

文章编号: 0253-9985(2005)01-0029-08

展望盆地模拟

张渝昌, 徐旭辉, 江兴歌, 朱建辉

(中国石化石油勘探开发研究院无锡实验地质研究所 江苏无锡 214151)

摘要: 通过苏北溱潼凹陷、松南长岭凹陷及东海西湖凹陷的实践, 因循盆地原型及其并列叠加关系的地质分析约束建模, 采取地质形象思维和数理逻辑思维结合的模拟思想, 运用多模块组合、多方案运行, 进行盆地地质作用和油气响应关系的“TSM”盆地系统模拟。目前, 这一方法已在断-坳原型盆地叠加地质领域实现了断陷二维沉降过程的模拟, 揭示了不同原型叠加导致地质作用的变化及其对油气形成和分布的控制作用, 指示了油气运移的路径, 预测了油气聚集的地带, 发现了苏北的台南油田, 并在松南的达尔罕反转构造获得相当经济产量。虽然“TSM”盆地系统模拟已经初步实现了面向实际, 为油气勘探预测未知的决策服务, 具有本质预测的功能。但只是“浅尝了一口梨”, 还需要进行大量的研发工作, 诸如挤榨前渊、走滑拉分 and 陆内坳陷等原型盆地模拟的研发, 以及不同原型的叠加模拟更有待探索。尽管如此, “TSM”模拟已经探索到一条跨越已知到未知的鸿沟, 它将成为油气勘探领域重要的创新科技链环之一。

关键词: 油气盆地; 盆地模拟; 盆地叠加; 反转构造

中图分类号: TE111.1 **文献标识码:** A

Outlook for basin modelling

Zhang Yuchang, Xu Xuhui, Jiang Xingge, Zhu Jianhui

(Wuxi Institute of Experimental Petroleum Geology, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu)

Abstract: Based on the practices in Qintong depression of Subei, Changling depression in southern Songliao basin and Xihu depression in East China Sea, constrained modelling through geological analysis of basins', prototypes and their juxtaposition and superimposition relations, and combining geological thinking in images with mathematical logic thinking, "TSM" basin system modelling of geologic processes and oil & gas response relations are carried out by using combination of multiple modules and multiple programs. Now, modelling of rift's 2-D subsidence process has been realized in the domain of stacking geology of fault-subsidence prototype basins, which reveal the superimposition of various prototypes of basins would change the geological processes, control the generation and distribution of oil and gas, indicate migration path of oil and gas, and can even predict zones of oil and gas accumulation. Tainan oilfield has thus been discovered in Subei, and a considerable amount of commercial production has been acquired in Darhan reversed structure in southern Songliao basin. Although "TSM" basin system modelling, with essential prediction functions, has been preliminarily applied in practice to serve decision-making in petroleum exploration, it is still in an initial stage with large amount of R&D work to be performed, such as simulation systems for various prototypes of basins, including compressing and squeezing foredeep basin, strike-slip and extensional basin and intracontinental depression basin, as well as simulation of superimposition of various prototypes of basins. Nevertheless, "TSM" modelling has built a bridge leading from known to unknown, and it will become one of the innovative technology chains in our petroleum exploration.

Key words: petroliferous basin; basin modelling; basin superimposition; reversed structure

从英语构词表达的盆地模拟 Modelling 就是对 模式(Model) 的运作(-ing)。显然, 只有适宜实情的

基金项目: 国家科技部社会公益研究专项资金项目“油气盆地资源分级评价技术”(165)

第一作者简介: 张渝昌, 男, 69岁, 教授级高级工程师, 石油地质与构造地质

收稿日期: 2004-11-25

模式才能运行达到期望的要求。自从20世纪70年代Ojakangas首先用计算机实现一维沉积柱的升降模拟以来,盆地模拟方法发展神速。在国外,投入了上亿美元资助,20世纪80年代有各种盆地模拟系统软件销售给企业勘探人员使用,势头良好,但是不久就消沉下来,勘探家认为不解决实用问题。经过20年攻关,Waples^[1]认为不好解决的是二维-三维油气模拟。他将一维模拟称之为成熟度模拟(Maturity Modelling),将二维-三维模拟称为流体流动模拟(Fluid Flow Modeling),提出要以精奥的哲理模式(Sophistication Model)才能实施模拟。顾名思义,按干酪根热降解建模蹬热成熟模拟只需要与埋深建立关系,一维模拟就能满足生烃模拟。如果沉降不连续,加上剥蚀厚度就行,其余的是细化或优化的问题。但是,有机质生烃转化成流体运移,要求随时间变化进行三维的流动模拟,解决问题必然要与盆地沉降变化复杂的实际地质作用相关联,通用性软件不能应付面向实际的勘探家。盆地模拟要求不同地质作用及其风格的盆地模式的约束,而不是从固定的框架结构输入数据模拟。事实上地质模拟是仿古。大多历史的真实在动态演化过程中消失了,今天静态的事实数据必须推演过去。因此模拟前地质建模十分紧要,面对未知,模式必须满足辩证综合,正反思维整合,实测数据拟合。

