

四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系天然气成藏史

李吉君¹, 曹群², 卢双舫¹, 王伟明¹, 李文浩¹, 颜鑫桐², 史颖琳², 阴建新¹

[1. 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛 266580;

2. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318]

摘要:应用天然气生成和同位素分馏的化学动力学方法对四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系天然气成藏史进行研究。结果表明:①高石梯-磨溪含气构造为继承性隆起,有利于天然气的高效聚集,震旦系灯影组主要聚集191 Ma以来所生天然气,早期所生天然气未运聚成藏或散失,成藏参与率约为79%;②资阳构造圈闭受燕山期构造运动影响逐渐演化成威远构造的斜坡,构造运动调整过程中剩余未裂解原油运移至新的构造高部位——威远构造继续裂解,资阳和威远气田分别聚集构造调整前后(106~104 Ma)所生天然气;③威远气田构造圈闭由于形成较晚,捕捉到的原油裂解气有限,成藏参与率约为51%,低于高石梯-磨溪地区;④资阳-威远地区构造反转过程中资阳古隆起中天然气会大量散失,尽管高石梯-磨溪地区天然气生成结束的时间早于资阳-威远地区90 Ma,不利于保存,但其气藏充满度却高于资阳-威远地区。

关键词:同位素动力学;生烃动力学;成藏史;乐山-龙女寺古隆起;四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

History of natural gas accumulation in Leshan-Longnyusi
Sinian paleo-uplift, Sichuan BasinLi Jijun¹, Cao Qun², Lu Shuangfang¹, Wang Weiming¹, Li Wenhao¹,Yan Xintong², Shi Yinglin², Yin Jianxin¹

[1. Research Institute of Unconventional Oil & Gas and Renewable Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China]

Abstract: History of natural gas accumulation in Leshan-Longnyusi Sinian paleo-uplift in the Sichuan Basin was studied with chemical kinetic methods of gas generation and isotopic fractionation. The results show that: ① Gaoshiti-Moxi gas bearing structure is an inherited uplift which is conducive to efficient accumulation of natural gas. The natural gas generated since 191 Ma mainly gathered in the Sinian Dengying Formation, while that generated earlier didn't accumulate or dissipated after accumulation. The gas accumulation participation rate is about 79%. ② The Ziyang structural trap gradually evolved into a tectonic slope of Weiyuan trap during the Yanshan tectonic movement. The remaining non-pyrolysed crude oil migrated to the new structural high—Weiyuan trap and continued to pyrolyse there during the tectonic movement. So Ziyang and Weiyuan gas fields gather the natural gas generated before and after structural adjustment (106–104 Ma), respectively. ③ Weiyuan structural trap captured limited pyrolysis gas due to its late formation, and its gas accumulation participation rate is about 51%, which is lower than that in Gaoshiti-Moxi area. ④ Much natural gas in Ziyang paleo-uplift was lost during Ziyang-Weiyuan tectonic inversion. Although the ending of gas generation in Gaoshiti-Moxi area is 90 Ma earlier than that in Ziyang-Weiyuan area, which is not conducive to the preservation, its gas reservoir fullness is higher than the later area.

Key words: isotopic fractionation kinetics, hydrocarbon generation kinetics, accumulation history, Leshan-Longnyusi paleo-uplift, Sichuan Basin

四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系-寒武系气田作为典型的碳酸盐岩溶风化壳大气田,起源于20

世纪60年代威远气田的发现,2011年古隆起轴部高石梯构造获得的高产工业气井——高石1井的发现预

收稿日期:2015-09-02;修订日期:2015-11-12。

第一作者简介:李吉君(1981—),男,博士、副教授,油气地质与地球化学。E-mail:lijijuncup@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41330313,41002044,41272152);中央高校基本科研业务费专项资金项目(14CX02224A,15CX05008A);黑龙江省高校青年学术骨干支持计划项目(1251G003)。

示着乐山-龙女寺古隆起具有巨大的天然气勘探潜力^[1-4]。就目前的勘探现状而言,高石梯-磨溪地区最具勘探前景,资阳-威远地区次之,这主要受控于该区构造演化。

高石梯-磨溪地区在演化过程中,一直处于有利的构造位置,有利于油气聚集成藏^[5]。资阳古背斜形成于印支期,早期为古油藏,燕山期-喜马拉雅期背斜规模逐渐缩小,古背斜油藏受到热蚀变,液态烃进入热裂解成气阶段。由于地壳遭受急剧抬升和强烈的挤压作用,资阳-威远地区发生构造反转,原本处于翼部的威远地区崛起形成背斜,而资阳古背斜圈闭萎缩成为威远背斜的翼部,其间天然气大量散失^[6-8]。威远背斜由于形成较晚,错过了源岩的生排烃期,只能捕捉原储集在古构造中的天然气^[6,9]。

上述构造演化史分析虽能解释研究区勘探现状,但其时间尺度较大,缺少与其相对应的天然气生成、运聚过程的定量研究,对一些关键地质事件的具体时间认识不清,如资阳-威远地区发生构造反转在喜马拉雅期某一时刻,由于那时资阳古油藏已全部裂解为气,威远背斜只是接收转移而来的天然气,则难以解释威远地区发育大量储层沥青的现象。基于上述原因,本次开展了天然气生成及同位素分馏动力学的研究。

