

海相叠合盆地构造演化 与油裂解气晚期成藏关系

郑民¹, 贾承造¹, 王文广², 李鹏¹, 李建忠¹, 吴晓智¹, 张永峰¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 东北石油大学, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:海相叠合盆地蕴含丰富的油裂解气资源,其晚期成藏过程经历了早期古油藏成藏与晚期油裂解成气阶段,受构造演化控制作用明显。探索构造演化与晚期油裂解气成藏的关系,对油裂解气藏的勘探具有指导意义。以四川盆地蜀南地区构造演化与晚期油裂解气成藏关系为研究实例,通过分析构造演化与沉积响应,研究古老烃源岩生烃演化过程、原始油气聚集、原油裂解与天然气晚期成藏关系。蜀南地区寒武系筇竹寺组烃源岩存在3次生烃期和2次生烃停滞期,筇竹寺组烃源岩在加里东期和海西期发生的沉积埋藏和抬升剥蚀事件出现了2次生烃和2次停滞,印支期和燕山期上覆巨厚沉积地层使得筇竹寺组烃源岩持续生烃;龙王庙组古油藏内原油存在一次油裂解生气过程,印支期后三叠系埋藏深度足够大并激发了龙王庙组古油藏内原油的裂解成气,持续到燕山晚期,提供充足的气源。研究得出以下结论:①海相叠合盆地的构造沉积演化控制了油气基础地质条件的发育;②构造沉积演化控制了古老烃源生烃过程;③构造沉积演化控制了古构造发育、古油藏聚集与保存;④构造沉积演化控制了古油藏的原油裂解与晚期聚集成藏;⑤建立了古老海相烃源层系晚期油裂解气成藏的研究思路,以期对同类古油藏研究起到借鉴作用,扩大油裂解气藏勘探的规模。

关键词:海相叠合盆地;构造演化;古油藏;油裂解气;晚期成藏;生烃期;生烃停滞期

中图分类号:TE121.1

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2015)02-0277-15

引用格式:Zheng Min, Jia Chengzao, Wang Wenguang, *et al.* The relationship between tectonic evolution and oil-cracking gas accumulation in late stage for marine superimposed basins[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 277-291. [郑民, 贾承造, 王文广, 等. 海相叠合盆地构造演化与油裂解气晚期成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 277-291.]

0 引言

油裂解气是指石油在高温条件下长链脂肪结构碳键断裂形成的天然气^[1],是海相气源灶高效成气的重要途径^[2]。中国中西部海相叠合盆地构造演化表现为多旋回性,具有时代老、埋藏深、多期叠加、改造明显、结构复杂等特征,对油气的聚集与保存非常不利。然而在如此复杂的海相地层系统中却发现了丰富的天然气资源,并且多为油裂解气藏。目前中

国以原油裂解气为主的天然气探明地质储量在 $5\,000\times 10^8\text{m}^3$ 以上,占中国海相大型气田总探明地质储量的30%左右^[3]。2009—2013年期间中国石油天然气股份有限公司新增天然气探明地质储量中,裂解气探明地质储量比重高达28%以上^[4],塔里木盆地台盆区天然气总资源量中原油裂解气比重更是高达40%~52%^[5],展示出了较大的勘探潜力。近年来,国内外众多学者对原油裂解气生烃实验机理、化学动力学特征及油裂解气和有机质热裂

收稿日期:2014-07-21;修回日期:2015-01-15.

基金项目:国家科技重大专项“中国大型油气田及煤层气勘探开发技术发展策略(二期)”(编号:2011ZX05043);中国石油天然气集团公司重大科技专项“第四次油气资源评价”(编号:2013E-0502);中国石油勘探开发研究院创新项目(编号:2012Y-006)联合资助。

作者简介:郑民(1979-),男,山东潍坊人,高级工程师,主要从事油气资源战略及石油地质综合研究. E-mail: zhenmin@petrochina. com. cn.

解气的识别标准与判别模式等开展了大量的研究^[2,6-8],并将高过成熟的高温裂解阶段残余有机质环烷甲基断裂形成的气态烃纳入裂解气范畴^[9-12],为油裂解气勘探领域的扩展奠定了理论基础^[1]。

在众多油裂解成气机制研究基础上,有学者提出多旋回叠合盆地成藏不是简单的“是否有充足油气源”的问题,而是复杂的生、排、聚过程^[13],以及后期如何有效保存的问题,油裂解气藏如何被保存下来是解开这一谜题的关键。但目前的研究成果主要集中在裂解气成因识别及油裂解成气的动力学机制方面^[14],对油裂解气的成藏过程和成藏特征的研究明显不足,对裂解气藏能够晚期成藏的原因分析较为欠缺。随着研究的深入,古油藏作为原始石油聚集的场所,成为了分析油裂解气藏晚期成藏定型的纽带,并逐渐认识到古油藏对于现今残余油藏和油裂解气成藏均具有一定控制作用^[3,15-17]。古油藏要实现从原始的石油聚集,到成藏保存、原油裂解、裂解气成藏等一系列过程,必须与海相克拉通盆地的区域性构造沉积演化相耦合,而区域性构造运动与沉积演化对古老烃源的成烃制约和古油藏的热演化裂解过程主要是通过地质体的抬升剥蚀与沉积埋藏作用来实现。本文以近期古老海相层系天然气藏大发现为出发点,选择四川盆地南部地区(蜀南地区)海相层系为研究对象,通过构造演化与沉积响应分析,研究古老烃源岩生烃演化过程与古油藏原油裂解生烃演化过程,及热演化过程对构造沉积演化的响应特征,从而探讨构造沉积演化过程对古老烃源岩生烃演化、原油裂解生烃演化及晚期油裂解气成藏的控制作用。

1 古老海相层系天然气藏成因分析

1.1 古老层系天然气藏大发现的启发

中国中西部海相叠合盆地古生界层系普遍具有沉积时代老、热演化程度高、埋藏深度大及油气藏遭破坏改造等特点^[18-20],增加了油气资源潜力评价和勘探开发的工作难度。我国古老海相烃源层系热演化程度较高,现今 R_o 值多在 2% 以上,大部分地区与层系在 3.0%~4.0% 之间,生烃潜力已经耗尽。然而自 2011 年以来,在四川盆地高石梯—磨溪地区寒武系龙王庙组和塔里木盆地古城地区奥陶系鹰山组 3 段(古城 6 井)连获天然气勘探重大突破,说明该领域具备较大的天然气资源潜力。四川盆地高石梯—磨溪地区在寒武系龙王庙组约 4 300~4 500 m 的主力层段获得天然气勘探的大突破,累计测试产

量为 $526.44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,单井平均测试产量为 $187.48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;2012 年提交磨溪 8 井区天然气控制储量为 $1\,318.82 \times 10^8 \text{ m}^3$,磨溪 9 井区和高石梯构造预测储量 $1\,121.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。塔里木盆地古城地区古城 6 井在奥陶系鹰山组 3 段测试,折日产气 $26.42 \times 10^4 \text{ m}^3$;2014 年提交安岳气田磨溪区块寒武系龙王庙组新增天然气探明地质储量为 $4\,403.85 \times 10^8 \text{ m}^3$,磨溪 101 井测试产量超过 $85 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。通过轻烃判别表明,龙王庙组和鹰山组天然气异构烷烃和环烷烃含量较高,而且在储层内发育明显的沥青收缩孔,属典型的原油裂解气。

不同地质条件下原油在储集层中的热稳定性存在一定差异,原油发生裂解的初始温度也会有一定差异,但一般情况下在地质温度超过 146°C 以后储层中原油将开始发生热裂解,并伴随气油比逐渐上升;储层地质温度高于 200°C 后原油基本完全裂解,并全部转化为天然气^[21]。而且单位油裂解生气数量是干酪根热解生气量的 2~4 倍,生气效率更高,油裂解生气是海相烃源岩成气的重要途径^[2]。统计显示,中国原油裂解气藏明显存在 2 期成藏或多期成藏特征(图 1),从该类气藏成藏期次与过程来看,最初成藏以原油充注成藏为主,成藏期跨度从奥陶纪至侏罗纪,但最终油裂解气的晚期成藏期跨度较小,均在晚侏罗世—古近纪之间(晚燕山期—喜马拉雅期)(图 1)。由此可见,古油藏的形成及原油在高温条件下的快速裂解,可促使海相烃源岩成为高效气源灶^[2],原始石油聚集成藏是晚期油裂解气成藏的关键。

1.2 古油藏为晚期油裂解气成藏提供了条件

古油藏是指岩石中集中出现的沥青^[22]或存在储层沥青的天然气藏,曾经在地质历史时期发生原油充注成藏^[23],后续某一时期古油藏调整改造,储层中石油已运移走^[3]或裂解形成天然气,仅有少量成藏记录(如成岩矿物中的油包裹体和孔隙中的少量残留烃类),或者大多数原油在原地经历过次生蚀变作用(包括热裂解、水洗、气洗、生物降解等作用),并形成古油藏存在证据的石油次生蚀变产物(稠油、沥青质或焦沥青)^[24],古油藏分布对晚期油裂解气成藏的发育和分布起控制作用。

中国古油藏众多,目前已陆续发现古油藏近 50 余处(图 2),主要分布在中西部盆地或地区,如中部的鄂尔多斯盆地、四川盆地、贵州黔中古隆起及南盘江盆地和西部的塔里木盆地、准噶尔盆地及柴达木盆地等,普遍发育储层沥青。古油藏中的储层沥青