当国外盆地模拟正在兴起时,在国内朱夏先生就已经注意到它在实验地质上的意义。他早就指出盆地分析研究不仅是对已知事实的归纳,更重要的是在于预测,指导实践工作。随着“深部地质和实验模拟、定量参数演算等新技术迅速发展,当可为我们提供一些途径,对含油气盆地的形成发展及其控制油气生成运移和聚集的演变过程,进行理论探索,从而建立模式,指出方向,以有助于油气普查勘探的实践^[2]。”随后,朱夏先生在各种场合提出了大地构造与油气聚集系统关系的T-S-M程式^[3]。他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;对此,T(环境)-S(作用)-M(响应)程式表达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。如果“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,也突出了中国盆地在全球构造环境中的特殊性。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^[4-6]。”由此,朱夏等还计划了按理论建模-实例检验-动态模拟的程序来进行盆地系统的研究工作。

经过10多年的持续探索,取名“TSM”的盆地模拟建模思路因循活动论构造历史观^[5],按原型及其并列叠加关系的地质约束建立模式,力图采取确定性数理逻辑演绎的方法,模拟原型地质作用-油气响应关系。地质科学至今仍以观察为基础,发现先行,发散思维,进行唯像理论解释。地质研究也在不断寻求物理相似性实验和化学测试方法,追索历史地质的理论架构,然而漫长的时间因素一直困扰实证方法。随着现代电子计算机高科技手段发展,地质数学模拟通过四维计算,密切运用物理、化学的理论架构,可以多方案便捷地“摸摸、捏捏”,检验地质模式,以证明观察理念的正确性,成为逼近真理的重要方法。由于模拟运用了经过反复实证的物理、化学定律,用数学公式或者数理逻辑推理函数之间“理应如此”的确定性关系,因此模拟的结果,可以检验用现今事实建立的地质演化思维模式的合理性,揭示地质作用的过程和油气响应,进而可用依其检验拟合的必然来预测未知。因此,“TSM”盆地模拟设定在原型约束下进行作用-响应的确定性数学模拟就是要检验原型设定条件下模拟推论的作用-响应是否与已知实际相符,检验实地建立的原型模式(包括从不同阶段大地构造环境变化识别的类型和构造热体制)约束的可靠性,检验以此建立的原型并列叠加控油模式和概念模型的数学模型系统是否合理(图1)。显然,要建立这样的数学模型系统必然是多样化不同风格的模块组合而成的。为了模型配套,事先建立模型库备用是十分重要的。它将促进地质数理化的基础理论发展,特别是作用-响应系统的边界条件。由于理论的不充分,还需与物理、化学实验相结合。一般模型开始总是在必要简化的基础上建立的,改善模型,逼近真实,是不断进行的,因此本质上模型配套成了模拟发展的核心研究内容。当实施模拟时,“TSM”也采用了“四史”关系来归纳各种子系统要求量化的输入参数,实际上埋藏史和热史的模拟就是地质作用的模拟,反映了原型构造-热体制的约束,而生烃史和运聚史的模拟就是在地质作用约束下的油气响应模拟。由于推理的地质模式往往并不具备完全的可输入参数,面对实际建立的地质模式也不是唯一的,需

要设定假想参数通过模拟来考察合理性, 经过多方案反复模拟比较、检验, 才构成实验方法。现今勘探的和实验测试的数据大都可以提供模拟的检验, 而历史过程保持所测定出的数据更为重要, 因此模拟要求实测技术不断发展新技术(图1)。经过反复运行和检

验后的模拟结果, 只能是阶段性模拟结束, 它应当跟踪勘探进展, 接受实践检验, 因此模拟必需不断改进提高, 在实用中与勘探密切结合, 以达到用户“评价再评价”的目的(图1)。

通过上述实施流程, “TSM”盆地模拟目前对断



图1 TSM 盆地数学模拟实验流程

Fig. 1 Flow chart of TSM basin mathematical simulation test

坳原型叠加领域的实验表明流程的设想是可行的, 模拟结果还得到出乎意料而令人兴奋的结果。通过实践, 虽然在方法上还是十分简化的, 但是在一定程度上反映了油气藏形成与分布的系统本质。模拟实施能与勘探人员互动沟通, 同步深化, 满足勘探进展需求, 可以提供油气盆地“系统整合、动态成藏”的研究, 是一条“评估与再评估”油气资源的有效途径。

