

文章编号:1672-6561(2012)02-0049-08

四川盆地原油裂解气的有利地温场分布 及其演化特征

马德文^{1,2}, 邱楠生^{1,2}, 许威^{1,2}, 谢增业³

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 盆地与
油藏研究中心, 北京 102249; 3. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要:为了确定四川盆地原油裂解气的有利分布区, 利用镜质体反射率古温标重建了四川盆地的热演化史, 分析了四川盆地三叠统飞仙关组原油裂解的有利地温场分布范围及其演化特征。结果表明: 四川盆地各构造单元自三叠纪以来的热流演化是不一致的, 川东北地区热流在地质历史时期最低, 川中地区热流也较低, 而川西北和川西地区热流演化最高, 这种差异与青藏高原隆升及峨眉山玄武岩地幔柱有关; 四川盆地在二叠纪时期热流明显高于其他时期, 但高热流持续时间较短, 这主要受岩浆侵入的影响; 四川盆地飞仙关组原油裂解气的有利地温场分布区是不断变化的, 侏罗纪末期其几乎遍及整个四川盆地, 白垩纪末期其范围缩小, 古近纪末期其收缩至川西和川中部分地区, 现今范围则最小, 主要分布在川西部分地区; 控制原油裂解气分布区的主要因素是古地温场, 尤其是地温最高时期的地温场, 而与现今地温场的关系并不密切。

关键词:原油裂解气; 地温场; 热演化史; 镜质体反射率; 热流; 古地温; 飞仙关组; 四川盆地

中图分类号: P618.13; P314.2 **文献标志码:** A

Distribution and Evolution Characteristic of Favorable Geothermal Field for Oil Cracking Gas in Sichuan Basin

MA De-wen^{1,2}, QIU Nan-sheng^{1,2}, XU Wei^{1,2}, XIE Zeng-ye³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Research Center of Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, Hebei, China)

Abstract: In order to sure the favorable area of oil cracking gas in Sichuan Basin, the thermal evolution history of Sichuan Basin was reconstructed by geothermometer of vitrinite reflectance, and the distribution and evolution characteristic of favorable geothermal field for oil cracking gas reservoirs in Feixianguan Formation of Lower Triassic were determined. The results showed that the heat flow evolution after Triassic was inconsistent in different tectonic units in Sichuan Basin; the heat flow was lowest in Northeast Sichuan, low in Central Sichuan, highest in Northwest Sichuan and West Sichuan during main geological ages, and the differences were mainly caused by the uplift of Qinghai-Tibet Plateau and basalt mantle plume of Emei Mountains; the heat flow was significantly higher during Permian than other periods, but the duration was short because of the magmatic intrusion; the distribution of favorable geothermal field for oil cracking gas in

收稿日期: 2011-07-28

基金项目: 国家科技重大专项研究项目(2008ZX05007-003-01)

作者简介: 马德文(1985-), 男, 山东日照人, 工学硕士研究生, E-mail: mdw0726@163.com。

Triassic Feixianguan Formation was ever changing; the distribution was almost over Sichuan Basin at the end of Jurassic, and reduced at the end of Cretaceous, and continually reduced to West Sichuan and part of Central Sichuan, and was smallest and mainly in part of West Sichuan now; the distribution of oil cracking gas was mainly controlled by paleogeotherm, especially the geothermal field with highest geological temperature, but it had little relationship with contemporary geothermal field.

Key words: oil cracking gas; geothermal field; thermal evolution history; vitrinite reflectance; heat flow; paleogeotherm; Feixianguan Formation; Sichuan Basin

0 引言

四川盆地是中国重要的天然气产区,目前已发现大量天然气田^[1-2]。原油裂解气是四川盆地海相碳酸盐岩地层中天然气的一个重要来源^[3-4]。四川盆地海相地层时代老、埋藏受热历史长、热演化程度高,古油藏在高温条件下极易发生热裂解,形成天然气藏,目前已经在四川盆地下三叠统飞仙关组中发现了普光、罗家寨、铁山坡等原油裂解型大型气田,显示了良好的勘探前景^[4-10]。研究表明,原油裂解主要受温度控制,原油裂解的温度主要为 160 °C ~ 220 °C,低于 160 °C 时原油基本不会裂解,而高于 220 °C 时原油裂解基本完成^[4,11-12]。很多学者对原油裂解的特征进行了一些研究和总结^[3,13-15],但是缺少对四川盆地原油裂解气平面分布范围及其演化的研究。笔者利用镜质体反射率重建四川盆地的热演化史,并根据原油裂解气温度条件确定四川盆地原油裂解气的有利地温场分布及其演化特征。

1 热演化特征

四川盆地是扬子准地台西部一个呈北东向延展的菱型含油气盆地。该盆地是一个在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合盆地,经历了古生代—早中生代的早期克拉通拗陷阶段和晚三叠世—新生代晚期的前陆盆地阶段^[16]。该盆地经历了多次构造运动,印支期是扬子板块重大变革阶段,此时形成了盆地雏形,后经喜马拉雅运动全面褶皱形成现今构造面貌^[17-20]。在多次构造运动影响下,盆地遭受了多次抬升剥蚀^[21-25],因此地层的沉积埋深及地层温度必然经历了复杂的变化。

