

原型控源、迭加控藏

——油气盆地资源分级评价与有利勘探方向优选思维及技术

徐旭辉¹, 方成名², 陆建林², 江兴歌², 王保华², 梁宇生²

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 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 214126)

摘要: 中国含油气盆地的形成演化具有多旋回、多成因、多阶段、多迭加的特点。针对这具有自身风格特点的盆地研究评价, 在朱夏先生提出的 3T(环境)—4S(作用)—4M(响应)盆地分析程式基础上, 通过对我国东、西部大量盆地研究实践, 总结形成了“原型控源、迭加控藏”的盆地分析评价思路, 并进一步提出了“3342”(3 个控制、3 个演化、4 个有效、2 个中心)分析方法, 同时发展形成了“TSM 盆地模拟资源评价系统”的评价方法。这些方法和系统对我国油气不同勘探阶段、不同类型盆地的分析研究和勘探评价部署具有重要的指导作用。

关键词: 盆地分析; 原型控源; 迭加控藏; 盆地模拟; 资源评价

中图分类号: TE155

文献标识码: A

Hydrocarbon sources controlled by basin prototype and petroleum accumulation controlled by basin superposition:

thoughts and technology of resource grading evaluation
and exploration optimization in petroliferous basins

XU Xuhui¹, FANG Chengming², LU Jianlin², JIANG Xingge², WANG Baohua², LIANG Yusheng²

(1. SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China;

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

Abstract: The formation and evolution of petroliferous basins in China are characterized by multi-cycles, multi-genesis, multi-stages and superposition. In these basins with their own style and characteristics, based on the analysis of 3T (time, tectonic setting, thermal regime)–4S (subsidence, sedimentation, stress, style)–4M (material, maturation, migration, maintenance) proposed by Mr. ZHU Xia, and the research and practice of a large number of basins in eastern and western China, a basin analysis and evaluation of “prototype controlled sources and superposition controlled accumulation” is summarized, a “3342” (3 controls, 3 evolutions, 4 effects and 2 centers) analysis method is proposed, and a TSM basin simulation and resource evaluation system is developed. These methods and systems play an important guiding role in the analysis, research and exploration evaluation deployment of different exploration stages and types of basins in China.

Key words: basin analysis; prototype controlled sources; superposition controlled accumulation; basin simulation; resource evaluation

“没有盆地就没有石油^[1]”, 概括说明了油气资源与盆地的密切关系。这里指的盆地显然与朱夏先生指出的那样, 具有历史演化、全球联系、深部根源、动力体制的系统 and 动态属性^[2-4]。朱夏先生强调的“盆地分析”, 其基本思想是将盆地视作一个整体, 全面分析其环境—作用—物质之间响应关

系的全貌, 进而准确预测石油天然气赋存的位置并合理估算资源的量。

历史经验证明, 油气勘探必须遵循从盆地整体到局部的原则, 要防止普查工作战略的片面和失误, 首先要免于找油“哲学的贫困”^[3]。含油气盆地分析正是提供一种由整体到局部的系统性研究

方法,通过把握盆地演化与油气聚集响应的总体规律,由少量的已知现象去推测地下更为复杂而庞大的未知对象,从而指导油气勘探活动并获取资源。理论与实践是相辅相成的统一辩证关系,油气理论来源于勘探实践的认识总结并指导实践。早在 1963 年,朱夏先生就从系统论的观点去研究盆地,提出了“运动体制”的概念,以期依变求本,逾越横亘在已知和未知之间的鸿沟。先生出于对中国大陆地质的深刻认识与长期思考,认为中国含油气盆地的演化经历古全球板块、新全球陆内和过渡运动体制,将全球板块大地构造理论与中国油气勘探的实践结合起来,创新地提出油气盆地分析的 3T-4S-4M 程式(图 1)。不同地质时期相继出现不同类型的原型盆地,原型盆地是一个结构单元,是一种构造型式,也是一个沉积实体,是某一特定地史时期形成的沉积盆地。而盆地是不同时期原型盆地的并列迭加,且前期发育的原型盆地常常受到后期原型盆地迭加及改造。寻找油气要根据盆地形成环境的三要素(时代、位置和热体制),恢复组成盆地各个时期原型及其沉降状况,沉降状况制约了沉积物的供应、沉积的环境和构造的变化等。而盆地原型的复杂迭加关系提供了油气的生成、运移、聚集等效果。因而,3T-4S-4M 之间有着紧密的联系,反映了盆地系统中各要素之间的动态逻辑关系。

作为曾经是朱夏先生同事和晚辈,笔者曾有机会当面聆听其关于油气盆地动态分析思想与勘探实践方面的思考。在先生思想指引下,笔者带领的研究团队曾将中国含油气盆地划分为古中国陆、古亚洲陆、新亚洲大陆 3 个大的形成演化阶段,识别刻画 12 个关键时期的原型并列与迭加关系,支撑了油气勘探战略选区与风险领域评价。同时也深刻认识到,要窥探现今结构复杂盆地内的油气成藏规律,必须首先恢复不同时代原型沉降结构及其

约束下的油气地质要素特征,然后依据原型更迭过程中的结构、要素、组合的动态演变,重建油气藏形成演化过程,最终揭示油气的分布。这一追本溯源式的研究思维与评价方法,笔者概括称其为“原型控源、迭加控藏”,其与朱夏先生倡导的活动论构造历史观与 3T-4S-4M 分析思想一脉相承。本文通过原型内在涵义与其分类回顾,采用实例解析与例举的方式,阐述“原型控源、迭加控藏”分析思维及其在油气盆地资源分级评价与有利方向优选中的应用,以此传承和发展朱夏学术思想。

1 盆地的概念与分类

1.1 盆地的概念与变化

术语“盆地”一词来源于地貌学,指地表低洼的泄水区域,但今天石油地质学引入的盆地概念已远不能望文生义了。石油地质学的盆地包含了洼地充填沉积实体的概念,还包含了低洼地壳沉降的构造成因概念。“沉积盆地”的概念是沉积地质学提出的,术语起因于在沉积学研究中强调沉积岩相古地理分布受构造活动控制,遂引申以变质岩为基底沉降充填沉积的负向单元,并以此概念建立了沉积与构造之间的成因分析^[5-7],形成沉积盆地分析。因而,石油地质学上的沉积盆地概念,认为是地壳沉降提供了盆地沉积的空间,而这一沉降空间不仅充填了一切构成油气藏形成的物质要素,又提供了烃类生成—运移—聚集事件发生的场所。

盆地作为全球构造沉降的单元,其沉降空间受全球板块构造、深部根源与动力作用方式所控制,具有形成时代与运动体制的双重属性。朱夏先生当初为避免与现今沉积连续分布圈定地壳沉降整体而流行称之为盆地的概念相混淆,他引申了 KLEMMER^[8]提出的内含时代概念的“原型”一词,用以表达“一个阶段的结构单元是一种构造形式,也是一个沉积