例如在苏北溱潼凹陷, 地质分析提出凹陷第三纪至今历经断—断—坳原型叠加^[7]。其断陷呈半地堑, 受犁式主断层重力滑动控制, 形成断阶、深坳、斜坡结构, 控制沉积充填并向北缓坡沉积减薄尖灭, 其内斜坡部位发育滚动式顶塌陷落块断; 而坳陷则以区域性挠曲下坳叠加在断陷上。以此, 模拟设置断陷模块组合主要是: 犁式主断面二维拉张+ 时间+ 充填+ 压实+ 剥蚀+ 热导+ 生烃+ 排径+ 路径。经过主断面模块模拟断面向下延伸 7 km 后逐渐变平, 表明模拟区是岩石层壳内脆韧性转换面之间非均一拉张结果, 拉张断陷规模不大, 与模式设想一致。经实地层序发育和地层间不整合面的分析认为断陷具有早、晚两期, 地震资料可以解释出早期断层被晚期断层切割, 但是早期主断面位置、走向并不清楚。因此模拟

设定早期断陷剥蚀后残留沉积实体是贴附在晚期断陷之下伴随埋藏, 代表晚期断陷叠加统一发展的新生影响。结果, 复原模拟确实反映两期断陷虽然顺向叠加, 但早期断陷沉降中心发育在西边, 而晚期断陷沉降东移, 沉降轴方位略有差异, 反映晚期北东东走向主控断层斜向切割早期断陷。叠加后凹陷总沉积埋藏史出现两个次凹, 但是, 两期断陷叠加效果, 两期断陷各自控制的源岩分布位置不同。钻井已证实晚期断陷沉降期生油岩发育不佳, 主烃源岩形成于早期断陷扩展期的进积体系中。但是模拟揭示早期断陷源岩发育在西部, 断陷结束, 烃源岩并未成熟, 晚期断陷由于迁移, 即使叠加埋藏也不产生足够的热降解生烃, 只有当坳陷统一了两期断陷后烃源岩成熟才发生明确的运移。由此, 模拟提示源岩转化生烃是在断陷断层分隔的条件下才发生运移的, 如果晚期断陷大断层不持续活动切入早期断陷, 油气就不具有区域性运移。模拟表明晚期断陷沉降起到对早期断陷源岩转化的作用, 但不是 Magoon^[8]所述油气系统认为上覆岩石是 4 大要素之一, 而是引起生储盖要素作用的系统边界条件, 源岩转化生烃是边界条件的响应, 正如 Deming^[9]指出上覆岩石对源岩生烃的影响是温度、热

流,本质与盆地形成与分类有关。盆地原型的叠加是体制的更迭,不仅是上覆岩石的复合,也是盆地演化对油气动态更迭的影响,因此,问题的关键在于要通过原型叠加引起热史变化是如何影响源岩的生烃时间的。

根据原型理论建模分析,断陷属于岩石层热膨胀-表壳引张的构造-热体制;坳陷为热冷缩-表壳下挠的体制,一旦断陷转化为坳陷后地热应由高温转向低温。如果断陷多期发展则可考虑是热涌“自限式”的结果^[10~12],具非线性高温场变化特征。依此约束,模型设置盆底不同热流值模拟的多方案热史分析,通过与现今热场和 R_0 值的比较、拟合,优选适宜的非线性时间-古地温曲线提供生烃史模拟输入数据。断-坳约束模式和选择的古地温随时间变化如图2和3,后经勘探部门采样进行包体测温检验认可。以此,热史的数据输入TTI生烃模块,模拟显示早期断陷主力烃源岩生烃高峰在28~10 Ma。在晚期断-坳叠加变化埋藏的结构影响下,早期断陷烃源岩不同时期生烃中心位置与上叠晚期断陷沉降方式以及断陷转化后的坳陷迁移沉降有关。有效烃源岩(Active source rock)范围是变化的,在晚期断陷迁移埋藏和转化为坳陷沉降时,不同部位源岩的组分如丰度、强度

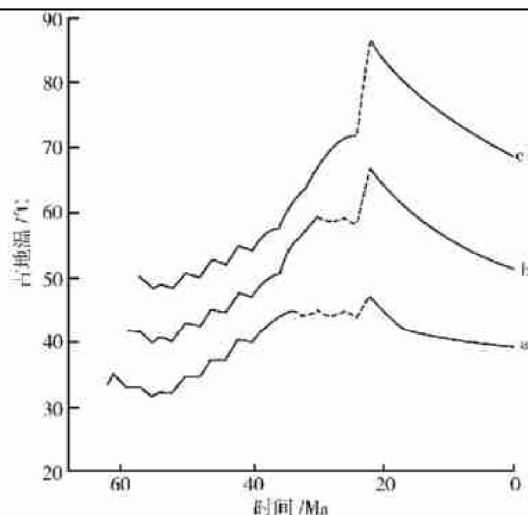


图3 按漆潼凹陷断-坳转化热模型设置数学模块模拟的时间-古地温曲线

Fig. 3 Time-palaeogeothermal curve simulated by setting mathematical module according to the thermal model of fault subsidence-depression conversion in Qintong depression

a—深度1000 m 古地温随时间的变化;