笔者利用镜质体反射率古温标模拟热历史。根据化学动力学模型^[26]建立镜质体反射率(R_o)与温度及时间的关系。该方法计算热演化史的步骤为:①首先重建地层沉积埋藏史,根据钻井的钻测数据及剥蚀数据,利用回剥法重建地层沉积埋藏史;②根

据研究区的宏观构造背景假定一地温梯度演化模型或热流演化模型,结合埋藏史计算目的层经历的古地温模式;③根据计算的古地温模式以及化学动力学模型,模拟计算 R_o ;④用实测的 R_o 和模拟计算的 R_o 进行对比,通过反复修改假设的热演化史模型,使模拟计算的 R_o 和实测 R_o 吻合较好,此时选定的热演化史及古地温模式即为该井的热历史^[27]。

沉积埋藏史是热演化史恢复的基础和前提,而地层抬升剥蚀是重建沉积埋藏史的关键参数。从早白垩世末期至今,尤其在始新世中、晚期,由于受到喜山运动影响,四川盆地发生了强烈隆升和地层剥蚀。很多学者利用多种方法对四川盆地的剥蚀量进行了恢复^[24,28-29]。从前人研究可以看出,四川盆地的抬升剥蚀主要发生在晚白垩世至今,其剥蚀总厚度普遍大于 2 500 m。晚白垩世之前虽然也发生了多期抬升剥蚀,但是剥蚀量较小。除剥蚀量外,其他地层分层、岩性、地层物性等参数采用钻井的实际测试分析数据。

根据上述热演化史恢复方法,结合单井实际钻测数据及镜质体反射率值,重建四川盆地典型井的埋藏史及热演化史(图 1~3)。从川西北地区关基井模拟结果来看,古热流从三叠纪初期约 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,逐渐降低至侏罗纪末期的 $54 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,到白垩纪末期降至 $51 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,之后热流基本维持不变。川中地区女基井的热演化史趋势与关基井相似,但在白垩纪之前其古热流明显小于关基井。川西地区油 1 井古热流最高,三叠纪热流高达 $62 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,此后热流逐渐降低,现今热流仍达 $55 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。川东北地区在晚二叠世热流较高,普光 5 井在该时期的热流为 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,但是从晚二叠世末期至三叠纪末期,其大地热流迅速降低,在三叠纪末期,其热流降低至约 $45 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,此后热流基本维持在该水平。

