

杨文涛, 吴东胜, 谢睿, 等. 上扬子盆地西南缘上组合气藏成藏过程分析[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(4): 77-84.

上扬子盆地西南缘上组合气藏成藏过程分析

杨文涛^{1,2,3}, 吴东胜^{1,2,3}, 谢睿^{1,2,3}, 林小云^{1,2,3*}, 祝懿斌^{1,2,3}

(1 长江大学非常规油气湖北省协同创新中心, 武汉 430100; 2 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100; 3 长江大学地球科学学院, 武汉 430100)

摘要:通过对代表上扬子盆地西南缘上组合气藏特征的平落坝、白马庙和观音寺 3 个典型气藏进行解剖, 明确了中侏罗统沙溪庙组天然气分布特征。结合输导体系、流体包裹体成藏期次和构造演化研究成果, 分析了气藏成藏过程, 总结其成藏模式, 以期为有利勘探目标区的选择及评价提供地质依据。上扬子盆地西南缘沙溪庙组气藏以构造-岩性和岩性气藏为主, 天然气主要分布在沙溪庙组 I、II、III 段, 主要聚集于构造高点。油气成藏时间集中在 93~72 Ma, 发生过至少 2 幕油气充注。燕山运动是气藏形成的主要时期, 其形成的断层是沟通气源的主要通道; 喜山运动是气藏天然气调整的主要时期, 喜山期逆冲断层的活动及构造高点的迁移是天然气调整的主要原因。不同构造区域成藏具有差异性: 西部褶皱带断-砂匹配、构造、砂体物性是主要控藏因素, 构造高点、断层封闭性控制其含气丰度; 东部斜坡带断-砂匹配、构造、封闭断层是主要控藏因素, 构造高点、砂体物性控制其含气丰度。

关键词: 油气分布; 成藏过程; 成藏模式; 沙溪庙组; 上扬子盆地西南缘

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.223

0 引言

古扬子板块西缘的四川盆地是在上扬子克拉通基础上发育起来的叠合改造型盆地^[1]。该盆地经历了 2 个沉积演化阶段, 沉积早期处于震旦纪—中三叠世的典型海相沉积环境, 碳酸盐岩相分布广泛; 沉积晚期处于晚三叠世—第四纪的典型陆相沉积环境, 以碎屑岩相为主。新场、洛带侏罗系气藏的重大突破, 证明了上扬子盆地西南缘中侏罗统沙溪庙组的勘探潜力, 目前已发现平落坝、白马庙、观音寺等 8 个重点含气构造。研究表明, 川西坳陷南部地区主要侏罗系气藏的气源多来自下伏须家河组气源岩以及须五段煤系地层, 下伏源岩生成的油气垂向运移至侏罗系^[2-4]。平落坝、白马庙和观音寺构

造自西向东分别位于龙门山山前断褶构造带、成都凹陷低缓构造带、龙泉山-熊坡断褶构造带 3 个一级构造单元, 笔者将其分别代表上扬子盆地西南缘上组合不同构造带典型气藏进行解剖, 从烃源条件、储集层特征、储层流体包裹体特征分析其油气运聚条件及成藏过程, 总结其成藏演化模式, 以期为该区下一步勘探提供地质依据。

1 地质特征

研究区位于上扬子盆地西南缘, 属“阿坝盆地”印支褶皱带东缘前陆盆地的一部分。西边紧靠龙门山断褶构造带, 东部毗邻川中古隆起, 南以峨眉瓦山断褶构造带山前带为界, 面积逾 10 000 km²^[5]。以构造展布差异为依据, 可将该区分为 3 个次级构造单元, 包括龙门山山前断褶构造带、成都凹陷低缓构造带及龙泉山-熊坡断褶构造带(图 1)。印支—喜山期等多期构造运动之后, 龙门山的挤压推覆作用使川西地区形成了呈 NE 向展布的前陆盆地, 尤其是喜山期的构造运动使得川西地区全面隆升剥蚀, 定型为现今构造格局^[6]。侏罗纪交替发育内陆河湖沉积, 主要为干旱环境下的山麓洪积相、河流相、湖成三角洲相的沉积。沙溪庙组以三角洲平原

收稿日期: 2020-12-28

资助项目: “十三五”国家重大科技专项“致密储层地震属性解析预测技术研究”(2016ZX05047-002-003); 中国石油西南油气田公司科研项目“川西南部地区沙溪庙组砂体展布特征研究”(20200301-25)

作者简介: 杨文涛(1996—), 男, 在读硕士, 主要从事油气成藏地质方面的研究工作。E-mail: 1152155024@qq.com

* 通讯作者: 林小云(1965—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事油气成藏地质与资源评价的科研与教学工作。E-mail: linxy65@126.com

