

文章编号: 0253-2697(2023)09-1399-18 DOI:10.7623/syxb202309001

全油气系统

基于成因法评价油气资源:全油气系统理论和新一代盆地模拟技术

贾承造^{1,2} 庞雄奇^{1,3} 郭秋麟⁴ 陈掌星^{1,5} 王飞宇^{1,3} 刘国勇⁶
高永进⁷ 施砍园^{1,3} 姜福杰^{1,3} 姜林⁴

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京) 北京 102249; 2. 中国石油天然气集团有限公司 北京 100724;
3. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249; 4. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083;
5. 卡尔加里大学化学与石油工程系 加拿大卡尔加里 T2N1N4; 6. 中国石油新疆油田公司 新疆克拉玛依 834000;
7. 中国地质调查局油气资源调查中心 北京 100083)

摘要:以盆地模拟为核心内容的成因法在勘探生产中得到广泛应用。中国的盆地模拟理论研究走在世界前列,但应用软件开发落后于世界其他国家。中国市场上的39种盆地模拟应用软件或算法中有75%来自国外公司,而国际上流行的盆地模拟软件,100%出自国外公司。盆地模拟研究目前面临的主要挑战是早前普遍应用的经典油气系统理论不能有效适用于非常规油气资源评价。采用全油气系统理论可以应对当前挑战:首先,基于全油气理论阐述了常规和非常规油气资源联合共存的基本特征、成因机制和分布规律,为常规和非常规油气资源预测评价提供了理论和方法指导;其次,通过建立常规和非常规油气藏的联合成因模式,建立了生烃总量与油气资源量之间的物质平衡关系,研发了常规油气、致密油气和页岩油气3类资源的预测评价关键技术;然后,建立了全油气系统生烃总量等与其演化产物之间的5组物质平衡方程,分析了原始烃量比率、运聚系数、可动烃比率、采收率等关键地质参数,提出了研发3类12项盆地模拟关键技术。基于全油气系统理论和现代信息技术来构建新一代盆地模拟系统,有望实现油气资源评价定量化、自动化和智能化,使油气资源总量提高5~8倍,预测评价资源的深度增大3倍以上,预测评价资源结果的可靠性大幅提升,并解决目前面临的卡脖子难题。

关键词:全油气系统;盆地模拟;成因法;油气资源评价;油气动力场

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Assessment of oil-gas resources based on genetic method: whole petroleum system theory and new generation basin modeling technology

Jia Chengzao^{1,2} Pang Xiongqi^{1,3} Guo Qiulin⁴ Chen Zhangxing^{1,5} Wang Feiyu^{1,3} Liu Guoyong⁶
Gao Yongjin⁷ Shi Kanyuan^{1,3} Jiang Fujie^{1,3} Jiang Lin⁴

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. China National Petroleum Corporation Limited, Beijing 100724, China; 3. College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. PetroChina Research Institute of Exploration and Development, Beijing 100083, China; 5. Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Calgary T2N1N4, Canada; 6. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834000, China; 7. Oil and Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: The genetic method with basin modeling as the core has been widely used in hydrocarbon exploration and production. China's basin modeling theory and research are in the front ranks of countries of the world, but the application software development lags far behind other countries. According to statistics, 75% of the 39 pieces of basin modeling software or algorithms available in China are developed by foreign companies, and 100% of the popular software on the international market are developed by overseas companies. At present, the main challenge faced by basin modeling research is that the classical petroleum system theory widely applied in the past cannot effectively evaluate unconventional oil-gas resources. In this study, whole petroleum system theory is adopted to address the current challenges. Firstly, the basic characteristics, genetic mechanism and distribution regularities for the joint coexistence of conventional and unconventional oil-gas resources are elaborated based on the whole petroleum system theory, providing theoretical and methodological guidance for the prediction and assessment of conventional and unconventional oil-gas resources. Secondly, key technologies for predicting and assessing conventional, tight and shale oil-gas resources have been developed by establishing a combined genetic model for conventional and unconventional oil-gas reservoirs and a material balance relationship between total hydrocarbon gener-