1 样品和实验

对于乐山-龙女寺古隆起震旦系-寒武系天然气藏的天然气成因,前人已做过相应的研究。结果显示,乐山-龙女寺古隆起天然气主要为下寒武统筇竹寺组底部腐泥型暗色泥岩所生原油下排至灯影组上部储层后裂解所形成^[5-6,10-13]。

乐山-龙女寺古隆起含气构造带的寒武系烃源岩已处于过成熟阶段,所生原油也已裂解为沥青,不适于热模拟实验。本次选用三叠系飞仙关组源岩所生原油(源岩抽提物)进行了密闭体系下的原油裂解成气的黄金管实验^[14]。飞仙关组碳酸盐有机质与下寒武统烃源岩有机质类型近似,富腐泥组显微组分^[11,15-16],且目前正处于成熟晚期阶段,其所生原油具有较好的代表性。黄金管实验压力为50 MPa,分别以2℃/h和20℃/h升温速率从200℃升温至600℃以上。在目标温度点(温度间隔约为25℃)关闭高压釜连接的截止阀,将该高压釜从恒温箱中取出,待冷却后取出金管。将金管置于特制的气体收集装置中刺破,进行气体组分和同位素分析。实验过程中油成甲烷、总气(C₁₋₅)的生烃转化率曲线及油成甲烷的碳同位素值演化曲线如图1所示。

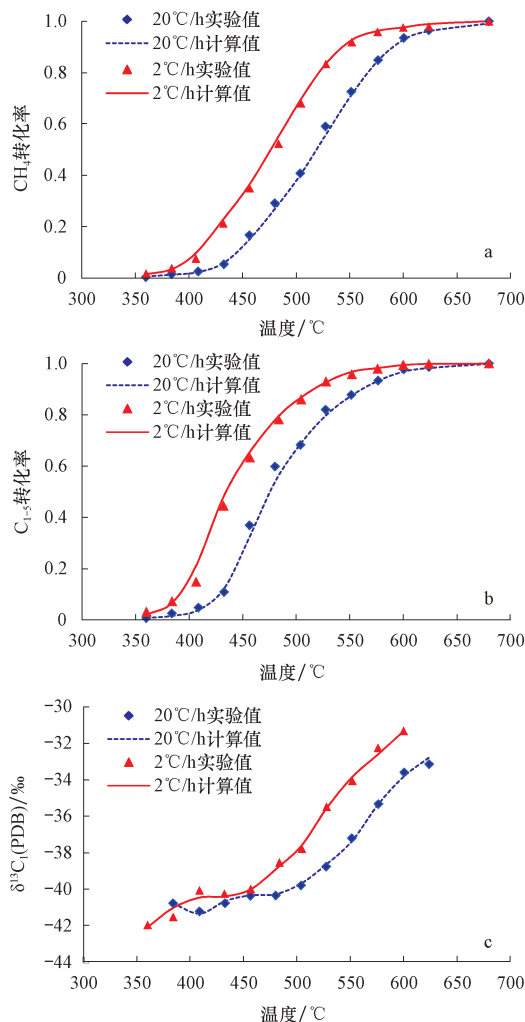


图1 乐山-龙女寺古隆起原油样品裂解成气转化率及成甲烷碳同位素值演化

Fig. 1 Gas transformation ratio and carbon isotope value changes of methane from oil cracking in the Leshan-longnyusi paleo-uplift

a. 甲烷转化率; b. 总气(C₁₋₅)转化率; c. 甲烷碳同位素

2 模型的选取和标定

化学动力学模型是生烃史分析的关键,动力学模型的优劣直接影响计算结果。对于动力学模型的选取,卢双舫^[17]通过详细的研究认为,比较而言,平行一级反应应该具有比较广泛的适用性。对于天然气同位素动力学模型的选取,卢双舫等^[18]针对国内外学者提出了多种分馏模型的优缺点,进行了对比研究;最初的静态模型是综合天然气现今碳同位素值并参考分布区的地质特征而建立起来的一种以统计为基础的经验模型^[19-25],无法动态地再现天然气的演化历程,无法预测天然气形成过程中的各种复杂变化;以 Rayleigh 方程为基础的碳同位素分馏模型^[26-29],通常只能描述源岩主要演化阶段的同位素变化,无法完整地描述复杂

的同位素演化;动力学同位素模型以生烃动力学模型为基础,认识到同位素分馏的本质是同位素组分生成速率不同所造成的生成量的差异,可很好地刻画天然气生成过程中同位素分馏的过程^[30-34],结合研究区地质背景可对天然气的成藏模式和效率等进行研究^[31,33-37],本次研究我们即采用该方法。

图1绘出了应用生烃动力学模型和动力学同位素模型分别计算得出的实验条件下油成甲烷、总气的生烃转化率曲线和甲烷的碳同位素值演化曲线,可以看出它们对实验点均有良好的拟合效果,这反映出生烃动力学模型及同位素动力学模型的可行性,同时也让我们有理由相信应用这两个模型可以对实际地质条件下的油成气过程和该过程中的碳同位素分馏情况进行良好的再现。模型标定得出的原油裂解成甲烷、总气的生烃及同位素分馏动力学参数如图2所示。根据笔者以往工作^[38],本次研究将指前因子统一取为 $1 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$,而甲烷生气母质碳同位素的比值则根据累积生成甲烷的碳同位素值确定为 -31‰ (图1c)。