和三角洲前缘亚相为主,其中分流河道、心滩及边滩为良好的储气砂体。沙溪庙组下部为灰—紫灰色砂岩与泥岩互层,中部发育一套稳定的浅灰色长石

石英砂岩,顶部为向上砂岩增厚的杂色砂泥岩互层。根据沉积旋回特征,将沙溪庙组自下而上划分为 I、II、III、IV、V 段。

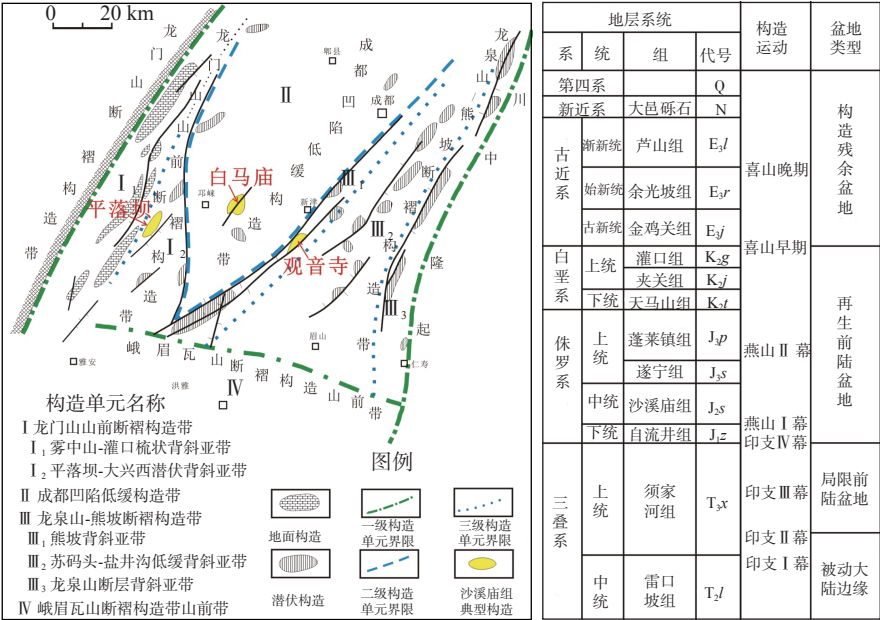


图 1 研究区构造分区图

Fig.1 Tectonic map of the study area

2 气藏分布特征

2.1 平落坝构造

平落坝地区在区域构造上位于川西地区龙门山前山带与前陆盆地之间,主体构造样式为箱状长轴背斜,沙溪庙组发育河流-三角洲平原相。试气及测井解释结果表明:垂向上,天然气主要分布在沙

溪庙组 II 段和 III 段,气藏主要受断层通道作用控制,形成断层油气藏;平面上,油气分布较广,主要分布在箱状背斜的高点部位,储集体主要为河口砂坝和河道砂体。受沉积微相和砂体展布特征控制,含气丰度随物性由河道中部向边缘变差,主要形成断层-岩性气藏或岩性气藏(图 2)。

2.2 白马庙构造

白马庙构造沙溪庙组气藏类型为构造-岩性气

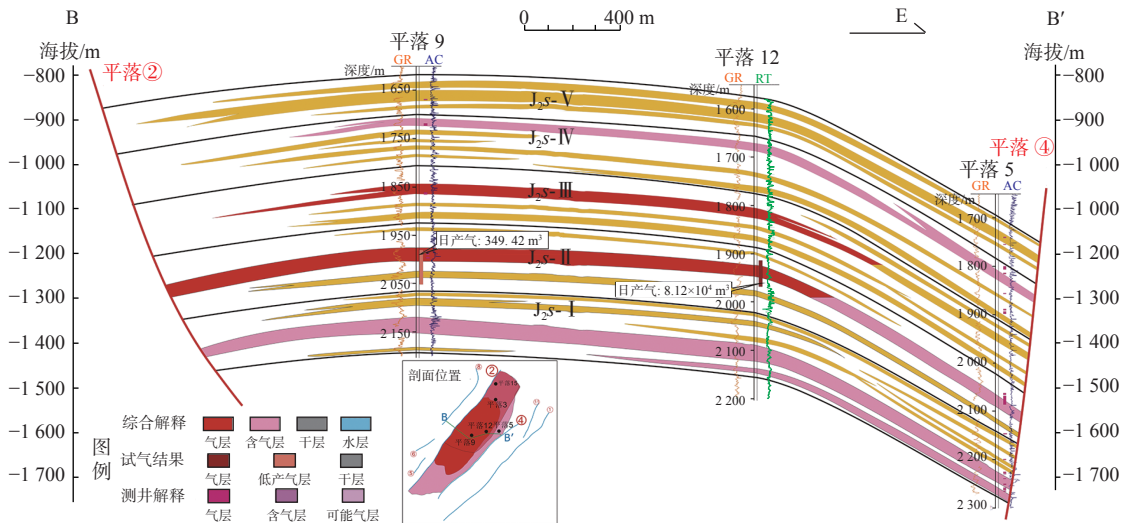


图 2 平落坝气藏剖面 B-B'

Fig.2 Profile B-B' of Pingluoba gas reservoir

藏,并以岩性气藏为主(图 3)。其在区域构造上位于大兴鼻状隆起(大兴①断层与熊坡①断层之间形成的北宽南窄、南高北低的鼻状隆起)北部区域。沙溪庙组属于曲流河-湖泊沉积体系。试气及测井解释结果表明:垂向上,天然气主要分布于沙溪庙组Ⅱ段;平面上,天然气主要分布在白浅 112 井周围的构造高点,且距离大兴⑤断层较近。储集体主要为沙溪庙组Ⅱ段中呈 NE-SW 向条带状展布的分流河道砂体,沿 NE 方向砂体连通性逐渐变差,物性由河道砂体中部向边缘的大兴 2 井方向变差。