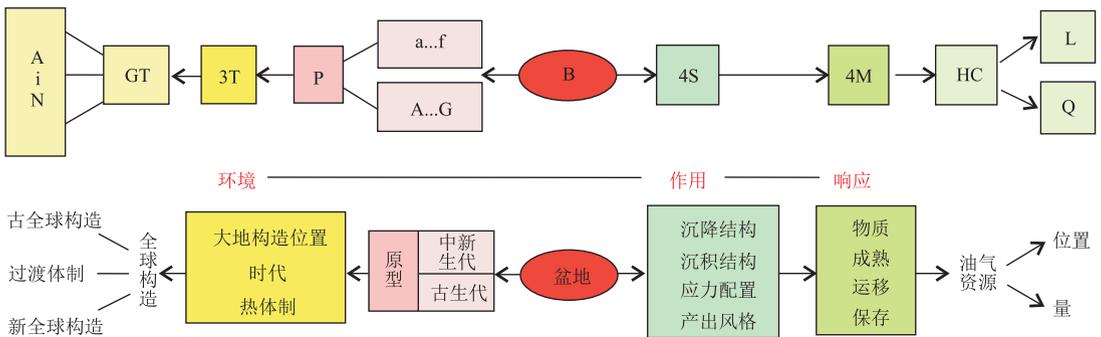


图 1 3T-4S-4M 盆地分析程式

据文献[4]修改。

Fig.1 3T-4S-4M basin analysis program

实体”,而盆地是不同阶段多种结构的组合。

1.2 主要的盆地分类概述

盆地分类,一直是地学领域研究的重要内容。通过盆地分类研究,建立盆地类型与油气生成、运移、聚集过程之间的关系,为预测油气分布服务。

自 1950 年代以来,国际上出现过多次盆地分类研究的热潮。1950 年代,按照盆地从沉积实体到构造成因的思路,WEEKS^[9]以地槽说为基础,将盆地划分为地台区(稳定型)和地槽区(活动带)两类,强调依照大地构造的盆地分类是油气资源评价的基础,并深刻影响了我国早期盆地研究。1970—1980 年代,随着板块构造理论的兴起,盆地分类研究犹如雨后春笋一般,但由于采用的原则或分辨视角不同,盆地分类及其类型各择其耳,流传广泛而具代表性的有:MAILL^[10]以所处的岩石组成将盆地划分为离散边缘、会聚边缘、转换断层、大陆碰撞、克拉通等 5 大类;ALLEN 等^[11]从力学机理上区分盆地,将盆地划分为拉伸、挠曲、走滑 3 大类;PERRODON 等^[12]从油气系统上分辨盆地,划分大陆裂谷型、拗陷型、“造山”型 3 类。MAILL、ALLEN 的分类主要从盆地所处构造位置或盆地沉降形成的动力学机制进行区分,属于成因分类,而油气系统分类则试图建立盆地成因与油气形成分布的约束关系。每一种分类在对盆地大类划分时都有明确的划分原则,然而在亚类划分时或存在与其本身遵循的原则不符,或未考虑盆地类型之间的成因联系,抑或是只考虑分类的端元类型。1990 年代以来,盆地分类大都是在前人或本人研究基础上的修改补充^[13],同时引导了一批国内学者的研究热潮,提出诸多的动力学分类方案^[14-15],但多是在国外学者分类方案基础上的修改完善。

复合的中国大陆和发育其上的盆地,尤其是前中生代海相盆地,经历了多旋回演化和多期次强烈而不均匀的构造改造,致使盆地本身结构较原始面貌大为改观。国外学者在研究盆地分类时无一例外地很少探究中国盆地,多数以“中国型盆地”称之^[16-17]。国内一些学者在对中国盆地类型进行厘定时,或直接引用国外盆地分类,或对国外盆地分类方案作进一步修改,提出诸多盆地分类方案。譬如,陆克政等在总结国内外学者的分类方案基础上,基于地球动力学将盆地划分为挤压、拉张、扭动和沉降型盆地^[18-19]。刘和甫从动力学系统将盆地分为裂陷、压陷和走滑 3 大类^[20]。刘池洋等根据盆地构造动力环境与沉降成因将盆地划分 8 大类 44 种盆地类型^[13]。国内关于盆地的分类至今仍

没有形成相对统一、大家普遍接受的方案,出现这种状况的原因主要在于中国盆地本身的复杂性、划分标准不一、理论研究较为欠缺、整体系统性研究较为薄弱^[13]。

1.3 盆地原型的分类与主要类型例举

前已述及,油气盆地分类最终就是要建立盆地成因对油气形成与分布的约束关系,提供推理未知的基础。通过中国油气勘探的实践,朱夏先生率先提出按原型机制分类盆地,并从历史的、系统的、动态的思想明确提出了盆地的观念和定义及其分类原则^[3]。所谓盆地原型就是一定岩石层组成在历史阶段地球动力环境特定构造—热体制下所表现的沉降结构实体,现今盆地整体是由不同阶段、不同世代原型沉降结构实体的并列迭加组合。原型作为“型”是原本体运行表现为典型结构类型的抽象,它提供了从现今盆地整体解析历史体制更迭复原的模板,以便于分析盆地形成的全过程,有利于在盆地体制变化过程中把握油气形成和分布的变化规律。

究其本质,盆地原型既反映了沉降形成的特定动力机制(环境、热体制),又体现了其具有时代属性。因而,盆地原型的识别需要从全球构造阶段的环境中去考虑。依据朱夏先生的分类思想,张渝昌先生以环境、组成、构造—热体制 3 种要素为分类原则,并依据运动体制的演化,划分出离散陆内、离散陆缘、会聚陆缘、会聚陆内 4 种序列 13 种原型^[21-23](图 2)。本文仅选几类勘探实践中常用但不同作者所理解、拟表达的认识差异颇大的原型术语进行分析,希望能对今后原型涵义的表述达成一些共识,以便交流。

1.3.1 裂谷、拗拉槽、拉张断陷

裂谷、拗拉槽、拉张断陷具有现今结构形态相似的特点,因而在诸多研究文献中存在术语混用的现象,然其所表达的术语涵义却又差异较大。术语表现的内涵差异主要体现在沉降动力机制、沉积实体、深部热结构不同(图 3)。

裂谷或称裂陷,是在稳定大陆岩石圈或克拉通上由于区域性拉张应力造成的沉降实体。裂谷形成于大陆离散的早期,位于陆内岩石圈减薄的部位,往往由于物质组成变化如岩石圈界面、先存裂谷或深部相变等软弱带因幔源物质上涌,诱发浅层地壳在热隆起引张配合下产生受断裂边界控制的沉降,其拉伸量符合岩石层均匀拉伸纯剪模型(图 3a)。因此,裂谷沉降的重要特征是热机制作用强烈,热上涌正对裂谷底面,热梯度与岩石层减薄率

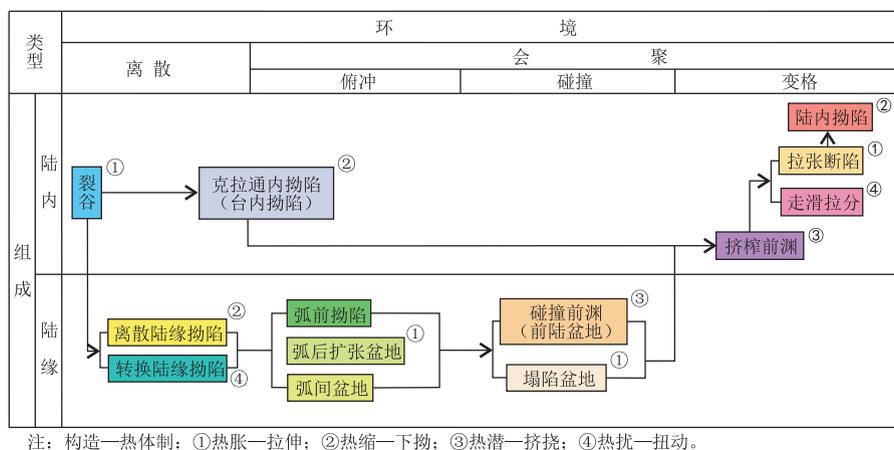


图 2 盆地原型分类方案^[23]

Fig.2 Basin prototype classification

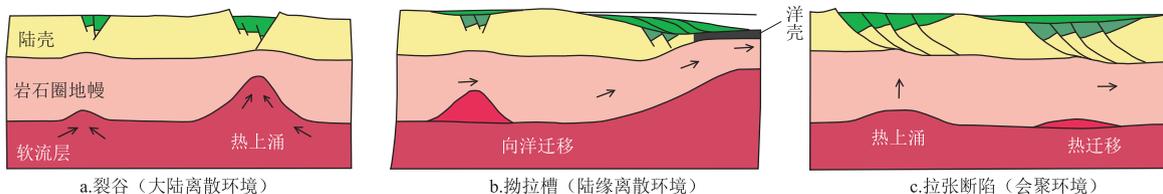


图 3 裂谷、拗拉槽、拉张断陷的形成机制

Fig.3 Formation mechanism of rift valley, depression trough and extensional fault depression

有关,形成多米诺式自由拉伸下切软流层的构造结构。当一个裂谷在初始隆起地方出现时,地貌起伏可达 4 km,破裂纵贯岩石圈,深部基性物质喷溢,随地壳进一步减薄,直到热作用振荡式回复正常,隆起逐步消失。

拗拉槽或称裂陷槽,是因为地幔上涌形成地壳三叉裂谷后发展为衰萎的一支。它代表了大陆裂解的过程,大陆性火山喷发活跃,在沉降上则具有更多的海洋性沉积特征。但随着深部热散失与迁移,拗拉槽的沉积逐步与台地内的沉降合为一体,形成下部边界断裂控制沉降结构与上部拗陷式碟形沉降结构的垂向复合迭加(图 3b)。因此,拗拉槽实际是裂谷与台内拗陷两类原型的迭加组合。在我国中元古代—晚元古代大陆离散期即发育有拗拉槽,如贺兰山拗拉槽。最新勘探实践表明,元古代时期华北克拉通边缘发育多条 NE 向展布的构造沉降带,其走向分布、沉积结构均与拗拉槽成因模式相吻合。