经地球化学分析为石油裂解或降解的衍生物^[15-17],说明古油藏中存在油裂解成气的过程,也说明古油藏与上覆现存油藏或油裂解气藏的成藏有一定联系,并对现存油藏、天然气成藏具有控制作用^[3]。因此,中国广泛分布的古油藏对下一步油裂解气藏的勘探具有重大意义,需要深入分析和解剖古油藏与现今气藏在成藏机理中的内在联系。

1.3 构造演化控制了油裂解气晚期成藏

构造运动与沉积演化控制了古老海相地层生烃演化、油气藏聚集与晚期油裂解成藏。由于油和气的物理性质差异,在地质历史时期的构造变动过程中,长效保存天然气藏很难,油藏的保存相对容易,保存重油、稠油则更容易^[25],因此古油藏的成藏与保存过程,以及晚期油裂解成气过程,是分析该类气

藏晚期成藏保存的关键。而古油藏的成藏保存与晚期油裂解成气与区域性构造演化息息相关。早期烃源岩生成石油后向上覆储层聚集并形成古油藏,构造抬升使得烃源岩或古油藏缺失了热演化的条件从而终止热裂解生气,直至后期快速沉降并沉积埋藏后重启二次生烃历程,原油大规模裂解成气,天然气在古油藏或上覆构造高点聚集,最终喜马拉雅期构造调整改造成藏是油裂解气的有效成藏模式。因此,综合分析海相叠合盆地区域构造演化、古油藏发育与分布特征、原油裂解等是寻找该类气藏的有效途径。本文以蜀南地区为例,通过构造沉积特征、生烃过程、原始石油聚集、原油裂解等分析,讨论海相叠合盆地构造演化对古老层系油裂解气成藏的控制作用。

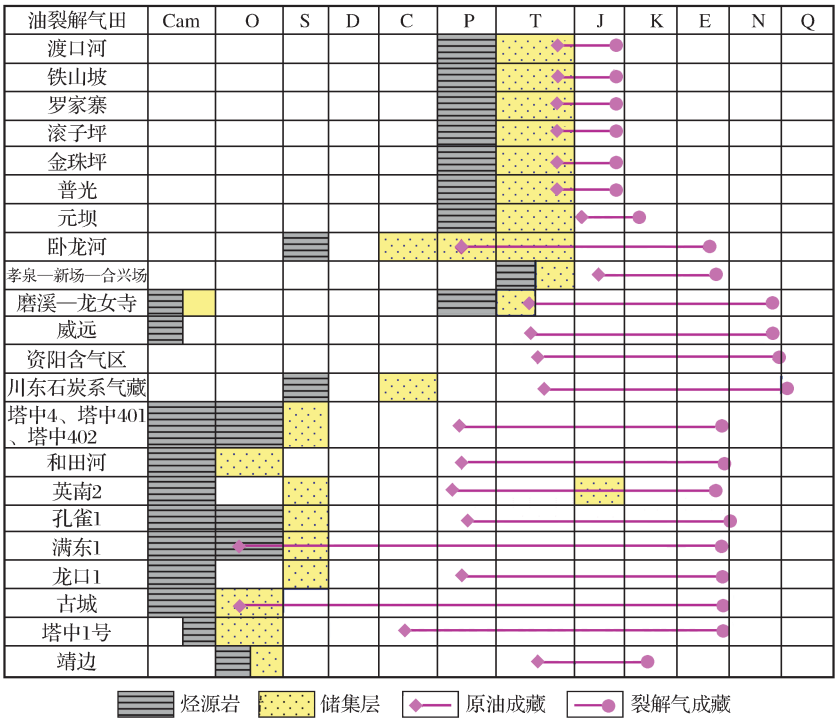


图 1 我国主要原油裂解气藏生储组合与成藏过程

Fig. 1 The reservoir combinations and accumulation process of China's major oil cracking gas reservoirs

2 蜀南地区构造演化与沉积响应特征

蜀南地区位于四川盆地南部,西起四川省乐山市—云南省绥江市,东至重庆市綦江县,北接简阳市—乐至县,南抵贵州省赤水市,大地构造位置属于川东南断褶带西南段和川中古隆平缓构造带西南段,海相地层发育较全,上覆层系发育大量天然气藏。

2.1 蜀南地区构造演化过程及期次

本文研究选取昭通—南江南北向和成都—青山

岭东西向 2 条区域地质剖面,采用弯曲滑移去褶皱法进行地层去压实恢复(地层回剥),采用断层解析与平行流滑动恢复法进行断层恢复,对 2 条交叉剖面进行了构造反演恢复,分析了区域性构造演化期次与过程。其中,昭通—南江 NS 剖面全长 680km,通过演化分析可识别出下古生界以来的 7 个构造演化期次[图 3(a)],成都—青山岭 EW 向剖面全长 330km,通过演化分析可识别出下古生界以来的 6 个构造演化期次[图 3(b)]。

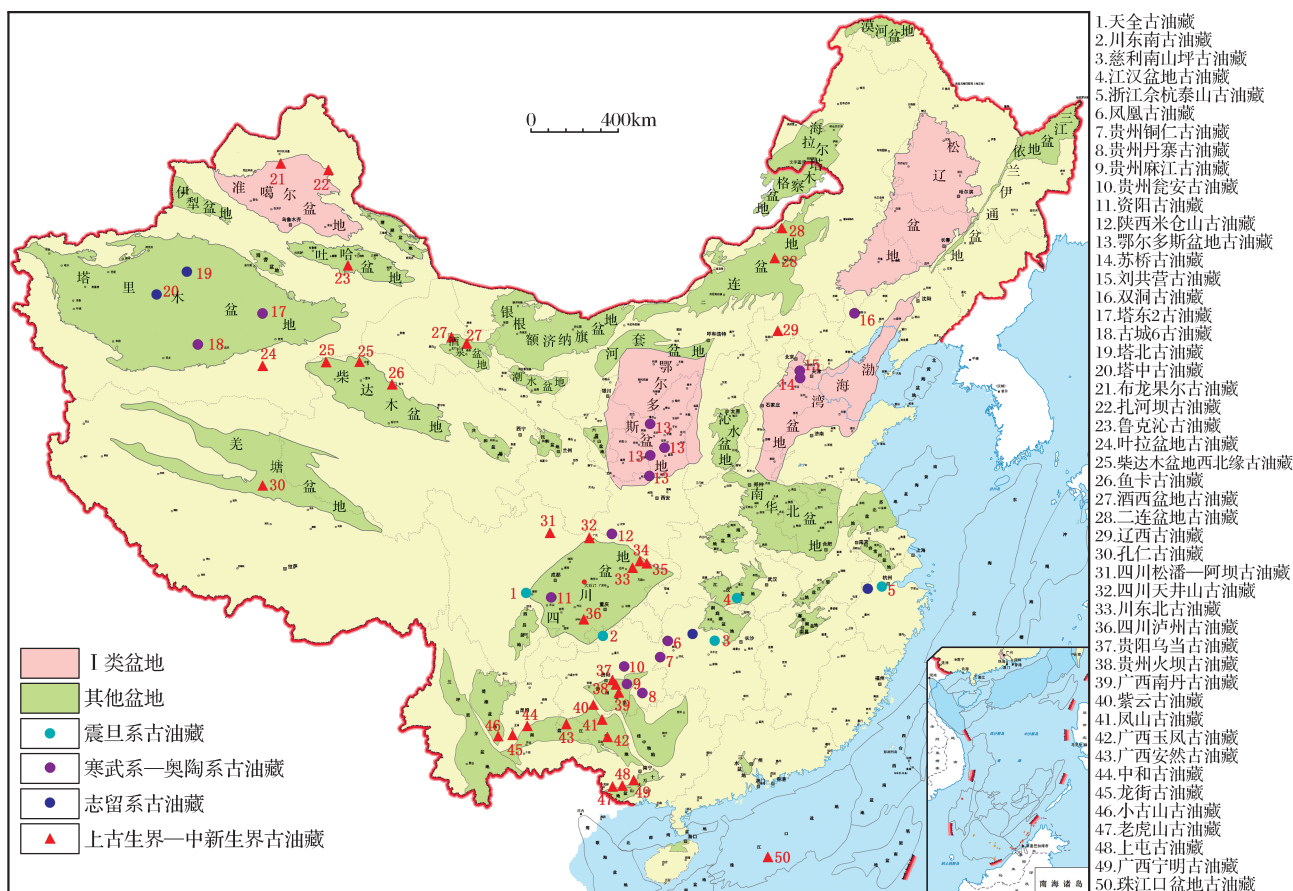


图2 中国古油藏分布示意

Fig. 2 China's ancient oil reservoir distribution

综合四川盆地 EW 向与 SN 向构造演化过程分析,建立地球物理影像可识别的构造演化过程,明确了5个旋回8个演化期次(表1)。

2.2 构造隆坳演化特征

四川盆地及周缘自早古生代以来“隆坳”相间发育,具“大隆大坳”特征。蜀南地区夹持在乐山—龙女寺古隆起和黔中隆起之间,其西部及西北部处于乐山—龙女寺古隆起区外围的斜坡地带,其余地区隶属于川南坳陷区,“隆坳”构造演化过程为高效气源岩及晚期油裂解成气提供了有利的条件。

蜀南地区在晚震旦世以浅海盆地—广海陆棚相沉积为主,桐湾运动使蜀南地区发生短暂抬升剥蚀,早寒武世全区快速沉降,水体较深,沉积了以筇竹寺组为代表的盆地相—盆地边缘相页岩及粉砂岩。中晚寒武世水体较浅,以斜坡—开阔台地相沉积为主。早奥陶世又发生快速沉降,沉积一套较为稳定的开阔台地相生物灰岩、灰岩夹泥页岩。中晚奥陶世—志留纪,中扬子海槽关闭与江南古陆隆升挤压,使得川中古隆起形成并扩大,海域缩小,蜀南地区在志留纪主要为深水陆棚环境,长宁—古蔺—巴鱼—石

