

TSM 盆地模拟原理方法与应用

徐旭辉, 朱建辉, 江兴歌, 陈拥峰, 陈迎宾

(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:盆地模拟是建立在油气地质的物理、化学原理上,用计算机软件来实现时空框架下的盆地结构、沉积充填和油气生排运聚的演化,从而给出油气资源潜力评价。TSM 盆地模拟是在“3T-4S-4M”盆地研究工作程式指导下研发的在原型约束下的确定性数值模拟软件系统。系统强调以盆地原型并列与迭加分析为先导,采用确定性的油气响应模拟模块,合理计算埋藏史、热史、生烃史、运聚史等结果,通过结果分析得到合理的油气资源量和分布。通过四川盆地川西坳陷的模拟应用,揭示了晚三叠世以来陆缘拗陷盆地原型到前渊盆地原型的环境变化,以及上三叠统须家河组烃源岩发育、分布、演化特征和动态生排烃过程。模拟结果表明,侏罗纪拗陷原型沉降演化是导致不同段生排烃差异形成的重要原因;中—晚侏罗世最终定型的结构控制了天然气的运聚,形成了孝泉—丰谷、安县—鸭子河—大邑 2 个有利的资源聚集区。模拟结果表达了盆地原型迭加的控烃、控藏过程;表明 TSM 盆地模拟可动态揭示“原型控源、迭加控藏”的油气演化过程,通过与已知的拟合,最终实现预测未知油气的功能,是油气勘探领域重要的技术手段和工具。

关键词:原型控源;迭加控藏;盆地原型;TSM 盆地模拟;川西坳陷;四川盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Principle of TSM basin simulation system and its application

Xu Xuhui, Zhu Jianhui, Jiang Xingge, Chen Yongfeng, Chen Yinbing

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Basin modeling describes the evolutions of basin structure, deposition as well as hydrocarbon generation, migration and accumulation from both time and space aspects by using computer software based on physical and chemical principles of petroleum geology, by which oil and gas resources can be estimated. TSM basin simulation is a deterministic numerical simulation software system constrained by basin prototype and guided by a basin research program of “3T-4S-4M”. The histories of burial, thermal evolution, hydrocarbon generation, migration and accumulation were simulated by using a deterministic hydrocarbon response simulation module and guided by the parallel and superposed analyses of basin prototype, in order to reasonably estimate hydrocarbon resources. This theory was applied in the West Sichuan Depression and revealed that basin prototype changed from continental margin depression to foredeep basin ever since the late Triassic. And the source rock generation, distribution and evolution characteristics as well as the hydrocarbon generation, migration and expulsion of the Upper Triassic Xujiahe Formation were also illustrated. Simulation results showed that the subsidence of depression during Jurassic was an important reason for the difference of hydrocarbon generation and discharge in various formations. The final structure in the middle-late Jurassic epoch controlled natural gas migration and accumulation, and formed two favorable resource gathering areas, Xiaoquan-Fenggu and Anxian-Duck River-Dayi, reflecting the controlling on hydrocarbon generation and accumulation by prototype basin superposition. This application showed that TSM basin simulation reveals dynamically the oil and gas evolution, which means “prototype controlled sources, superposition controlled accumulation”, and predicts undiscovered oil and gas by fitting with the known. TSM software is an important technology and tool in the field of oil and gas exploration.

Key words: prototype controlled sources; superposition controlled accumulation; basin prototype; TSM basin simulation; West Sichuan Depression; Sichuan Basin

收稿日期:2017-09-24;修订日期:2017-11-07。

作者简介:徐旭辉(1964—),博士,教授级高级工程师,从事含油气盆地分析研究。E-mail: xuxh.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“海相碳酸盐岩油气资源潜力评价与勘探新领域”(2017ZX05005-001)和中国石化科技攻关项目“中国石化油气地质综合评价与选区研究”(P15098)联合资助。

1 盆地模拟研究历史

“没有盆地,就没有石油”^[1],发生在含油气盆地内的地质作用和油气响应过程是一个复杂的系统。少量而分散的事实和信息制约着勘探家对盆地油气演化的全面深入的认识,不同世代原型盆地的并列和迭加也导致了盆地风格的千差万别,这些因素常常导致油气勘探发现的“意外”^[2]。实践表明,由于“沧海桑田”,大多地质历史的真实均被动态的演化所改造,甚至消失,为了通过今天静态事实去推演过去,数值模拟是揭示盆地演化、油气生成和运聚动态过程^[3],最终预测油气资源,寻求油气从生成到聚集自然规律的重要手段之一。

从 1970 年代逐步发展起来的盆地模拟技术,通过近 30 年的应用得到了快速发展,逐步形成了对地质历史多个作用过程进行集成数值模拟的一种方法^[4]。到 1990 年代中后期,形成了为数不多的几套商品化程度高、模型丰富的软件系统,如法国石油研究院(IFP)、德国有机地化研究所(IES)及美国 Platte River 公司均推出了各自独具特色的软件产品^[5]。但是,随后的二十多年里,高度集成的商品化软件并不为勘探家们所看好,无论是在地质科学研究,还是在油气勘探评价中,使用较多的模拟模块仅仅是针对烃源岩生烃量的计算方面^[6-8]。究其原因,烃源岩生烃过程可以用确定的化学反应来定量表达,而随后的烃类排出、二次运移、聚集过程,虽然目前已开展大量的物理模拟实验^[9-10],但其结果并不被广大勘探家所接受,原因是受实际地质条件的复杂性、各向异性、不可描述性等的制约,如岩石物性的各向异性(孔隙度、渗透率的不均质)、孔隙结构复杂等特征,所建立的地质模型不足以给出优秀的数学模型。