2.3 观音寺构造

观音寺构造气藏类型主要为构造-岩性气藏(图 4)。该构造位于川西坳陷熊坡构造带东北端,西为大兴鼻状隆起,东邻苏码头与盐井沟构造,南部为断垒特征,北部为平缓的背斜形态。沙溪庙组发育河流-三角洲平原相。由试气及测井解释结果综合分析表明:垂向上,天然气主要分布在沙溪庙组Ⅰ、Ⅲ段,受断层的通道或封闭作用控制;平面上,沙溪庙组Ⅲ段砂体为 NE 向展布,物性由河道砂体

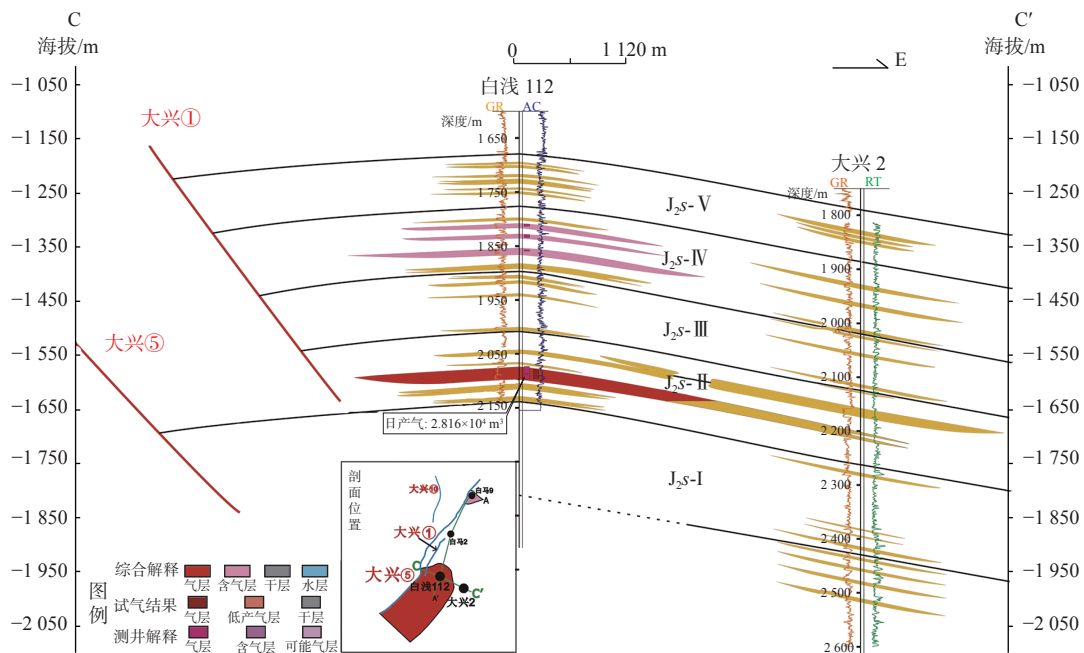


图 3 白马庙气藏剖面 C-C'

Fig.3 Profile C-C' of Baimamiao gas reservoir

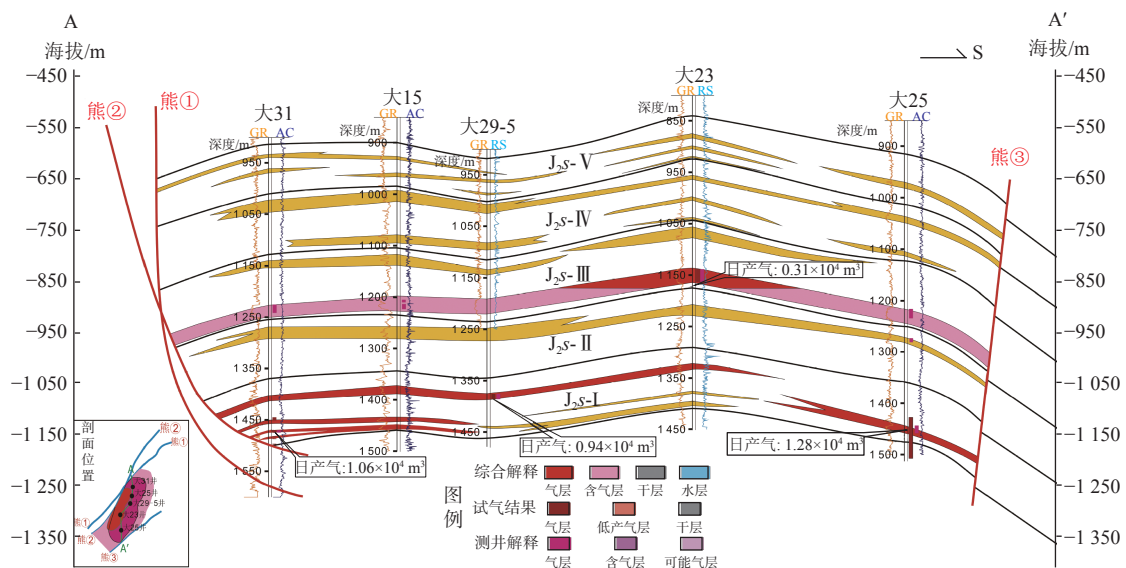


图 4 观音寺气藏剖面 A-A'