柱—利川以南为浅水陆棚环境^[26]。

在石炭纪黄龙期,峨嵋地裂运动初期(I幕)的拉张作用影响到盆地东南部,由潮汐通道与鄂西浅海沟通。早晚二叠世之间的峨嵋地裂运动(II幕),形成了泸州(呈近SN向)和开江(近EW向)2个大型古隆起的雏形。进入中生代以后,受印支运动影响,中三叠世发育大幅构造抬升并遭受剥蚀,中上三叠统之间发育抬升隆起型侵蚀不整合,此后盆地进入定型与快速沉积阶段。晚三叠世与侏罗纪沉积速率可高达300~600m/Ma,沉积了巨厚层上三叠统与侏罗系,经喜马拉雅期褶皱回返与构造改造最终定型^[27]。

概括来讲,蜀南地区完整经历了扬子、加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅等6个旋回,导致蜀南地区的升降运动频繁,并围绕蜀南地区发育了黔中古隆起、乐山—龙女寺古隆起和泸州古隆起等3个大型古隆起。黔中隆起和乐山—龙女寺隆起形成于加里东期,二者之间为川黔坳陷,晚海西期形成泸州茅顶古隆起,并在印支期和早燕山期还在持续活动。乐山龙女寺古隆起与泸州古隆起是对蜀南地区油气

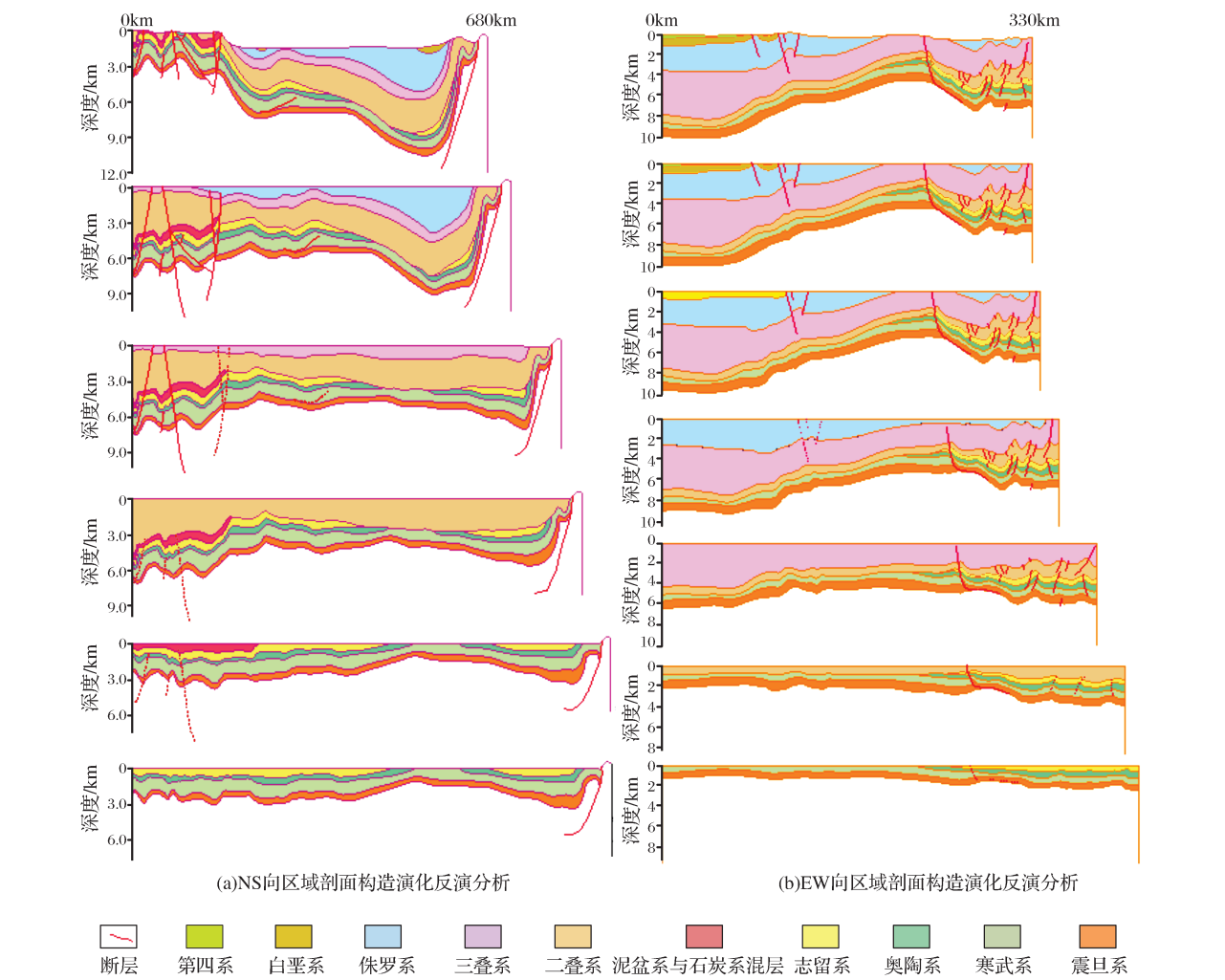


图 3 EW 向与 NS 向构造演化

Fig. 3 EW and NS Direction structure evolution

表 1 蜀南地区区域性构造演化的轮回和期次

Table 1 The regional tectonic evolution cycles and stages of the south of Sichuan

轮回	期次	事件
喜马拉雅期	8	第四纪,早喜马拉雅期形成的构造进一步得到加强和改造,四川盆地的构造面貌最终定型
	7	E 沉积末期,沉积盖层全面褶皱,不同时期不同地域的褶皱和断裂连成一体,盆地的构造格局基本定型
燕山	6	K 沉积末期,白垩纪周边地区持续褶皱回返,其间各古陆前缘的沉降中心时有迁移,但受川中稳定基底制约,围绕威远—龙女寺一带的中间隆起呈环带分布
	5	J 沉积末期,侏罗纪周边地区开始褶皱回返,古陆崛起,沉积盆地范围逐步向内压缩。龙泉山断裂开始发育,泸州古隆持续活跃
印支	4	T 沉积末期,印支期泸州古隆起持续活跃,产生 T_3/T_2 角度不整合、J/T 低角度不整合等,雷口坡自西向东尖灭,标志着盆地范围海相沉积的结束,进入克拉通内拗陷发展过程
海西	3	P 沉积时期,扬子准地台再次抬升成陆,华蓥山深大断裂东侧的川南拗陷逐渐抬升形成了泸州茅顶古隆起,茅口组地层遭受不同程度的剥蚀,上、下二叠统呈平行不整合接触
	2	C 沉积末期,柳江运动和云南运动,使四川地台整体性抬升,广泛缺失泥盆系、石炭系,黔中古陆挤压造成下陷,在黔北—康滇古陆东缘发育的泥盆石炭混层
加里东	1	S 沉积末期,华南地槽全面褶皱回返,下古生界海相层系褶皱变形,并发育黔中古隆起和乐山—龙女寺古隆起,下古生界地层遭受剥蚀

运聚起控制作用的 2 个重要隆起。

乐山—龙女寺古隆起基本上代表了 NEE 向的一组构造,从盆地西南方向自西向东插入,是地台内部范围最广的一个大型隆起。志留纪末的加里东Ⅲ幕运动,是加里东期最大的一幕构造运动,形成了乐山—龙女寺古隆起高带,并迫使海水退缩至龙门山区及川湘鄂边境等地。古隆起从志留纪末,一直延续至二叠纪前,历经了 120Ma 的风化剥蚀,古隆起顶部已准平原化。

泸州古隆起是 2 期相互重叠的古隆起。晚二叠世末的东吴运动使处于华蓥山深大断裂东侧的川南拗陷逐渐抬升,茅口组遭受不同程度的剥蚀,形成了泸州茅顶古隆起。中三叠世末,受印支运动早幕的影响,华蓥山断裂由拉张变为挤压,正断裂转化为逆断裂,位于东侧断上盘的地区大幅度抬升,形成了 NE—SW 向延伸的具有断隆特点的大型泸州三叠纪古隆起。早二叠世末的东吴运动形成的泸州茅顶古隆起和中三叠世末的印支运动形成的泸州三叠纪古隆起,这 2 期古隆起统称为泸州古隆起。

2.3 沉积响应特征

研究区地层纵向上层系较齐全,总厚度为 6 000~12 000m,除泥盆系和石炭系广泛缺失外,其他地层均有发育,具有多层系、多旋回特点。其中震旦系至中三叠统发育海相碳酸盐岩沉积,偶夹薄层碎屑沉积层,总厚度为 4 000~7 000m 左右。震旦系发育良好,分布稳定。寒武系、奥陶系、志留系属地台型沉积,广泛分布,中上寒武统、奥陶系和志留系受加里东运动影响均遭受剥蚀。泥盆系与石炭系,上扬子古陆呈持续的隆升状态,导致研究区缺乏泥盆系、石炭系。二叠系与中下三叠统为浅海台地沉积,沉降沉积范围广,全区普遍发育。中三叠世末期,早印支运动开始活跃,上扬子地区整体性抬升,大规模海侵从此结束,并遭受不同程度的剥蚀。上三叠统是一套海陆过渡沉积,四川盆地由浅海台地逐渐转变为内陆湖盆,上三叠统厚度可达 3 000m。侏罗纪以后为陆相沉积期,主要发育一套厚为 2 000~5 000m 碎屑岩。侏罗纪湖盆范围较大,到白垩系、古近系和新近系沉积时期湖盆范围逐渐收缩,最后经喜马拉雅运动定型。第四系为冲积、洪积层,由疏松泥沙及砾岩组成,一般厚为 0~100m。