3 地质应用

本文分别以高石梯-磨溪构造带的高石1井、资阳气田的资1井和威远气田的威117井为例,进行乐山-龙女寺古隆起震旦系灯影组原油裂解成气及其碳同位素分馏的化学动力学应用,确定天然气的成藏史。首先,将已求取的原油热解成甲烷、总气(C_{1-5})的化学动力学参数(图2)分别结合各井区沉积埋藏史、热史可得到对应井区原油裂解成甲烷、总气的生烃史。将原油裂解成甲烷的碳同位素动力学参数(图2)与各井区的沉积埋藏史、热史结合,可得出地质时期原油成 $^{12}\text{CH}_4$ 、 $^{13}\text{CH}_4$ 的转化率,再结合各自的生烃潜量便可获得相应的生成量,进而可以求取甲烷的碳同位素值。

地质背景的差异决定了天然气成藏具有以下3种

模式:①天然气生成时其他成藏条件还未具备,那么只有在具备之后生成的天然气才能参与成藏,此时气藏中聚集的天然气毫无疑问是晚期生成的;②天然气生成时若其他成藏条件均已具备,且后期没有大幅度的构造调整,则所生成的天然气均可参与成藏,不过由于早期生成的天然气易于散失,现今气藏中储集的天然气也应是晚期生成的;③天然气生成时若其他成藏条件均已具备,但后期发生大幅度的构造调整,那古构造圈闭(构造调整前的圈闭)应储集早期所生天然气,而新的构造圈闭(构造调整后形成的圈闭)则储集晚期所生天然气。前两种模式适用于多数地质背景,以往对于同位素动力学的应用也均针对这两种情况^[31,33-37]。而本次研究的资阳-威远地区存在构造调整,这就需要我们进行新的同位素动力学的探索性应用。

3.1 高石梯-磨溪构造带

图3a为高石1井沉积埋藏史和热史,受其影响原油裂解成气主要发生在燕山早、中期(J_1-J_2)200~159 Ma内,目前原油裂解成气和成甲烷转化率分别达到98%和95%(图3b,c)。图3d分别绘出了高石1井不同地质时期(横轴坐标)之后累积所生天然气运聚成藏所对应的甲烷碳同位素值曲线和油成甲烷的累积碳同位素曲线(即认为所有的天然气都参与了成藏)。由图3d可以看出,高石1井天然气的现今 $\delta^{13}\text{C}_1$ 约为 -32.5‰ ,该值大致相当于191 Ma之后所生天然气聚集所对应的甲烷碳同位素值,而与甲烷的累积碳同位素值曲线没有交点。191 Ma对应油成甲烷转化率为20%,之前所生甲烷可能未运聚成藏或成藏后散失,而油成甲烷的最终转化率为95%,由此可以确定甲烷成藏参与率为79%。由此说明高石梯-磨溪含气构造主要是晚期裂解气参与成藏,这是由于该区在演化过程中一直处于古构造高部位,是油气运移指向的有利部位。

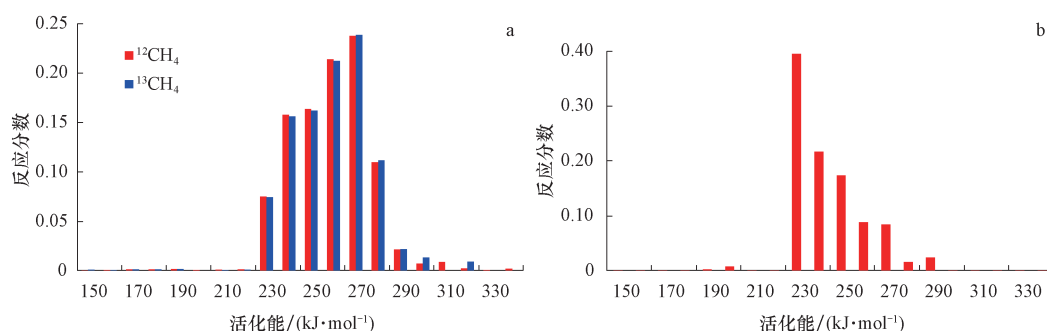


图2 乐山-龙女寺古隆起原油样品裂解成气反应动力学参数

Fig. 2 Kinetic parameters of gas generation from oil cracking in the Leshan-longnyusi paleo-uplift

a. 甲烷;b. 总气(C_{1-5})