笔者认为,细致刻画盆地模拟各类参数,如源岩厚度、丰度、类型、地层孔隙度、渗透率,以及地层热导率、比热容等的横向变化,对得到合理的模拟结果固然重要,但是复杂含油气盆地的数值模拟更需要地质人员对盆地形成过程中不同时期盆地原型和迭加关系的认识。只有通过不同世代盆地原型构造热体制分析,才能得到合理的原型结构分析下的烃源岩分布预测,即“原型控源”,才能得到多期迭加作用下烃源岩演化、烃类演化的地质作用和油气响应模型,即“迭加控藏”^[11]。基于此而建立的符合地质家、勘探家头脑中认识的地质模型才能有效地、合理地引导含油气盆地的数值模拟。

地质条件下的真实往往在现实中我们知之甚

少,尤其是地质历史时期经历了多期演化而形成的盆地。勘探家们通常利用少量的、分散的地质现象在脑海中构建地质模式,这种模式通常情况下只能是在忽略一些地质细节而形成,这种综合的地质模式已经能有效地表达含油气盆地的地质作用和油气响应的关系。如中生代以来,中国中西部四川盆地的边缘拗陷盆地原型与前渊盆地原型的迭加组合与中国东部断陷盆地原型与拗陷盆地原型的迭加组合,均发育了不同的烃源岩,形成了不同的生烃演化过程。边缘拗陷盆地原型提供了潮坪—三角洲的沉积环境,形成了以腐殖型为主的烃源岩类型;断陷盆地原型提供了湖相—三角洲的沉积环境,形成了偏腐泥型的烃源岩类型。另外,即使在相同的地质时期,烃源岩深埋过程相似,也可能由于不同的盆地原型迭加组合而提供了不同古热流场,形成了各具特色的 P(压力)、V(体积)、T(温度)条件,导致了烃源岩的生烃演化过程以及形成的烃类的相态、量明显的差异,形成了不同的油气资源结构和分布。

因而,近十多年以来,勘探家和地质家们对地质模型的建立,以及在盆地模拟中选择模拟模型,都给出了非常谨慎的态度。如 Waples^[12]提出要以精奥的哲理模式(Sophistication Model)才能实施盆地的油气数值模拟,表达了他对开展数值模拟之前地质建模研究的重视。本文的 TSM 盆地模拟系统,是将 TSM 盆地分析作为盆地模拟的基础,合理地选择模型和参数,通过数值模拟发现油气生排运聚规律,探索未知,发现油田。

2 TSM 盆地分析系统程式

含油气盆地是指“在地质发展历史一定阶段的一定运动体制下形成发展的统一的沉降大地构造单元”^[13],因而,运动体制的变化是形成含油气盆地的首要条件(朱夏,1965,1978,1979,1989)。运动体制形成的沉降过程也是包括烃源岩、储集岩等盆地物质充填的过程,同时也是有机质的烃类转化、迁移的运动过程,只是 2 个过程各遵循不同的物理和化学机理,它们之间的相互联系、相互制约,控制了油气的产出。

朱夏(1983)提出了大地构造与油气聚集系统关系的 TSM 程式(图 1),强调指出盆地是不同历史阶段原型的组合,按照地球动力学机制区分、类比的是这些原型或结构单元,应当被看作是在一定大地构造环境下地壳沉降的地质作用—油气响应系统。T(环境)—S(作用)—M(响应)程式表达

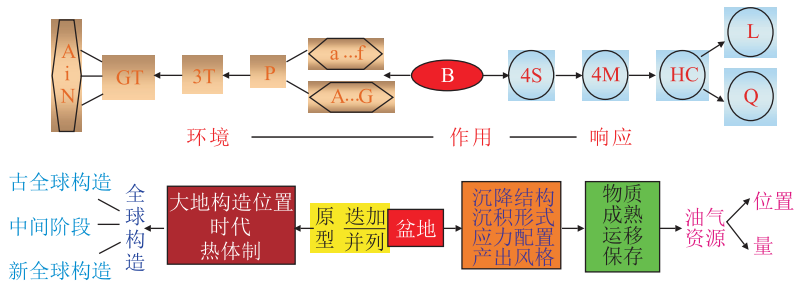


图1 朱夏(1983)提出的盆地系统(运动体制)的程式

程式左列代表全球构造体制(GT)在不同阶段(A, i, N)所控制的3大要素(3T)。在此制约下,盆地(B)是由几种不同沉降机制形成的原型(P)在时空上组合而成的。由此,程式右列表达了盆地形成中各原型的地质作用(4S)及其并列迭加所控制的油气条件(4M)。通过所有这些要素、作用和条件的分析和综合,才能在具体油气勘查中,从盆地整体出发,循序渐进,预测油气资源(HC)的存在位置(L)和潜在数量(Q)

Fig.1 Basin system (evolution mechanism) proposed by Zhu Xia in 1983

的系统内涵和外延诸因素,包含着许多子系统,形成复杂的相关性。通过电脑的运算、模拟,将能使各种盆地原型具有全球性的可比拟性,这样做可以使大量已知的东西更有效地为探索未知服务;对于尚未勘探或未完全勘探的地区也可以从少量的已知来推测许多未知^[14-15]。

3 TSM 盆地模拟系统

TSM 盆地模拟系统是将 3T-4S-4M 盆地系统研究工作程式作为指导思想,根据不同世代盆地原型具有的构造—热体制特征,建立“理所应当”的地质模型;建立并列迭加过程形成的地质约束边界条件,采用确定性的数理逻辑进行演绎,模拟盆地演化过程的地质作用和油气响应的动态关系。

TSM 盆地模拟系统是石油实验地质的一种数学实验方法,在设定的原型约束下开展确定性的数学模拟。针对各种不同类型盆地,通过埋藏史、热史、生烃史和运聚史“四史”数值模拟,建立起不同阶段构造—热体制控制下的埋深和热场演化过程,依据拟合现今的热场特征,提供成烃、成藏的 P、V、