Fig.4 Profile A-A' of Guanyinsi gas reservoir

中部向边缘变差,含气丰度从大 23 井附近背斜高点部位沿 S、N 向变差,而沙溪庙组 I 段砂体物性较好,整体天然气充满度较高。

3 输导体系

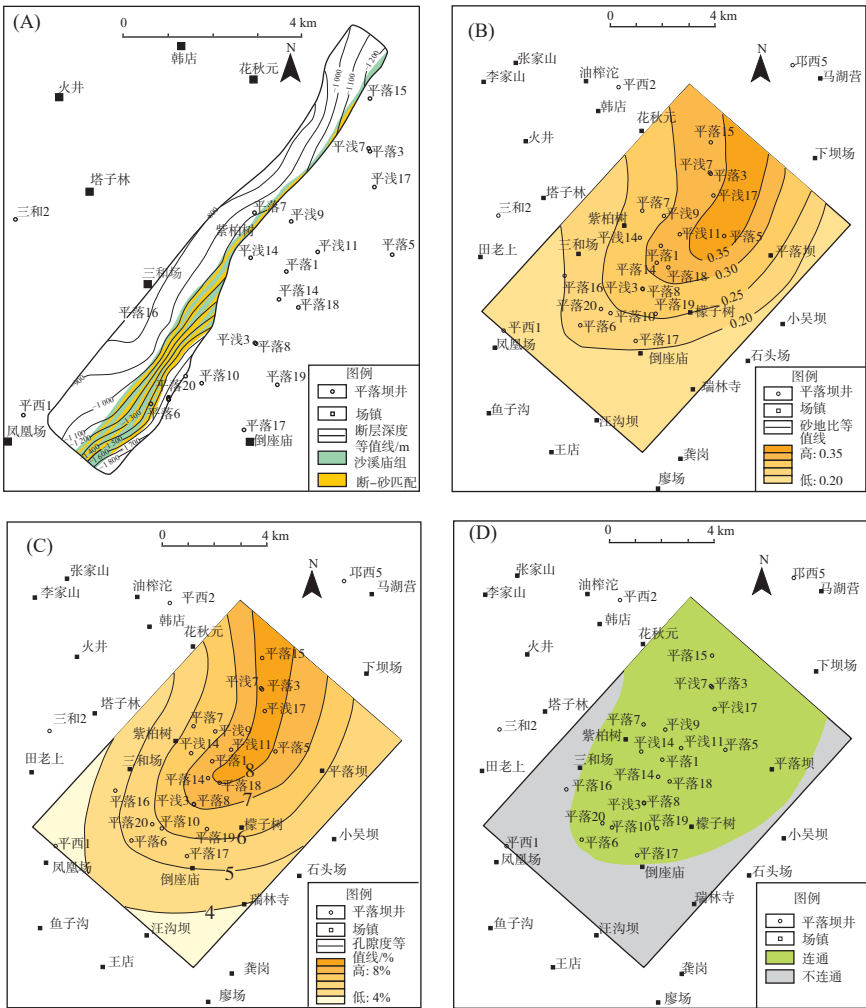
输导体系作为连接油气源与圈闭的路径,在油气藏的形成过程中不可或缺。研究区沙溪庙组气藏输导体系类型包括须家河组与沙溪庙组之间的断裂输导体系以及侧向砂岩输导体系^[7]。

平落坝构造断层发育,全部为逆断层,规模大小不等,对油气的运聚起一定的作用。主要烃源断层有 F1、F2、F3、F4(表 1),其中 F2、F3 为 SE 倾向, F1、F4 为 NW 倾向。以 F2 断层为例,纵向上,断层从南到北由陡变缓,近似于平直型,北部断开层位较浅仅 300 m,南部断开层位较深并直接与烃源层

接触。走向上,在平落 16 井以南段,断面形态主要表现为下凸型,形成垂向的优势运移通道^[8-9]。油气由下往上推进,断层两侧遇到良好储层可形成油气藏。在断面形态研究的基础上,结合各个层段砂地比以及砂体厚度等值线图,利用 GIS 坐标统一和叠合显示技术可以标定与砂体具体的交切位置和断-砂匹配关系^[10]。在断-砂匹配优良的位置有利于油气的大规模侧向运移,白马庙和观音寺等其他南部地区含气构造同样如此(图 5)。

表 1 平落坝构造主要断层活动时间

Table 1 Activities of main faults in Pingluoba structure		
断层名称	断开层位	活动时间
F1	J ₃ p-T ₃ x	燕山中幕(蓬莱镇沉积期)
F2	J ₃ p-T ₃ x	燕山中幕(蓬莱镇沉积期)
F3	J ₂ sx-T ₃ x	燕山中幕(沙溪庙沉积期)
F4	K-T ₃ x	燕山中—晚幕