研究区海相层系发育受构造影响较大,由于庞大的乐山—龙女寺古隆起的存在,研究区在古生代主要表现为川西、川中隆起,地层缺失较多;川东南拗陷,地层连续,厚度较大。而在中新生代构造运动

后沉积反向,川西转为拗陷,地层连续,厚度大;川东南转为抬升,地层厚度较小。沉积过程中共发育 9 个大的不整合面^[28],对研究区油气生成与后期发展影响较大的有以下 5 个:①加里东中期运动形成奥陶系与寒武系间不整合面,在斜坡部位奥陶系的上超沉积特征,奥陶系顶部自东向西被削截,在龙门山前尖灭;②加里东晚期运动形成泥盆系与志留系间不整合面,在蜀南泥盆系缺失,志留系顶部普遍遭受剥蚀,威远地区仅残留下志留统;③海西运动旋回早期形成下二叠统与前二叠系之间的区域性不整合面,经过加里东运动,上扬子古陆和康滇古陆拼贴为一体,碰撞隆升导致蜀南地区广泛缺失泥盆系、石炭系,下二叠统主要超覆于志留系或奥陶系之上;④东吴运动使扬子准地台在经历了早二叠世海盆沉积以后再次抬升成陆,并形成上二叠统一下二叠统间平行不整合面;⑤印支晚期运动形成侏罗系与三叠系间不整合面,此后盆地已进入克拉通内拗陷发展过程。

2.4 油气地质条件发育特征

构造作用对四川盆地海相油气分布的控制作用主要有以下 4 点:①地裂运动形成的拉张槽控制油气原生地质条件(储集层和烃源岩)的发育;②通过构造沉降造成烃源岩层的深埋热演化,并保持长期的生烃状态;③古隆起控制油气运聚和古油气藏的分布;④盆山耦合造成了古油藏的调整改造与油裂解气晚期成藏,对油气保存条件和油气分布有重要的影响。研究区受构造演化与沉积演化影响,主要发育了上震旦统灯影组、下寒武统、志留系龙马溪组、下二叠统、下三叠统嘉陵江组、中三叠统雷口坡组、上三叠统须家河组等多套烃源岩,并在震旦系、奥陶系、二叠系、三叠系和侏罗系发育了以碳酸盐岩和砂岩为主的多套储集层^[27]。

兴凯地裂运动形成的稳定大陆边缘拉张槽控制了烃源岩与储集层的发育,对下组合成烃条件有重要作用。兴凯运动拉张孕育阶段,上震旦统灯影组发生隆升和剥蚀作用,致使拉张槽内及其周缘灯影组残留厚度较薄,同时发生较强的风化壳喀斯特作用导致灯影组优质储层的形成。沧浪铺组和龙王庙组沉积期,拉张作用已非常微弱,拉张槽已基本填平,但可能仍有一定的沉降作用和古地形地貌差,对沉积相的分布仍有一定的影响,进而影响优质储层的发育^[29-30]。兴凯运动拉张高潮阶段沉降作用最大,致使水体较深,沉积的筇竹寺组应是最好的烃源岩。四川盆地寒武统烃源岩厚度和平均生气强度

平面展布与拉张槽范围重叠,充分揭示拉张槽的发育对下寒武统优质烃源岩分布的控制作用。

峨眉地裂运动形成的拗拉槽群为良好的生、储组合发育提供裂谷型的拉张构造背景,在其台缘带上,处于大型礁滩发育最有利地带,其有机质充分转化和白云岩化作用为川东北天然气生成与保存提供了物理条件^[31]。

3 古老烃源生烃演化过程及原始油气聚集

古老烃源岩生烃演化多受构造演化的影响,沉降埋藏与构造抬升期次决定了烃源岩生烃和停滞时期。

3.1 古老烃源生烃演化过程及对构造演化的响应

蜀南海相层系发育了下寒武统筇竹寺组(ϵ_1q)、上奥陶统五峰组(O_3w)、下志留统龙马溪组(S_1l)、中二叠统栖霞组和茅口组(P_2y)等丰富的烃源物质。下寒武统筇竹寺组烃源岩是该区古老海相

烃源岩的典型代表,其生烃演化过程对构造沉积演化具有很好的响应。

本文研究以蜀南地区构造沉积体系为依据建立其地史与热史,通过生烃模拟实验标定生油、生气和油裂解气的生烃动力学参数,结合地热史与生烃动力学参数开展筇竹寺组烃源岩生烃史模拟。从模拟结果来看,寒武系筇竹寺组烃源岩存在3次生烃期和2次生烃停滞期(图4)。蜀南地区在经历了厚层沉积阶段之后,于加里东期和海西期发生沉积埋藏和抬升剥蚀事件,剥蚀厚度达800~2 000m^[32],直接导致下寒武统烃源岩在加里东期和海西期出现了2次生烃和2次停滞,生烃停滞拓宽了液态烃生烃窗时间范围;印支期和燕山期期间虽发生几次抬升剥蚀,但是仍保持着巨厚沉积,上覆地层厚度达3 000~5 000m,下寒武统烃源岩生烃阶段并未出现停滞现象,燕山早期(172Ma)下寒武统烃源岩达到过成熟阶段,生成大量的天然气资源,为天然气藏的形成提供了丰富的气源。

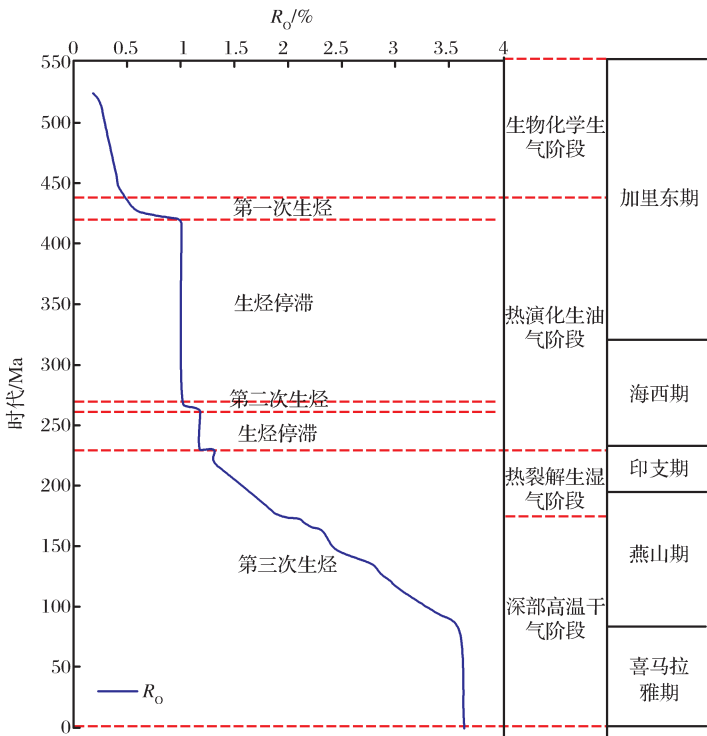


图 4 四川盆地蜀南地区下寒武统烃源岩的生烃演化阶段与构造演化的匹配关系
Fig. 4 The matching relation of the hydrocarbon evolution stage and tectonic evolution of the lower Cambrian source rocks of the Shunan area

筇竹寺组烃源岩在整个生烃演化过程中,其液态窗与气态窗 2 个阶段的演化过程为大气田的发现奠定了充足的物质基础,具体包括以下 4 个方面:①

加里东期地层快速沉积埋藏,沉积层厚达3 000m左右,使得下寒武统筇竹寺组烃源岩在423.5Ma进入生油门限,(兴凯地裂运动)加里东末期的构造运动

引起地层大规模抬升剥蚀,剥蚀厚度达1 200m左右,并造成泥盆系、石炭系的沉积间断,这一构造沉积演化过程改变了下寒武统烃源岩生烃环境,导致筇竹寺组出现生烃停滞。②海西期沉积了1 400~1 500m厚的二叠系,筇竹寺组烃源岩在海西末期(229Ma)再次进入生烃门限;地层遭受抬升剥蚀(云南运动和峨眉地裂运动的出现),剥蚀厚度为1 000m左右,出现生烃停滞;从生烃阶段和生烃史看,距今423.5~229Ma,下寒武统烃源岩热演化程度 R_o 值处于0.5%~1.2%之间,长期处于液态窗范围内,生成了大量的石油。③印支期虽然发生洋陆转化并抬升剥蚀,但同时保持了快速沉积埋藏,沉积了厚层的须家河组,并未影响生烃进程,使得下寒武统烃源岩再次进入生烃阶段。④燕山期主要沉积侏罗系和白垩系2套地层,这个时期是四川盆地一次重要的整体沉降期,受褶皱回返作用发生了几次抬升剥蚀,下白垩统局部剥蚀,但并未影响生烃演化进程。现今阶段,四川盆地蜀南地区下寒武统海相烃源岩达到过成熟阶段。

3.2 古构造、古隆起与古油藏的形成

从油裂解气角度来看,古构造、古隆起是油气聚集的有利指向区,在沉积埋藏史演化进程中,影响最深、最广地是加里东期、印支期区域性隆起,其展布、规模与演变时间都是空前的:加里东期古隆起展布

