

文章编号:0253-9985(2012)04-0545-07

川西坳陷中部上三叠统烃源岩动态演化模拟

江兴歌,曾华盛,朱建辉,曹倩

(中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214151)

摘要:川西坳陷中部上三叠统烃源岩在须家河组三段沉积时期开始成熟,早侏罗世晚期进入高成熟阶段,晚侏罗世达到过成熟阶段。川西坳陷西深东浅的构造格局,导致烃源岩演化具有西早东晚、西高东低的特点。须家河组三段沉积末期,成熟度相对较高的地区靠近龙门山前;至须家河组五段沉积末,成熟度相对高的地区向东扩展,最高点向北迁至龙深1井附近。侏罗纪末,成熟度相对较高的地区整体向东迁移。白垩系末到现今,形成以绵阳、德阳、彭州和大邑一线为核心的高演化区,以马深1井和大邑北为最高点。川西坳陷中部须家河组烃源岩总生气量为 $1\,678\,125 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,马鞍塘组—须家河组三段沉积时期生气量仅占总生气量的2.53%,须家河组四段至五段沉积时期占10.84%,早、中侏罗世占22.79%,晚侏罗世占22.87%,白垩纪占40.97%。

关键词:动态演化;盆地模拟;烃源岩;须家河组;川西坳陷

中图分类号:TE112.3

文献标识码:A

Dynamic evolution simulation of the Upper Triassic source rocks in central part of western Sichuan Depression

Jiang Xingge, Zeng Huasheng, Zhu Jianhui and Cao Qian

(Wuxi Petroleum Geology Research Institute, SINOPEC PEPRS, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: The Upper Triassic source rocks in the central of western Sichuan Depression got mature during the deposition of the 3rd member of Xujiahe Formation, over-mature stage in the late of Early Jurassic and post-mature in the Late Jurassic. The EW-dipping tectonic framework in western Sichuan depression determines that the source rocks in the west got mature earlier and have higher maturity than that in the east. Area with high maturity was near the piedmont of Longmen Mountain at the end of deposition of the 3rd member of Xujiahe Formation, and it extended eastwards with the highest maturity migrating near to Longshen-1 well at the end of deposition of the 5th member of Xujiahe Formation. Later it migrated eastwards as a whole at the end of the Jurassic. The area with high maturity has centered in Mianyang-Deyang-Pengzhou-Dayu from the Cretaceous to present, with the highest maturity occurring at Mashen-1 well and Dayu North. The whole amount of gas generated from source rocks in the Xujiahe Formation in western Sichuan depression is $167.812\,5 \text{ tcm}$. The gas generated during the deposition of the Maantang Formation-3rd member of Xujiahe Formation accounts for 2.53% of the total, that during the deposition of 4th and 5th members of Xujiahe Formation accounts for 10.84%, that in the Early and Middle Jurassic 22.97%, that in the Late Jurassic 22.86% and that in the Early Cretaceous 40.97%.

Key words: dynamic evolution, basin modeling, source rock, Xujiahe Formation, western Sichuan Depression

川西地区是碎屑岩领域非常重要的天然气生产基地,上三叠统烃源岩是其主力烃源岩^[1-5]。川

西地区盆地发育演化受大陆边缘—前陆盆地等盆地原型演化序列控制,热流演化有一个从热盆到

收稿日期:2011-10-04;修订日期:2012-07-05。

第一作者简介:江兴歌(1965—),男,博士,高级工程师,盆地数值模拟。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05002-006-002)。

冷盆的过程。盆地构造-热演化控制了烃源岩的发育形成和成熟演化^[6-10],因此烃源岩的研究应当以盆地构造演化为背景,在盆地分析的基础上,应用TSM盆地模拟方法对川西凹陷中段埋藏史、热史进行数值模拟,进而对上三叠统烃源岩的动态演化过程进行数值模拟。以此为基础,进一步进行动态的成藏分析与资源评价。