(A)平落坝构造 F2 断层断-砂匹配平面图; (B)平落坝构造沙溪庙组沙 II 段砂地比等值线图; (C)平落坝构造沙溪庙组沙 II 段砂体孔隙度等值线图; (D)平落坝构造沙溪庙组沙 II 段砂体综合连通图

图 5 断-砂匹配及综合连通图

Fig.5 The fault matches the sand body for gas migration

在砂体连通性问题上, 罗晓容等^[11]提出在 KING 等^[12]的砂岩体空间分布概率模型基础上, 采用高斯拟合建立砂地比与孔隙度的数学关系来描述输导层内砂岩体之间的连通性。对于川西南部地区, 在统计各典型构造试气成果的基础上, 将含气层所对应的砂地比最小值 X 、孔隙度最小值 Y , 作为衡量各个不同区域和层位综合连通性的阈值鉴别标准: 凡是地层砂地比值小于 X 或孔隙度小于 Y 的, 均视为综合不连通(图 5)。

4 成藏期次

油气运移聚集成藏过程的研究离不开成藏年代的确定, 储层流体包裹体分析方法作为较为经济直观的油气成藏时间研究方法得到广泛应用^[13-15]。通过对研究区盐浅 1 井、码浅 8 井以及灌口 1 井采集的 8 块沙溪庙组储层样品进行流体包裹体岩相及荧光特征分析表明, 包裹体主要有 5 类: 纯油单相包裹体、气液两相的石油包裹体、油+气+盐水三相包裹体、纯水液相包裹体、纯气相包裹体, 并在荧光显微下观察到黄、蓝绿、蓝 3 种颜色油包裹体, 说明该地区至少发生过 2 幕油气充注。此外, 在码浅 8 井样品的粒间孔隙中检测到大量黑褐色沥青, 说明该区油藏早期的充注遭受过破坏。将上述 3 口井中各期次油包裹体同期共生的盐水包裹体均一

温度投影到标有等温线的埋藏史图上(图 6、7), 结果显示, 油气成藏时间主要集中在 93~72 Ma, 由 NW 往 SE 方向油气成藏时间有变晚的趋势^[16]。成岩过程中捕获的烃类包裹体代表了晚期受构造运动影响油气发生调整之后再次运聚成藏^[17]。

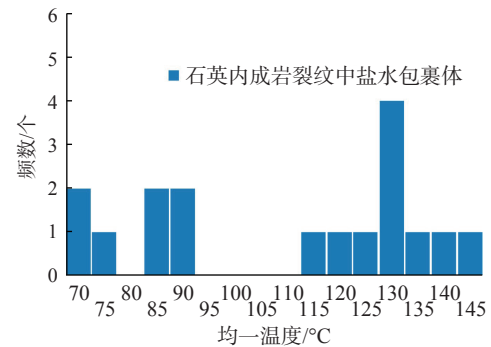


图 6 灌口 1 井 2 252.5 m 深度段盐水包裹体均一温度直方图

Fig.6 Homogenized temperature from brine inclusion, well Guankou 1, 2 252.5 m

5 成藏模式

研究区上三叠统暗色含煤泥页岩发育, 生烃潜力巨大, 气源岩以泥质岩为主, 煤层为辅, 且分布不连续。须家河组五段为沙溪庙组气藏的主要源岩, 生烃高峰集中在燕山运动中—晚幕(早白垩—晚白垩世)。燕山早—中幕, 构造运动产生近 SN 向的挤