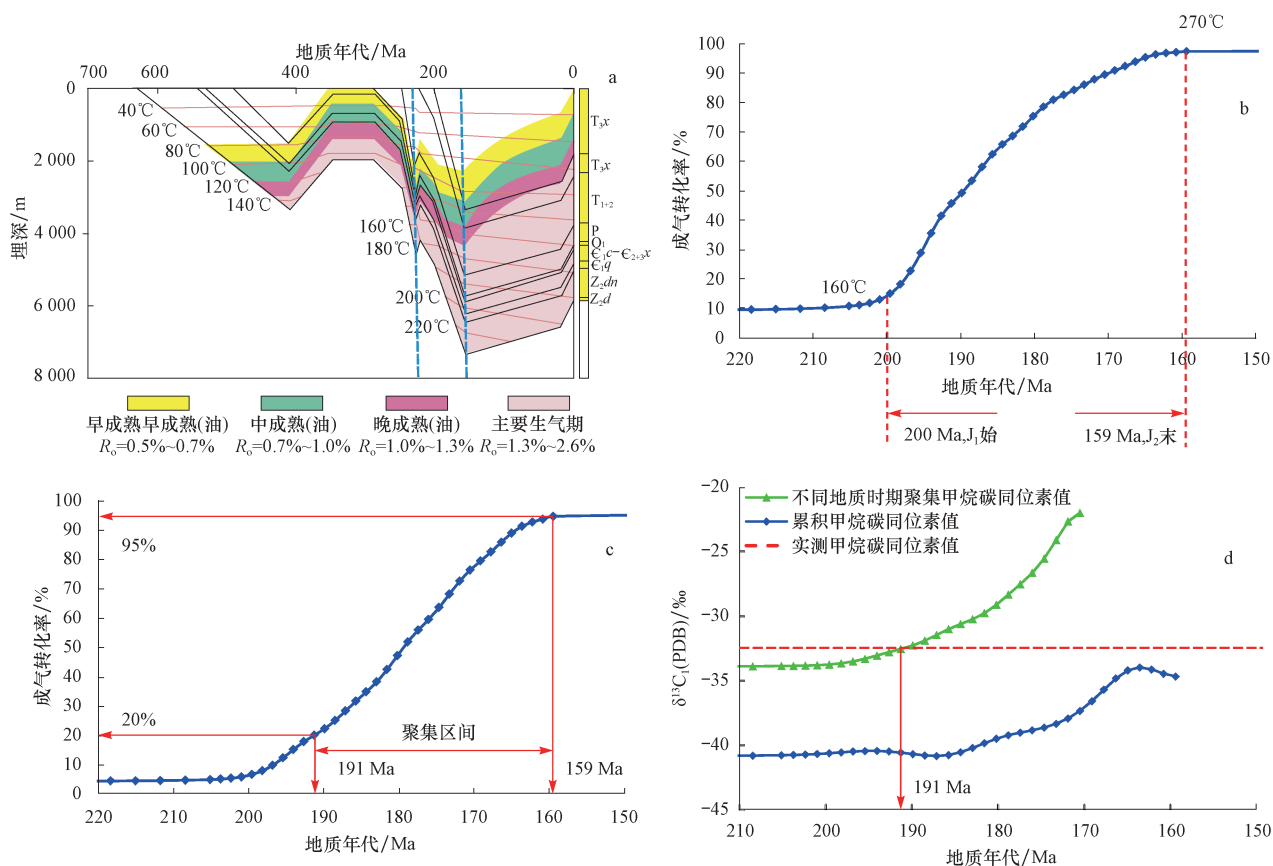


图3 乐山-龙女寺古隆起高石1井生烃及同位素动力学应用结果

Fig. 3 Application of hydrocarbon generation and isotopic fractionation kinetics in Gaoshi-1 well in the Leshan-Longnyusi paleo-uplift

a. 沉积埋藏史和热史; b. 地质时期原油裂解成气转化率; c. 地质时期原油裂解成甲烷转化率; d. 原油裂解所生甲烷碳同位素值

T_{3x} . 须家河组; C_{1c} . 沧浪铺组; C_{2+3x} . 洗象池组; C_{1q} . 筇竹寺组; Z_{2dn} . 灯影组; Z_{2d} . 陡山沱组

3.2 资阳构造带

同理,结合资1井沉积埋藏史和热史(图4a),我们可以计算出该井区灯影组原油裂解成气主要发生在燕山期(J-K)184~70 Ma内,目前成气转化率为98%(图4b),成甲烷转化率为96%(图4c)。图4d分别绘出了资1井不同地质时期(横轴坐标)之后累积所生天然气运聚成藏所对应的甲烷碳同位素值曲线和原油裂解成甲烷的累积碳同位素值曲线。资1井天然气的现今 $\delta^{13}C_1$ 约为-37.1‰,从图中可以看出,甲烷碳同位素值明显轻于不同地质时期至今所生甲烷的碳同位素值,而相当于原油裂解成气至燕山晚期106 Ma所生成天然气聚集所对应甲烷碳同位素值,对应油成甲烷转化率为78%,甲烷成藏参与率为81%。上述情况说明与高石梯-磨溪地区不同,资阳地区主要聚集早期所生天然气。这也印证了资阳气田构造圈闭为残余古隆起,后期构造调整过程中由于逐渐演化成威远构造的斜坡,因而无法聚集晚期所生天然气。

3.3 威远构造带

图5a为威117井沉积埋藏史和热史,灯影组原油

裂解成气主要发生在燕山期(J-K)196~70 Ma内,转化率达90%(图5b),裂解成甲烷转化率为78%(图5c)。威117井天然气的现今 $\delta^{13}C_1$ 约为-32.19‰,从图5d可以看出,该值大致相当于104 Ma之后所生天然气聚集所对应的甲烷碳同位素值,对应油成甲烷转化率为51%,之前所生甲烷可能未运聚成藏或成藏后散失,甲烷成藏参与率为32%。与同样聚集晚期所生天然气的高石梯-磨溪相比,威远气田天然气成藏参与率明显较低,这与威远气田构造圈闭形成较晚,只能捕捉晚期原油裂解气的地质背景相符。