前人对四川盆地的热演化史也进行了大量研究,伍大茂等利用 R_o 、流体包裹体等对四川盆地的

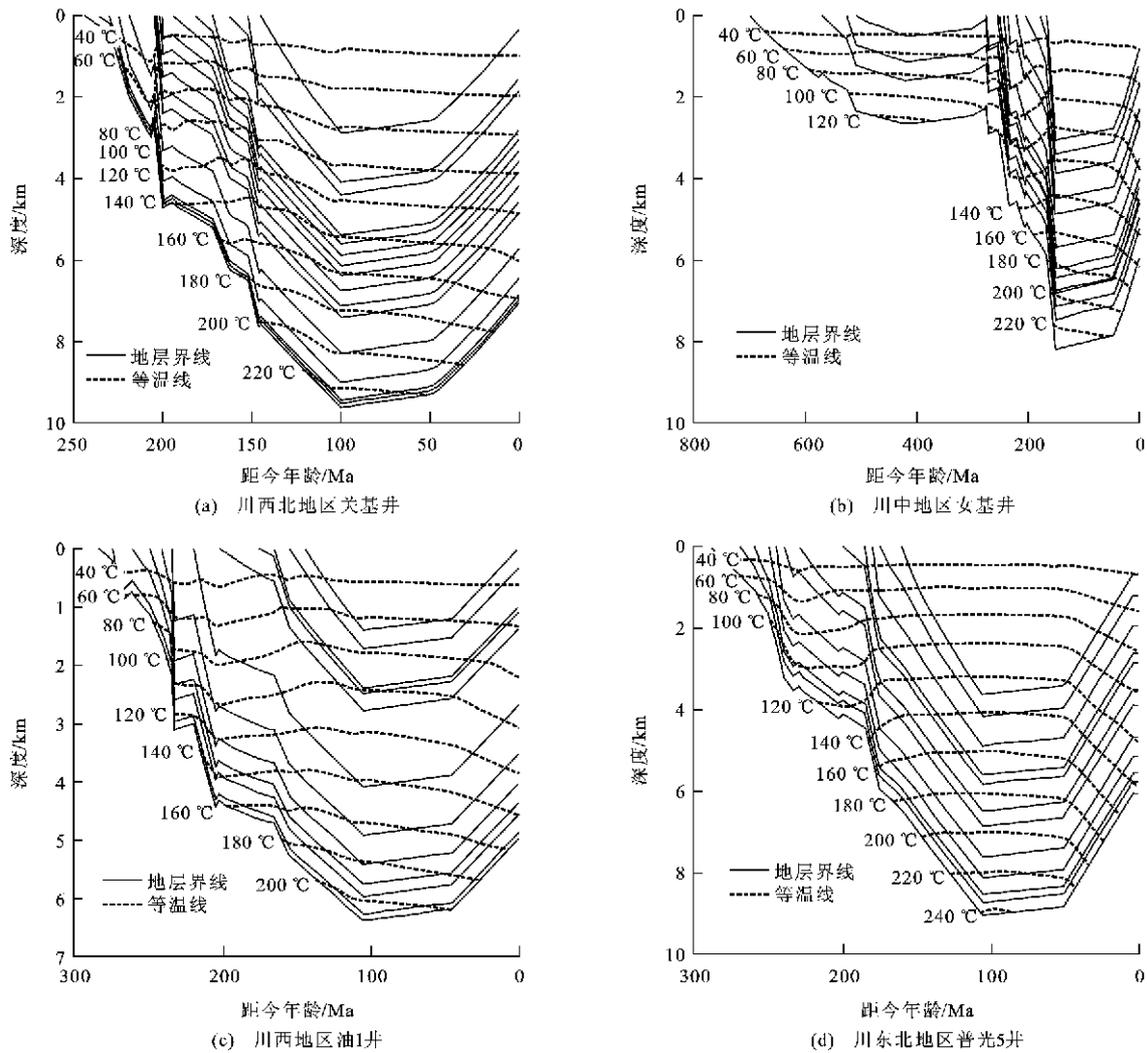


图 1 典型井沉积埋藏史和热演化史模拟结果

Fig. 1 Simulated Results of Burial and Thermal Evolution Histories in Typical Wells

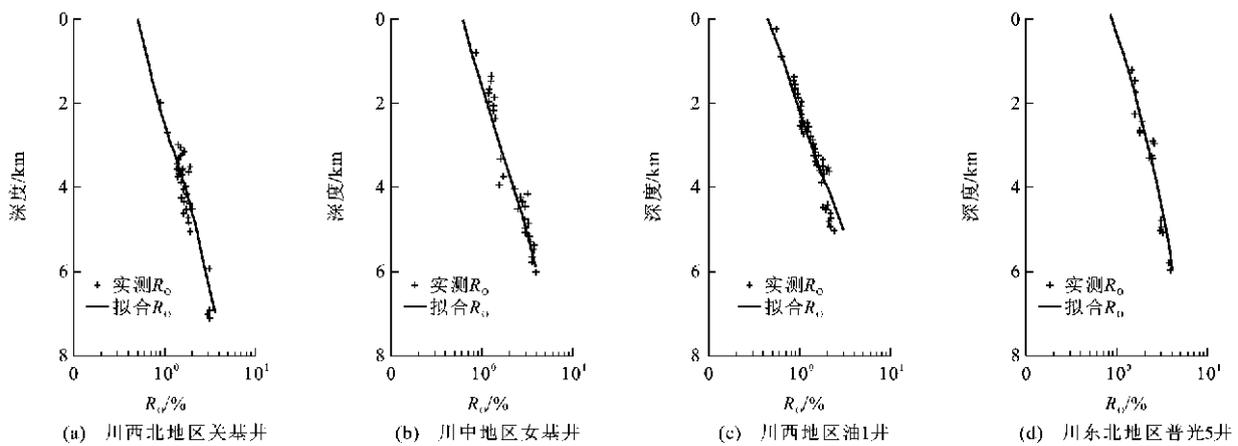


图 2 典型井镜质体反射率拟合结果

Fig. 2 Fitting Results of Vitrinite Reflectances in Typical Wells

热演化史进行了研究^[30];陈梅涛等利用热演化史波动模型及磷灰石裂变径迹重建了四川盆地北部地区的热演化史^[31];卢庆治等利用 R_o 反演获得了川东

北地区的热演化史^[32-34];沈传波等利用裂变径迹研究了川东北地区中、新生代的热历史^[35];邱楠生等利用 R_o 等研究了川东北地区的热流演化特

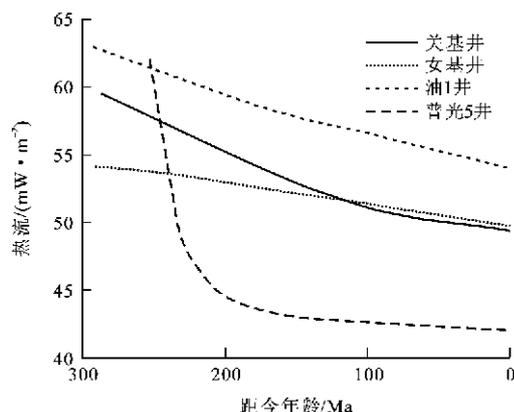


图3 典型井热流演化结果

Fig. 3 Heat Flow Evolution Results of Typical Wells

征^[36-37]。磷灰石裂变径迹等低温热年代学方法对于模拟川东北地区白垩世以来的温度演化较为有效,对比结果表明,前人利用上述方法确定的川东北地区白垩世以来的地温演化史与本研究结果基本一致^[29,35-36]。从早白垩世末期至今,由于构造抬升剥蚀,四川盆地地层温度发生了明显下降;由于剥蚀量的差异,不同地区地温下降幅度也不同。