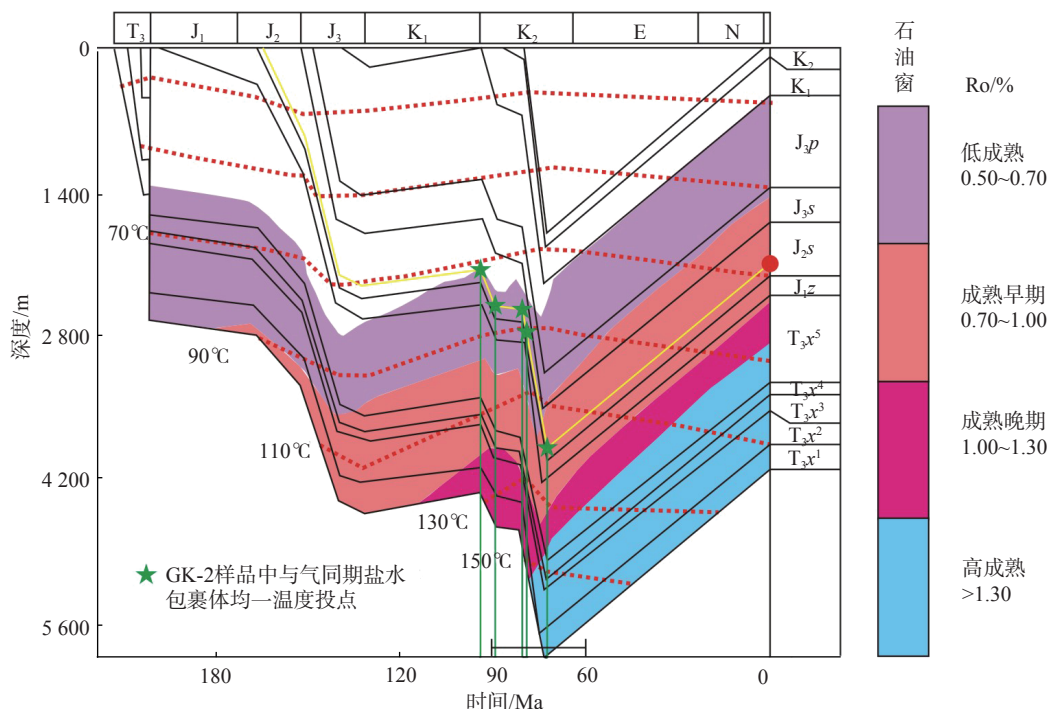


图 7 灌口 1 井盐水包裹体均一温度-埋藏史投影法确定油气充注时间

Fig.7 The charging time of oil and gas determined with well Guankou 1 homogeneous temperature by burial history projection method

压构造应力,形成EW向构造带的雏形,整体表现为东部龙泉山高、西部山前坳陷低的特征。燕山晚幕—喜山期,由于青藏高原的快速隆升和侧向挤压,SN向逆冲断层发育,研究区遭受整体抬升剥蚀,剥蚀厚度整体呈向西南增大的趋势。此时,研究区西部构造应力发生强烈改变,断层活动性增强,并产生了新的侏罗系断层,易使古气藏破坏及调整;而研究区东部由于构造应力减弱,封闭性断层有利于油气的保存,油气聚集于砂体物性好的构造高点部位。在对喜山期剥蚀厚度恢复的基础上,对典型气藏进行了成藏演化分析,天然气的成藏过程受到古构造和今构造的控制点^[18]。综合分析沙溪庙组成藏因素,其成藏过程总体上为“断-砂匹配控制油气的运移,储层相势控制油气的范围,构造演化控制油气的调整”模式,不同构造区带以及层间间具有相似性和差异性,可划分为西部褶皱带成藏模式(图8)和东部斜坡带沙溪庙和下沙溪庙成藏模式点^[19](图9)。