拉张断陷,主要是在大陆岩石圈受挤上隆的背景下,地壳因减薄拉张,深部物质垫入形成断陷(图 3c)。这种断陷因处在会聚环境陆内非均质块体变格排斥的作用下,地幔蠕动上涌,岩石层下压上张,诱发地壳脆韧性分层拆离,断层顺倾向重力滑动呈半地堑式沉降,其沉降符合 WERNICKE 的

岩石层非对称单剪切拉伸模式^[24]。拉张断陷由于会聚边缘构造作用力的变化亦导致地幔蠕动上涌迁移,致使断陷呈现多期性迁移演化的特点,而其主断裂往往消失于岩石圈韧性分界面。原型沉降结构常为多个并列的半地堑,各半地堑地温场的高低程度与断层拆离面交切地幔的热上涌位置有关。晚白垩世以来,中国大陆在印度大陆反旋向亚洲大陆会聚下,开始向东发生排斥运动,形成西挤东斥格局。由此,大陆岩石层地幔开始向东蠕散,并在太平洋斜向俯冲约束下,在东部形成下压上张的犁式断陷。

由上,从三元分类原则看,在会聚大陆拆离面上断陷形成的热上涌方式与离散大陆裂解形成裂谷的热上涌方式不同,原型表现出的拉张断陷,应当明确有别于裂谷,以便把握油气形成和分布条件的不同,提供动态系统预测评价分析的基础。

1.3.2 碰撞前渊与挤榨前渊

前陆盆地这一术语已被国内学者引进并广泛应用,多将具有非对称式挠曲沉降结构的盆地都归为此类,而忽略了该术语所代表的内在涵义。为更为准确地表达形成于会聚碰撞与会聚变格 2 种环境,具有类似结构但实则差异较大的沉降类型,分别以“碰撞前渊”与“挤榨前渊”称之,以示区别(表 1)。

表 1 碰撞前渊、挤榨前渊形成机制差异对比

Table 1 Comparison of formation mechanism of impact and squeeze foregrounds

| 原型类型 | 环境 | 组成 | 热体制 | 构造体制 |
|------|------|----|--------------------------------|----------------------------|
| 碰撞前渊 | 会聚碰撞 | 陆缘 | 从冷返回正常;冷却洋壳俯冲消亡,碰撞大陆融合恢复热正常 | 沉降的构造载荷递增;挠曲刚度弹性;前隆抬升迁移明显 |
| 挤榨前渊 | 会聚变格 | 陆内 | 从热返回正常;热覆盖陆壳升温下潜,中酸性浆岩上涌散热恢复正常 | 沉降的构造载荷递减;挠曲刚度流变性;前隆抬升迁移掩盖 |

碰撞前渊是陆缘会聚陆—陆(弧)碰撞阶段的沉降实体,位于陆缘碰撞造山带前沿,由地壳冲断楔多期的构造载荷形成半挠曲沉降结构,迭加在离散陆缘原型序列之上,也即典型前陆盆地这一术语所表达的真实内涵。陆—陆碰撞经历冷却洋壳俯冲消亡至重新融合为一个大陆岩石层的过程,标志陆缘地幔物质向洋蠕动阻滞,地球热对流中断。碰撞前渊挠曲沉降原型结构的地温场,在陆缘从低地温再恢复到正常,陆缘弹性挠曲沉降控制的前缘隆起抬升具有明显的迁移性。

挤榨前渊则是板块会聚大陆持续受挤的环境下,在陆内热对流中断效应下,深部地幔蠕动下潜引起“陆内俯冲”,诱发大陆内古碰撞造山带复苏、古裂谷反转和大陆基底拆离,致使挤榨造山隆起带冲断楔前沿陆壳因构造载荷而产生挠曲沉降。呈冲断半挠曲沉降的原型结构的地温场,在陆内从正常梯度经高地温再恢复到正常。

显然,陆内变格挤榨前渊原型,虽然在形态上与碰撞前渊(陆缘前陆盆地)相似,结构同是构造载荷下地壳半挠曲沉降的产物。但是,它们所处的构造环境不同,组成物质受力形变反应不同,热机制成因和效应不同。因此,应当从分类上明确区分

开来。

2 原型的演化与油气

2.1 动态成藏的研究方法

油气盆地的分析就是复杂而动态的油气系统分析,需要从原型更迭组合方式中具体地进行系统整合才能把握油气分布。面对复杂的盆地系统进行油气预测,应遵循理论建模—实例校验—动态模拟的工作程序进行研究,以满足勘探需求(图 4)。

理论建模,就是建立盆地原型并列迭加及其地质作用控制下的油气响应预测模式。首先要求在盆地地球动力学知识的基础上,分析内生与外生动力作用关系,识别地壳沉降的基本结构及其控制下的沉积体系展布,明确控制沉降的热体制及其可比拟的对象,建立盆地原型并列迭加的组合模式及其相关的油气生储盖组合关系。进而,根据油气的基本知识,推理分析原型地质作用,诸如容积(V)、温度(T)、压力(P)因素如何约束油气响应,包括生烃、排烃、运移、圈闭,以及油气聚集与保存的方式,最后建立原型地质作用与油气响应模式。

实例校验,即在理论建模分析基础上,通过勘探实例或物理实验、化学测试实际结果进行检验,

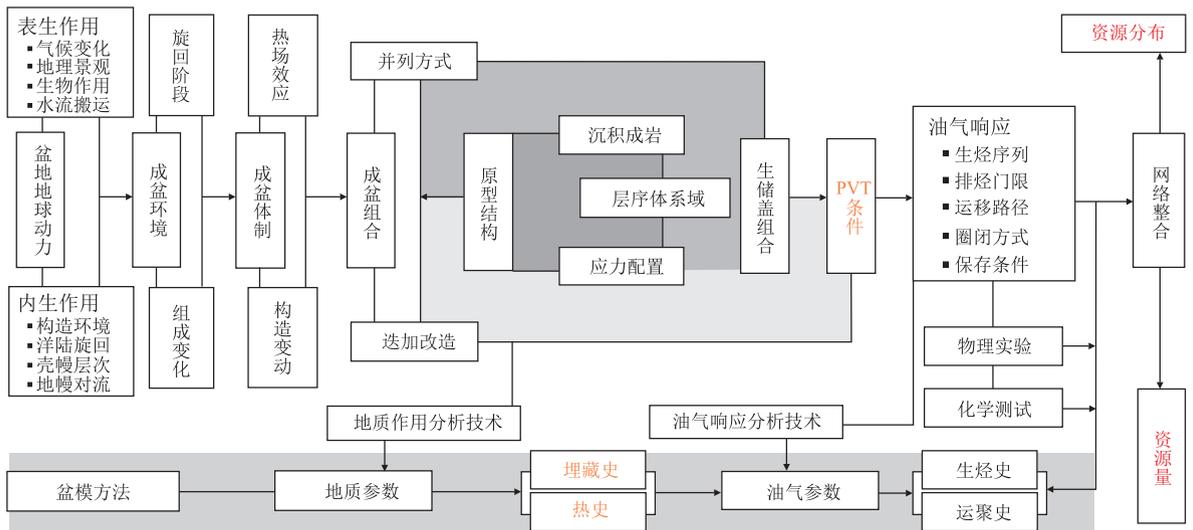


图 4 盆地动态成藏研究的工作流程框架

Fig.4 Workflow framework of basin dynamic reservoir formation research

反复验证类比推理,达到修正或消除理论模式中的错误,最终建立合理的理论模式。累积的大量油气勘探实例和地质作用与油气响应预测模式,可为不同原型迭加序列中系统整合分析,提供从实地少量已知信息优化推理未知的知识案例。

动态模拟,即指运用计算机技术开展理论模式约束下的确定性数理演绎,模拟地质作用—油气响应关系,揭示油气聚集的位置和数量,从而考察盆地系统油气形成和分布的动态规律。

面对盆地原型演化序列复杂的油气系统整合,朱夏先生就从盆地 T(环境)—S(作用)—M(响应)的程式,设想将原型结构看作是在一定环境下的作用—响应系统,并强调了盆地系统的、动态的、定量的研究方向^[25]。这一思想至今闪烁着智慧的光芒,仍处在世界油气勘探地质理论的前沿,是含油气盆地“原型控源、迭加控藏”研究思维与评价技术的指导思想。