1 动态模拟方法

1.1 TSM盆地动态模拟方法

根据朱夏(1983)提出的TSM系统评价的思路(图1),把盆地油气评价方法的系统性和动态性融汇在一起,形成了盆地定量模拟评价方法的指导思想^[11-12]。盆地模拟要求在盆地原型地质建模的基础上,通过模拟以洞察原型并列叠加效果,检验概念、揭示过程、预测未知,以期在勘探进程中从盆地整体上进行系统地评价。

经过长期的探索实践,形成了具有原创特色的TSM盆地模拟技术^[13-18]。强调盆地才是具备边界和要素的系统,系统中油气要素包括的生、储、盖物质及其分布都受盆地沉降性质、结构与充填方式的控制。一切油气事件都发生在这一系统中。而盆地组成边界的构造-热体制起到了盆地地质要素、油气要素与响应网络之间相互作用的约束。

TSM盆地模拟采取了确定性的模拟方法,要求用严格的逻辑关系或函数关系来描述对象,表述数值模拟“理应如此”的结果。因此它突出了物理学和化学的定理同地质原理或规律的结合。在地质原型建模之后,用数学公式或数理逻辑运算形式表达地质规律或地质概念,其结果是将地质事实抽象为数据通过计算机运算实现的。也就是说,它力图用物理或化学的数理逻辑的方

法来表达地质作用(4S)同油气响应(4M)诸参数之间的关系,动态地演绎推论油气的赋存位置及其数量。

1.2 烃源岩动态数值模拟流程

盆地模拟是为了反映盆地的地质演化过程,计算的模型必须适应这种不同原型并列叠加的作用。因此,盆地模拟的操作流程必须根据盆地分析得出的概念模型和实际地质资料情况的分析确定,并分别选择适应的计算模型。

盆地的各个子系统是互相关联互动的,为了模拟烃源岩的动态演化,模拟的流程必须包括埋藏史、热史和生烃史等互相关联的子系统。

烃源岩的演化与其埋藏演化密切相关,可以根据现今地层的埋深,利用回剥法恢复其埋藏演化过程。在恢复的过程中,必须对压实作用和剥蚀作用进行校正。压实作用可以根据孔隙度与深度关系进行校正计算(图2)。

热演化是烃源演化的关键因素之一。盆地原型演化决定了盆地的热流演化,大陆边缘盆地一般热流值较高而类前陆盆地相对热流较低。在计算烃源岩演化过程中,大地热流值是一个关键的参数,因此需要根据盆地原型,选取相应的大地热流值。通过大地热流值随时间的变化分析古地温场的演化,根据温度场积分计算时间与温度并求取时间温度指数(TTI),根据典型钻井的成熟度测试值(R_o)拟合得到TTI- R_o 关系,从而进一步得到各个地质时期的成熟度 R_o 。热演化计算的关键问题在于与实测资料的拟合。计算得到的地温值应当与有关测试数据包括裂变径迹、包体测温以及井中测温等进行拟合。根据积分累计效应,最后计算得到的 R_o 应当与实测的 R_o 值相拟合。

在埋藏史和热史模拟的基础上,根据烃源岩

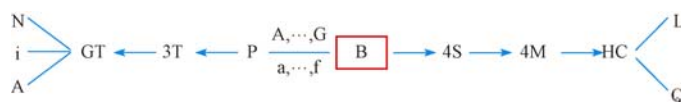


图1 油气盆地TSM系统研究程式(朱夏,1983)

Fig. 1 Pattern of TSM system for petroliferous basin study (from Zhu Xia, 1983)

B. basin (盆地); P. prototype (原型); 3T. time (时代), tectonic setting (构造处境), thermal regime (热体制); GT. global tectonic (全球构造); A. ancient global tectonic (古全球构造); N. new global tectonic (新全球构造); i. intermediate stage (中间阶段); 4S. subsidence (盆地沉降作用), sedimentation (沉积作用), stress condition (应力条件), style (独特风格); 4M. material (物质), maturity (成熟度), migration (运移), modification & maintenance (改造与保持); HC. hydrocarbons (油气藏); L. location (位置); Q. quantity (数量); A, ..., G. 中、新生代盆地原型; a, ..., f. 古生代盆地原型