T 动态变化,从而给出系统、动态、定量的盆地地质作用与油气响应过程,合理地进行生烃量、排烃量和资源量的计算^[16]。

系统由 3 个主体部分组成,即:TSM 盆地分析系统、TSM 盆地模拟系统和资源分级评价系统,三者相互独立,又彼此联结(图 2)。TSM 盆地分析系统首先对研究区进行盆地原型及其并列迭加关系的研究,进行勘探数据的分析和梳理,建立地质模型;TSM 盆地模拟系统在盆地分析的基础上,建立模拟的流程和数据库,动态定量模拟盆地原型的地质作用和油气响应,形成盆地四史演化模拟数据体,为资源分级评价提供数据基础;盆地资源评价按照盆地、区带和圈闭等不同级别进行,各个级别既各有侧重又互相关联,都是从盆地整体出发,评价油气资源的量和位置^[17-18]。

良好的盆地数值模拟需要合理的地质模型和数学模拟模块,依据地质演化分析,组合合适的模拟模块,形成合理的模拟流程,才能得到合理的盆地数值模拟结果。如拗陷盆地原型地质单元(质点)的运动轨迹是可以近似以垂向为主;断陷盆地

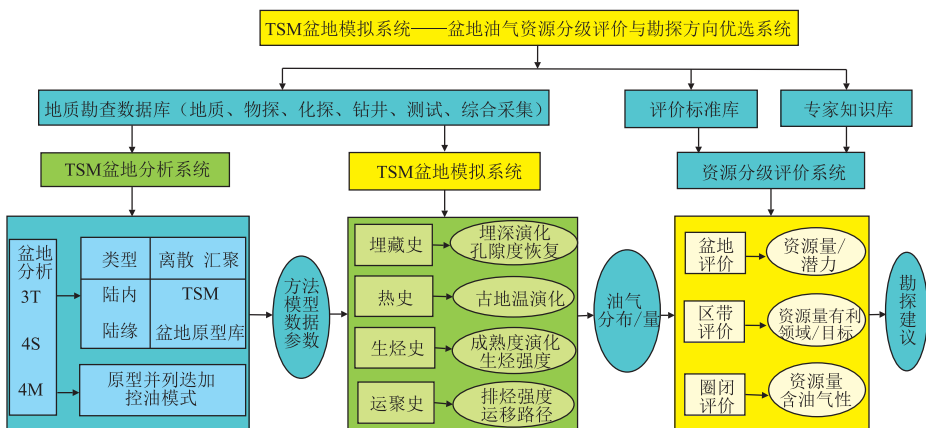


图2 TSM 盆地分析、模拟和资源分级评价系统架构

Fig.2 System framework of TSM basin simulation and resource classification

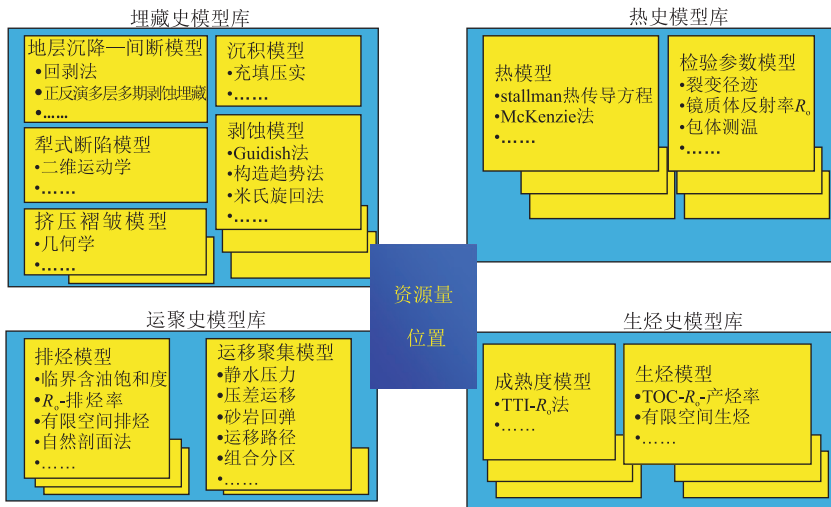


图 3 TSM 盆地模拟资源分级评价系统模型库

Fig.3 System model base of TSM basin simulation and resource classification

原型地质单元的运动受控于边界断层或控盆断层的活动形式,如断层的运动方向、生长速率、产状(倾向、倾角)等而发生侧向运动;而推覆作用下前渊盆地原型的地质单元表现出平面迁移和垂向变化的交替运动方式。因而,针对不同盆地原型需要选择不同的运动学模型来计算盆地埋藏史演化过程。对于烃源岩生烃演化过程,如果从源岩最大可容纳烃类的孔隙体积空间去评价,将与依据干酪根热降解机理去评价烃源岩产烃能力的方法形成区别,那么就需要用户选择不同的生烃计算模型,如有限空间生烃模型^[19]或者 TTI 模型。所以,丰富模型库是完成盆地“四史”数值模拟的基础,在地质分析基础上,TSM 盆地模拟系统运行需要从模型库(图 3)中有条件地选择合适的计算模型,组成合理的模拟计算流程,来完成模拟计算,最终得到更加贴近地质真实的模拟结果。

4 勘探应用

本文模拟研究区位于四川盆地川西坳陷中段,其结构主要由南部成都凹陷、北部梓潼凹陷和中部孝泉—丰谷凸起组成,总体呈西深东浅的前渊盆地特征,其主要含油气领域为中生界上三叠统须家河组碎屑岩成藏系统(图 4)^[20]。

4.1 盆地演化阶段与地质特征

川西地区在印支期之前为被动大陆边缘拗陷盆地原型,之后经历了西侧龙门山由西向东推覆和北部大巴山由北向南推覆作用而转变为大型前渊盆地^[21],导致晚三叠世以来,须家河组不同沉积时期的沉降中心不断变化(图 5)。推覆作用形成的前渊盆地原型迭加在被动大陆边缘拗陷盆地原型