b—为深度2000 m 古地温随时间的变化;

c—为深度3000 m 古地温随时间的变化

等不同,各部位烃源岩的生烃量不同,累积油气聚集量不同。模拟揭示了不同原型叠加导致地质作用的变化,控制了油气的形成和分布。根据早期断陷源岩至坳陷期间才转化生烃,表明油气运移是在断层封闭条件下发生的,早期断陷生储盖油气组合只具备在封隔仓内侧向运移自生聚集条件,只有晚期断陷持续活动的断层才能垂向沟通形成下生上储的叠加组合油气藏。以此,设置油气运移势场模块,并依其结果拟议油气运移模式进行实际分析。分析表明晚期断陷主断层和相配置的反向断层具有持续活动性,运移路径指向与已探明油田位置一致,主断层活动产生的高断块产油层是晚期断陷发育的底块砂岩,模拟揭示在坳陷沉降统一的新体制控制着油气藏的分布。此外,模拟还受叠加早期断陷结构自生组合的油气运移的影响,指示运移趋向凹陷东北和西北。分析认为西北方已知产油井是反向断层沟通扩大了侧向运移范围的结果,油气可以聚集在断块高位圈闭中。依此推论向东北方的油气可能是沿已封闭断层下降盘上方运移,预测油气受小断层或岩性封堵。由此,结合正钻井发现的自生组合显示,与勘探人员取得一致意见,决策部署发现了台南油田。勘探最终证实高产油井分布在断层下降盘

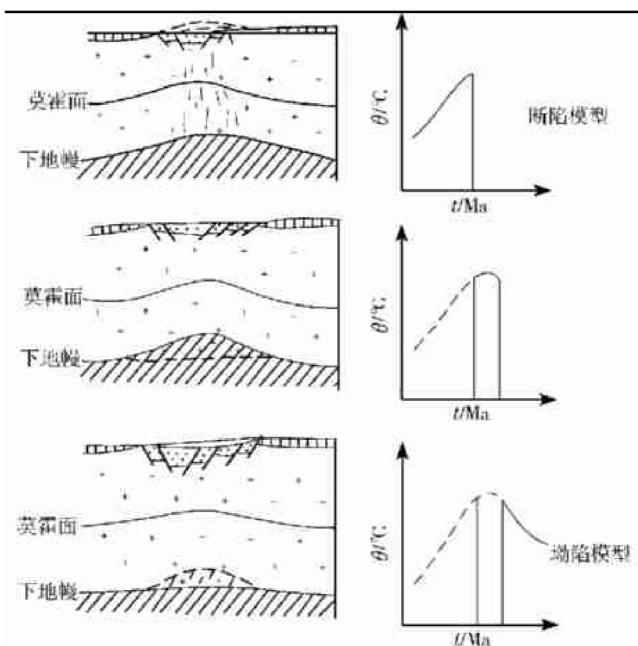


图2 漆潼凹陷建立的陆内断陷转化为坳陷的叠加模式(左)和模拟概念模型(右)

Fig. 2 Superimposition pattern (left) and conceptual model (right) for conversion of intracontinental fault subsidence to depression in Qintong depression

的堑式结构中,与模拟的预测结果相符。

松南长岭凹陷模拟也取得动态分析的体验,分析认为凹陷晚侏罗世-第三纪也是断-坳原型叠加模式,早白垩世晚期泉头组沉积以来断陷转化为坳陷^[13,14]。断陷原型也有两期,先后充填营城组沉积和登娄库组沉积。地震分析早期断陷受北西向主断层控制,具有西南断东北超的特点;晚期与北北东向断层切割有关,断陷结构西断东超,东西并列。总体上断陷可能是凹陷基岩块体两组剪切断层反时针扭动受南部近东西向隆起约束,引起应力不同反应变化的结果,顺势发展的北北东向断陷叠加在先期北西向断陷之上,导致沉降结构变化很大。除外,断陷转化为坳陷后,在晚白垩世受扭动应力影响发育了北北东向断陷反转构造和较平缓的坳陷反转隆起,后者发育在长岭凹陷东缘。依此,从地质模式设定,除沿用断陷模块组

合模拟外,补充了简单一维反转模块(试用)。对照地震编图模拟结果清楚地反映了原型叠加的埋藏史和应力变化这一模式演化。由此进一步类比邻区凹陷早晚两期断陷火石岭-营城组和登娄库组的岩性和主源岩分布,并依类比参数模拟生烃史及排烃期。按热降解成熟和临界饱和排烃模型模拟指示早期断陷火石岭-营城组源岩主排油期在晚期断陷叠加期末,而晚期断陷登娄库组源岩主排油期在白垩纪坳陷反转时期,两组源岩的主排气期都在白垩纪末一现今。模式分析设想油气运移具有早期断陷营城组源岩自生组合运移和断陷叠加之后经断层向上的叠加组合运移两种情况,经模拟,早期断陷形成后和晚期断陷沉积末自生组合运移路径油气向内斜坡、次凹间的隆起和向东斜坡古隆起上聚集。当坳陷叠加后,油气主要向东北运移,直到现今才有向西运移的可能(图4)。如果营城组