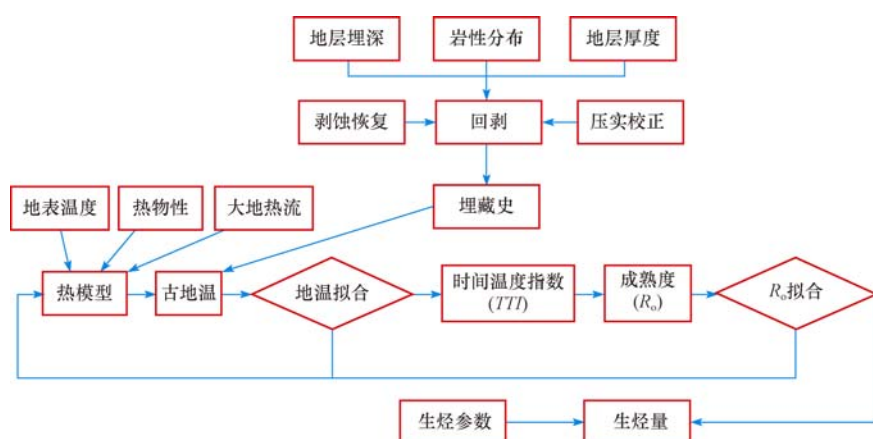


图2 烃源岩演化模拟流程示意图

Fig. 2 Schematic flow chart of source rocks evolution simulation

体积、有机碳含量、生烃热模拟实验获得的各类型烃源岩的 R_o —烃产率关系等参数,就可以计算得到烃源岩在各个地质时期的生烃强度和生烃量。

2 烃源岩动态演化

川西坳陷在晚三叠世,经历了马鞍塘—小塘子大陆边缘,须家河组二段、三段的边缘坳陷阶段,而须家河组四段、五段龙门山隆起形成前陆盆地,在此之后,还继续经历类前陆盆地阶段。马鞍塘—小塘子组为浅海陆棚相和滨岸三角洲相,发育泥灰岩和暗色泥岩,须家河组二段、三段沉积相为湖相三角洲—滨浅湖相,发育暗色泥岩。须家河组四段、五段为湖沼相沉积,发育煤及暗色泥岩。三叠纪的地层后期经历到侏罗纪的前陆和类前陆盆地以及后期盆地的叠加,控制了烃源岩的发育。根据研究,从三叠纪到侏罗纪以及后期晚燕山到喜马拉雅运动,盆地的热流总体上趋于下降,热流总体上演化有一个从热盆到冷盆的过程。控制烃源岩成熟的重要因素就是盆地的沉降在平面的变化控制了烃源岩的热演化。根据上覆地层的厚度变化,上三叠统烃源岩的成熟度演化相应变化。

根据川西坳陷构造和沉积演化,建立了模拟演化的模式和流程。通过对川西坳陷中部的数值模拟,明确了该区上三叠统烃源岩的成熟度和生烃强度的动态演化过程,确定了成烃演化的关键时期。

2.1 烃源岩热成熟演化史

运用 TSM 盆地模拟系统的埋藏史和热演化史

的模拟模型,计算获得了反映烃源岩热成熟演化趋势的 R_o 分布图。

2.1.1 马鞍塘—小塘子组

须家河组三段沉积末期 (T_3x^3 , 须下盆沉积末期), 安县、绵阳、德阳、新都 and 温江一线以东地区烃源岩 R_o 小于 0.5%, 还未成熟。以西地区烃源岩 R_o 为 0.5% ~ 0.75%, 处于低成熟演化阶段。须家河组五段沉积末期 (T_3x^5 , 须上盆沉积末期), 绵阳、中江、金堂和成都一线以东地区烃源岩的 R_o 为 0.5% ~ 0.8%, 处于低成熟演化阶段。该线以西至什邡、彭州, 烃源岩 R_o 为 0.8% ~ 1.3%, 进入了成熟演化阶段; 白鹿场一带, R_o 大于 1.3%, 达到了高成熟(湿气)演化阶段。侏罗纪末, 绵竹、什邡、彭州和大邑地区烃源岩 R_o 大于 2.0%, 已达到过成熟(干气)演化阶段。其他地区烃源岩基本上处于高成熟(湿气)演化阶段。现今, 除安县地区外, 川西坳陷中部 R_o 均大于 2.0%, 在大邑 1 井以北至马深 1 井一带, R_o 达到 3.0% 以上。显示该层段烃源岩基本都已经达到过成熟(干气)演化阶段(图 3)。