总之,四川盆地各构造单元自三叠纪以来的热流演化是不一致的(图3)。川东北地区的热流在地质历史时期最低,川中地区热流也较低,而川西北和川西地区热流演化最高,这种差异可能与西部青藏高原隆升及西南部峨眉山玄武岩地幔柱有关。此外,从各地区的热演化史可以看出,二叠纪热流明显高于其他时期,这主要受二叠纪火山喷发的影响,使热流在短时间内迅速升高,但是火山喷发的影响在时间上相对较短,因此热流短暂升高之后又迅速降低。

2 有利地温场分布及其演化特征

四川盆地下三叠统飞仙关组是原油裂解气型大气田的主要分布层系,目前已在该层系发现了普光、罗家寨、铁山坡等大型气田。前人研究表明,飞仙关组不仅是现今各大气田的主要储层,而且也是古油藏的主要储集层系^[38-39],其烃源岩主要为二叠系龙潭组。因此,在热演化史恢复的基础上,有必要研究四川盆地原油裂解过程。以普光5井为例(图4),其烃源岩(下二叠统龙潭组) R_o 在三叠纪初达到0.5%,烃源岩开始生、排烃并在飞仙关组形成古油藏,此后成熟度不断增高,在侏罗纪中期烃源岩 R_o 达到1.3%,因此从三叠纪初到侏罗纪中期为古油藏形成期。在距今160 Ma左右,飞仙关组的地层温度达到160℃,因此从该时期开始,原油开始裂

解;之后,随着地层的不断沉积,地层温度不断升高,原油不断裂解直到早白垩世构造抬升剥蚀之前,此阶段是原油裂解气形成的主要时期,此后发生构造抬升剥蚀地层温度降低,原油停止裂解。

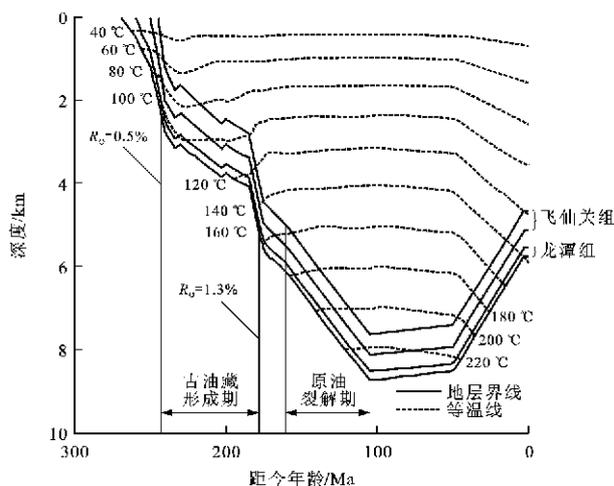


图4 川东北地区普光5井烃源岩及储层温度演化及原油裂解过程

Fig. 4 Process of Oil Cracking and Temperature Evolution of Hydrocarbon Source Rock and Reservoir in Well Puguang5 of Northeast Sichuan

根据原油裂解的地温条件,在热演化史恢复的基础上,结合四川盆地各层系的现今构造分布特征及前人对四川盆地抬升剥蚀的研究成果^[27],确定了四川盆地飞仙关组在主要地质历史时期原油裂解的有利地温场分布特征(图5)。

对比不同时期四川盆地飞仙关组的地温分布可以看出,不同时期的地温场分布存在明显差异,原油裂解气的有利地温场分布区是不断变化的。侏罗纪末期,几乎整个四川盆地飞仙关组的地层温度都大于原油裂解气的初始裂解温度(160℃),具备了原油裂解的地温条件,在川东北、川西及川中部分地区地温甚至明显高于220℃,原油已经完全裂解;白垩纪末期,由于构造抬升剥蚀的影响,地层温度发生下降,在构造抬升剥蚀较强烈的川南和川东地区地温发生明显下降,使得这些地区地温小于原油裂解的初始温度,此时原油裂解的有利地温场主要分布在川西、川东北和川中地区;古近纪末期,由于地层持续抬升剥蚀地温仍持续下降,此时原油裂解气仅分布在川西、川东北及川中的部分地区;相对其他地质历史时期,现今飞仙关组的地层温度最低,原油裂解气的有利地温场仅分布于川西及川东北的部分地区。