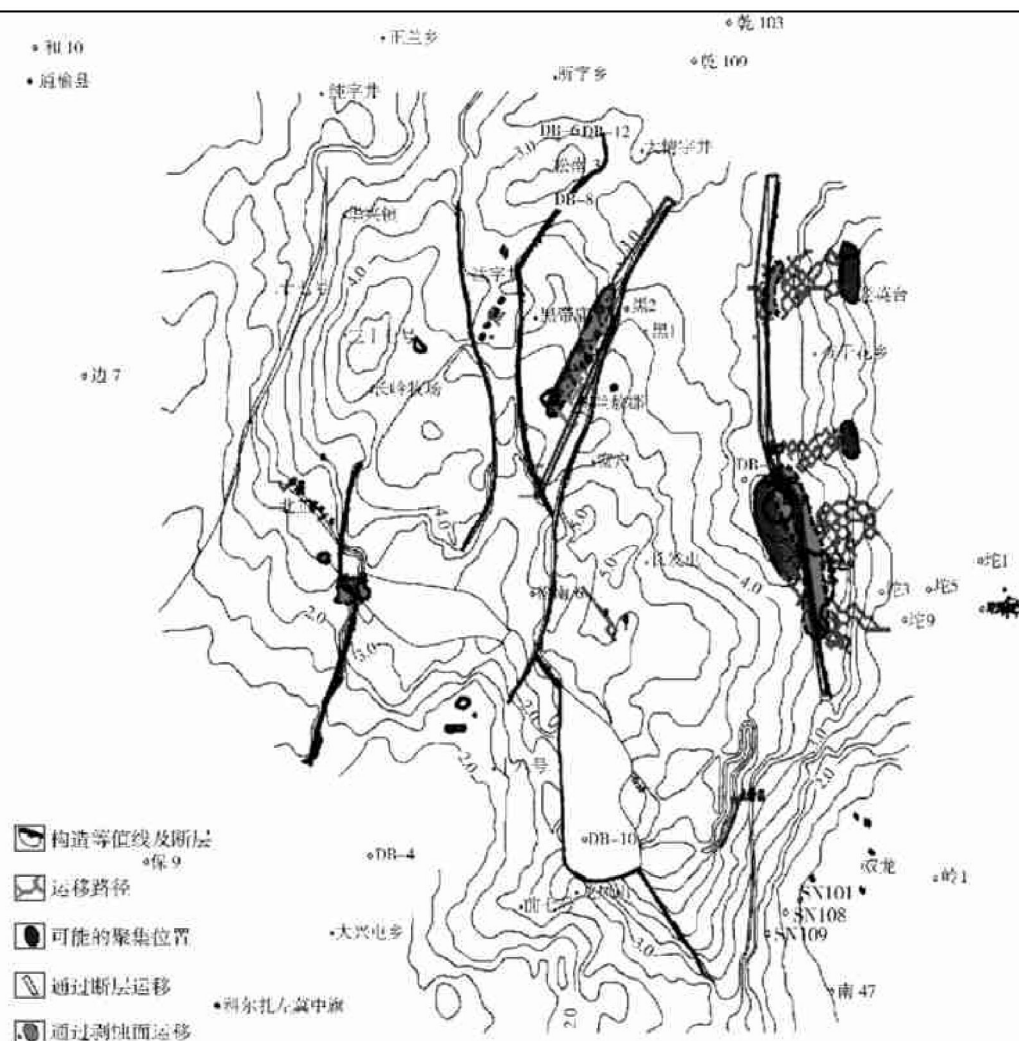


图4 松南长岭凹陷在坳陷反转影响下模拟的早期断陷自生组合迁移路径和可能的聚集位置

Fig.4 Migration paths and possible accumulation locations of hydrocarbons in the indigenous generation play in the early fault depression simulated under the influence of depression inversion in Changling depression, southern Songliao basin

油气通过断层向上在登娄库组运移,在晚期断陷控制下,早期内斜坡聚集的油气向西迁移集中到断块高部,原先向东斜坡运移的油气也向并列断层的断块高位集中,而到拗陷发生反转后,油气向断陷反转部位集中表现突出(图5)。总体模式效果表明,营城组自生组合油气向东北运移显著,经过后期断陷和拗陷叠加反转变,油气进一步向反转构造集中,并可沿新层位进一步向东北势场高部位运移。

由此判断模拟前在达尔罕反转构造部署的钻井是正确的,该井确证聚集了天然气,虽然对重大气显示完井技术处理不当,试采仍获得相当经济产量。同时,模拟后勘探也在浅层发现小型油藏,它与断陷油气向拗陷运移的模拟情况相似,说明“TSM”模拟思路初步实现的技术具有本质预测的功能,随着勘探进展,实际信息增加,可以在地质分析基础上优化盆地模拟模块组合,继续进行“评价与再评价”。