2.1.2 须家河组三段

须家河组三段沉积末期(须下盆末期), 绵阳、金堂、新都 and 崇庆一线以东地区烃源岩 R_o 小于 0.5%, 还未成熟。其以西地区烃源岩 R_o 为 0.5% ~ 0.75%, 处于低成熟演化阶段。侏罗纪末, 绵阳、德阳、成都、彭州和大邑地区烃源岩 R_o 大于 1.3%, 已达到高成熟(湿气)演化阶段。其

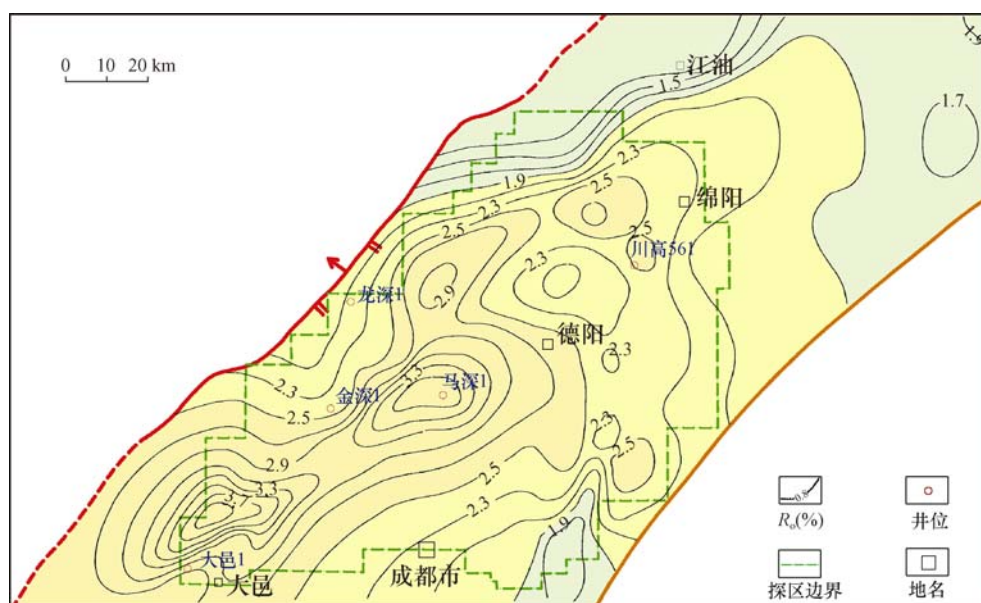


图3 川西坳陷中部马鞍塘—小塘子组烃源岩现今 R_o 等值线

Fig. 3 Current R_o contour of source rocks in the Maantang - Xiaotangzi Formation in the central part of western Sichuan Depression