面积几乎覆盖全盆地,印支期古隆起亦达盆地面积的3/4,控制油气运聚和古油气藏的分布。古隆起对四川盆地海相天然气储量分布的控制作用较大,目前其上共获天然气探明地质储量为 $6\,871.6\times 10^8\text{m}^3$,占四川盆地总探明储量的26.4%。其中,在乐山—龙女寺加里东古隆起上已发现了2个气田——威远灯影组气田和安岳龙王庙组气田,目前探明储量为 $4\,771.6\times 10^8\text{m}^3$ 。开江古隆起上已发现石炭系气田13个,探明储量约为 $1\,600\times 10^8\text{m}^3$ 。泸州古隆起上已发现气田35个,含气构造17个,但都为下二叠统和下三叠统致密碳酸盐岩系裂缝型储层,没有发现孔隙性的储层,总计获天然气探明储量约为 $560\times 10^8\text{m}^3$ [29]。

从古老烃源生烃演化过程来看,423.5~229Ma筇竹寺组烃源岩处于液态烃生烃阶段,即志留纪—三叠纪期间,筇竹寺组处于生油阶段。加里东期形成沉积—剥蚀型乐山—龙女寺古隆起,海西—印支期形成继承性沉积型泸州古隆起与开江古隆起,成为了石油聚集的有利指向区,并形成古油藏(图5)。如乐山—龙女寺古隆起经历了多期构造运动,总体呈继承性发育,与四川盆地下寒武统烃源岩在志留纪和晚二叠世2个重要生烃时期相匹配,古隆起为区域性迁移指向区,形成古油藏,轴线不断由西北向东南迁移,并最终在喜马拉雅运动后定型,控制着油气成藏过程[33-34]。

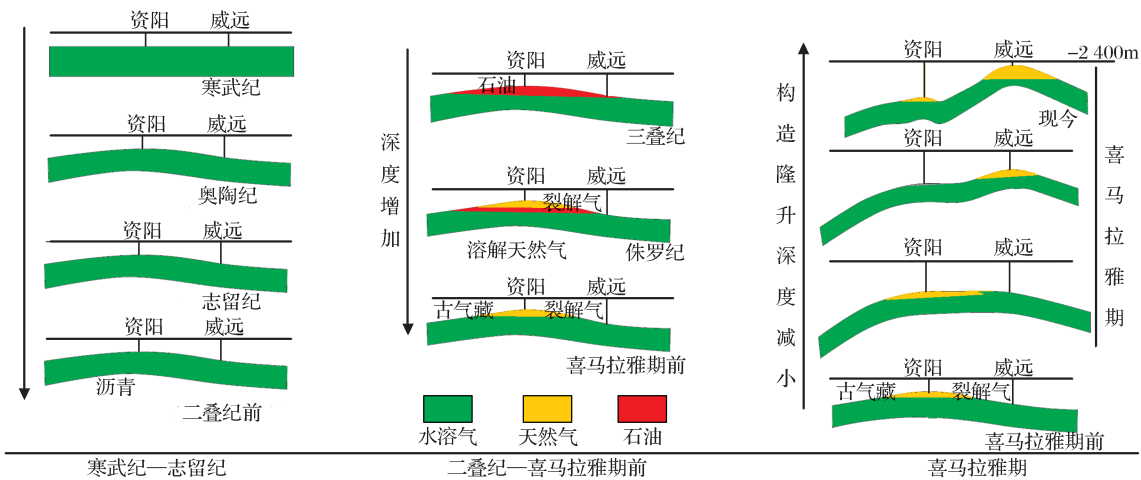


图5 四川盆地资阳—威远地区震旦系天然气成藏过程模式[34]

Fig. 5 Ziyang-Weiyuan area Sinian gas accumulation process model of Sichuan Basin[34]

3.3 原始油气的聚集与保存

蜀南地区发育的多套生储盖组合,为油气的生成、聚集和保存提供了条件[35],烃源岩主要发育寒武系、奥陶系、志留系、二叠系和三叠系等多套烃源岩;储集层主要为寒武系龙王庙组,志留系石牛栏组

与韩家店组,二叠系长兴组、阳新统和三叠系须家河组、嘉陵江组、飞仙关组等多套储集层;下古生界主要发育有泥质岩类与膏岩类盖层,区域性泥质岩类盖层为上奥陶统、下志留统泥岩,膏质类盖层则主要发育在中下寒武统。

加里东期、海西期的沉积演化导致烃源岩进入液态窗,加里东、海西、印支期的古隆起则聚集了大量的石油。古隆起抬升之后,处于克拉通内部的蜀南地区构造运动相对平静,直到晚期燕山期侏罗系与白垩系的大规模沉积埋藏,一方面造成古老烃源高演化阶段生成少量高温裂解气,另一方面造成了古油藏内原油的大规模裂解并最终形成天然气藏。

4 原油裂解与天然气晚期成藏

油裂解生气是海相烃源岩成气的重要途径,1t原油全部裂解可生成天然气 664~740m³。可以认为,古油藏原油是优质的气源物质基础。烃源岩生成的油主要有 3 种赋存形式:源内分散状液态烃、源外分散状液态烃和源外富集型液态烃。原油裂解气为古老海相层系天然气晚期成藏提供气源,需要经历 2 个必备的演化过程,其一是在液态烃生烃阶段生成大量石油,并分散在烃源岩内或运聚形成古油藏;二是晚期地质演化过程为源岩或古油藏达到较高的温度,为原油提供裂解成气的热力学条件^[36]。

本文基于蜀南构造演化史和正常原油裂解参数,开展不同赋存状态的原油裂解条件及过程研究,揭示了源内和源外原油裂解生烃演化与构造匹配关系,总结了油裂解气的晚期聚集成藏特征,为海相叠合盆地古生界天然气勘探提供了理论依据。

4.1 原油裂解的生烃模拟过程

不同地质条件导致地层温度、压力等因素存在差异,而且不同介质条件下甲烷的生成活化能分布也有差异^[36],原油发生裂解的过程具有很大的差异^[1](表 2)。

本文选择四川盆地古生界与中生界多块源岩样品进行抽提,对抽提物质进行原油裂解实验,建立源内的原油裂解动力学参数体系,并结合地史与热史演化过程,模拟蜀南地区热史条件下源内的原油裂解演化过程。同时,对蜀南地区及川东北地区的油藏内的原油样品进行原油裂解实验,建立油藏内的原油裂解动力学参数体系,并结合地史与热史演化过程,模拟蜀南地热史条件下油藏内的原油裂解演化过程。通过实验模拟结果来看(图6),源内热裂

影响因素		实验结果
压力/MPa	大于 40	抑制裂解速度
	小于 40	促进裂解速度
地层水	有水体系非氧化盐类液体	一定促进作用(氧化还原或歧化反应,改变裂解的自由基链反应) 气体产率一定程度的增加
黏土矿物、碳酸盐	黏土催化剂	催化性能
	碳酸盐	抑制作用
TSR(硫酸盐热化学还原反应) MgSO ₄ 和 CaSO ₄ ;Na ₂ SO ₄ 和 K ₂ SO ₄		强烈促进裂解,产气量是加水或者无水产量的 2 倍,变化不明显

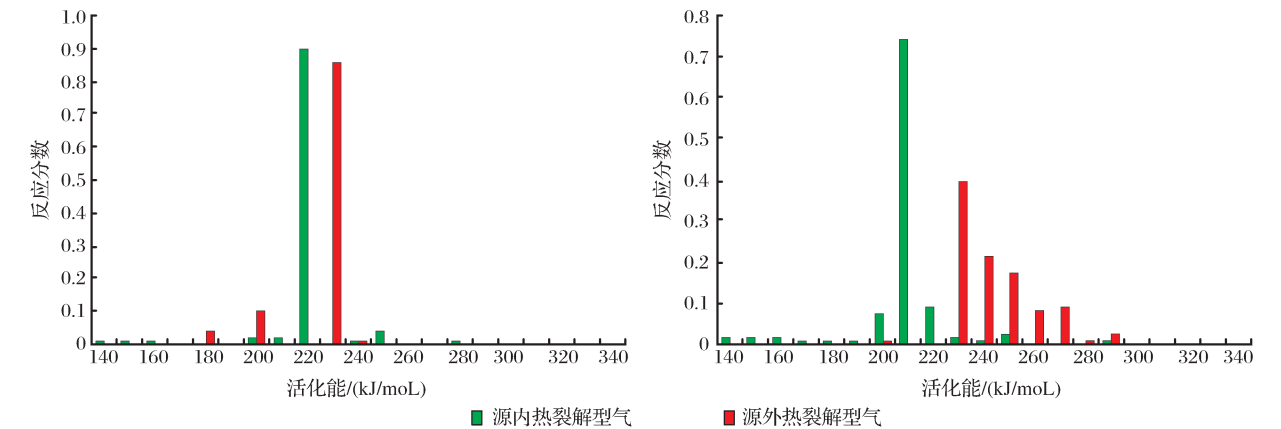


图 6 四川盆地古生界(a)、中生界(b)烃源岩源内与源外裂解气的动力学参数差别

Fig. 6 The difference between the inner and outer oil-cracking gas kinetic parameters of the Sichuan Basin Paleozoic(a) and Mesozoic(b) source rocks

解型气活化能分布相对较低,主体分布在 210~220kJ/mol 之间,而源外热裂解型气的活化能相对要高,以 230kJ/mol 为主。反映源外油裂解所需要的地质条件要更为严格,源外石油在不考虑扩散逃逸情况下将更难以裂解,为古生界原油裂解气藏的潜力评价提供理论支撑。