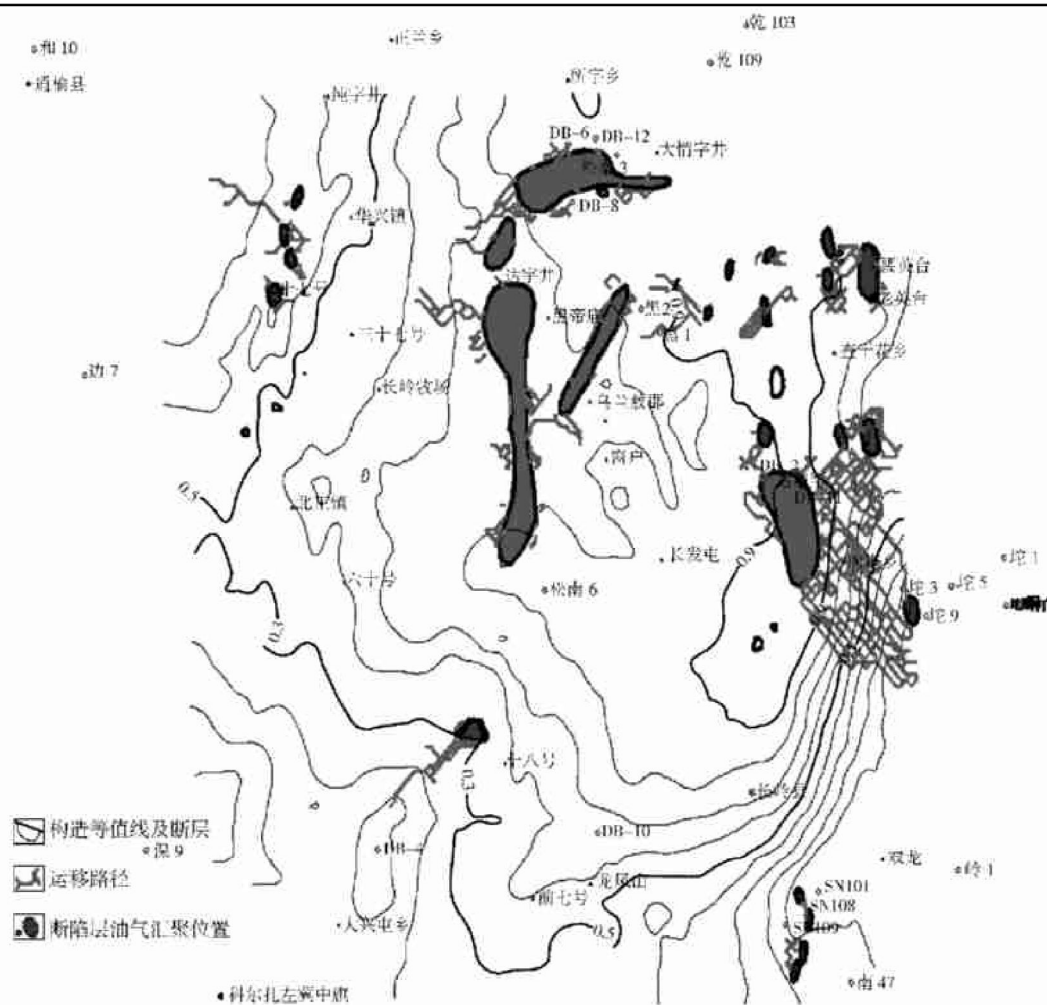


图5 在拗陷反转影响下,模拟松南长岭凹陷早期断陷自生组合可能聚集位置
因反转断层沟通而运移到拗陷储层中的位置

Fig. 5 Simulation for hydrocarbons that have migrated from the possible accumulations in the indigenous generation play in the early fault depression to reservoirs in the present depression being linked up by reverse faults under the influence of depression inversion

对盆地原型分析还存在不同见解的情况下,运用多模块的不同组合可以从已知模拟检验不同见解在地质作用-油气响应上的合理性,优选原型约束方案,为勘探决策提供了依据,接受实践检

验。在东海西湖凹陷应用“TSM”模拟时,试从两个原型演化方案出发,涉及不同构造-热演化和烃源岩转化成熟、排烃、运移关系多达16种派生推理,提供模拟优化检验和选择。这种情况下,计算机