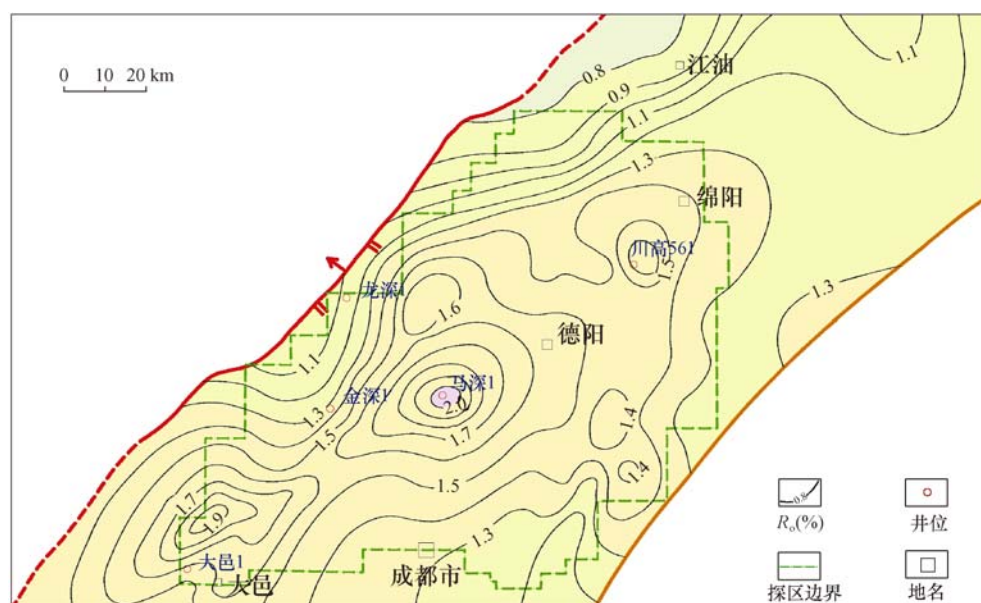


图4 川西坳陷中部须家河组三段烃源岩侏罗纪末 R_o 等值线

Fig. 4 R_o contour of source rocks in the 3rd member of Xujiache Formation in the central part of western Sichuan Depression at the end of the Jurassic

他地区烃源岩基本上处于成熟演化阶段。现今，安县地区 R_o 小于 1.3%，绵阳、新场、中江、成都、都江堰等地区 R_o 为 1.3% ~ 2.0%，其他地区 R_o 基本都大于 2.0%，在大邑以北至马深 1 井一带， R_o 达到 2.5% 以上（图 4，图 5）。