地层	代号	岩性和相	岩石粗细变化	盆地演化阶段	构造期
第四系	Q	河流冲积相	向上总体变粗	龙门山前渊盆地(IV期)	喜马拉雅期
第三系	N	河流冲积相			
	E	冲积扇		残留盆地	燕山晚期—喜马拉雅早期
白垩系	K ₃ K ₂ K ₁	冲积扇 辫状河流相 冲积相			
侏罗系	J _{4p}	辫状河流相冲积扇	向上总体变粗	龙门山前渊盆地(III期)	燕山期
	J _{3m}	湖三角洲相			
	J _{2s}	河流相		龙门山前渊盆地(II期)	
	J _{2x}	河湖相			
	J _{2q}	辫状河流相 三角洲相 冲积扇			
三叠系	T _{3x} T _{3y}	辫状河流相 沼泽相 三角洲相 海潟湖坪相	向上总体变粗	龙门山前渊盆地(I期)	印支期
	T _{3z}	浅海相			
	T _{3m}	浅海相		被动大陆边缘	

图 4 四川盆地川西坳陷

上三叠统一侏罗系充填序列与盆地演化

Fig.4 Upper Triassic-Jurassic infilling sequence and basin evolution in West Sichuan Depression, Sichuan Basin

之上,形成浅海相碳酸盐岩沉积向潟湖—三角洲—沼泽—河流相砂泥岩沉积环境的转变^[22],发育了晚三叠世潮坪—沼泽环境下的须家河组煤系烃源岩组合,包含了煤岩和暗色泥岩 2 种主要源岩类型。须家河组一段、三段和五段为川西坳陷中生界主力烃源岩。该区经历了沉降、沉积的演化,不同时期烃源岩厚度中心分布不同(图 6);同时,也因后期沉降中心往东—东南的迁移而改造了前期边

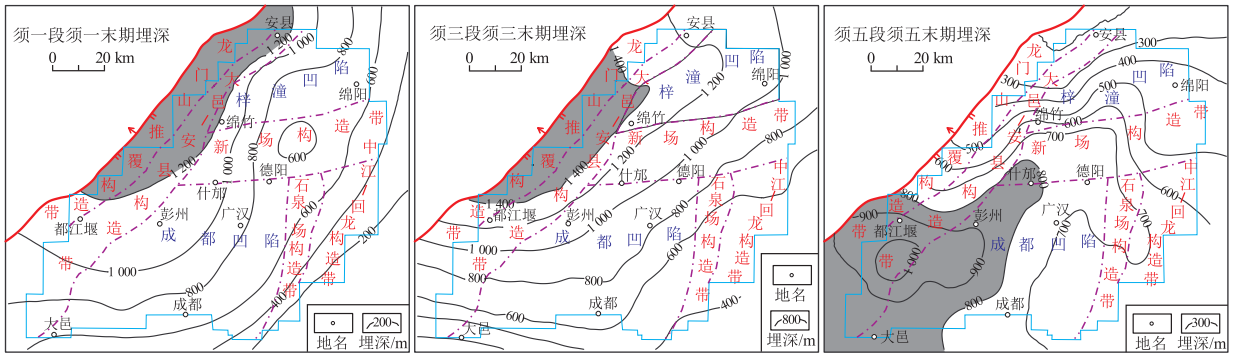


图5 四川盆地川西拗陷须家河组各沉积时期沉降中心分布

Fig.5 Subsidence center distribution during different deposition periods of Xujiache Formation, West Sichuan Depression, Sichuan Basin

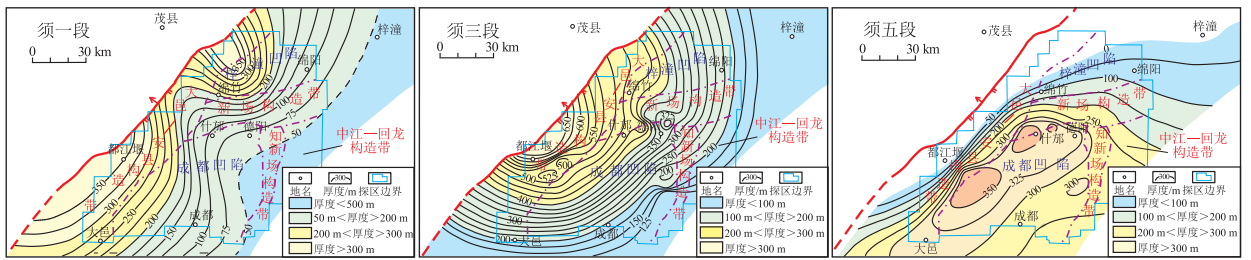


图6 四川盆地川西拗陷须家河组烃源岩(暗色泥岩)厚度分布

Fig.6 Thickness of source rocks (dark mudstone) in Xujiache Formation, West Sichuan Depression, Sichuan Basin

缘拗陷的结构样式。印支期以来,龙门山推覆作用形成的前渊盆地原型迭加在前期陆缘拗陷盆地原型之上,形成了川西地区西深东浅的盆地结构。

古热流变化是川西拗陷地质历史时期须家河组古温度场演化的重要控制因素之一,该要素与不同时期埋深变化共同制约了须家河组烃源岩的成熟演化历史。在缺乏古地温场变化资料的情况下,依据对盆地原型构造演化和原型热体制转变的特征,结合有限的温度场测试资料^[23],给出了由印支期以来,古热流逐渐降低的先验热场演化地质模型。通过热史模拟结果与现今烃源岩成熟度实测数据的拟合来修正参数和重新模拟,达到成熟演化史的合理优化;模拟得到晚三叠世以来埋藏演化、不同区带烃源岩的成熟及生烃演化的差异,从而给出不同区带生烃贡献的差异。