从上述地温场分布及其演化特征可以看出,虽然有利于原油裂解的地温场分布范围逐渐减小,但

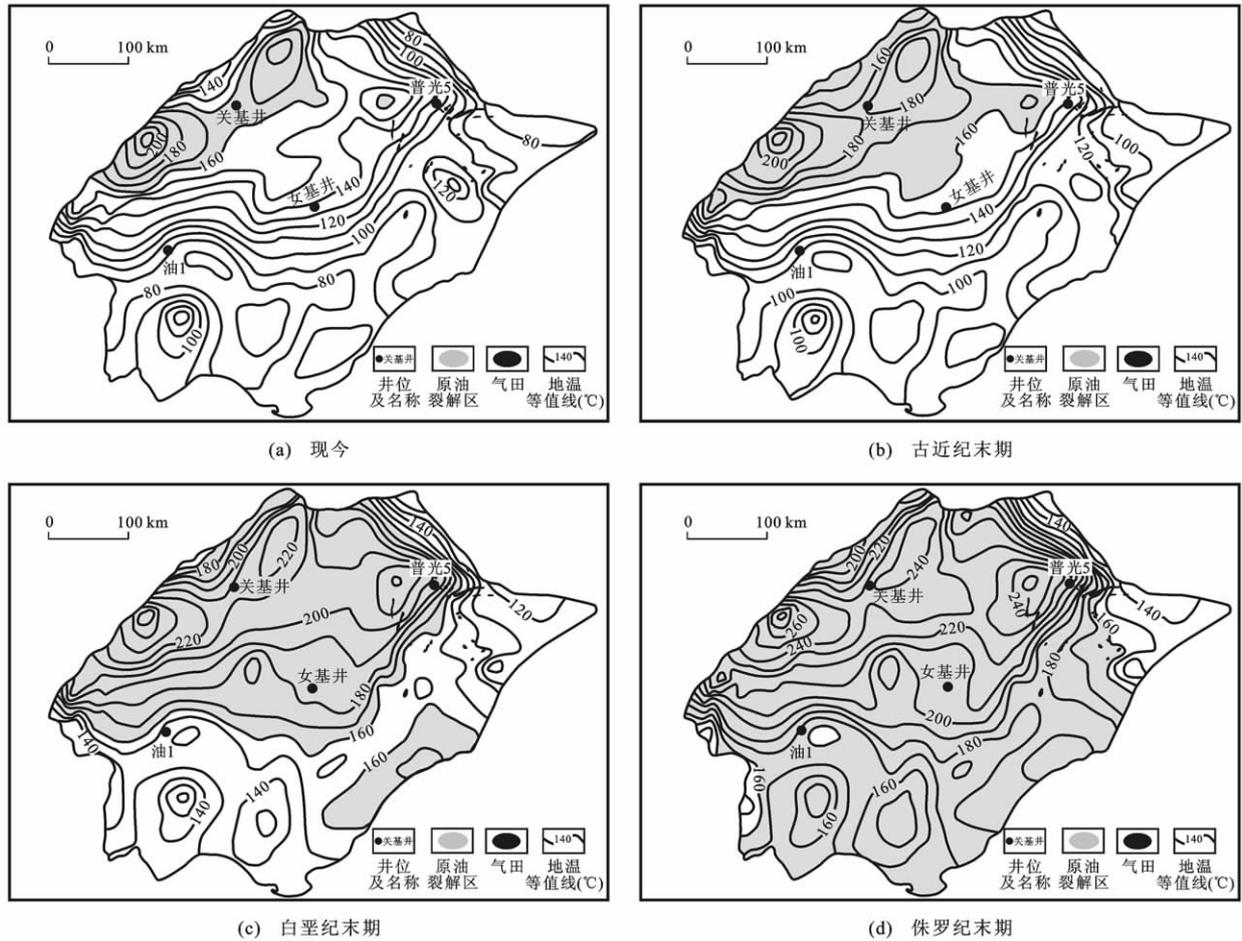


图 5 飞仙关组主要地质历史时期原油裂解气有利地温场分布

Fig. 5 Distributions of Favorable Geothermal Fields for Oil Cracking Gas in Feixianguan Formation During Main Geological Ages

是从原油裂解过程可以看出(图 4),对原油裂解气分布影响最大的是早白垩世末期的地温场,因为该时期地温最高,之后发生构造抬升剥蚀,地温开始下降,原油停止裂解,此后地温分布特征对原油裂解基本不再产生影响。其他地区原油裂解的过程与川东北基本一致,因为其沉积埋藏史和热演化史的总体演化趋势基本一致(图 1)。因此,早白垩世末期至今的地温场分布范围是逐渐变化的,现今地温场并不能代表原油裂解的分布范围,若用现今地温场分布来约束原油裂解气分布范围会使原油裂解气的分布范围明显偏小。从图 3 可以看出,在川东北主要裂解型大气田的分布区,虽然现今并未处于原油裂解气的有利温度分布区,但在地质历史时期明显发生过原油裂解。总之,控制原油裂解气分布区的是古地温场,尤其是地温最高时期的地温场,而不是现今地温场。