2.1.3 须家河组五段

侏罗纪末，大部分地区烃源岩 R_o 为 0.8% ~ 1.1%，处于成熟演化阶段。现今，安县、绵竹、隆丰、大邑和洛带地区现今 R_o 小于 1.3%，烃源岩处

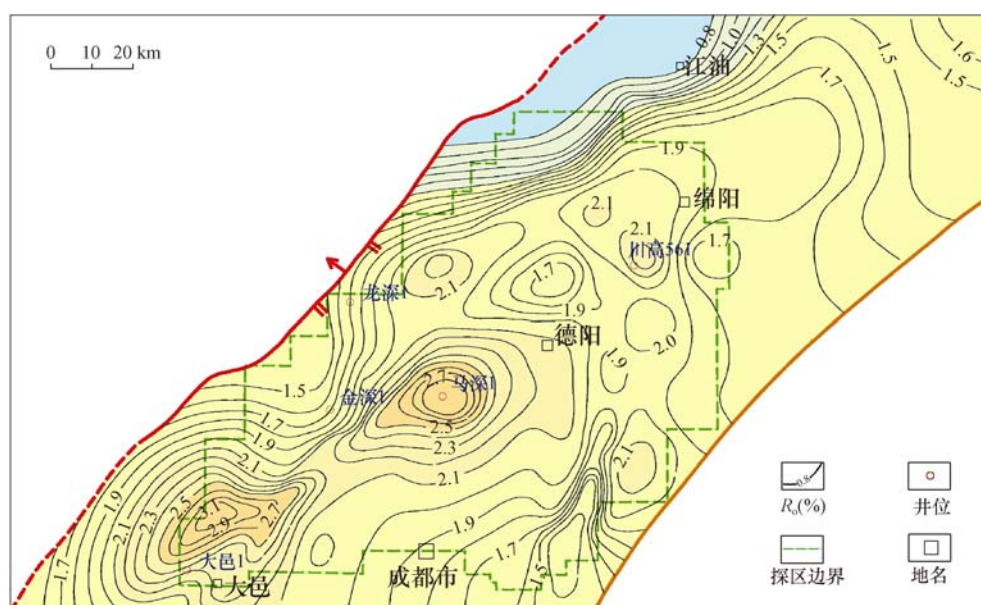
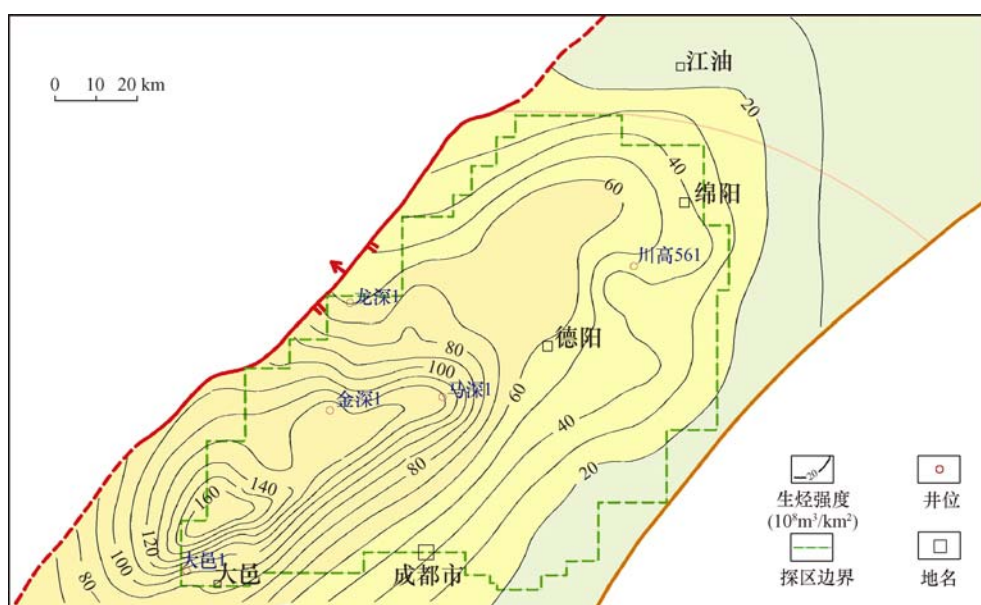
图5 川西坳陷中部须家河组三段烃源岩现今 R_o 等值线Fig. 5 Current R_o contour of source rocks in the 3rd member of Xujiahe Formation in the central part of western Sichuan Depression