4.2 盆地演化模拟与油气生成展布特征

埋藏史模拟表明,在龙门山推覆作用下,中侏罗世以前须家河组下部烃源岩沉降和埋深中心往东部迁移;晚侏罗世以后由北而南的大巴山推覆作用远端效应形成台内拗陷的迭加,须家河组下部烃源岩沉降和埋深中心形成南北分异(图7),须家河组上部(须五段)埋藏演化与下部层系趋于一致。

埋藏史演化的差异导致了烃源岩成熟演化的差异。经过 R_o 实测数据校验后的烃源岩成熟演化

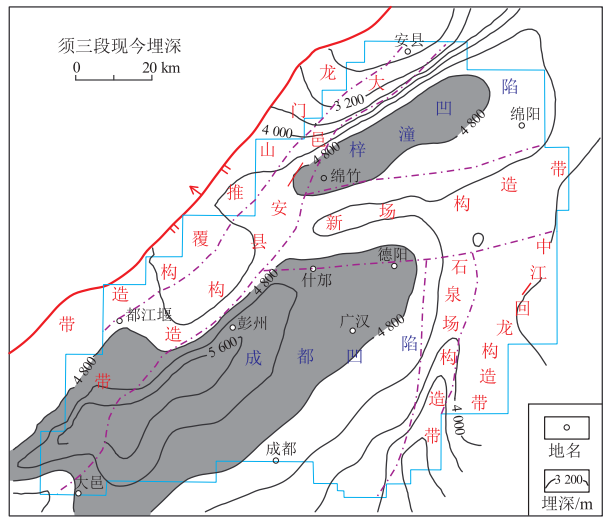


图7 四川盆地川西拗陷须家河组三段埋藏演化

Fig.7 Burial evolution of the third member of Xujiache Formation in the West Sichuan Depression, Sichuan Basin

史模拟表明,须三段烃源岩大体在中侏罗世进入成熟门限,且在中—晚侏罗世处于低熟阶段(R_o 为0.5%~0.7%),早白垩世早期为成熟演化阶段(R_o 为0.8%~1.1%),白垩纪中—晚期进入高一过成熟阶段($R_o > 1.3%$);须五段烃源岩成熟演化史整体滞后于须三段,模拟表明其进入门限的时间在侏罗纪末期,白垩纪为成熟演化阶段(R_o 为0.8%~1.1%);喜山期由于凹陷整体抬升,烃源岩成熟演化被终

止,现今烃源岩的成熟度仍维持着晚白垩世末期的状态(图 8)。

各期烃源岩成熟度演化与埋深演化趋于相同,如须三段烃源岩,虽然其原始厚度分布围绕着西侧龙门山推覆前缘,但在侏罗纪早期低成熟区域仅分布在龙门山前,晚侏罗世—白垩纪期间,烃源岩成熟—高成熟分布区域往东部迁移,到白垩纪末期形成南北 2 个高成熟演化中心(图 9),烃源岩成熟分布区域与地层较大埋深分布区域高度一致,反映出

结构和埋深演化对油气生成的控制。因此,为了明确油气资源前景和分布格局,首先要明确后期原型结构的迭加对烃源岩生烃演化的影响。

通过对不同时期控制盆地(凹陷)演化的区域构造背景分析,辨别出不同时期的原型特征,建立合理的地质模型,以模型驱动来开展模拟,才能提升对盆地演化和油气演化的认识,以此为基础开展油气响应模拟,才能在合理的认识下得出合理的资源评价和有利区带预测结果。

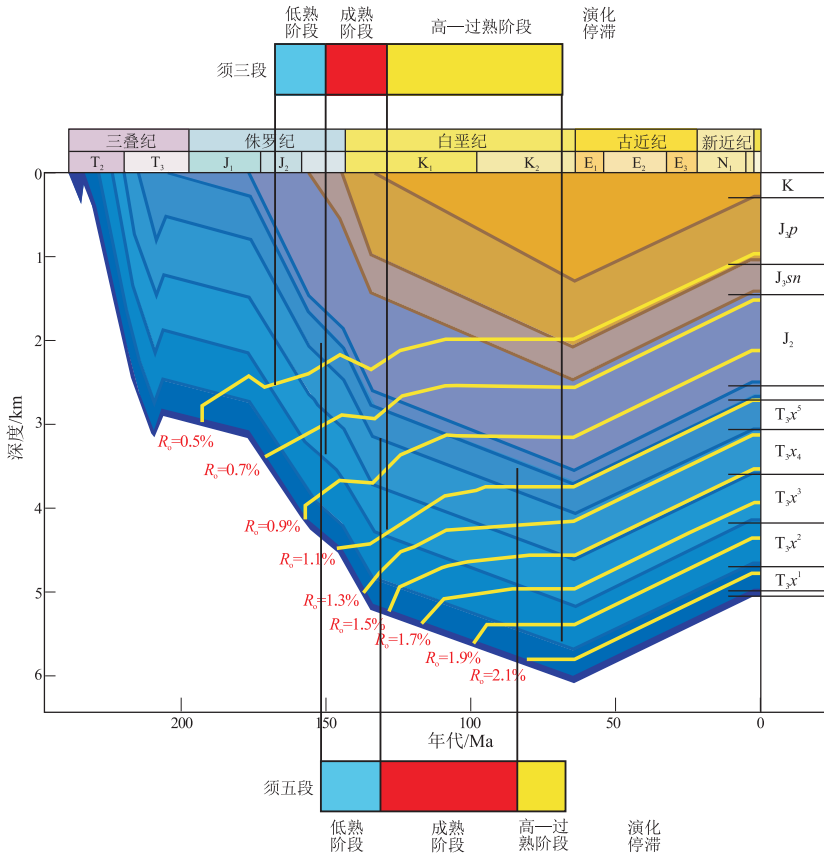


图 8 四川盆地川西坳陷川合 100 井须三段、须五段烃源岩成熟演化模拟结果

Fig.8 Simulation results of maturity evolution of hydrocarbon source rocks from the third and fifth members of Xujiahe Formation in well Chuanhe 100, West Sichuan Depression, Sichuan Basin