2.2 原型控源分析

原型控源分析是理论建模研究的重要内容。原型控源是指原型空间(V)边界范畴内生储盖等诸要素形成与分布的特征。依据不同世代原型结

构的构造—热体制,可确立不同原型沉降空间内沉积充填及其油气地质要素分布规律。不同构造体制、不同类型原型下的烃源岩、储集岩发育及组合均有各自的特点。认识和总结这种特点为我们分析油气形成条件及差异性提供了依据。

笔者通过对中国含油气盆地原型演化及热体制的区域对比,结合对各类盆地的沉积充填物分析,梳理了裂陷、拗陷、前渊、断陷等 4 种原型的控“源”及组合,阐明了不同原型盆地烃源岩、储层、盖层发育的差异性及组合特点(表 2)。

中元古代—早古生代板间构造体制的板块分离或碰撞形成克拉通内裂陷,在裂陷初期快速沉降,裂陷鼎盛期海侵体系域的凝缩层段,发育以硅质、钙质泥岩为主的烃源岩,且深水环境具有有机质保存的有利条件。如绵阳—长宁震旦纪—早寒武世裂陷阶段,裂陷初期发育了灯三段烃源岩,早寒武世早期裂陷强盛期发育了麦地坪组斜坡—盆地相(厚度 100~200 m)和筇竹寺组深水陆棚相泥质烃源岩(厚度 400~800 m);同期在裂陷两侧构造高部位发育灯影组台地边缘礁滩高能相带,利于储层发育,这种叠置或侧接构成了良好的生储组合(图 5)。

表 2 不同体制下原型及控“源”与组合特征对比

Table 2 Comparison of prototype, source control and combination characteristics under different systems

| 构造体制 | 时代 | 原型类型 | 热体制 | 烃源岩发育环境及典型实例 | 储层发育环境及典型实例 | 盖层发育环境及实例 | 生储盖组合及实例 |
|------|-----------|------|------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 陆缘体制 | 中元古代—早古生代 | 裂陷 | 下涌上张 | 盆地—深水陆棚滞留环境,川东北—湘鄂西陡山沱组 | 裂陷(槽)边缘相带,安岳气田灯影组丘滩体 | | 湘鄂西陡山沱组—灯影组—水井沱组生储盖组合 |
| | | 拗陷 | 台缘 | 深部蠕散 | 盆地—陆棚滞留环境,四川盆地北缘下寒武统筇竹寺组 | | |
| | | 台内 | 下缩上沉 | 局限封闭高盐/碱性环境,鄂尔多斯盆地的马家沟组 | 局限台内浅滩,安岳气田龙王庙组 | 局限—蒸发台地相,中扬子宜昌地区覃家庙组 | 安岳气田龙王庙组模式 |
| 过渡体制 | 晚古生代—早中生代 | 前渊 | 下插上挠 | 隆后凹陷滞留海环境,川东南五峰组—龙马溪组 | 富有机质页岩储层 | | 涪陵页岩气田模式 |
| | | 裂陷 | 下涌上张 | 陆棚—盆地相环境,川北、鄂西吴家坪组—大隆组 | 裂陷—台缘边缘礁滩,普光气田长兴组—飞仙关组 | | 普光气田生储盖组合 |
| | | 拗陷 | 下缩上沉 | 海陆过渡环境、台凹,川东南龙潭组、川北茅口组 | 台内生屑滩,川北—川中茅口组 | 局限台地—膏盐潟湖相,四川盆地嘉陵江组、雷口坡组膏盐岩 | 川西雷口坡组 |
| 陆内体制 | 中新世代 | 断陷拗陷 | 下挤上张 | 半深湖—深湖相,渤海湾盆地沙河街组 | 滨浅湖—三角洲相砂体 | 半深湖—深湖相泥岩 | 渤海湾盆地济阳拗陷古近系 |
| | | 前渊 | 下插上挠 | 半深湖—深湖相,川西须家河组 | 滨浅湖—三角洲相砂体 | 半深湖—深湖相泥岩 | 川西须家河组生储盖组合 |

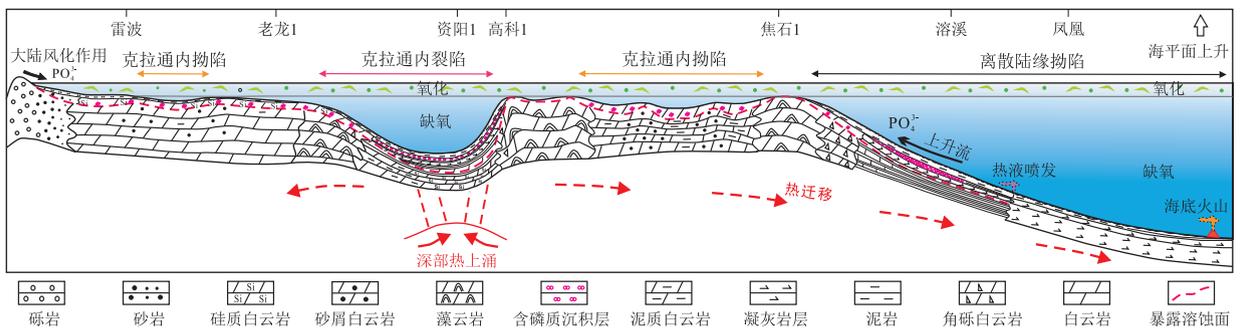


图 5 裂陷和离散陆缘的原型控源模式

Fig.5 Prototype source control model of rifting and discrete continental margin

早古生代陆缘体制下的拗陷,包括陆缘拗陷与台内拗陷,前者主要发育于被动大陆边缘(如四川盆地周缘筇竹寺组沉积期),成烃生物受控于上升洋流,盆地—深水陆棚相滞留沉积环境则有利于有机质保存,海侵体系域凝缩层横向上呈带状—连片分布,岩性以含硅质泥岩为主,钙质与泥质次之。早寒武世末—中寒武世,伴随岩相古地理的变迁和沉降—沉积中心迁移,从早期的离散陆缘拗陷逐步演变为台内拗陷,在龙王庙组发育高能浅滩,有利于储层的发育;晚寒武世随着海平面下降,发育局限台地—潮坪相含膏岩系,构成良好的盖层,并最终形成了川中地区寒武系生储盖组合。鄂尔多斯盆地的马家沟组烃源岩形成与分布则主要受局限封闭高盐/碱性环境控制,这种环境下生物种群单一,浮游生物生产力高,高盐缺氧环境,水体分层,有利于有机质保存;旋回性海进海退构成白云质泥页岩与膏盐岩在纵向上叠置分布,烃源岩类型以钙质泥岩为主。盐盆封闭或半封闭的水环境为有机质堆积、保存提供了有利条件。

晚古生代过渡体制的克拉通内裂陷(如川东北梁平—开江),在裂陷深水陆棚区是烃源岩发育的有利相区,在裂陷—台缘肩部是礁滩相发育的有利区,两者形成良好的生—储组合。而在台内拗陷区,如四川盆地晚二叠世,龙潭组沉积相为滨岸—沼泽—潮坪—半深水—深水陆棚,发育了含煤泥页岩、暗色泥页岩、含硅质泥页岩等多种岩性的烃源岩,与滨岸相—沼泽相中的砂体,碳酸盐岩台地中的各种生屑滩、台缘或台内滩叠置或侧接构成不同于裂陷区的生—储组合。早中三叠世随着大规模的海退,在四川盆地内形成广泛分布的局限台地—蒸发台地相的含膏层系,构成上古生界成藏组合的区域盖层。这种克拉通内裂陷和台内拗陷的并列形成了四川盆地最重要的成藏组合。

中生代陆内体制下的前渊,主要为发育陆相

湖泊、三角洲、河流沉积体系,半深湖—深湖相富含有机质暗色泥岩与三角洲和河流体系中的砂体平面上侧接构成生储组合,湖平面频繁升降导致高位体系域和湖侵体系域的更迭,使得纵向上形成多套生储盖组合,以川西、塔北库车拗陷为代表。