图6 川西坳陷中部须家河组烃源岩侏罗纪末累计生烃强度等值线

Fig. 6 Accumulative hydrocarbon generation intensity contour of Xujiahe Formation source rocks in the central part of western Sichuan Depression at the end of the Jurassic

于成熟演化阶段。其他地区 R_o 为 1.3% ~ 1.8%，烃源岩达到高成熟(湿气)演化阶段。

2.2 烃源岩生烃演化史

盆地模拟法计算获得了川西坳陷上三叠统各层段烃源岩在须家河组三段沉积末期、须家河组

五段沉积末期、侏罗纪末和白垩纪末期生烃强度图以及整个上三叠统烃源岩在上述时间段的总生烃强度图(图6,图7)。

白垩纪末以来,川西地区由于地壳抬升,烃源岩已基本上停止生烃,因此,白垩纪末期的累计生气强度即为现今的累计生气强度。根据生烃强度

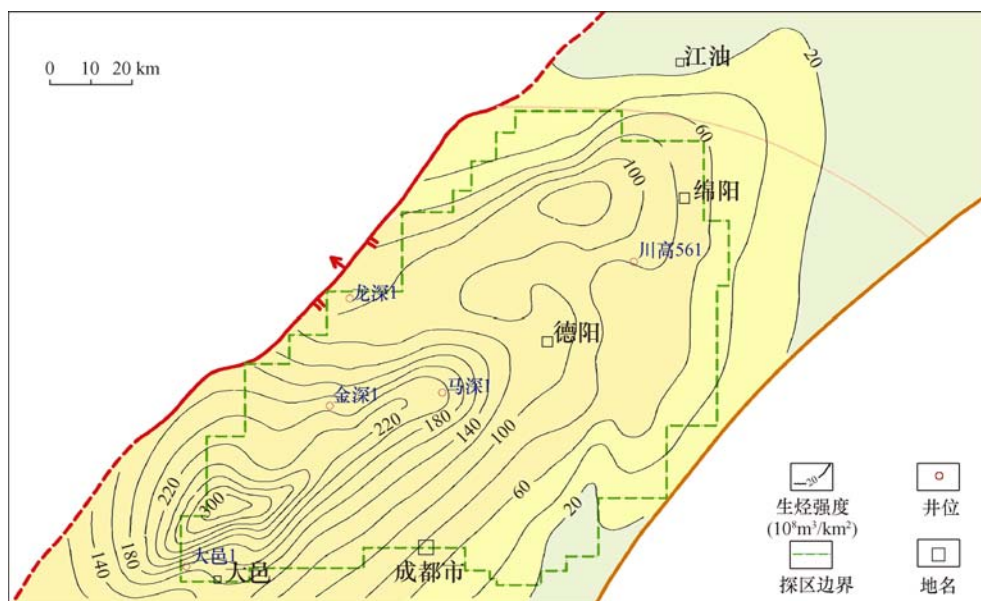


图7 川西坳陷中部须家河组烃源岩白垩纪末累计生烃强度等值线

Fig. 7 Accumulative hydrocarbon generation intensity contour of Xujiache Formation source rocks in the central part of western Sichuan Depression at the end of the Cretaceous

图计算得到了川西中段须家河组各个烃源层在各个时期的累计生气量。结果表明,川西坳陷中部须家河组总生气量为 $1\,678\,125 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

从生烃时间上来看,川西坳陷中部上三叠统烃源岩在须三段沉积末生气量仅占总生气量的 2.53%,须家河组四段至五段沉积时期生气量占总生气量的 10.84%,白田坝—沙溪庙组沉积时期生气量占总生气量的 22.79%,遂宁组沉积时期生气量占总生气量的 3.47%,蓬莱镇组沉积时期生气量占总生气量的 19.40%,白垩纪生气量占总生气量的 40.97%。

川西坳陷中部上三叠统烃源岩在须家河组三段沉积末累计生气量仅达总生气量的 2.53%,须家河组五段沉积末累计生气量达总生气量的 13.37%,沙溪庙组沉积末,累计生气量达总生气量的 36.16%,遂宁组沉积末,累计生气量达总生气量的 39.63%,蓬莱镇组沉积末,累计生气量达总生气量的 59.03%。

从各个层段来看,川西坳陷中部马鞍塘组烃源岩生气量占总生气量的 35.59%,须家河组二段占 11.39%,须家河组三段占 22.56%,须家河组四段占 7.11%,须家河组五段占 6.83%,马鞍塘组—须家河组三段煤占 12.86%,须家河组四段—五段煤占 3.66%。

3 结语

1) 川西坳陷中部上三叠统烃源岩在须家河组三段沉积时期开始成熟 ($R_o \geq 0.5\%$),早侏罗世晚期进入高成熟(湿气)演化阶段 ($R_o \geq 1.3\%$),晚侏罗世达到过成熟(干气)演化阶段 ($R_o \geq 2.0\%$),川西坳陷西深东浅的构造格局,导致烃源岩演化具有西早东晚、西高东低的特点。

2) 川西坳陷中部须家河组烃源岩总生气量为 $1\,678\,125 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,马鞍塘组—须家河组三段沉积时期 ($T_3m-T_3x^3$) 生气量仅占总生气量的 2.53%,须家河组四段—五段沉积时期 ($T_3x^4-T_3x^5$) 占 10.84%,早、中侏罗世占 22.97%,晚侏罗世占 22.86%,白垩纪占 40.97%。

3) 川西地区碎屑岩层系中,强生烃区广泛分布,具备了形成大中型气田的物质基础。

致谢:本研究工作得到了郑和荣、胡宗全等的指导,参加研究工作的还有王津义、王保华、管宏林、王东燕等,王宜芳帮助清绘图件,中石化西南局提供了基础资料,在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] 郑和荣,尹伟,胡宗全,等. 中国中西部碎屑岩领域油气富集主控因素与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31