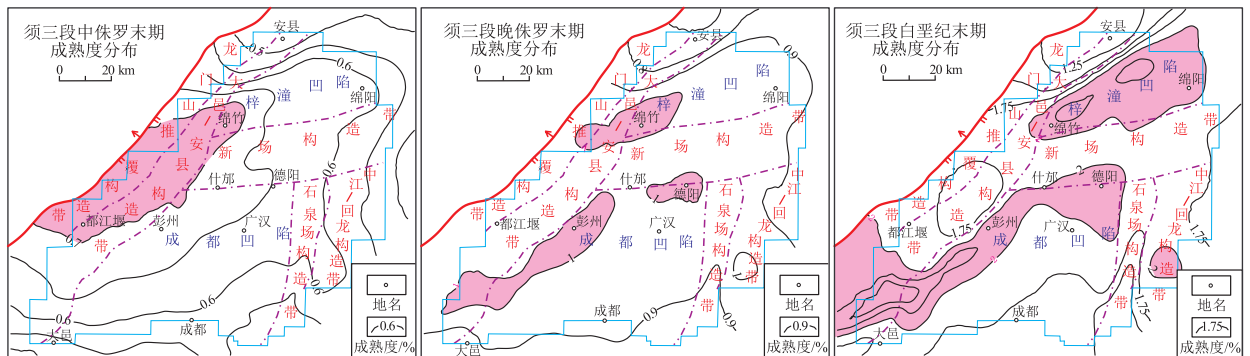


图 9 四川盆地川西坳陷须三段烃源岩成熟演化史模拟

Fig.9 Simulation results of maturity evolution history of source rocks in the third member of Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

各段烃源岩生烃能力的模拟计算可以反映出不同段、不同岩性烃源岩生烃贡献的差异。现今残留的须一段和须三段烃源岩主要分布在龙门山推覆构造前缘,须一段烃源岩累计生烃中心位于龙门山推覆前缘,与该段烃源岩厚度分布中心一致;须三段累计生烃中心位于凹陷中部的什邡—大邑地区,呈近北东走向。这表明须一段烃源岩主要生烃时期处于龙门山推覆早期,而须三段烃源岩主要生烃时期处于龙门山推覆中后期。由西往东的推覆作用导致了烃源岩生烃中心向东、东南迁移,位于上部的须五段烃源岩累计生烃中心基本上位于南部大邑—温江一带。同时,模拟演化也反映出侏罗纪期间北部大巴山由北而南推覆作用的远端效应对须家河组烃源岩生烃演化与生烃中心的分布影响不大(图 10)。计算表明,须家河组烃源岩累计生烃量约为 $167 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中须一段—须三段烃源岩累计生烃量约为 $138 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比 83%左右。模拟计算同时也反映出不同岩性烃源岩的生烃贡献差异(表 1),煤系暗色泥岩的生气贡献要远高于煤岩的生气贡献,须一段—须三段、须四段—须五段的煤岩累计生气量占比仅分别为 12.86%和 3.86%。

4.3 运聚模拟分析与勘探方向优选

早期边缘拗陷发育的由东向西三角洲相与晚期前渊盆地发育的由西向东冲积扇—三角洲相共同构成了自下而上的分支河道、河口坝砂体的叠置

组合,虽然成岩作用导致其储层致密化(须二段平均孔隙度仅为 3.18%,渗透率为 $0.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),但后期尺度较小的纵张裂缝的改造提高了须家河组二段、四段的储集性能。须三段的煤系泥页岩和须五段湖沼相的生油岩系形成了区域封盖,与须二段、须四段砂体构成了良好的生储盖组合^[21,24]。这种区域性的储盖组合提供了天然气良好的运移和储集条件,晚侏罗世形成的古构造圈闭是在须家河组大量生排烃高峰期之前或同期,有利于这些构造圈闭捕获油气成藏。沉降埋深的差异形成了横向势能差控制着天然气的运移聚集,区域上叠合连片的三角洲各微相砂体提供了天然气的主要运移通道,优势储集区域控制着局部构造下的天然气有效聚集^[25-27]。据此建立的以压力势能差和砂体物性特征为要素的天然气运移驱动模型,给出了川西拗陷须家河组天然气运移聚集的模拟结果,拗陷的东部斜坡、中部次凹之间的低凸起以及东南斜坡是天然气运聚的重要区域(图 11)。依据聚集模拟,川西拗陷须家河组天然气总资源量为 $2.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中,成都与梓潼次凹之间的孝泉—丰谷构造带资源量最高,南部安县—鸭子河—大邑断褶带资源量次之。

实例表明了 TSM 盆地模拟系统可以从“认识盆地演化规律、揭示成烃成藏过程、评价资源优选区带”3个方面,为地质研究人员和勘探家们提供

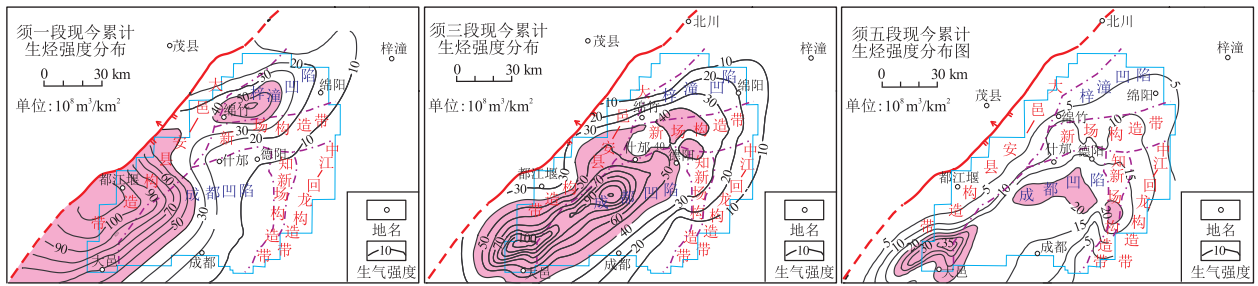


图 10 四川盆地川西拗陷须家河组累计生烃强度模拟分布

Fig.10 Simulated cumulative distribution of hydrocarbon generation intensity of Xujiaye Formation, West Sichuan Depression, Sichuan Basin