陆内体制下的断陷盆地生储盖的发育及组合受控于断陷结构及演化。对于箕状断陷,整个断陷几乎为斜坡所占据,烃源岩一般发育于靠近边界正断层一侧倒三角形底角的深湖相区,岩性以暗色泥岩为主,而储层(砂体)主要发育在斜坡一侧滨浅湖、三角洲、河流相环境中,在控盆正断层陡坡一侧也发育有扇三角洲体系的砂体。断—拗转换期则有利于区域泥岩盖层的发育。

2.3 迭加控藏分析

迭加控藏,是指原型在历史演化中发生更迭引起地质作用变化,最终其组合的盆地必然关联着地质作用(PVT)与油气响应的联动关系。原型更迭形成统一盆地实体过程中,由于盆地结构、构造体制发生改变,导致油气生成条件的变化和成藏要素重新组合,而最终影响到油气藏的分布。

从我国东部(中)新生代断陷盆地油气发现看,比如松辽、渤海湾盆地,此类原型盆地均具有双层结构,即早期断陷和晚期拗陷,盆地往往具有高热流和高地温梯度,沉积范围小但厚度大,沉降和沉积速率快,生油岩巨厚,短期内快速成熟,油气资源丰富。而在我国中西部中(新)生代—古生代叠合盆地中,比如塔里木、鄂尔多斯、四川盆地,中生代前渊叠覆在古生代地台原型盆地之上,这类盆地发育多套烃源岩层系,往往具有中—低的热流和地温梯度,烃源岩生烃早、持续时间长,具有多期生烃多期成藏的特点,油气资源非常丰富,但分布和富集规律远较前一类盆地复杂。这2类盆地基本上代表了我国油气盆地“风格”。表3概括了这2类盆地迭加改造作用及油气响应。

表 3 两类典型盆地迭加与油气响应

Table 3 Superposition and hydrocarbon response of two typical basins

| 盆地类型 | 迭加关系 | 地温场 | 烃源岩 | 储层 | 圈闭 | 成藏期次 | 成藏组合 | 油气富集规律 |
|-------------|----------------|-------------|------------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------|---|------------------|
| 中生代断陷盆地 | 拗陷/断陷 | 高地温返回正常地温梯度 | 单一烃源岩,短期快速成熟,大量生烃(油为主) | 相控砂体,压实胶结改造为主 | 期次较为单一 | 喜马拉雅早期为主,一次成藏 | 单一—单储:自生自储、新生古储(潜山) | 斜坡、凹中隆控聚,砂体控富 |
| 中生代—古生代叠合盆地 | 中(新)生代前渊/古生代地台 | 由低地向中—低地温梯度 | 多源、多期生烃,过熟,多元供烃,气为主 | 复杂成岩改造,类型多样:礁滩相储层、白云岩储层、风化岩溶储层、致密砂岩储层 | 多期构造形成、后期改造定型 | 多期成藏、油—气转化,晚期调整定型 | 多源、多储、多套区域盖层组成多个成藏组合:下组合、上组合、陆相层系自生—自储组合、跨越式生—储组合 | 古隆起、古斜坡控聚,优质储层控富 |

对于东部(中)新生代断陷盆地,比如渤海湾盆地,始新世和渐新世继承性断陷湖盆奠定了油气生、储要素,新近纪拗陷区域性的地层覆盖,提供了烃源岩生烃、油气运移的温压条件,同时构成了有效的盖层,断—拗转换期的挤压导致了圈闭的形成。这样的原型和迭加配置成就了济阳拗陷为代表的富油拗陷。但对于冀中廊固凹陷,早期断陷盆地继承性差,上迭拗陷层厚度也小,致使烃源岩未能大量生油,且保存条件也差,油气规模较小。因此,原型的发育程度和双层结构的配置好坏直接影响了油气生成和富集程度。

对于以四川盆地为代表的中(新)生代—古生代叠合盆地,原型的期次多、迭加改造方式复杂,对这类盆地油气成藏过程的分析及分布预测更需在“原型控源、迭加控藏”原则下进行。对于下伏的古生代盆地,烃源岩演化具有“形式转换、位置迁移”的特点,经历长期演化后,现今多已达到过成熟阶段(特别是下古生界烃源岩),已不具有供烃能力,早期形成的古气藏构成晚期成藏的有效烃源;碳酸盐岩储层,经历了复杂成岩作用(包括岩溶、白云岩化、构造裂缝)改造后,有效储层的展布

需根据成储主控因素的分析而综合预测;不同时期的古构造(古隆起、古斜坡)控制了不同阶段的油气运聚,输导系统类别决定了源—圈—储的配置。所以,只有把成藏过程的分析 and 现今成藏要素在时间和空间上进行关联,才能对油气藏进行定位。

3 评价预测方法建立

3.1 “3342”分析方法

盆地分析的目的最终要为寻找油气目标和勘探实践服务。以 3T-4S-4M 盆地分析思想为指导,以“原型控源、迭加控藏”为研究思路,提出了针对盆地研究的分析流程和“3 个控制、3 个演化、4 个有效、2 个中心”的研究方法(图 6)。

3.1.1 三个控制

前文对“原型控源”的内涵进行了阐述,盆地在形成发育过程中,伴随着沉积实体的充填,这种沉积实体的性质、组成和形态本身受到原型形成的控制。具体表现为:(1)区域大地构造背景控制了盆地的形成及其原型特征,如不同构造体制下裂谷、断陷、拗陷的形成;(2)原型盆地对沉积实体的控制作用,不同的原型结构具有不同的沉积体系组

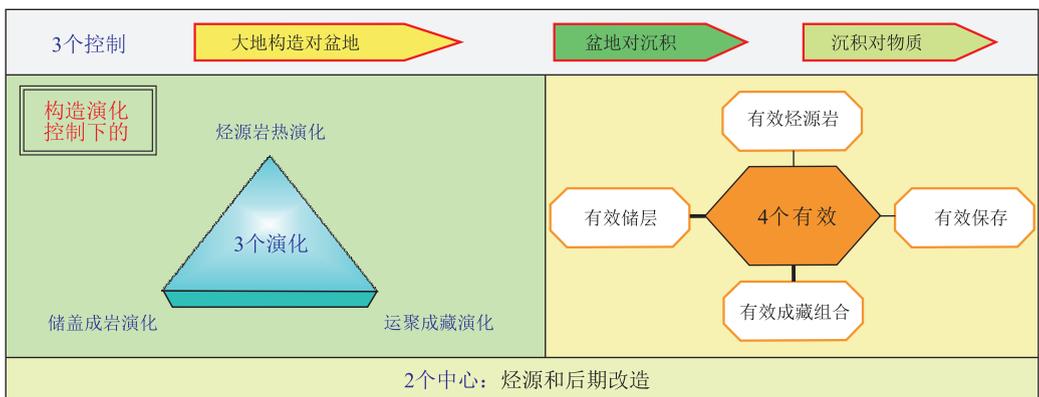


图 6 “原型控源、迭加控藏”下的“3342”分析方法

Fig.6 “3342” analysis method under “prototype controlled sources and superposition controlled accumulation”

成特征;(3)沉积体系包含了组成烃源岩、储集岩、盖层等成藏关键要素的物质,也即控制了油气成藏的物质基础、组成特征及其类型和特性,如表2中不同原型下“控源”的岩性及组合特征,这是开展油气成藏研究的基础和前提。通过对这3个控制的研究,来落实油气勘探目标的生、储、盖特征及其组合方式。