- (6):753-762.
Zheng Herong, Yin Wei, Hu Zongquan, et al. Main controlling factors for hydrocarbon accumulation and potential exploration targets in clastic sequences in Western Central China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):753-762.
- [2] 戴金星, 黄士鹏, 刘岩, 等. 中国天然气勘探开发 60 年的重大进展[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6):689-698.
Dai Jinxing, Huang Shipeng, Liu Yan, et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):689-698.
- [3] 杨克明. 川西坳陷油气资源现状及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4):322-331.
Yang Keming. Status of oil & gas resources and prospecting potential in Western in Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4):322-331.
- [4] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6):707-714.
Cai Xiuyan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone: an example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan depression, the Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):707-714.
- [5] 叶军. 再议四川盆地西部坳陷深盆气[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2):109-114.
Ye Jun. Reconsideration of deep basin gas in the Western Sichuan depression of the Sichuan basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(2):109-114.
- [6] 王金琪. 川西坳陷须家河组 (T_3x) 气藏再认识[J]. 天然气工业, 2002, 22(2):1-6.
Wang Jinqi. Recognition of Xujiahe Formation (T_3x) gas reservoirs in West Sichuan depression[J]. Nature Gas Industry, 2002, 22(2):1-6.
- [7] 罗啸泉, 陈兰. 川西坳陷形成演化及其与油气的关系[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(1):16-19.
Luo Xiaoquan, Chen Lan. Forming evolution of western Sichuan depression and its relation with oil and gas[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2004, 11(1):16-19.
- [8] 杨克明, 叶军, 吕正祥. 川西坳陷上三叠统成藏年代学特征[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2):208-213.
Yang Keming, Ye Jun, Lv Zhengxiang. Chronological characteristics of Upper Triassic reservoirs in western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2):208-213.
- [9] 郭旭升. 川西地区中、晚三叠世岩相古地理演化及勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5):610-619, 631.
Guo Xusheng. Litho-paleogeographic evolution in the Middle-Late Triassic in western Sichuan Province and its significance for petroleum exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5):610-619, 631.
- [10] 龚浩. 等四川盆地西北地区热流史及烃源岩演化[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3):1031-1036.
Gong Hao. Thermal history and hydrocarbon source rock evolution in the northwestern Sichuan basin[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3):1031-1036.
- [11] 朱夏. 试论古全球构造与古生代油气盆地[J]. 石油与天然气地质, 1983, 0(1):1-33.
Zhu Xia. Notes on Ancient Global Tectonics and Paleozoic petroliferous basins[J]. Oil & Gas Geology, 1983, 0(1):1-33.
- [12] 朱夏. 活动论构造历史观[J]. 石油实验地质, 1991, 13(3):201-209.
Zhu Xia. Tectonic history viewpoint of active theory[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1991, 13(3):201-209.
- [13] 徐旭辉, 江兴歌. TSM 盆地模拟——在苏北溱潼凹陷的应用[M]. 北京:地质出版社, 1997:70-90.
Xu Xuhui, Jiang Xingge. TSM basin modeling—a case study of Qintong depression, Northern Jiangsu[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997:70-90.
- [14] 张渝昌, 徐旭辉, 等. 展望盆地模拟[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1):29-36.
Zhang Yuchang, Xu Xuhui, Jiang Xingge, et al. Outlook for basin modelling[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1):29-36.
- [15] 徐旭辉, 朱建辉, 金晓辉. 中国海相残留盆地油气资源潜力评价技术探索[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6):865-870.
Xu Xuhui, Zhu Jianhui, Jin Xiaohui. Method for appraising hydrocarbon resource potential in relict marine basins in China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):865-870.
- [16] 马行陟, 庞雄奇, 孟庆洋, 等. 辽东湾地区深层烃源岩排烃特征及资源潜[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2):251-258.
Ma Xingzhi, Pang Xiongqi, Meng Qingyang, et al. Hydrocarbon expulsion characteristics and resource potential of deep source rocks in the Liaodong Bay[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2):251-258.
- [17] 关德范, 徐旭辉, 李志明, 等. 烃源岩有限空间生排烃基础研究新进展[J]. 石油实验地质, 2011, 33(5):441-446.
Guan Defan, Xu Xuhui, Li Zhiming, et al. New progress in basic studies of hydrocarbon generation and expulsion of source rock in finite space[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5):441-446.
- [18] 易士威, 蒋有录. 范炳达渤海湾盆地饶阳凹陷古近系源岩特征与新近系油气来源[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5):475-479.
Yi Shiwei, Jiang Youlu, Fan Bingda, et al. Neogene petroleum source and characteristic of Paleogene hydrocarbon source rock in the Raoyang sag, Bohai Bay basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5):475-479.

(编辑 高岩)