发挥了功能效应,减轻了人的思维和工作量负担。地质分析一致意见是西湖凹陷第三纪以来历经断-坳转化原型演化,但方案 iv 认为断陷南北延展,东断西超,渐新世转化为坳陷,坳陷晚期形成的中央构造背斜带是断陷中央隆起继承性发展形成的;方案 ⑤则推论断陷走向北东,主断层倾向对生,始新世中-晚期转化为坳陷时具有转换边缘性质,中央构造背斜带是与断陷主断面匹配的剪切面在走滑应力场适应性逆向发育的反转构造。两个方案对断陷转化为坳陷的界面引用的地震波组是相同的,只是属性界定不同,因此模拟埋藏史时输入数据是相同的,但却提供了原型性质的比较。针对凹陷具中央背斜带的特征,方案 ⑤组合了二维同心褶曲模块配合模拟。结果,埋藏史模拟检验地震波组输入的数据属性具坳陷性质,断层对沉降、沉积并不起控制作用,埋深差异是沉积后生发展的。另外,按方案 iv 断陷底界数据模拟结果,油气运移路径与发现的已知油气不符。而方案 ⑤推断的反转断面可以沟通断-坳源岩生成的烃,并与现今已知的多源生烃、油气混藏事实相符。由此,经多方案不同模块组合模拟对比,优选了方案 ⑤A(图6)原型演化分析,提出了勘探建议,以便在今后实践中接受检验。

实践的经验表明盆地模拟方法在预测油气位置和资源量估算方面具有极大技术潜力。作为面向复杂系统的预测工具,绝不是如通用软件那样按照文件格式要求输入数据就能实行的。它必须将地质的形象思维与数理的逻辑思维相结合,然后用多方案数学实验优化对比才能达到目的。“TSM”模拟从原型观念针对预测对象进行地质历史分析出发,建模本质上就是对地质实际构架形象思维,进而运用物理化学的逻辑思维考察地质构架“理应如此”的结果是否符合真实。如果不符,就必须修正形象思维,逻辑证伪,重建模式。这是盆地模拟方法应当建立的基本技术路线,同时模型运行的模拟软件必须满足模式检验,揭示过程,达到预测未知的目的。虽然探索“TSM”模拟目前已经有了眉目,但只是“浅尝了一口梨”,还需要进行大量的研发工作,开拓这一科技领域需要全国有志于它的专家通力合作,才能满足我国经济建设迅速发展的要求。

首先,作为模拟前的地质建模,正如朱夏早就

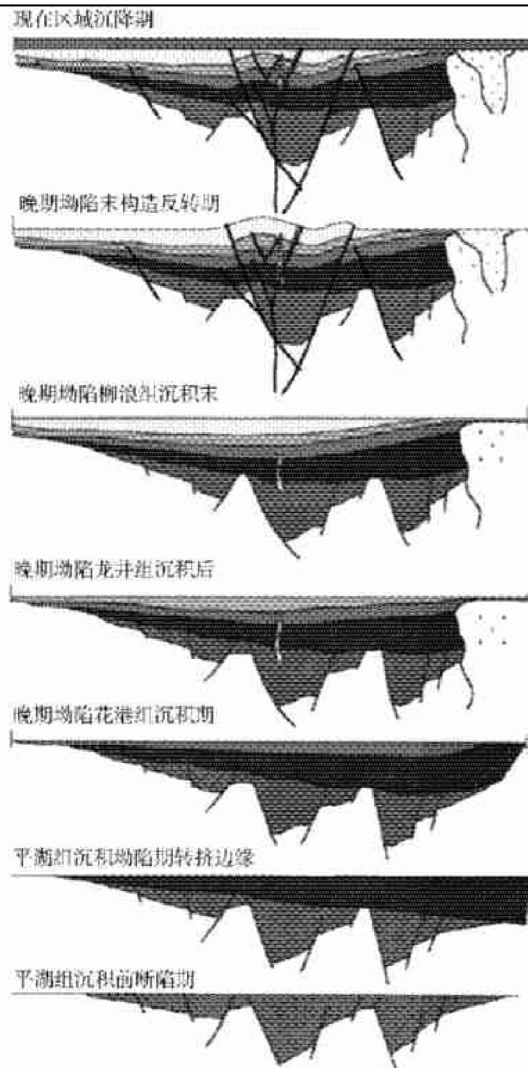


图6 东海西湖凹陷模拟模式

Fig. 6 Modelling pattern of Xihu depression in East China Sea

指出那样,盆地的运动体制“决定于深部根源”^[2,5,6],需要对壳-幔结构的变化有深入的了解,以正确区分不同构造-热体制及其表现的原型结构和风格。这方面虽然已提出了在大陆热覆下岩石层按4大构造-热体制及其表生组成-环境的原型分类,但实例检验并不充分,因此结合大地构造演化以观察为基础,开展分阶段、按体制的原型结构分析还要深入进行下去。国外已经在进行壳幔地球动力学方面的模拟,对检验原型约束下的地质作用-油气响应模拟是有根源本质性的意义,应当密切关注。

作为原型约束地质作用-油气响应关系的模拟,本质上是地质原型构造-热体制观念通过盆地系统边界条件来约束地质要素和油气要素间的作用-响应关系,系统边界条件模拟体现在作用-响应关系的体积、温度、压力($P-V-T$)上,原型结构的