原油裂解型气田的实际分布主要受地温场、源岩类型、裂解后气田的保存等条件影响,但是温度是控制原油裂解的主要条件,地层温度高于原

油裂解的门限温度是存在原油裂解气田的必要条件;因此,笔者主要从地温场角度来约束原油裂解气的分布范围。

3 结 语

(1)四川盆地各构造单元自三叠纪以来的热流演化是不一致的。川东北地区热流在地质历史时期最低,川中地区热流也较低,而川西北和川西地区热流演化最高。这种差异与青藏高原隆升及峨眉山玄武岩地幔柱有关。此外,四川盆地在二叠纪时期热流明显高于其他时期,但高热流持续时间较短,这主要受岩浆岩侵入的影响。

(2)四川盆地飞仙关组原油裂解气的有利地温分布区是不断变化的,侏罗纪末期范围最大,几乎遍及整个四川盆地,白垩纪末期范围缩小,古近纪末期收缩至川西和川中部分地区,现今范围最小,主要分布在川西部分地区。控制原油裂解气分布区的是古地温场,尤其是地温最高时期的地温场,而与现今地温场的关系并不密切。

参考文献:

References:

- [1] 朱光有,张水昌,梁英波,等.四川盆地天然气特征及气源[J].地学前缘,2006,13(2):234-248.
ZHU Guang-you,ZHANG Shui-chang,LIANG Ying-bo, et al. The Characteristics of Natural Gas in Sichuan Basin and Its Sources[J]. Earth Science Frontiers, 2006,13(2):234-248.
- [2] 沈忠民,姜敏,刘四兵,等.四川盆地陆相天然气成因类型划分与对比[J].石油实验地质,2010,32(6):560-565.
SHEN Zhong-min,JIANG Min,LIU Si-bing, et al. Partition and Contrast on Genetic Type of Continental Natural Gas in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment,2010,32(6):560-565.
- [3] 赵喆,钟宁宁,李艳霞,等.生烃化学动力学在川东北普光气田的应用[J].石油勘探与开发,2006,33(6):682-686.
ZHAO Zhe,ZHONG Ning-ning,LI Yan-xia, et al. Application of Hydrocarbon-generating Chemical Kinetics in the Puguang Gas Field, NE Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6):682-686.
- [4] 赵文智,王兆云,张水昌,等.油裂解生气是海相气源灶高效成气的重要途径[J].科学通报,2006,51(5):589-595.
ZHAO Wen-zhi,WANG Zhao-yun,ZHANG Shui-chang, et al. The Oil Cracking Gas Is an Important Way of Gas Source Kitchen in Marine[J]. Chinese Science Bulletin,2006,51(5):589-595.
- [5] 戴建全.川东北元坝地区长兴组-飞仙关组气藏勘探潜力评价[J].成都理工大学学报:自然科学版,2010,37(4):419-423.
DAI Jian-quan. Exploration Potential Evaluation of the Changxing-Feixianguan Formation Gas Pool in Yuanba Block of Northeast Sichuan,China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition,2010,37(4):419-423.
- [6] 管宏林,蒋小琼,王恕一,等.普光气田与建南气田长兴组、飞仙关组储层对比研究[J].石油实验地质,2010,32(2):130-135.
GUAN Hong-lin,JIANG Xiao-qiong,WANG Shu-yi, et al. A Comparative Study of Reservoirs of the Changxing and Feixianguan Formation Between Puguang Gasfield and Jiannan Gasfield in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment,2010,32(2):130-135.
- [7] 燕继红,李启桂,石文斌.镇巴区块飞仙关组沉积演化及其对储层的控制作用[J].成都理工大学学报:自然科学版,2010,37(2):140-146.
YAN Ji-hong,LI Qi-gui,SHI Wen-bin. Sedimentary Evolution of Feixianguan Formation and Its Control on the Reservoirs in the Zhenba Area,China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition,2010,37(2):140-146.
- [8] 过敏,李仲东,杨磊,等.川东北飞仙关组异常压力演化与油气成藏[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(1):175-182.
GUO Min,LI Zhong-dong,YANG Lei, et al. Evolution of Abnormal Pressure and Hydrocarbon Accumulation in Feixianguan Formation in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2010, 32(1):175-182.
- [9] 王恕一,蒋小琼,管宏林,等.川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J].石油实验地质,2010,32(4):366-372.
WANG Shu-yi,JIANG Xiao-qiong,GUAN Hong-lin, et al. Diagenesis Effects of Lower Triassic Feixianguan Formation Reservoir in Puguang Gas Field, Northeast Sichuan[J]. Petroleum Geology and Experiment,2010,32(4):366-372.
- [10] 唐海,汪全林,彭鑫岭,等.川东宣汉地区飞仙关组裂缝特征及成因研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(4):78-84.
TANG Hai,WANG Quan-lin,PENG Xin-ling, et al. The Study of Fracture Characteristics and Causes at Feixianguan Formation in Xuanhan Area of Eastern Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2011, 33(4): 78-84.
- [11] SCHENK H. The Conversion of Oil into Gas in Petroleum Reservoirs Part I: Comparative Kinetic Investigation of Gas Generation from Crude Oils of Lacustrine, Marine and Fluviodeltaic Origin by Programmed-temperature Closed-system Pyrolysis[J]. Organic Geochemistry,1997,26(7/8):467-481.
- [12] WAPLES D W. The Kinetic of In-reservoir Oil Destruction and Gas Formation: Constraints from Experimental and Empirical Data, and from Thermodynamics[J]. Organic Geochemistry,2000,31(6):553-575.
- [13] 刘德汉,肖贤明,田辉,等.论普光原油裂解气藏的动力学和热力学模拟方法与结果[J].天然气地球科学,2010,21(2):175-185.
LIU De-han,XIAO Xian-ming,TIAN Hui, et al. Methodology and Results of Dynamic and Thermody-