3.1.2 三个演化

盆地及其沉积充填实体在形成以后,因地球动力学体制的变化,会随之发生烃源岩的热演化、储盖层的演化、运聚成藏的演化。这个变化和演化是连续性的。除了会被后期新的原型取代而迭置形成原型迭加关系外,其自身也会随着动力学条件的变化而发生或沉降或隆升等运动和变化。特别是这种迭加不仅是沉积的上叠,更重要的则是运动的迭加^[22]。这种运动体制的变化导致盆地的地质作用特征相应发生一系列的变化,在本质上就是在构造—热体制制约下,对沉积实体所处环境的PVT(压力、体积、温度)特征的控制。这种控制作用到生、储、盖等沉积物质产生一系列的物理化学变化,包括烃源岩的热演化、储—盖层的成岩演化等。烃源岩中有机质的组构、化学组成及生成的产物会发生相应的变化,其演化是一个逐渐变化的连续过程并具有明显的阶段性,在不同的演化阶段,有机质生烃演化具有不同的演化模式,生成石油、天然气等阶段性的烃类物质,张厚福等^[26]对它们在有机质转化过程中的作用机理进行了比较系统的概括。同时,盆地沉积物在构造—热体制的作用下,受压力、温度的影响,由松散的沉积物转变为沉积岩,伴随其中的有多种成岩作用类型,包括压实作用、胶结作用、重结晶作用和新矿物的生长等,其成岩作用一般也可划分为4个阶段:同生阶段、成岩阶段、后生阶段和表生成岩阶段等。这种成岩演化决定了各类沉积岩最终的岩石物理性质特别是渗流特性。在所处的应力场的作用下,这种演化形成的油气物质,会沿着可能的渗流通道,由高势区向低势区发生运移、聚集或散失等变化,可能遇圈闭成藏,也可能运移至地表散失。对非常规页岩油气而言,更多的则是生、储、聚一体化,若保存条件有利则原地成藏;和常规油气相比其较大的差异就是运聚方式的差异,而油气成藏的本质则是一样的。因此,这3个演化的动态变化过程是运动体制下油气响应的主要研究内容。

3.1.3 四个有效

构造—热体制对这种油气响应的控制而产生

的结果,表现在4个方面,即:烃源岩的有效性、储层的有效性、保存条件的有效性以及它们形成的成藏组合的有效性,这种有效性决定了原生的生、储、盖及其组合是否最终成为有效的成藏组合。在烃源岩生烃演化初期,成熟度低时($R_o < 0.7\%$)不能生成足量的烃类物质,难以供烃到储层成藏;而当 R_o 过大时($R_o > 2.0\%$),烃源岩处于过成熟阶段,生烃作用逐渐衰竭,烃源岩难以继续有效供烃。烃源岩这种生烃的阶段性和模式在盆地构造演化过程中决定了什么时间、什么环境下能够对成藏组合有效供烃,而生成的量的多少和运聚的特征可以通过埋藏史、热史、生烃史、运聚史的模拟和资源评价计算得到。不同的成岩作用阶段、类型对储集岩、盖层起到不同的改造作用,有建设性改造作用和破坏性改造作用,其结果是形成好的储层或差的储层及非储层、盖层等。对有利储集岩体的预测以及对其在构造—热体制作用下成岩作用的研究,是评价确定是否是有效储层的主要研究内容,是对有效储层进行预测的关键。基于对盆地“四史”研究的同时,结合成岩作用的分析,可以开展孔隙度演化史的研究,深化对储、盖层特征和有效性的认识,是确定有效的生储盖组合、评价和预测有利油气聚集区的重要内容。

3.1.4 二个中心

基于烃源岩演化及有效性的研究,结合应用TSM盆地模拟资源评价系统,可以开展资源量及其在成藏体系中分布的研究,这是成藏体系中油气物质的来源和存在的关键。生成的油气物质的存在状态直接受到成藏体系中各成藏要素的影响,特别是贯穿油气成藏过程中盆地的构造运动,动态地影响着油气的存在状态和运移路径、聚集位置,并决定着油气藏的最终存在状态,这也是勘探的目标所在。因此,无论对常规油气藏和非常规油气藏而言,烃源和后期改造是确定油气藏(田)目标的中心,也是在“迭加控藏”研究中“4个有效”研究基础上,确定油气富集区带和目标的关键研究内容。

3.2 TSM盆地模拟方法

TSM盆地模拟就是在实际盆地构造环境演化(T)分析类比建立不同世代原型的基础上,利用现代信息技术对原型地质作用(S)和油气物质响应(M)之间可能的各种组合关系方案进行确定性数值模拟实验,进而研究原型并列迭加演化、盆地系统整合和油气动态成藏的模拟方法,最终确定盆地油气资源的量和分布位置^[27]。这是经过探索实践,逐步形成了具有原创特色的方法,称之为“TSM

盆地模拟方法”^[28-31]。

3.2.1 思路

根据朱夏先生提出的 3T-4S-4M 盆地系统评价的思路(图 1,图 4),把盆地油气评价方法的系统性和动态性融汇在一起,形成了盆地定量模拟评价方法的指导思想,按照盆地理论建模—实例校验—动态模拟的程序着手实施。盆地模拟要求在盆地原型地质建模的基础上,通过模拟来洞察原型并列迭加效果,检验概念、揭示过程、预测未知,以期在勘探进程中从盆地整体上进行分级评价,预测油气的所在位置和数量,提高勘探命中率。

3.2.2 流程

TSM 盆地模拟是在地质研究人员对盆地进行原型分析后,根据盆地的原型迭加序列,选择合适的地质模型来完成模拟计算。不同的原型用不同的地质模型来完成模拟计算,而且埋藏史、热史、生烃史、运聚史等模拟过程中,每个模拟过程都要选择与原型相适应的计算模块来执行。盆地模拟为了反映盆地的地质演化过程,计算的模型必须适应这种不同原型并列迭加的作用。根据盆地原型分析的结果,针对各演化史分别选择模拟计算的方法,组成一个完整的模拟流程。

3.2.3 模型库

TSM 盆地模拟涉及广泛的地质模型,从盆地沉降与沉积—构造作用到油气生成和油气成藏及其这些模型之间的关系。实现这一庞大的、复杂的油气盆地模拟,需要一个代表各类盆地原型并按照埋藏史、热史、生烃史和运聚史建立的一套 TSM 盆

地模拟资源评价系统模型库(图 7)。随着油气盆地模拟研究工作的不断深化,不断地充实、更新库中的模型。

3.2.4 特点

该系统具有明显的特点,主要包括:TSM 盆地模拟技术强调了原型地质作用约束下的油气预测模拟,强调盆地原型并列迭加分析,恢复盆地演化过程,据此确定盆地模拟流程;模拟采取了确定性的数值模拟方法;TSM 盆地模拟是盆地系统整合的有效方法;实现含油气盆地资源的分级评价,适用于不同勘探程度的盆地;在地质作用模拟的控制下,开展油气响应的动态模拟,达到定量模拟盆地资源及分布、定量评价有利区带以及预测目标的目的。该系统的研究思路和功能特色能更有效地满足我国多旋回叠合盆地模拟和资源评价工作的需要。

基于 TSM 盆地模拟方法在以往研究的基础上,研发形成了 TSM 盆地模拟资源评价系统(v2.0)。软件分为一维单井模拟、二维剖面模拟、三维模拟、资源评价,以及一个“系统管理”模块和帮助模块,系统管理负责处理一些参数管理和软件系统相关的管理工作。单井模拟可以对研究区进行快速的模拟评价,起到初步认识规律和指导部署的作用。剖面模拟可以对研究区进行快速的二维模拟评价,起到对成盆、成烃、成藏规律的初步认识和指导部署的作用。三维模拟是针对三维数据体的埋藏史、热史、生烃史、运聚史模拟。三维模拟可以对研究区进行系统模拟,深化对成盆、成烃、成藏规