对于高石梯-磨溪、资阳、威远3个地区天然气的生成和聚集成藏史可以得出以下认识。资阳、威远气田分别聚集早期和晚期所生天然气,且二者的时间节点非常接近,分别为106 Ma和104 Ma,这很好地说明了资阳-威远地区在地质历史时期确实发生了构造反转。资阳-威远构造反转的时间应在燕山晚期,而非喜马拉雅期。喜马拉雅期资阳地区原油裂解已结束,此时的构造反转只能造成天然气的重新运聚,这难以解释威远地区储层中沥青大量发育的现象。构造反转之后,资阳古构造下部剩余未裂解原油转而在威远地区聚集发生进一步的裂解,构造反转会造成资阳古隆

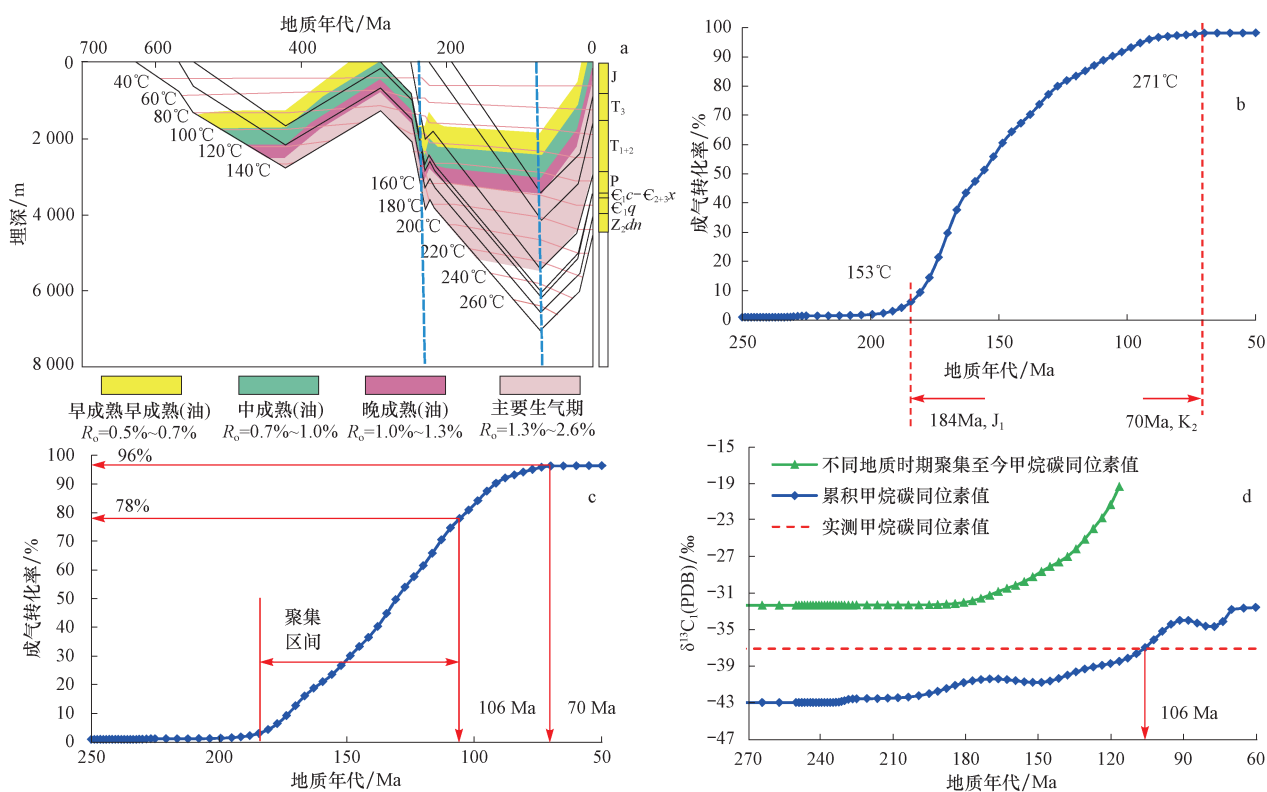


图4 乐山-龙女寺古隆起资1井生烃及同位素动力学应用结果

Fig. 4 Application of hydrocarbon generation and isotopic fractionation kinetics in Zi-1 well in the Leshan-Longnyusi paleo-uplift