表 1 四川盆地川西拗陷须家河组各段烃源岩不同时期生烃量模拟统计

Table 1 Simulation statistics of hydrocarbon generation of source rocks of Xujiaye Formation in different periods, West Sichuan Depression, Sichuan Basin 10^8 m^3

时间	T_3mt	T_3x^2	T_3x^3	T_3x^4	T_3x^5	T_3x^{1-3} 煤	T_3x^{4-5} 煤	合计
T_3x^3 末	42 406	0	0	0	0	0	0	42 4060
T_3x^5 末	123 662	26 104	46 228	0	0	28 337	0	224 331
J_{1-2} 末	298 905	53 298	92 956	35 299	44 190	55 354	26 836	606 838
J_{3sn} 末	323 424	61 899	104 122	38 182	44 905	65 151	27 281	664 964
J_{3p} 末	432 864	101 346	186 653	58 162	63 102	113 702	34 726	990 555
K 末	597 336	191 180	378 528	119 289	114 597	215 731	61 465	1 678 125

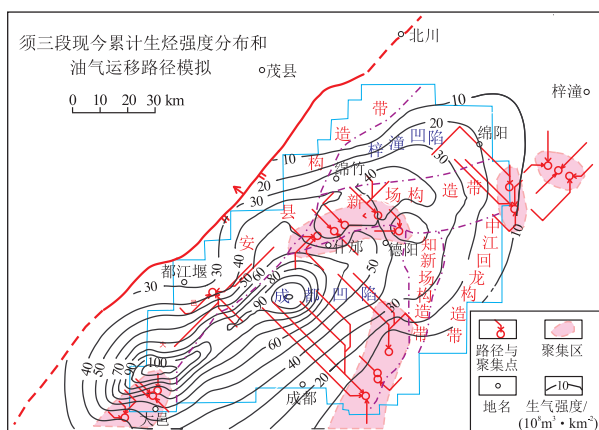


图 11 四川盆地川西坳陷须家河组主要层系天然气运移路径模拟

Fig.11 Natural gas migration path simulation of main formations of Xujiahe Formation, West Sichuan Depression, Sichuan Basin

咨询和服务,是一套能够揭示盆地演化史和进行油气选区及有利区带定量评价的分析和模拟方法,是一套高效的盆地—区带—圈闭资源分级评价方法,是一个减小勘探风险的重要工具。

在盆地勘探评价初期地质资料有限的情况下,该系统可以用于盆地油气资源潜力评价和战略选区;当获得更多资料后,该系统可以定量评价有利区带的油气资源量,并通过与已知油气田(藏)的拟合,预测未知的可能油气聚集区位置。可以随着勘探进程进行滚动评价,达到指导油气勘探部署的目的,从而实现在不同勘探阶段对不同级别资源的综合评价和勘探方向优选。

5 讨论

TSM 盆地模拟强调了盆地分析先行,数值模拟需建立在地质模型基础之上。但面对复杂的地质演化以及油气生排运聚机理的认识不足,盆地模拟不能局限于如何细致描述某个单一地质要素,而应该更加重视合理地质模型的建立和符合实际情况模拟流程的建立。

(1)合理的地质模型是驱动盆地数值模拟的关键。例如,古热场演化模型是盆地模拟中重要的模型,而通常采用的古热流模型是不确定的。地质资料中热指标相对稀缺,镜质组反射率测定、FAMM 技术对等效 R_0 值的校正等是地质研究人员习惯采用的手段,但往往获得的实际数据较少;裂变径迹技术在一定条件下才能适用,并且给出的结果往往误差范围比较大。因而,现有的资料和技术,通常不能让地质家们准确把握热场的演化,必须通过分析不同时期盆地原型及迭加关系,明确各

原型构造热体制,在有限资料的基础上建立“先验”的古热流模型,然后通过模拟计算结果与少量实测资料(R_0 、包裹体测温等)进行拟合,进一步来修正“先验”模型,重新计算以达到合理的模拟结果。

(2)多方案、多组合数值模拟与拟合是得到最优化模拟结果的手段。对于同一盆地,不同地质研究人员和勘探家有不同的地质认识,或者是存在一定的认识差异,这种差异来源于拥有资料的不同和观察角度的不同。认识的差异将导致选取的模拟模型和建立的模拟流程不同,形成盆地模拟结果和评价的差异。TSM 盆地模拟系统中模拟模块的动态组合,可以不用去苛求不同地质人员对地质认识达成共识,通过建立不同方案、不同组合的地质模型和参数模型,进行不同流程的数值模拟,多方案形成模拟结果,进而对模拟结果对比分析,选择最优化的方案,以达到最佳的盆地油气资源评价和勘探方向优选的结果。