- namic Simulation for Oil-cracked Gas Pool of Puguang [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(2): 175-185.
- [14] 薛会, 张金川, 刘丽芳, 等. 天然气机理类型及其分布[J]. *地球科学与环境学报*, 2006, 28(2): 53-57.
XUE Hui, ZHANG Jin-chuan, LIU Li-fang, et al. Distribution and Mechanic Classification of Gas[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(2): 53-57.
- [15] 唐小强, 黄光辉, 张敏, 等. 原油及其族组分裂解过程中产物组成变化特征[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2011, 38(1): 21-28.
TANG Xiao-qiang, HUANG Guang-hui, ZHANG Min, et al. Composition Characteristics of Products in the Process of Cracking of Crude Oil and Oil Fractions[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2011, 38(1): 21-28.
- [16] 刘和甫, 李景明, 李晓清, 等. 中国克拉通盆地演化与碳酸盐岩-蒸发岩层序油气系统[J]. *现代地质*, 2006, 20(1): 1-18.
LIU He-fu, LI Jing-ming, LI Xiao-qing, et al. Evolution of Cratonic Basins and Carbonate-evaporite Sedimentary Sequence Hydrocarbon Systems in China[J]. *Geoscience*, 2006, 20(1): 1-18.
- [17] 刘树根, 罗志立, 戴苏兰. 川西前陆盆地的“四川运动”及与油气的关系[J]. *石油与天然气地质*, 1996, 17(4): 276-281.
LIU Shu-gen, LUO Zhi-li, DAI Su-lan. Sichuan Movement in West Sichuan Foreland Basin and Its Relation to Oil and Gas[J]. *Oil and Gas Geology*, 1996, 17(4): 276-281.
- [18] 周小进, 杨帆. 中国南方新元古代—早古生代构造演化与盆地原型分析[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(5): 446-451.
ZHOU Xiao-jin, YANG Fan. Tectonic Evolution and Prototypes Analysis from Neoproterozoic to Early Paleozoic in South China[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2007, 29(5): 446-451.
- [19] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
GUO Zheng-wu, DENG Kang-ling, HAN Yong-hui, et al. The Formation and Evolution of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1996.
- [20] 毛琼, 邹光富, 张洪茂, 等. 四川盆地动力学演化与油气前景探讨[J]. *天然气工业*, 2006, 26(11): 7-10.
MAO Qiong, ZOU Guang-fu, ZHANG Hong-mao, et al. Discussion on Geodynamic Evolution and Oil/Gas Prospect of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(11): 7-10.
- [21] 曾道富. 关于恢复四川盆地各地质时期地层剥蚀量的初探[J]. *石油实验地质*, 1988, 10(2): 134-141.
ZENG Dao-fu. A Preliminary Study on the Restoration for the Various Denuded Sequences of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 1988, 10(2): 134-141.
- [22] 刘树根, 孙玮, 李智武, 等. 四川盆地晚白垩世以来的构造隆升作用与天然气成藏[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(3): 293-300.
LIU Shu-gen, SUN Wei, LI Zhi-wu, et al. Tectonic Uplifting and Gas Pool Formation Since Late Cretaceous Epoch, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(3): 293-300.
- [23] 邓宾, 刘树根, 李智武, 等. 青藏高原东缘及四川盆地晚中生代以来隆升作用对比研究[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(4): 477-486.
DENG Bin, LIU Shu-gen, LI Zhi-wu, et al. A Comparative Study of the Late Mesozoic Uplifting in the Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau and Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2008, 35(4): 477-486.
- [24] 朱传庆, 徐明, 单竟男, 等. 利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量[J]. *中国地质*, 2009, 36(6): 1268-1277.
ZHU Chuan-qing, XU Ming, SHAN Jing-nan, et al. Quantifying the Denudations of Major Tectonic Events in Sichuan Basin; Constrained by the Paleothermal Records [J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1268-1277.
- [25] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 四川盆地震旦系—下古生界古油藏特征[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2011, 38(6): 638-645.
HUANG Wen-ming, LIU Shu-gen, MA Wen-xin, et al. Primary Study on Characteristics of Paleo-Oil Reservoirs of Sinian System-Lower Paleozoic in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2011, 38(6): 638-645.
- [26] SWEENEY J, BURNHAM A K. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [27] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
QIU Nan-sheng, HU Sheng-biao, HE Li-juan. Theory and Application of Geothermal System in Sedimentary Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [28] 邓宾, 刘树根, 刘顺, 等. 四川盆地地表剥蚀量恢复及其意义[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(6): 675-686.