a. 沉积埋藏史和热史; b. 地质时期原油裂解成气转化率; c. 地质时期原油裂解成甲烷转化率; d. 原油裂解所生甲烷碳同位素值

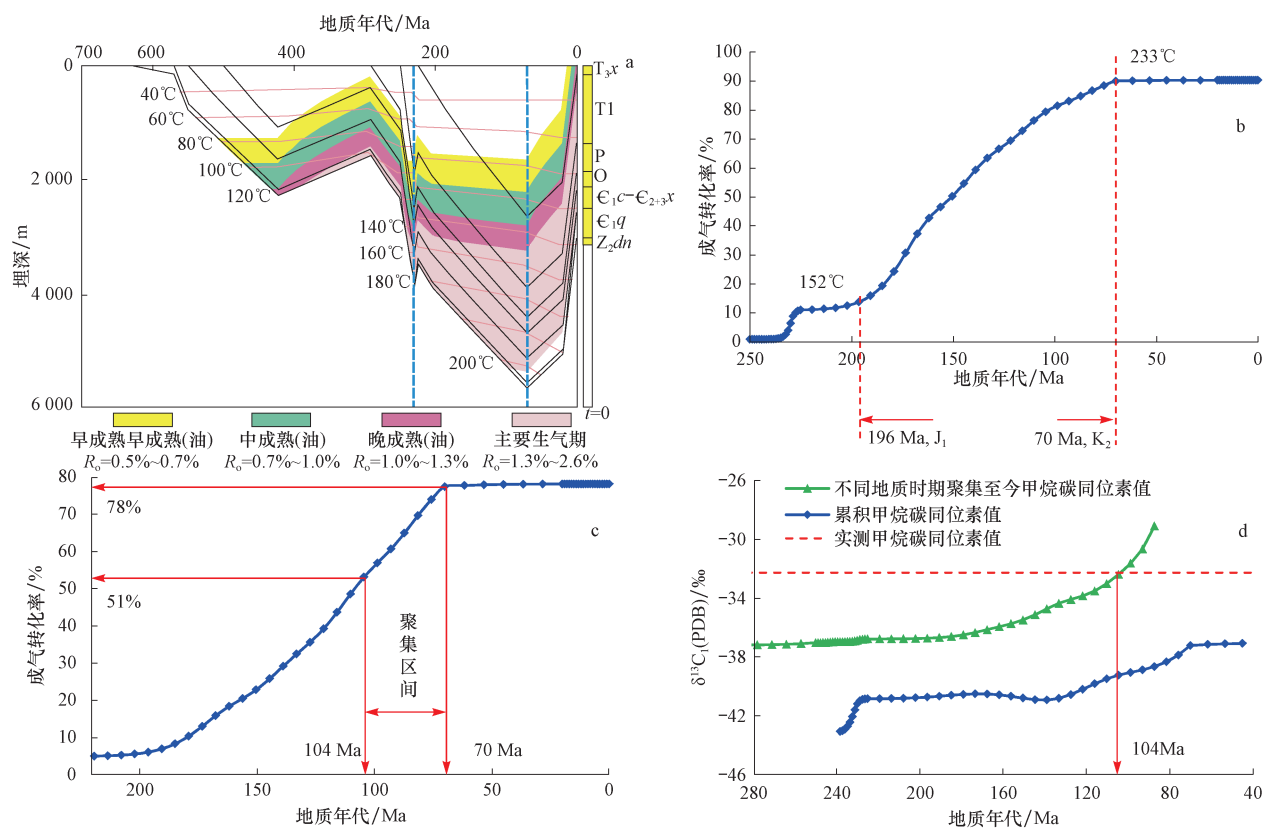
 ϵ_{1c} . 沧浪铺组; ϵ_{2+3x} . 洗象池组; ϵ_{1q} . 筇竹寺组; Z_2dn . 灯影组


图5 乐山-龙女寺古隆起威117井生烃及同位素动力学应用结果

Fig. 5 Application of hydrocarbon generation and isotopic fractionation kinetics in Well Wei-117 in the Leshan-Longnyusi paleo-uplift

a. 沉积埋藏史和热史; b. 地质时期原油裂解成气转化率; c. 地质时期原油裂解成甲烷转化率; d. 原油裂解所生甲烷碳同位素值

 T_{3x} . 须家河组; ϵ_{1c} . 沧浪铺组; ϵ_{2+3x} . 洗象池组; ϵ_{1q} . 筇竹寺组; Z_2dn . 灯影组

起中天然气的散失,且散失天然气难以运移至威远地区聚集。高石梯-磨溪地区天然气生成结束的时间早于资阳-威远地区 90 Ma,不利于保存,但其气藏充满足度却高于资阳-威远地区,这主要是由于构造反转过程中资阳古隆起中天然气会大量散失,而高石梯-磨溪地区为古今构造叠合区,保存期内圈闭大小和所处位置相对稳定^[39]。

4 结论

1) 高石梯-磨溪地区原油裂解成气主要发生燕山早中期(J_1 — J_2)200~159 Ma 内。资阳-威远地区原油裂解成气发生在整个燕山期(J — K)196~70 Ma 内。

2) 高石梯-磨溪含气构造为继承性隆起,有利于天然气的高效聚集成藏,主要聚集 191 Ma 以来所生天然气,天然气成藏参与率约为 79%;资阳地区为古隆起,只能聚集早期原油裂解所生天然气,燕山晚期构造运动调整过程中剩余未裂解原油会运移至新的构造高部位——威远气田发生进一步的裂解,资阳和威远地区分别聚集 106 Ma 之前和 104 Ma 之后所生天然气。