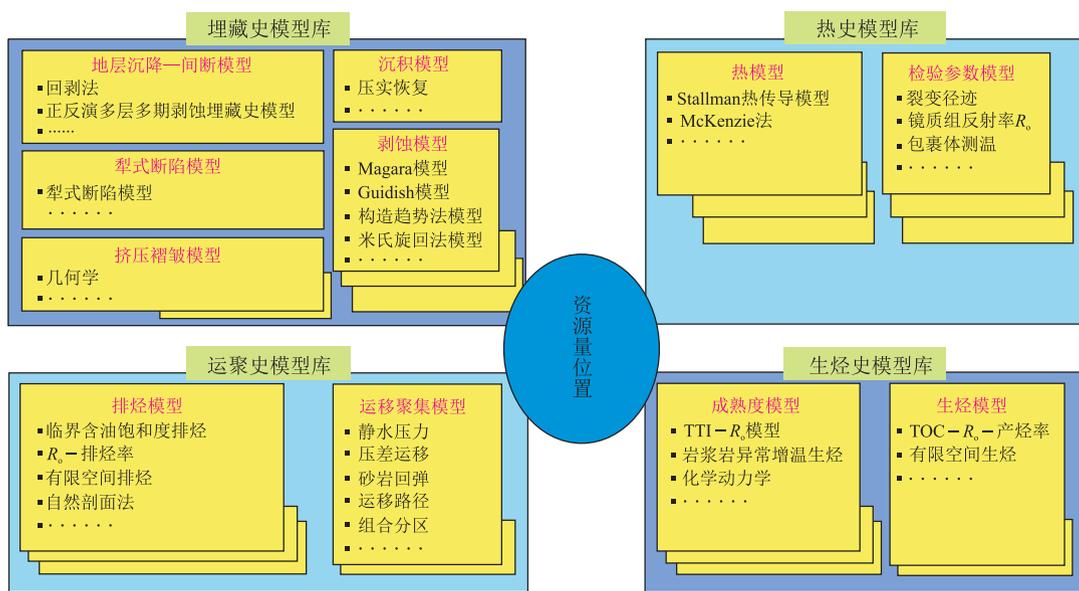


图 7 TSM 盆地模拟资源评价系统模型库

Fig.7 Model base of TSM basin simulation and resource evaluation system

律的认识和有利区带的评价,从而指导部署。资源评价模块在三维模拟的基础上对研究区开展油气资源评价。

3.3 “TSM 盆地系统模拟方法”应用简述

TSM 盆地模拟资源评价系统本着边研发边应用的原则,不断在实践应用中得到发展和完善,在我国不同类型、不同勘探程度盆地都得到较广泛的应用,在战略准备领域、风险突破领域评价优选和勘探部署中发挥了重要作用。本文以海相叠合盆地、陆相拉张断陷盆地以及非常规领域的资源评价为例做简要论述。

3.3.1 海相叠合盆地——四川盆地 TSM 盆地模拟及勘探方向优选

四川盆地从晚震旦世到现今经历了晚震旦世—中奥陶世的离散陆缘拗陷+克拉通内拗陷、晚奥陶世—中二叠世克拉通内拗陷与碰撞前渊、晚二叠世—中三叠世的克拉通内裂陷与拗陷、晚三叠世—晚白垩世的挤榨前渊、古近纪—第四纪的盆地萎缩与隆升改造等演化阶段,不同时期的原型并列迭加形成了盆地差异演化特征。盆地及邻区海相建造发育下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组下部、上二叠统吴家坪组/龙潭组 3 套优质泥质烃源岩和中二叠统栖霞组—茅口组一套中等丰度碳酸盐岩烃源岩;陆相建造发育上三叠统须一、三、五段和下侏罗统自流井组、中侏罗统千佛崖组多套烃源岩。不同时期的盆地原型直接控制了烃源岩的展布及品质。以中二叠统茅口组为例,烃源岩发育与分布受陆缘(内)裂陷控制,优质烃源岩主要分布在台内拗陷和陆内裂陷内。

基于“原型控源、迭加控藏”的思路,在 TSM 盆

地模拟整体框架约束下,分区开展盆地原型演化序列研究,建立不同地区模拟流程。以川东南地区原型演化为例,川东南地区从早寒武世至今经历了离散陆缘拗陷—克拉通内拗陷—碰撞前渊—克拉通内拗陷—挤榨前渊等演化阶段,构造演化复杂,在模拟过程中依据不同世代原型演化特征,分区域建立相应的热演化模型,形成盆地的差异演化(图 8)。不同时期的盆地演化及原型叠加控制了油气成藏地质条件,直接决定了有利油气运聚位置及资源规模。在此基础上,开展四川盆地 TSM 盆地模拟及资源量计算。在完成盆地埋藏史—热史—成熟度史—生烃史模拟后,综合考虑烃源岩层在关键地质时期的烃源灶展布、古构造图、流体运移趋势与运聚单元划分,开展油气排烃及运聚模拟。模拟结果显示,中二叠统烃源岩主排烃期为早燕山期。早燕山末期的上三叠统顶部古构造形态,进一步控制了油气运聚优势方向。从油气运聚结果看,该时期川中及川西南地区是早期油气藏形成的主要地区。

3.3.2 拉张断陷盆地——南襄盆地泌阳凹陷 TSM 盆地模拟及有利勘探方向

泌阳凹陷新生代以来经历了 2 个原型演化阶段,古近纪渐新世期间发育拉张断陷,形成断陷层核桃园组近千米主力优质烃源岩层,至新近纪转换为拗陷。据此盆地原型演化序列,建立了泌阳凹陷盆地模拟流程,针对不同时期演化,采用拉张断陷、拗陷模型开展模拟。

模拟表明,核桃园组烃源岩主体在渐新世末进入生油高峰期,中新世末达到高成熟,最大生油层位核三₃,主要生油期为持续沉降阶段。利用源—储压差特征进一步模拟了断陷层排烃特征,其中以

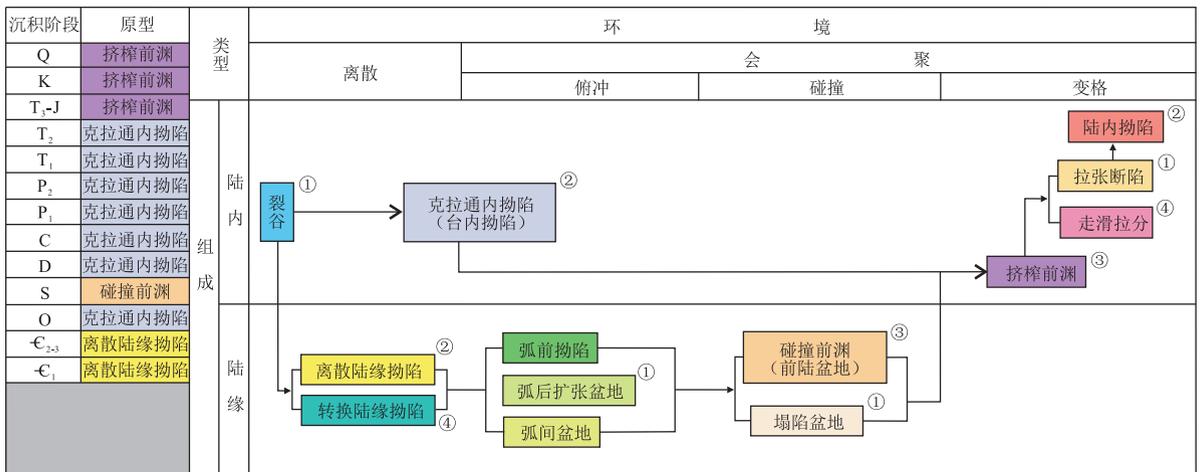


图 8 川东南地区寒武纪以来盆地原型演化序列

Fig.8 Basin prototype evolution sequence since Cambrian in southeastern Sichuan Basin

核三₄烃源岩的排油量最大。在排烃史模拟基础上,开展断陷层油气运移模拟,结合关键排烃期古构造形态,将泌阳凹陷划分为4个主要油气聚集区带,其中双河—赵凹地区石油资源潜力最大。

3.3.3 非常规——川东南五峰组—龙马溪组页岩气 TSM 盆地模拟及有利勘探方向

川东南地区从早寒武世至现今经历了多个盆地原型演化阶段(图8),构造演化复杂,造成五峰组—龙马溪组泥页岩地质演化差异大,泥页岩分布非均质性强,保存条件差异大。采用常规方法(体积法、类比法、测井拟合法等)预测页岩气资源量效果不理想,页岩气资源的空间展布特征预测缺乏有效的边界条件约束,因而制约了页岩气目标优选和勘探开发部署。

针对页岩气资评和选区中的这些问题,确定了在 TSM 盆地模拟整体框架约束下,地质—实验—测井相结合的页岩气资源评价方法。在完成盆地埋藏史—热史—生排烃史模拟后,可获得源内生成天然气(理论最大滞留气)量及分布。一部分源内生成气排出烃源岩体系外,形成常规气的一部分或散失掉;另外一部分仍保留在泥页岩层系内,形成页岩气。经历一系列地质演化后仍残留在泥页岩层系的天然气占源内生气量的比值即为页岩气“存滞系数”,该系数是盆地模拟法计算页岩气资源量中关键参数之一。对于已有较多页岩气专探井的地区,可以在单井理论最大滞留气量精细模拟计算的基础上,结合实测含气量反推页岩气“存滞系数”。通过对涪陵、丁山、彭水典型页岩气井开展解剖和应用,得到页岩气“存滞系数”。涪陵地区 JY1 井五峰组—龙马溪组页岩气“存滞系数”为 32.44%,丁山地区 DY1 井为 23.26%,彭水地区 PY1 井为 15.97%,表明不同地区页岩气“存滞系数”存在较大差异。