沉降、沉积时空变化约束了油气物质的分布时空(V),原型的热体制在油气物质埋藏下提供了热降解生、排烃的必要条件(T),而原型的构造体制提供了转化的油气运聚的位置(P)。就我国陆内形变形成的中生代不同原型的 P - V - T 关系,还存在许多建模的问题有待攻关。目前“TSM”模拟还只尝试了断-坳原型约束下的系统模拟方法,断陷原型约束应用了岩石层非均一拉张半地堑体积守恒的概念模型转换的数学模型,实现断陷二维沉降的过程,但诸如挤榨前渊、走滑拉分 and 陆内坳陷等原型从体制上进行体积模拟还需要大量的研发工作,而不同原型的叠加模拟更有待于探索,特别是从原型模式和概念模型转换为数学模型系统,存在大量基础研究工作要做,这方面国外基础较好,要善于借鉴、引入、消化吸收。

原型的热模拟本质上涉及体制模拟,其数学方程是成熟的,关键在于地质动态的约束理念和输入参数,包括敏感度。由于地热来自地球内部,一种见解提出定义的岩石层底面是固化面,具有恒定温度 1350°C ,以它作为起始温度计算地温梯度具确定性关系,通过实验包括如裂变径迹等方法测定历史地温值以检验模拟计算的可信度,拟合生烃演化。但是它涉及岩石层深度及其随时间变化的确定,涉及历史地球物理方法基础研究,作为模拟支撑。目前在国外已经有开展模拟盆地演化过程古莫霍面深度的计算方法,值得借鉴。

作为地质作用的压力场,广泛应用着岩石压实和应力应变概念的数学模型,可以优化吸收到“TSM”模拟方法中,但是它对油气响应特别是源岩排烃方式等仍处于先验模式状态,成了油气演化的“瓶颈”问题,需要系统的整合,才能提供油气事件可信的模拟支撑。因此,运用物理实验方法从理论上建立事件本质的联系是急需的。

尽管如此,“TSM”模拟已经探索到一条通向数学实验的方法,它可以在油气地质调查和勘探决策之间起到桥梁作用,跨越已知到未知的鸿沟。通过良好的创新环境和管理,它将成为我国油气勘探领域重要的创新科技链环之一。

参 考 文 献

- Duppenbecker S J and Illiffe J E. Basin modelling: practice and progress [C]. The Geological Society Special Publication, 141, 1998. 1-14
- 朱夏. 关于我国陆相中生界含油气盆地若干基本地质问题的初步设想 [A]. 见: 朱夏. 论中国含油气盆地构造 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1986. 22~34
- 朱夏. 试论古全球构造与古生代油气盆地 [A]. 见: 朱夏. 论中国含油气盆地构造 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1986. 94~121
- 朱夏. 自序 [A], 见: 朱夏. 论中国含油气盆地构造 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1986. 1~3
- 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
- 朱夏. 我国中生界含油气盆地的大地构造特征及有关问题 [A]. 见: 朱夏. 论中国含油气盆地构造 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1986. 4~26
- 朱建辉. 中国东部构造-热体制与断陷盆地多期性迁移特征 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 367~370
- Zhu Jianhui. Tectonic thermal regime and multiple transporting characteristics of faulted basins in eastern China [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 367~370
- Magoon L B. Tuxedni-Hemlock petroleum system in Cook Inlet, Alaska, USA [A]. In: Magoon L B, Dow W G. The petroleum system from source to trap [C]. AAPG Memoir 60, 1994. 359~370
- Deming D. Overburden rock, temperature, and heat flow [A]. In: Magoon L B, Dow W G. The petroleum system from source to trap [C]. AAPG Memoir 60, 1994. 165~186
- Stockmal G S, Beaumont C, Boutilier R. Geodynamic models of convergent margin tectonics, transition from rifted margin to overthrust belt and consequences for foreland basin development [J]. AAPG Bull, 1987, 70: 181~190
- Beaumont C, Quinlan G M, Hamilton J. The alleghanian orogeny and its relationship to the evolution of Eastern Interior, North America [A]. In: Beaumont C, Tankard A J. Sedimentary basins and basin forming mechanisms [C]. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 12, 1987. 527
- Beaumont C, Quinlan G, Hamilton J. Orogeny and stratigraphy; numerical models of the Paleozoic in the eastern interior of North America [J]. Tectonics, 1988, 7: 389~416
- 何兴华. 松南白垩统天然气成藏主控因素与成藏规律 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 75~80
- He Xinghua. An analysis of main control factors and accumulation patterns of gas reservoirs in Lower Cretaceous in southern Songliao basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 75~80
- 王庭斌. 中国气田的成藏特征分析 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 103~110
- Wang Tingbin. Reservoiring characteristics analysis of gasfields in China [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 103~110