以头脑中的地质模式来引导盆地模拟是灵活应用盆地模拟的重要手段,“归根到底,首先找到石油的地方正是在人们的脑海里”^[28]。

致谢:本文得到了中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所刘光祥教授、曾华盛高级工程师的指导,他们领导的中国南方油气地质研究组提供了各类模拟参数数据,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Perrodon A, Masse P. Subsidence, sedimentation and petroleum systems[J]. Journal of Petroleum Geology, 1984, 7(1): 5-25.
- [2] 张渝昌.关于盆地油气动态成藏系统研究的理论问题[C]//周玉琦.朱夏油气地质理论应用研讨文集.北京:地质出版社,2001:207-218.
Zhang Yuchang. Theoretical problems about basin hydrocarbon dynamic accumulation system[C]//Zhou Yuqi. Application papers of oil and gas geology theory of Zhuxia. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 207-218.
- [3] Hermanrud C. Basin modelling techniques: An overview[M]//Dore A G, Augustson J H, Hermanrud C, et al. Basin modelling: Advances and applications. Amsterdam: Elsevier, 1993: 1-34.
- [4] Hantschel T, Kauerauf A I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling[M]. New York: Springer, 2009: 1-30.
- [5] 张庆春,石广仁,田在艺.盆地模拟技术的发展现状与未来展望[J].石油实验地质,2001,23(3):312-317.
Zhang Qingchun, Shi Guangren, Tian Zaiyi. Present developing situation and future prospects of basin simulation technology[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(3): 312-317.
- [6] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. AAPG Bulletin, 1990,

- 74(10):1559-1570.
- [7] Ungerer P. Modelling of petroleum generation and expulsion: An update to recent reviews [M]//Dore A G, Augustson J H, Hermanrud C, et al. Basin modelling: Advances and applications. Amsterdam: Elsevier, 1993: 219-232.
- [8] Wendebourg J. Uncertainty of petroleum generation using methods of experimental design and response surface modeling: Application to the Gippsland Basin, Australia [M]//Duppenbecker S D, Marzi R. AAPG/Data pages Discovery Series No. 7: Multidimensional Basin Modeling. Tulsa: AAPG, 2003: 295-307.
- [9] 曾澦辉, 金之钧, 王伟华. 油气二次运移和聚集实验模拟研究现状与发展 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(5): 94-97.
- Zeng Jianhui, Jin Zhijun, Wang Weihua. Status and advances of the studies on the experimental simulation of secondary hydrocarbon migration and accumulation [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1997, 21(5): 94-97.
- [10] 罗晓容. 油气运聚动力学研究进展及存在问题 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 337-346.
- Luo Xiaorong. Review of hydrocarbon migration and accumulation dynamics [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(5): 337-346.
- [11] 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.
- [12] Waples D W. Basin modelling: How well have we done? [M]//Duppenbecker S J, Illife J E. Basin Modelling: Practice and Progress. London: Geological Society, 1998: 1-14.
- [13] 朱夏. 论中国含油气盆地构造 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 1-3, 22-34.
- Zhu Xia. Structure of petroliferous basins in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 1-3, 22-34.
- [14] 张渝昌, 徐旭辉, 江兴歌, 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] Zhu X. Chinese sedimentary basins [M]. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [16] 徐旭辉, 江兴歌, 朱建辉, 等. TSM 盆地模拟: 在苏北溱潼凹陷的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- Xu Xuhui, Jiang Xingge, Zhu Jianhui. TSM basin modeling: A case study of Qintong Depression, Northern Jiangsu [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [17] 张渝昌. 中国含油气盆地原型分析 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1997: 1-26.
- Zhang Yuchang. Petroliferous basin prototypes in China [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1997: 1-26.
- [18] Magoon L B, Dow W G. The petroleum system: From source to trap [M]. Tulsa: AAPG, 1994.
- [19] 关德范, 徐旭辉, 李志明, 等. 成盆成烃成藏理论思维与有限空间生烃模式 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 709-715.
- Guan Defan, Xu Xuhui, Li Zhiming, et al. A study on theories of basin evolution and hydrocarbon generation and accumulation and model of hydrocarbon generation in finite spaces [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 709-715.
- [20] 罗啸泉, 陈兰. 川西拗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 Xiaquan, Chen Lan. Forming evolution of western Sichuan Depression and its relation with oil and gas [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(1): 16-19.
- [21] 杨克明, 朱彤, 何鲤. 龙门山逆冲推覆带构造特征及勘探潜力分析 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 685-693.
- Yang Keming, Zhu Tong, He Li. Structural characteristics and exploration potential of the thrust block in Longmenshan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(6): 685-693.
- [22] 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 Zhengwu, Deng Kanglin, Han Yonghui, et al. The formation and development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [23] 韩永辉, 吴春生. 四川盆地地温梯度及几个深井的热流值 [J]. 石油与天然气地质, 1993, 14(1): 80-84.
- Han Yonghui, Wu Chunsheng. Geothermal gradient and heat flow values of some deep wells in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1993, 14(1): 80-84.
- [24] 杨克明, 叶军, 吕正祥. 川西拗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.
- [25] 沈忠民, 潘中亮, 吕正祥, 等. 川西拗陷中段须家河组天然气地球化学特征与气源追踪 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(3): 225-230.
- Shen Zhongmin, Pan Zhongliang, Lv Zhengxiang, et al. The geochemical characteristics of natural gas and the gas-sources tracing of Xujiahe Formation in the middle member of West Sichuan Depression [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(3): 225-230.
- [26] 沈忠民, 张勇, 刘四兵, 等. 川西拗陷中段原、次生气藏天然气特征及运移机制探讨 [J]. 矿物岩石, 2011, 31(1): 83-88.
- Shen Zhongmin, Zhang Yong, Liu Sibing, et al. Characteristics of primary and secondary gas pool and transportation mechanism in Western Sichuan Depression [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31(1): 83-88.
- [27] 杨克明. 川西拗陷油气资源现状及勘探潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 322-326.
- Yang Keming. Status of oil & gas resources and prospecting potential in Western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 322-326.
- [28] Pratt W E. Towards a philosophy of oil-finding [J]. AAPG Bulletin, 1952, 36(12): 2231-2236.