采用上述方法,结合川东南不同地区 8 口典型页岩气井 215 项实测含气量数据,结合神经网络等新算法的应用和研究区关键地质参数评价,获得了川东南五峰组—龙马溪组页岩气资源量及其分布情况。结合甜点区预测,确定了页岩气勘探的有利方向。

4 主要结论

(1) 盆地分类的目的是获取盆地形成演化对油气成藏控制的规律性认识,从而可推理预测油气分布。按原型机制分类是朱夏先生的见解,反映了盆地沉降的动力背景与构造—热体制变化对油气

行为的约束。盆地原型是一定岩石层组成在历史阶段地球动力环境特定构造—热体制所表现的沉降结构实体,现今盆地是由不同阶段、不同世代原型沉降结构实体的并列迭加组合。盆地原型分类提供了从现今盆地解析历史体制更迭复原的路径,以便于分析盆地形成的全过程,有利于在盆地体制变化过程中把握油气形成和分布的变化规律。

(2) “原型控源、迭加控藏”是在传承朱夏先生提出的 3T-4S-4M 盆地分析程式基础上的创新实践,既是一种针对复杂盆地油气系统动态分析的思维方式,也是提供盆地油气资源定量分布预测的有效方法。原型控源即依据不同世代原型结构的构造热体制,确立原型空间边界范畴内生储盖等诸要素形成与分布的规律。迭加控藏即指原型在历史演化中发生更迭过程会引起地质作用变化,最终其组合的盆地必然关联着地质作用与油气响应的联动关系。

(3) 基于“原型控源、迭加控藏”研究思路下的“3342”分析方法,是进行盆地油气成藏系统分析和确定勘探方向、目标的有效途径,适合针对我国多旋回、多成因迭加改造盆地的评价研究。

(4) TSM 盆地模拟资源评价系统能适用不同勘探阶段、不同盆地原型及其组合的盆地模拟和资源评价的需要,达到定量模拟盆地资源及分布、定量评价有利区带以及预测目标的目的;能有效地满足我国多旋回、多期改造叠合盆地勘探评价部署的需要。

致谢: 本文研究过程中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盆地研究中心的大力支持,并得到了教授级高工张渝昌先生生前的指导和帮助,在此向广大支持盆地分析研究的学者专家一并表示感谢!

参考文献:

- [1] PERRODON A. Geodynamique petroliere: genese et repartition des gisements d' hydrocarbures [M]. Paris: Masson-Elf Aquitaine, 1980: 381.
- [2] 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]. Experimental Petroleum Geology, 1991, 13(3): 201-209.
- [3] 朱夏. 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.
ZHU Xia. ZHU Xia's discussion on China's petroleum basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 1-3.
- [4] 朱夏. 试论古全球构造与古生代油气盆地[J]. 石油与天然气地质, 1983, 4(1): 1-33.

- ZHU Xia. Notes on ancient global tectonics and Paleozoic petroliferous basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 1983, 4(1): 1-33.
- [5] PETTIJOHN F J. Sedimentary rocks[M]. New York: Harper and Brothers Press, 1949.
- [6] PETTIJOHN F J. Sedimentary rocks[M]. 2nd ed. New York: Harper and Brothers Press, 1957: 718.
- [7] PETTIJOHN F J. Sedimentary rocks[M]. 3rd ed. New York: Harper & Row, 1975: 628.
- [8] KLEMME H D. Giant oil fields related to their geologic setting: a possible guide to exploration[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1975, 23(1): 30-66.
- [9] WEEKS L G. Factors of sedimentary basin development that control oil occurrence[J]. *AAPG Bulletin*, 1952, 36(11): 2071-2124.
- [10] MIALD A D. Principles of sedimentary basin analysis[M]. New York: Springer, 1984.
- [11] ALLEN P A, ALLEN J R. Basin analysis, principle and application[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [12] PERRODON A, MASSE P. Subsidence, sedimentation and petroleum systems[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1984, 7(1): 5-25.
- [13] 刘池洋, 王建强, 赵红格, 等. 沉积盆地类型划分及其相关问题讨论[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 1-26.
LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHAO Hongge, et al. The classification of sedimentary basins and discussion on relevant issues[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 1-26.
- [14] 张一伟, 陈发景, 陆克政, 等. 中国含气(油)盆地的构造格架和成因类型[J]. *中国科学(D辑 地球科学)*, 1996, 26(6): 493-498.
ZHANG Yiwei, CHEN Fajing, LU Kezheng, et al. Plate tectonic setting and genetic types of gas (oil)-bearing basins in China[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 1997, 40(1): 16-22.
- [15] 陈发景, 汪新文. 中国中、新生代含油气盆地成因类型、构造体系及地球动力学模式[J]. *现代地质*, 1997(4): 411-424.
CHEN Fajing, WANG Xinwen. Genetic types, tectonic systems and geodynamic models of Mesozoic and Cenozoic oil- and gas-bearing basins in China[J]. *Geoscience*, 1997(4): 411-424.
- [16] BALLY A W, SNELSON S. Realms of subsidence[M]//MIALD A D. Facts and principles of world petroleum occurrence. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1980: 9-94.
- [17] BOIS C, BOUCHE P, PELET T. Global geologic history and distribution of hydrocarbon reserves[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(9): 1248-1270.
- [18] 陆克政. 关于盆地分类问题的讨论[J]. *华东石油学院学报(自然科学版)*, 1987, 11(4): 1-7.
LU Kezheng. Discussion on basin classification[J]. *Journal of East China Petroleum Institute*, 1987, 11(4): 1-7.
- [19] 陆克政, 朱筱敏, 漆家福. 含油气盆地分析[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 424.
LU Kezheng, ZHU Xiaomin, QI Jiafu. Analysis of petroliferous basin[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2001: 424.
- [20] 刘和甫. 沉积盆地地球动力学分类及构造样式分析[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 1993, 18(6): 699-724.
LIU Hefu. Dynamic classification of sedimentary basins and their structural styles[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 1993, 18(6): 699-724.
- [21] 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.
ZHANG Yuchang. Petroliferous basin prototypes in China[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1997.
- [22] 张渝昌. 关于盆地油气动态成藏系统研究的理论问题[C]//朱夏油气地质理论应用研讨文集. 北京: 地质出版社, 2001.
ZHANG Yuchang. Theoretical problems about basin hydrocarbon dynamic accumulation system[C]//Application papers of oil and gas geology theory of ZHU Xia. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 207-218.
- [23] 张渝昌. 动态的盆地和石油: 从盆地原型系统的组合例解油气形成和分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
ZHANG Yuchang. Dynamic basin and petroleum[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [24] WERNICKE B, BURCHFIELD B C. Modes of extensional tectonics[J]. *Journal of Structural Geology*, 1982, 4(1): 105-115.
- [25] 朱夏. 中国东部板块内部盆地形成机制的初步探讨[J]. *石油实验地质*, 1979(1): 1-9.
ZHU Xia. A preliminary study on the formation mechanism of basins within the eastern plate of China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1979, 1(1): 1-9.
- [26] 张厚福, 孙红军, 李滢莲. 大中型气田形成条件的早期预测[M]. 东营: 石油大学出版社, 1997.
ZHANG Houfu, SUN Hongjun, LI Weilian. Early prediction of formation conditions of large and medium gas fields[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1997.
- [27] 徐旭辉, 朱建辉, 江兴歌, 等. TSM盆地模拟原理方法与应用[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(6): 729-737.
XU Xuhui, ZHU Jianhui, JIANG Xingge, et al. Principle of TSM basin simulation system and its application[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(6): 729-737.
- [28] 徐旭辉, 江兴歌, 朱建辉, 等. 盆地系统定量分析和计算机模拟应用[J]. *石油物探*, 1997, 36(3): 56-69.
XU Xuhui, JIANG Xingge, ZHU Jianhui, et al. Basin system quantitative analysis and computer modeling application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1997, 36(3): 56-69.
- [29] 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.
- [30] 徐旭辉, 江兴歌, 朱建辉. 断陷—拗陷原型迭加系统的生烃史: 以苏北盆地溱潼凹陷为例[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(3): 225-230.
XU Xuhui, JIANG Xingge, ZHU Jianhui. Hydrocarbon-generation history of fault subsidence-depression prototype superimposition system: a case study of Qintong Sag in the North Jiangsu Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(3): 225-230.
- [31] 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.