4.2 源内原油裂解生烃演化与构造演化匹配

通过源岩抽提物进行的源内油裂解演化过程分析表明,下寒武统筇竹寺组烃源岩存在 3 次原油裂解过程(图 7)。蜀南地区下寒武统筇竹寺组烃源岩内油裂解气生成过程主要表现为早期生烃、早期油裂解气、生烃停滞、中期生烃、中期油裂解气、生烃停滞和晚期油裂解气。加里东早期、中期沉积巨厚的寒武系、奥陶系和志留系,筇竹寺组烃源岩在距今 423.5Ma 进入生油、生气门限,源内油裂解时间滞后于生油、生气门限时间,后期受加里东期构造抬升剥蚀影响,原油裂解出现停滞,同时上部古油藏遭到破坏。在距今 299Ma 的早海西期,蜀南地区处于稳定沉积期,沉积 400~500m 厚的下二叠统,源内原油再次发生裂解生气;而由于受云南运动和峨眉地裂运动的影响,下二叠统遭受抬升剥蚀,油裂解气出现停滞。印支期盆地发生快速沉积埋藏,下寒武统筇竹寺组烃源岩再次进入油裂解气阶段。综合下寒武统筇竹寺组烃源岩内油裂解气史看,加里东期和早海西期内的油裂解气只占油裂解气总量的很小一部分,大部分油裂解气发生在距今 229~161Ma 期间,具有中晚期生气的特点。

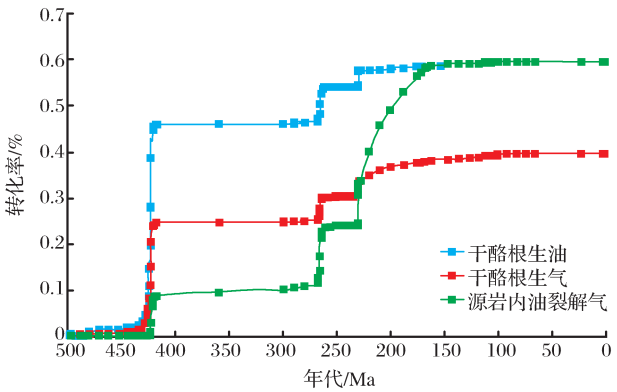


图 7 四川盆地蜀南地区下寒武统烃源岩的生烃演化过程
Fig. 7 Cambrian source rocks of hydrocarbon generation evolution under the Shunan area

4.3 源外原油裂解生烃与构造演化时间匹配

以寒武系龙王庙组为目标层位,通过原油裂解的生烃模拟研究结果显示,龙王庙组古油藏内原油存在一次油裂解生气过程,但持续时间较长,主要发

生在 228~112Ma 期间(图 8,图 9)。
原油裂解的主要地质温度范围约为 130~220℃(表 3),考虑到蜀南地区油气地质条件,本文设定原油裂解初始温度为 146℃。由于加里东期、海西期、印支期抬升剥蚀时,寒武系龙王庙组古油藏内没有达到裂解温度 146℃(采用本文动力学参数地质外推得到的油裂解气温度)(图 9),拖延了古油藏内油裂解气的时间,导致古油藏内只存在一次油裂解气阶段。而源岩内油裂解气存在 3 次,最晚一次的时间在 230Ma 左右(图 9)。源岩内油裂解气与源外油裂解气发生的时间存在 50Ma 的时间差,以沥青质 R_o 评价结果来看,原油的热演化过程比源内有机质热演化要迟缓(图 8)。

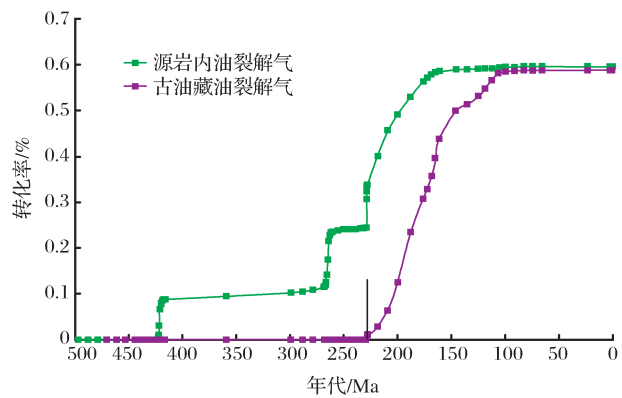


图 8 蜀南地区古油藏油裂解和源内油裂解成气史分析
Fig. 8 The oil-gas cracking history of the ancient reservoirs oil and sources oil of the Shunan area

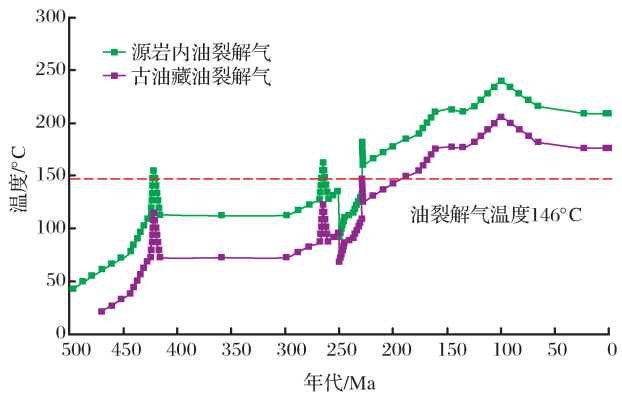


图 9 蜀南地区古油藏油裂解和源内油裂解温度演化史分析
Fig. 9 The pyrolysis temperature history of the ancient reservoirs oil and sources oil of the Shunan area

4.4 油裂解气的晚期聚集成藏

从蜀南地区凹陷区—斜坡区—古隆起区原油裂解成气的演化过程,以及油裂解气藏的成藏和最终定型的过程来看,寒武系烃源岩依次在海西期、印支

期及燕山期进入生油高峰期。寒武系筇竹寺组古老烃源岩生排烃并进行一次成藏后,液态石油被寒武系与震旦系储集层就近捕获成藏,受海西期、印支期构造抬升影响,生烃演化经历了停滞期。由于上扬子克拉通基底的存在使得蜀南地区属于整体性升降,烃源岩与古油藏均处于相对稳定存在的状态,对古油藏保存有利。而海西期、印支期、燕山期构造旋回之后都伴随构造沉降与沉积埋藏,并激发烃源岩再次演化生烃,然而只有印支期后三叠系埋藏深度足够大,并激发了龙王庙古油藏内原油的裂解成气。

二叠纪—三叠纪,川(东)南地区经历了从稳定向活跃的转变。稳定期志留系内部层系下生上储形成原生古油藏,断裂强烈活动期,古油藏调整并在奥陶系—志留系及二叠系形成次生油藏^[35]。三叠纪—侏罗纪,四川盆地沉降深埋,沉积了巨厚的沉积地层,深埋高温作用使得四川盆地内海相地层中一切能生成天然气的有机质均充分而完全的转化成天

然气,致使有机质成气率极高^[34]。

三叠系分为上三叠统、中三叠统、下三叠统,中下三叠统主要是海相碳酸盐岩,上三叠统主要是海陆过渡相的碎屑岩沉积,在盆地中部及南部一般埋深500~2 000m,受江南古陆持续向西北方向扩展影响,中三叠世以后四川盆地东部抬起,海盆环境西深东浅,晚三叠世海盆再次下沉并接受沉积。侏罗系分为中下侏罗统自流井群,中侏罗统沙溪庙组、遂宁组,上侏罗统蓬莱镇组,全盆地发育,多埋藏地腹,埋藏深度约1 000~3 000m,但在中侏罗世晚期(遂宁期)环境又趋安定,主要沉积的是棕红色泥岩、砂质泥岩夹粉砂岩薄层,微细层理十分发育。巨厚的沉积地层使得在侏罗纪—白垩纪,古老海相层系油藏内古温度普遍在120~215℃之间,导致古油藏处于原油裂解温度范围之内并发生强烈裂解成气,并产生异常高压。燕山—喜马拉雅运动使得四川盆地整体隆升,导致天然气藏晚期调整并最终成藏^[35]。

表 3 不同地区原油裂解起始温度
Table 3 The starting temperature of Oil cracking in different areas

地区	温度范围/℃	地区	温度范围/℃	地区	温度范围/℃
西加拿大盆地	90~120	马哈坎三角洲	140	意大利	150
阿尔及利亚	130	尼日尔	150	北海	165~175
阿拉巴马州	130~140	加利福尼亚	130~150	威利斯顿	182

5 研究思路与意义

5.1 研究思路

早期干酪根热解生成的残留在生油岩中或进入油气藏中的原油,在持续的热应力作用下会继续裂解生成湿气,而随着热演化程度的加深,湿气会进一步发生二次裂解生成干气,这种由原油发生裂解生成的天然气,就是所谓的原油裂解气。由于烃源岩生成油的赋存形式与温压环境不同,导致油裂解成气的热演化条件存在差异。构造演化过程与原油裂解过程的耦合关系与耦合程度,影响了晚期裂解气的保存和成藏。要分析该类晚期油裂解气成藏的分布富集规律,需要将现今气藏与古油藏裂解研究相结合,将定性 with 定量相结合,建立古老海相烃源层系晚期油裂解气成藏研究思路,以探讨叠合盆地构造演化对沉积埋藏、生烃演化、原油裂解和晚期成藏等的控制作用。该研究思路包括如下6个方面:

(1)构建区域性构造演化恢复模型,通过构造演化过程与沉积响应特征,分析油气形成的基本生油

岩、储集层、盖层等发育与展布规律。借助区域性二维地震与局部精细三维地震资料,建立油气区地质框架模型,并采用平衡剖面恢复技术反演各地质历史时期构造演化特征,分析烃源岩、储集岩、盖层等基本油气地质条件发育规律,并详细评价古生界海相叠合盆地的烃源层系。

(2)构建地史与热史数据模型,确定生烃热演化条件。结合钻井分层、测录井资料,通过分析构造演化、沉积埋藏、抬升剥蚀等作用下沉积埋藏厚度与剥蚀厚度变化,研究古地温梯度变化特征,确定生烃热演化的地史与热史条件,以及生烃门限温度与门限深度。

(3)开展烃源层系生油、生气及油裂解气等生烃演化分析,包括烃源岩有机质热演化、源内与源外液态烃的热裂解演化分析,通过生烃模拟实验与生烃动力学方法确定各类生烃演化阶段的动力学参数。结合地史与热史数据模型外推特定地热史条件下的生烃演化过程,确定生油与生气的阶段性变化。

(4)开展成藏组合的时空配置关系与古油藏形

成的可能性分析,估测古油藏圈闭面积大小、古油柱高度及古油藏的规模,通过确定古油藏特征及古油水界面,评价古油藏含油潜力及调整改造的油藏生命史。

(5)分析古油藏与现今油裂解气藏的成生关系,研究其气源条件、油气藏继承性、油气藏位置变迁规律。分析古油藏油藏类型、古油藏圈闭开放度与天然气藏成藏效应等,建立最优化晚期油裂解气成藏的模式。

(6)分析识别古油藏(礁沥青)的存在与意义,建立同类古油藏追踪与识别的技术体系,以及古油藏流体性质的识别方法,扩大油裂解气藏勘探的场面。

5.2 研究意义

从现今勘探实践来看,古油藏对油裂解气藏的勘探具有一定的指示意义,而且相当大比例的油裂解气藏与古油藏具有成因联系。原油裂解气为古老海相层系天然气晚期成藏提供气源,需要经历2个必备的演化过程,其一是在液态烃生烃阶段生成大量石油,并分散在烃源岩内或运聚形成古油藏;二是晚期地质演化过程为源岩或古油藏达到较高的温度,为原油提供裂解成气的热力学条件。

中国中西部在晚三叠世前,沉积发育多套海相地层,其中包括震旦系、寒武系、奥陶系、志留系和二叠系等多套古生界海相烃源层系。同时,中西部盆地构造演化历史时期长,能够满足古老烃源多次生烃的地区较多,如四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等,这一演化特征为早期古油藏的成藏与晚期油裂解气藏的成藏奠定了基础。前文述及我国现阶段已确定50余处古油藏,在我国中西部地区分布广泛。本文分析提出的古构造演化特征、古老烃源生烃演化特征、古油藏成藏特征,以及与现今气藏的分布富集规律等进行耦合分析,建立古油藏与现今气藏沟通桥梁的研究方案,一旦确定已发现古油藏与现今天然气的规律,可通过古油藏研究扩大油裂解气勘探的场面,对相关研究区油裂解气藏勘探意义深远。

6 结论

通过对构造演化期次、沉积响应特征的分析,研究了古老烃源岩生烃过程、古油藏聚集、晚期油裂解成气等对构造演化的匹配关系,得出如下结论:

(1)海相叠合盆地的构造沉积演化控制了油气基础地质条件的发育,如兴凯运动拉张高潮阶段,水

体较深,沉降作用最大,沉积了筇竹寺组优质烃源岩;中晚奥陶世—志留纪,中扬子海槽关闭与江南古陆隆升挤压,使得蜀南地区在志留纪发育深水陆棚环境,沉积了志留系龙马溪组优质源岩。总体而言,受构造演化与沉积演化影响,研究区主要发育了上震旦统灯影组、下寒武统筇竹寺组、志留系龙马溪组、下二叠统、下三叠统嘉陵江组、中三叠统雷口坡组 and 上三叠统须家河组等多套烃源岩。

(2)构造沉积演化控制了古老烃源生烃过程,由于构造沉积演化强度的不同而呈现出强弱交替的生烃特征。寒武系筇竹寺组烃源岩存在3次生烃期和2次生烃停滞期,其中加里东期和海西期发生的沉积埋藏和抬升剥蚀事件,导致筇竹寺组烃源岩在加里东期和海西期出现了2次生烃和2次停滞,印支期和燕山期上覆巨厚沉积地层使得筇竹寺组烃源岩持续生烃,并在燕山早期(172Ma)下寒武统烃源岩达到过成熟阶段,生成大量的天然气资源。

(3)构造沉积演化控制了古构造发育、古油藏聚集与保存。从古老烃源生烃演化过程来看,423.5~229Ma筇竹寺组烃源岩处于液态烃生烃阶段,即志留纪—三叠纪,筇竹寺组处于生油阶段。加里东期形成沉积—剥蚀型乐山—龙女寺古隆起,海西—印支期形成继承性沉积型泸州古隆起与开江古隆起,成为了石油聚集的有利指向区,并形成古油藏。

(4)构造沉积演化控制了古油藏的原油裂解与晚期聚集成藏。寒武系烃源岩依次在海西期、印支期及燕山期进入生油高峰期。寒武系筇竹寺组古老烃源岩生排烃并进行一次成藏后,受海西、印支期构造抬升影响,生烃演化经历了停滞期。由于上扬子克拉通基底的存在使得蜀南地区属于整体性升降,烃源岩与古油藏均处于相对稳定存在的状态,对古油藏保存有利。而海西期、印支期、燕山期构造旋回之后都伴随构造沉降与沉积埋藏,并激发烃源岩再次演化生烃,然而只有印支期后三叠系埋藏深度足够大,并激发了龙王庙古油藏内原油的裂解成气。

(5)建立了古老海相烃源层系晚期油裂解气成藏研究的6步工作思路:①构建区域性构造演化恢复模型,分析构造演化与沉积响应下的油气基本地质条件的发育与展布规律;②构建地史与热史数据模型,确定生烃热演化条件;③开展烃源层系生油、生气及油裂解气等生烃演化分析;④开展成藏组合的时空配置关系与古油藏形成的可能性分析,估测古油藏圈闭面积大小、古油柱高度及古油藏的规模;

⑤分析古油藏与现今油裂解气藏的成因关系,研究其气源条件、油气藏继承性、油气藏位置变迁规律;
⑥建立同类古油藏追踪与识别的技术体系,以及古油藏流体性质的识别方法,扩大油裂解气藏勘探的场面。

参考文献(References):

- [1] Li Jun, Wu Xiaodong, Wang Dongliang, *et al.* The genetic feature and reservoir forming model of cracked gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 520-528. [李君, 吴晓东, 王东良, 等. 裂解气成因特征及成藏模式探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 520-528.]
- [2] Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Zhang Shuichang, *et al.* The oil cracked gas is an important way for marine gas kitchen high-efficiency gas[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2006, 51(5): 589-595. [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.]
- [3] Ma Wenxin, Liu Shugen, Huang Wenming. Progresses on primary study of the paleo oil reservoirs and its control on natural gas accumulation[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(4): 89-99. [马文辛, 刘树根, 黄文明. 古油藏及其对天然气藏的控制作用研究进展[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(4): 89-99.]
- [4] Ministry of Land and Resources. 2013 National Oil and Gas Mineral Reserves Bulletin[R]. Beijing: Ministry of Land and Resources, 2014. [国土资源部. 2013 年全国油气矿产储量通报[R]. 北京: 国土资源部, 2014.]
- [5] He Xunyun, Wang Zhaoming, He Xiaosu, *et al.* Estimation of oil cracked gas resources in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(2): 182-186. [贺训云, 王招明, 贺晓苏, 等. 塔里木盆地原油裂解气资源估算[J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(2): 182-186.]
- [6] Zhao Mengjun, Lu Shuangfang. Natural gas from secondary cracking of crude oil: An important pattern of gas generation[J]. *Geological Review*, 2000, 46(6): 645-650. [赵孟军, 卢双舫. 原油二次裂解气——天然气重要的生成途径[J]. *地质论评*, 2000, 46(6): 645-650.]
- [7] Lu Shuangfang, Xue Haitao, Zhong Ningning. The chemical kinetic study of the oil preservation threshold[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(6): 1-3. [卢双舫, 薛海涛, 钟宁宁. 石油保存下限的化学动力学研究[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(6): 1-3.]
- [8] Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, *et al.* Methodology and results of dynamic and thermodynamic simulation for oil-cracked gas pool of Puguang[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(2): 175-185. [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.]
- [9] Zhao Mengjun, Zhang Shuichang, Liao Zhiqin. The cracking gas from crude oil and its significance in gas exploration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(4): 47-56. [赵孟军, 张水昌, 廖志勤. 原油裂解气在天然气勘探中的意义[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(4): 47-56.]
- [10] Xu Yongchang. *Natural Gas Origin Theory and Application* [M]. Beijing: Science Press, 1994 [徐永昌. *天然气成因理论及应用* [M]. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [11] Chen Shijia, Fu Xiaowen, Ma Lining, *et al.* Genetic identification method of kerogen cracked gases and oil-cracked gases[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(4): 364-366, 371. [陈世加, 付晓文, 马力宁, 等. 干酪根裂解气和原油裂解气的成因判别方法[J]. *石油实验地质*, 2002, 24(4): 364-366, 371.]
- [12] Wang Yunpeng, Tian Jing. Review of oil cracked gas formation, identification and migration[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(2): 235-244. [王云鹏, 田静. 原油裂解气的形成、鉴别与运移研究综述[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(2): 235-244.]
- [13] Tang Jiguang, Mei Lianfu, Shen Chuanbo, *et al.* Response of hydrocarbon fluid source to tectonic deformation in multicycle superimposed basin: Example from Palaeozoic and Mesozoic marine strata in Yangtze Block[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(3): 526-534. [汤济广, 梅廉夫, 沈传波, 等. 多旋回叠合盆地烃流体源与构造变形响应: 以扬子地块中中生界海相为例[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(3): 526-534.]
- [14] Guo Liguang, Xiao Xianming, Tian Hui. Laboratory studies of differences between oil-derived and kerogen maturation gases[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(4): 428-436. [郭利果, 肖贤明, 田辉. 原油裂解气与干酪根裂解气差异实验研究[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(4): 428-436.]
- [15] Hu Shouzhong, Fu Xiaowen, Wang Tingdong, *et al.* Bitumen-sealed belt in reservoir and its implication to petroleum exploration[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(1): 99-103. [胡守志, 付晓文, 王庭栋, 等. 储层中的沥青沉淀带及其对油气勘探的意义[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(1): 99-103.]
- [16] Tian H, Xiao X M, Wilkins Ronald W T, *et al.* New insights to the volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs: Implications for the in-situ accumulation of gas cracked from oils[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(2): 181-200.
- [17] Shi Jixi, Yu Xiaoying, Wang Huayun. The role of ancient oil reservoirs, bitumens and bitumen inclusions in metallogenetic research[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1995, 15(2): 117-122. [施继锡, 余孝颖, 王华云. 古油藏、沥青及沥青包裹体在金属成矿研究中的应用[J]. *矿物学报*, 1995, 15(2): 117-122.]
- [18] Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Zhang Shuichang, *et al.* Deep marine oil and gas accumulation conditions and enrichment areas in Chinese superimposed basin[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2007, 52(supplement 1): 9-18. [赵文智, 汪泽成, 张水昌, 等. 中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J]. *科*