3) 资阳-威远地区构造反转过程中,资阳古隆起中天然气会大量散失,而高石梯-磨溪继承性古隆起一直相对稳定,由此造成高石梯-磨溪地区天然气生成较早,但其气藏充满足度却高于资阳-威远地区。

参 考 文 献

- [1] 田兴旺,胡国艺,李伟,等. 四川盆地乐山-龙女寺古隆起地区震旦系储层沥青地球化学特征及意义[J]. 天然气地球科学,2013,24(5):982-990.
Tian Xingwang, Hu Guoyi, Li Wei, et al. Geochemical characteristics and significance of Sinian reservoir bitumen in Leshan-Longnusi paleo-uplift area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5):982-990.
- [2] 韩克猷,孙玮. 四川盆地海相大气田和气田群成藏条件[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):10-18.
Han Keyou, Sun Wei. Conditions for the formation of large marine gas fields and gas field clusters in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):10-18.
- [3] 郭彤楼. 四川盆地奥陶系储层发育特征与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质,2014,35(3):372-378.
Guo Tonglou. Characteristics and exploration potential of Ordovician reservoirs in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3):372-378.
- [4] 王庭斌,董立,张亚雄. 中国与煤成气相关的大型、特大型气田分布特征及启示[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):167-182.
Wang Tingbin, Dong Li, Zhang Yaxiong. Distribution of large and giant coal-related gas fields in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):167-182.
- [5] 张林,魏国齐,汪泽成,等. 四川盆地高石梯-磨溪构造带震旦系灯影组的成藏模式[J]. 天然气地球科学,2004,15(6):584-589.
Zhang Lin, Wei Guoqi, Wang Zecheng, et al. Analysis of formation mechanism of Sinian Dengying formation in Gaoshiti-Moxi structure belt in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6):584-589.
- [6] 杨家静. 四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系油气藏形成演化研究[D]. 成都:西南石油学院,2002.
Yang Jiajing. Study on formation and evolution of Sinian petroleum pools in Leshan-Longnusi Paleolift, Sichuan Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2002.
- [7] 许海龙,魏国齐,贾承造,等. 乐山-龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制[J]. 石油勘探与开发,2012,39(4):406-416.
Xu Hailong, Wei Guoqi, Jia Chengzao, et al. Tectonic evolution of the Leshan-Longnusi paleo-uplift and its control on gas accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4):406-416.
- [8] 徐世涛,洪海涛,师晓蓉. 乐山-龙女寺古隆起与下古生界含油气性的关系探讨[J]. 天然气勘探与开发,2002,25(3):10-15.
Xu Shiqi, Hong Haitao, Shi Xiaorong. Relationship analysis of the Leshan-Longnusi paleo-uplift and petroleum potential of Lower Paleozoic[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2002, 25(3):10-15.
- [9] 戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. 石油实验地质,2003,25(5):473-480.
Dai Jinxing. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan gasfield[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2003, 25(5):473-480.
- [10] 姚建军,郑浚茂,宁宁,等. 四川盆地高石梯-磨溪构造带震旦系含油气系统研究[J]. 天然气地球科学,2002,13(5-6):74-79.
Yao Jianjun, Zheng Junmao, Ning Ning, et al. Research of Sinian petroleum system in Gaoshiti-Moxi structure belt, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2002, 13(5-6):74-79.
- [11] 姚建军,陈孟晋,华爱刚,等. 川中乐山-龙女寺古隆起震旦系天然气成藏条件分析[J]. 石油勘探与开发,2003,30(4):7-9.
Yao Jianjun, Chen Mengjin, Hua Aigang, et al. Formation of the gas reservoirs of the Leshan-Longnusi Sinian palaeo-uplift in central Sichuan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4):7-9.
- [12] 张水昌,朱光有. 四川盆地海相天然气富集成藏特征与勘探潜力[J]. 石油学报,2006,27(5):1-8.
Zhang Shuichang, Zhu Guangyou. Gas accumulation characteristics and exploration potential of marine sediments in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5):1-8.
- [13] 孙玮,刘树根,马永生,等. 四川盆地威远-资阳地区震旦系油裂解气判定及成藏过程定量模拟[J]. 地质学报,2007,81(8):1153-1159.
Sun Wei, Liu Shugen, Ma Yongsheng, et al. Determination and quantitative simulation of gas pool formation process of Sinian cracked gas in Weiyuan-Ziyang area, Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8):1153-1159.
- [14] 李吉君,卢双舫,薛海涛,等. 川东北飞仙关组鲕滩气藏天然气运聚效率[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2008,33(4):565-571.
Li Jijun, Lu Shuangfang, Xue Haitao, et al. Migration and accumulation efficiency of natural gas in feixianguan formation oolitic gas reservoirs, northeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(4):565-571.