5.1 褶皱带成藏模式

平落坝-白马庙地区的主要烃源断层于燕山

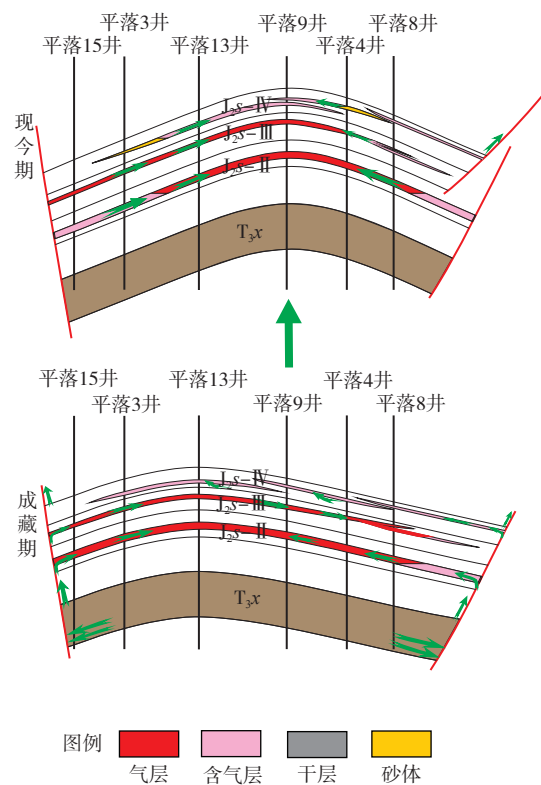


图8 西部褶皱带成藏演化模式

Fig.8 Reservoir forming and evolution model of the western fold belt

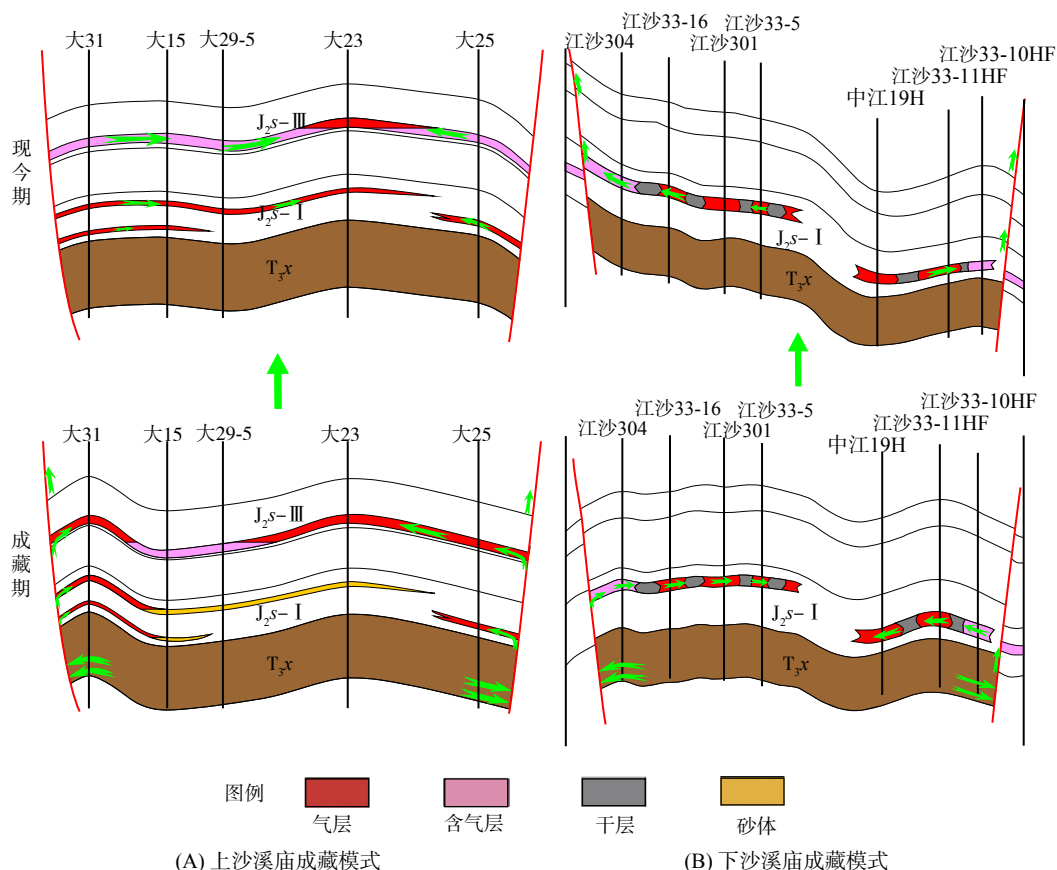


图9 东部斜坡带成藏演化模式

Fig.9 Reservoir forming and evolution model of the eastern slope belt

中—晚幕活动中形成,是沟通下伏深部须家河组烃源的良好通道。在成藏期,天然气沿断层优势运移路径由下往上快速垂向运移,在此过程中遇到与断层匹配良好且储集物性好的砂体时则开始进行大规模侧向运移。在侧向运移过程中,天然气在连通性良好的砂体中向构造高部位聚集成藏。由于河流频繁的改道导致砂体纵向叠置接触,由断层进入砂体侧向运移的气体在向远源砂体的运移过程中,驱替压力在克服摩擦力之后逐渐减小,造成在远源砂体中天然气充满度较低,无法到达溢出点^[20]。喜山期,由于受龙门山快速逆冲推覆和强烈挤压的影响,逆冲断层发育,由南向北,逆冲断层走向由近SN向转向近NE—SW向的趋势,天然气的分布也随局部构造高点的改变而转移。由于逆冲断层的活动,天然气在流体势的作用下向断-砂交切处发生泄压,导致砂体中的气体在压差的作用下向断面处运移,断层中的气体则沿着断层继续向上运移,此时远源砂体中的气体同样由于动力不足的原因,无法大量向断面处大量运移,因此,在现今构造中远源气藏中有一定量天然气的存在^[21]。

5.2 斜坡带成藏模式

5.2.1 斜坡带上沙溪庙成藏模式

观音寺地区的主要烃源断层也于燕山中—晚期形成,同样沟通下伏源岩。成藏期,天然气在压力驱替作用下沿断层面垂向优势运移路线快速运移,并且在断面与物性良好的砂体呈凹面接触的交切点处汇聚侧向运移,天然气优先充注局部构造高点。而在喜山构造运动期间,逆冲断层活动较弱,断层封闭性好,气体并未向断-砂交切处泄走,而只是在断块内部随局部构造高点的调整而转移到现今构造高点部位。

5.2.2 斜坡带下沙溪庙成藏模式

在邻区中江地区,成藏期天然气运移成藏模式与观音寺地区类似,但气藏呈现为“香肠式”展布,分析沉积微相控制下的砂体展布特征以及储层物性控制下的砂体连通性特征,该现象的表征主要由砂体分布的独立性控制为主^[22]。喜山期的构造运动调整,将靠近断层的砂体抬升,造成砂体与断层面呈优势接触,使天然气在断-砂交切处泄压,古气藏气体沿断层开启的通道向上运移,但与断层距离较远的储集体,由于砂体间综合连通性差乃至不连通,在岩性的封堵作用下气体不能向断-砂交切处流通,

继续保存在原储集体中。

6 结论

(1)沙溪庙组气藏以构造-岩性和岩性气藏为主,天然气主要分布在沙溪庙组I、II、III段,主要聚集于构造高点。

(2)流体包裹体分析显示,发生过至少2幕油气充注,油气成藏时间主要集中在93~72 Ma,由NW往SE方向油气成藏时间有变晚的趋势。成岩过程中捕获的烃类包裹体代表了晚期受构造运动影响油气发生调整之后再次运聚成藏。

(3)上扬子盆地西南缘上组合的成藏过程总体上为“断-砂匹配控制油气的运移,储层相势控制油气的范围,构造演化控制油气的调整”模式,不同构造区带以及层位具有差异性。西部褶皱带断-砂匹配、构造、砂体是主要控藏因素,构造高点、断层封闭性控制含气丰度;东部斜坡带断-砂匹配、构造、封闭断层是主要控藏因素,构造高点、砂体物性控制含气丰度。

参考文献:

- [1] 宋金民,罗平,刘树根,等.四川盆地西部震旦系灯影组沉积储层特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(1):27-44.
- [2] 蔡开平,廖仕孟.川西地区上三叠统轻烃的生成特征[J].石油学报,2002,23(1):35-39.
- [3] 蔡开平,王应蓉,刘雪梅,等.川西南部侏罗系油气垂向运移特征[J].西南石油学院学报,2000,22(4):1-5.
- [4] 蔡开平,廖仕孟.川西地区侏罗系气藏气源研究[J].天然气工业,2000,20(1):36-41.
- [5] 陈林.川西南部地区沙溪庙组储层特征及其控制因素研究[D].成都:西南石油大学,2015.
- [6] 于冬冬,汤良杰,余一欣,等.川西和川东北地区差异构造演化及其对陆相层系天然气成藏的影响[J].现代地质,2016,30(5):1085-1095.
- [7] 张卫海,查明,曲江秀.油气输导体系的类型及配置关系[J].新疆石油地质,2003,24(2):118-120,185.
- [8] 刘景东,蒋有录,马国梁.断面优势运移通道的有效性及其对油气的控制作用[J].特种油气藏,2011,18(3):47-50,137.
- [9] 鲁兵,陈章明,关德范,等.断面活动特征及其对油气的封闭作用[J].石油学报,1996,17(3):33-38.
- [10] 吴文静,吴东胜.川西坳陷东坡断裂优势运移通道预测[J].中国科技论文,2019,14(5):476-480,523.
- [11] 罗晓容,雷裕红,张立宽,等.油气运移输导层研究及量化表征方法[J].石油学报,2012,33(3):428-436.
- [12] KING P R. The connectivity and conductivity of overlapping sand bodies[C]//BULLER A T, BERG E, HJEMELAND O, et al. North Sea Oil & Gas Reservoirs-II, London: Graham and

- Trotman, 1990: 353-362.
- [13] 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 油气成藏期研究新进展[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 271-276.
- [14] 赵靖舟. 油气水界面追溯法与塔里木盆地海相油气成藏期分析[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(4): 53-56.
- [15] 刘可禹, BOURDET J, 张宝收, 等. 应用流体包裹体研究油气成藏: 以塔中奥陶系储集层为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(2): 171-180.
- [16] 林小云, 魏民生, 丰勇, 等. 四川盆地川西坳陷东坡沙溪庙组油气成藏关键时刻研究[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(1): 50-57.
- [17] 刘世豪, 林小云, 刘建. 济源凹陷中生界流体包裹体特征与油气成藏期次[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(4): 55-60.
- [18] 覃军, 蒋一鸣, 李宁, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷Y构造油气成藏过程及勘探启示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(6): 159-168.
- [19] 刘建, 谢睿, 徐敏, 等. 东海西部台北坳陷中生界油气成藏模式研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(6): 150-158.
- [20] 乔诚. 川西坳陷东坡沙溪庙组气藏气水分布特征及成藏过程研究[D]. 武汉: 长江大学, 2017.
- [21] 袁红英. 川西坳陷东坡沙溪庙组成藏过程研究[D]. 武汉: 长江大学, 2017.
- [22] 徐敏, 刘建, 林小云, 等. 川西坳陷东坡沙溪庙组气藏成藏演化模式[J]. *现代地质*, 2018, 32(5): 953-962.

ACCUMULATION PROCESS OF THE UPPER GAS ASSEMBLAGE ON THE SOUTHWEST MARGIN OF UPPER YANGTZE BASIN

YANG Wentao^{1,2,3}, WU Dongsheng^{1,2,3}, XIE Rui^{1,2,3}, LIN Xiaoyun^{1,2,3*}, ZHU Yibin^{1,2,3}

(1 Hubei Collaborative Innovation Center for Unconventional Oil/Gas, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2 Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of the Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3 College of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: Three typical gas reservoirs, the Pingluoba, Baimamiao and Guanyinsi, selected from the upper gas reservoir assemblage on the southwest margin of the Upper Yangtze Basin, are studied for gas distribution in the Middle Jurassic Shaximiao Formation with the research results from gas transportation system, fluid inclusion accumulation period and tectonic evolution. The study has provided a solid geological basis for the determination and evaluation of favorable exploration target areas. The gas reservoirs, dominated by structural-lithologic and lithologic traps, are mainly accumulated in the structural highs of Sha I, Sha II and Sha III Members and deposited in the time span of 93-72 Ma, by two stages of hydrocarbon charging. Yanshan movement is the main period for the formation of gas reservoirs, active faults originated in the Yanshan movement provided channels connecting the source rocks and the gas accumulations. Himalayan movement is the main period for the adjustment of natural gas, the reverse fault activity and tectonic peak adjustment in the Himalayan movement led to the readjustment of gas reservoirs. The accumulation processes are different in different tectonic provinces. Fault-sand matching, structures and physical properties of sand bodies are the main controlling factors in the western fold belt, while structural high and fault sealing the main factors controlling the gas abundance; fault-sand matching, structures and sealing fault are the main controlling factors in the eastern slope belt, and the structural high and physical properties of sand bodies are the factors controlling the gas abundance.

Key words: oil and gas distribution; hydrocarbon accumulation process; reservoir pattern; Shaximiao Formation; southwest margin of upper Yangtze Basin