- 学通报, 2007, 52(增刊 1): 9-18.]
- [19] 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. [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.]
- [20] Li Yanxia, Zhong Ningning. The accumulation process reconstruction to oil cracked gas of carboniferous gas reservoir in the east of Sichuan Basin[C]//Colloquium Papers of The Fourth International Symposium on Oil and Gas Accumulation Mechanism and the Resource Evaluation. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2006: 397-402. [李艳霞, 钟宁宁. 川东石炭系气藏原油裂解型气成藏过程重构[C]//第四届油气成藏机理与资源评价国际学术研讨会论文集. 北京: 中国石油大学(北京), 2006: 397-402.]
- [21] 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(6): 553-575.
- [22] Geological Press. Dictionary of Earth Science[M]. Beijing: Geological Press, 2006. [地质出版社. 地球科学大辞典[M]. 北京: 地质出版社, 2006.]
- [23] Han Shiqing, Wang Shoude, Hu Weiyuan. The discovery of paleopool in Majiang and its geological significance[J]. Oil and gas Geology, 1982, 3(4): 315-326. [韩世庆, 王守德, 胡惟元. 黔东南江古油藏的发现及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 1982, 3(4): 315-326.]
- [24] Wang Feiyu, Pang Xiongqi, Zeng Huasen, *et al.* Paleo-oil leg recognition and its application to petroleum exploration[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 26(5): 565-569. [王飞宇, 庞雄奇, 曾花森, 等. 古油层识别技术及其在石油勘探中的应用[J]. 新疆石油地质, 2006, 26(5): 565-569.]
- [25] Chen Anding, Liu Deliang. Geochemical characteristics and geological condition of Cambrian oil-cracking gas in paleo reservoir[J]. Marine Petroleum Geology, 2006, 11(2): 41-46. [陈安定, 刘德良, 寒武系烃源古油藏油裂解气特征及成藏条件[J]. 海相油气地质, 2006, 11(2): 41-46.]
- [26] Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Zhang Lin, *et al.* The Tectonic Sequence and Natural Gas Exploration of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Press, 2002. [汪泽成, 赵文智, 张林, 等. 四川盆地构造层序与天然气勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2002.]
- [27] The Writing Group for Petroleum Geology of Sichuan Oil and Gas Region. Petroleum Geology of China 10: Sichuan Oil and Gas Region[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. [四川油气区石油地质志编写组. 四川油气区. 中国石油地质志卷 10: 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.]
- [28] He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, *et al.* Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 46(3): 589-606. [何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589-606.]
- [29] Liu Shugen, Sun Wei, Luo Zhili, *et al.* Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 40(5): 511-520. [刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(5): 511-520.]
- [30] Sun Wei, Luo Zhili, Liu Shugen, *et al.* Characteristics of Xingkai taphrogenesis in south China and the effects on oil and gas[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(5): 1-8. [孙玮, 罗志立, 刘树根, 等. 华南古板块兴凯地裂运动特征及对油气影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 1-8.]
- [31] Luo Zhili. Guidance function of Emei taphrogenesis viewpoint on discovery of large gas province in northeastern Sichuan[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(4): 401-407. [罗志立. 峨眉地裂运动观对川东北大气区发现的指引作用[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(4): 401-407.]
- [32] Zhu Chuangqing, Xu Ming, Shan Jingnan, *et al.* Quantifying the denudations of major tectonic events in Sichuan Basin: Constrained by the paleothermal records[J]. China Geology, 2009, 36(6): 1268-1277. [朱传庆, 徐明, 单竞男, 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.]
- [33] Jiang Hua, Wang Zecheng, Du Hongyu, *et al.* Tectonic evolution of the Leshan-Longnsvsi paleo-uplift and reservoir formation of Neoproterozoic Sinian gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 192-200. [姜华, 汪泽成, 杜宏宇, 等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化与新元古界震旦系天然气成藏[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 192-200.]
- [34] Liu Shugen, Ma Yongsheng, Sun Wei, *et al.* Studying on the differences of Sinian natural gas pools between Weiyuan Gas field and Ziyang gas-brone area, Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 328-337. [刘树根, 马永生, 孙玮, 等. 四川盆地威远气田和资阳含气区震旦系油气成藏差异性研究[J]. 地质学报, 2008, 82(3): 328-337.]
- [35] Huang Wenming, Liu Shugen, Wang Guozhi, *et al.* Geological conditions and gas reservoir features in Lower Paleozoic in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 465-475. [黄文明, 刘树根, 王国芝, 等. 四川盆地古生界油气地质条件及气藏特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 465-475.]
- [36] Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Wang Hongjun, *et al.* Cracking conditions of oils existing in different modes of occurrence and forward and backward inference of gas source rock kitchen of oil cracking type[J]. Geology in China, 2006, 33(5): 952-965. [赵文智, 王兆云, 王红军, 等. 不同赋存状态油裂解条件及油裂解型气源灶的正演和反演研究[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 952-965.]

The Relationship between Tectonic Evolution and Oil-cracking Gas Accumulation in Late Stage for Marine Superimposed Basins

ZHENG Min¹, JIA Cheng-zao¹, WANG Wen-guang², LI Peng¹,
LI Jian-zhong¹, WU Xiao-zhi¹, ZHANG Yong-feng¹

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;*

2. *Geoscience College, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China*)

Abstract: The marine superimposed basins are rich in oil-cracking gas resources. Their hydrocarbon accumulation processes of late stage have experienced early paleo-oil reservoir accumulation period and late oil-cracking gas period, which are apparently controlled by tectonic evolution. Studying the relationship between tectonic evolution and oil-cracking gas accumulation of late stage has great significance to guide the exploration of oil-cracking gas reservoirs. Taking the relationship between tectonic evolution and oil-cracking gas accumulation of late stage for the Shunan area in the Sichuan Basin as an example, through the analysis on the responds of structural evolution to deposition, the relationship between hydrocarbon generation process of ancient source rocks, initial hydrocarbon accumulation, oil cracking and gas accumulation of late stage was studied. The source rocks of the Cambrian Qiongzhusi Formation in the Shunan area experienced three periods of hydrocarbon generation and two lag periods of hydrocarbon generation. During the large-scale tectonic uplift and thick erosion event in the periods of the Caledonian and the Hercynian, source rocks of the Qiongzhusi Formation had experienced two periods of hydrocarbon generation and two lag periods of hydrocarbon generation. The overlying super-thick strata deposited during the Indosinian and Yanshan periods made the source rocks of the Qiongzhusi Formation continuously generate oil and gas. The crude oil in the paleo-reservoir of the Longwangmiao Formation experienced one time of oil-cracking gas process. After the Indo-Chinese Epoch, the burial depth of the Triassic was deep enough to promote the crude oil in the paleo-reservoir of the Longwangmiao Formation to crack into gas. This process continued to the Late Yanshan Period, providing sufficient gas source. The following five conclusions are obtained: (1) The tectonic and depositional evolution of the marine superimposed basins controlled the development of the basic hydrocarbon geological conditions; (2) The tectonic and depositional evolution controlled the hydrocarbon generation process of the ancient source rocks; (3) The tectonic and depositional evolution controlled the development of the paleo-structures, accumulation and preservation of the paleo-oil reservoirs; (4) The tectonic and depositional evolution controlled the crude oil cracking of paleo-reservoirs and their accumulation in the late stage; (5) The research idea on oil-cracking gas accumulation of late stage of ancient marine source rocks was established, which could provide references for the paleo-oil reservoirs of the same type in order to expand the exploration scopes of oil-cracking gas reservoirs.

Key words: Marine superimposed basin; Tectonic evolution; Paleo-oil reservoir; Oil-cracking gas; Hydrocarbon accumulation of late stage; Hydrocarbon generation period; Hydrocarbon generation lag period