- DENG Bin, LIU Shu-gen, LIU Shun, et al. Restoration of Exhumation Thickness and Its Significance in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2009, 36(6): 675-686.
- [29] 田云涛, 朱传庆, 徐明, 等. 晚白垩世以来川东北地区的剥蚀历史——多类低温热年代学数据综合剖面的制约[J]. 地球物理学报, 2011, 54(3): 807-816.
- TIAN Yun-tao, ZHU Chuan-qing, XU Ming, et al. Post-early Cretaceous Denudation History of the Northeastern Sichuan Basin—Constraints from Low-temperature Thermochronology Profiles[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(3): 807-816.
- [30] 伍大茂, 吴乃苓, 郗建军. 四川盆地古地温研究及其地质意义[J]. 石油学报, 1998, 19(1): 28-33.
- WU Da-mao, WU Nai-ling, GAO Jian-jun. Paleogeotemperature in Sichuan Basin and Its Geological Significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(1): 28-33.
- [31] 陈梅涛, 汤良杰, 杨宁, 等. 四川盆地北部热史波动模型的建立和应用[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2005, 20(6): 24-27.
- CHEN Mei-tao, TANG Liang-jie, YANG Ning, et al. Establishment and Application of the Thermal Wave Model of the Deposition in the Northern Sichuan Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2005, 20(6): 24-27.
- [32] 卢庆治, 胡圣标, 郭彤楼, 等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1110-1116.
- LU Qing-zhi, HU Sheng-biao, GUO Tong-lou, et al. The Background of the Geothermal Field for Formation of Abnormal High Pressure in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(5): 1110-1116.
- [33] 卢庆治, 郭彤楼, 胡圣标. 川东北地区热流史及成烃史研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(5): 549-551.
- LU Qing-zhi, GUO Tong-lou, HU Sheng-biao. Hydrothermal History and Hydrocarbon Generation History in Northeastern Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 549-551.
- [34] ZHU C Q, XU M, YUAN Y S, et al. Paleogeothermal Response and Record of the Effusing of Emeishan Basalts in the Sichuan Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(10): 949-956.
- [35] 沈传波, 梅廉夫, 郭彤楼. 川东北地区中、新生代热历史的裂变径迹分析[J]. 天然气工业, 2007, 27(7): 24-26.
- SHEN Chuan-bo, MEI Lian-fu, GUO Tong-lou. Fission Track Analysis of Mesozoic-Cenozoic Thermal History in Northeast Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(7): 24-26.
- [36] 邱楠生, 秦建中, McInnes B I A, 等. 川东北地区构造-热演化探讨——来自(U-Th)/He年龄和 R_0 的约束[J]. 高校地质学报, 2008, 14(2): 223-230.
- QIU Nan-sheng, QIN Jian-zhong, MCINNES B I A, et al. Tectonothermal Evolution of the Northeastern Sichuan Basin—Constraints from Apatite and Zircon (U-Th)/He Ages and Vitrinite Reflectance Data[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(2): 223-230.
- [37] 王杰, 秦建中, 刘文汇, 等. 川东北元坝地区中生代构造与动态热演化史——磷灰石、锆石(U-Th)/He定年分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 19-24.
- WANG Jie, QIN Jian-zhong, LIU Wen-hui, et al. Mesozoic Tectonics and Dynamic Thermal History in Yuanba Area of Northeastern Sichuan Basin—Application of (U-Th)/He Dating of Apatite and Zircon[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(1): 19-24.
- [38] 马永生, 蔡勋育, 郭彤楼. 四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素[J]. 科学通报, 2007, 52(增1): 149-155.
- MA Yong-sheng, CAI Xun-yu, GUO Tong-lou. The Main Controlling Factors of Hydrocarbon Filling and Accumulation in Puguang Gas Field of Sichuan Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 149-155.
- [39] 杜春国, 郝芳, 邹华耀, 等. 川东北地区普光气田油气运聚和调整、改造机理与过程[J]. 中国科学: D辑, 2009, 39(12): 1721-1731.
- DU Chun-guo, HAO Fang, ZOU Hua-yao, et al. The Mechanism and Process of Oil and Gas Migration, Accumulation, Transformation and Adjustment of Puguang Gas Field in Northeast Sichuan Basin[J]. Science in China: Series D, 2009, 39(12): 1721-1731.