- [15] 杨家静, 王一刚, 王兰生, 等. 四川盆地东部长兴组-飞仙关组气藏地球化学特征及气源探讨[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 349-352.
- Yang Jiajing, Wang Yigang, Wang Lansheng, et al. The origin of natural gases and geochemistry characters of Changxing reef and Feixianguan oolitic beach gas reservoirs in eastern Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 349-352.
- [16] 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 Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The characteristics of natural gas in Sichuan basin and its sources [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 234-248.
- [17] 卢双舫. 有机质成烃动力学理论及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- Lu Shuangfang. The theory of organic matter hydrocarbon generation kinetics and its application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [18] 卢双舫, 李吉君, 薛海涛, 等. 碳同位素分馏模型比较研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 1-4.
- Lu Shuangfang, Li Jijun, Xue Haitao, et al. Comparison of fractionation models of carbon isotope [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 1-4.
- [19] Stahl W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration [J]. Chemical Geology, 1977, 20: 121-149.
- [20] Schoell M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins [J]. Geochemical et Cosmochimica Acta, 1980, 44(5): 649-661.
- [21] 韩会平, 武春英, 季海琨, 等. 苏里格南部地区上古生界天然气成藏条件及勘探潜力[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 33-36.
- Han Huiping, Wu Chunying, Ji Haikun, et al. Reservoir-forming conditions and exploration potential of natural gas in the upper Paleozoic, southern area of Sulige [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 33-36.
- [22] 陈迎宾, 胡烨, 王彦青, 等. 柴达木盆地鄂博梁Ⅲ号构造深层天然气成藏条件[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(5): 34-39, 63.
- Chen Yingbin, Hu Ye, Wang Yanqing, et al. Research on the deep gas accumulation conditions of Eboliang-III structure, Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 34-39, 63.
- [23] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学 B 辑, 1992, 22(2): 185-193.
- Dai Jinxing. The identification of different kinds of alkane gas [J]. Science in China, Series B, 1992, 22(2): 185-193.
- [24] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学. 1993, 2(3): 2-40.
- Dai Jinxing. Carbon and hydrogen isotopic characteristics of natural gas and the identification of different kinds of natural gas [J]. Natural Gas Geoscience. 1993, 2(3): 2-40.
- [25] 黄第藩, 刘宝泉. 塔里木盆地东部天然气的成因类型及其成熟度判别[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(4): 365-372.
- Huang Difan, Liu Baoquan. The natural gas origin types and maturity in east part of Tarim Basin [J]. Science in China, Series D, 26(4): 365-372.
- [26] Bener U, Faber E, Scheeder G. Primary cracking of algal and land-plant kerogens: Kinetic models of isotope variations in methane, ethane and propane [J]. Chemical Geology, 1995, 126: 233-245.
- [27] Bener U, Faber E, Stahl W. Mathematical simulation of the carbon isotopic fractionation between huminitic coals and related methane [J]. Chemical Geology, 1992, 94(4): 315-319.
- [28] Lorient F, Behar F, Vandenbroucke M. Methane generation from methylated aromatics: Kinetic study and carbon isotope modeling [J]. Energy & Fuels, 2000, 14: 1143-1155.
- [29] Lorient F, Prinzhofer A. Carbon isotopic and molecular constraints on the formation and the expulsion of thermogenic hydrocarbon gases [J]. Chemical Geology, 1998, 147: 249-264.
- [30] Cramer B, Krooss B M, Littke R. Modelling isotope fractionation during primary cracking of natural gas: a reaction kinetic approach [J]. Chemical Geology, 1998, 149(3-4): 235-250.
- [31] Cramer B, Faber E, Gerling P, et al. Reaction kinetics of stable carbon isotopes in natural gas-Insights from dry open system pyrolysis experiments [J]. Energy & Fuels, 2001, 15(3): 517-532.
- [32] Xiong Y Q, Geng A S, Liu J Z. Kinetic - simulating experiment combined with GC-IRMS analysis: application to identification and assessment of coal-derived methane from Zhongba Gas Field (Sichuan Basin, China) [J]. Chemical Geology, 2004, 213: 325-338.
- [33] Li J J, Lu S F, Xue H T, et al. A study of the migration and accumulation efficiency and the genesis of hydrocarbon natural gas in the Xujiaweizi fault depression [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2008, 82(3): 629-635.
- [34] Li J J, Lu S F, Wu W, et al. Role of water and its influence on the hydrogen isotopic composition of natural gas during the generation of natural gas [J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 2011, 85(5): 1203-1210.
- [35] 张长宝, 罗东坤, 魏春光. 中亚阿姆河盆地天然气成藏控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 766-773.
- Zhang Changbao, Luo Dongkun, Wei Chunguang. Controlling factors of natural gas accumulation in the Amu Darya Basin, Central Asia [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 766-773.
- [36] 张春林, 庞雄奇, 田世澄, 等. 天然气成藏过程中地层水相态变化——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 640-645.
- Zhang Chunlin, Pang Xiongqi, Tian Shicheng, et al. Phase state changes of formation water in gas accumulation process: A case study from the Upper Paleozoic, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 640-645.
- [37] Zou Y Y, Zhao C Y, Wang Y P, et al. Characteristics and origin of natural gases in the Kuqa Depression of Tarim Basin, NW China [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 280-290.
- [38] 李吉君. 天然气生成过程中的碳同位素分馏作用研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2005.
- Li Jijun. Study of carbon isotopes fractionation during the process of nature gas generation [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2005.
- [39] 杨渊宇. 乐山-龙女寺古隆起构造特征及与震旦系油气成藏关系[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- Yang Yuanyu. The tectonic characteristics of Leshan-Longnvsi paleo-uplift and it's relationship with forming Sinian Gas-oil reservoir [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.