基金项目: 中国石油科学研究与技术开发项目“油气地质基础新理论新技术研究”项目01课题“全油气系统理论与非常规油气成藏机理”(2021DJ0101)资助。

第一作者及通信作者: 贾承造,男,1948年3月生,1987年获南京大学博士学位,现为中国科学院院士,中国石油学会会士,《石油学报》编委会主任,《Petroleum Research》主编,长期从事构造地质学、石油地质学研究和油气勘探工作。Email:jjacz@petrochina.com.cn

ation and hydrocarbon resources. Thirdly, this paper establishes five sets of material balance equations between the total hydrocarbon production and the evolution and productivity of the whole petroleum system, analyzes the key geological parameters such as primitive hydrocarbon production ratio, migration-accumulation coefficient, movable hydrocarbon ratio and oil recovery, and proposes 12 key technologies of three categories for basin modeling. The new generation basin modeling system based on the whole petroleum system theory and modern information technology is expected to achieve quantitative, automated and intelligent assessment of oil-gas resources, increase the total amount of resources as the study objects by 5 to 8 times, deepen the research of predicted and assessed resources by more than 3 times, significantly improve the reliability of the predicted and assessed results, and solve the existing bottleneck problem.

Key words: whole petroleum system; basin modeling; genetic method; assessment of oil-gas resources; oil-gas dynamic field

引用:贾承造,庞雄奇,郭秋麟,陈掌星,王飞宇,刘国勇,高永进,施砍园,姜福杰,姜林.基于成因法评价油气资源:全油气系统理论和新一代盆地模拟技术[J].石油学报,2023,44(9):1399-1416.

Cite: JIA Chengzao, PANG Xiongqi, GUO Qiulin, CHEN Zhangxing, WANG Feiyu, LIU Guoyong, GAO Yongjin, SHI Kanyuan, JIANG Fujie, JIANG Lin. Assessment of oil-gas resources based on genetic method: whole petroleum system theory and new generation basin modeling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1399-1416.

油气资源评价是油气勘探开发研究中的核心内容,不仅关系到探井部署与钻探成效,更关系到油气勘探发展方向、战略规划与能源安全,历来受到各国政府和各大油气公司高度重视。油气资源评价方法一般分为统计法、类比法和成因法3类。以盆地模拟为核心的成因法因其考虑了油气的来源与分布规模,被称为“最为科学的评价方法”,突出表现在:评价油气资源的原理清楚;考虑影响资源的因素全面;计算资源的速度快、周期短;表达资评的结果定量可视。盆地模拟在中国和全球的历次资源评价研究中发挥着不可或缺的作用,而大规模应用于油气资源评价的方法类型又视国家和地质条件的不同而异,这当中,成因法也被认为是一种主要的方法并在盆地模拟技术支撑下得以广泛应用。全国第二次油气资源评价主要采用成因法——盆地模拟法^[1-2]。从2003年全国第三次油气资源评价开始,中国三大油公司(中国石油天然气集团有限公司、中国石油化工集团有限公司、中国海洋石油集团有限公司)的评价方法开始逐步发生转向:针对全盆地或凹陷以开展盆地模拟法评价为主;针对区带或区块以开展刻度区资源丰度类比法评价为主,同时,统计法的重要性也得到提高^[3-5]。2000年以后,伴随着北美地区压裂技术的突破,非常规油气的经济性显著提高,非常规油气资源评价得到了重视。成因法在有机地球化学和微米—纳米级实验测试技术的带动下获得了发展的契机,也取得了重要进展,比如对页岩气、页岩油资源开展评价^[6-7],对致密砂岩气、致密砂岩油资源开展评价^[8-9]等。以盆地模拟为核心的成因法,其优点突出,但缺点也同样明显:需要获得大量的地质参数,但关键参数(排烃系数、聚集系数等)无法准确获取。因此,成因法在实际应用中面临着系列挑战,没有发挥出应有的作用。全油气系统概念的提出及基于全油气系统理论的盆地模拟技术的研发为解决这一系列难题创造了条件,开拓了新途径。

1 盆地模拟评价油气资源面临的挑战与应对策略

1.1 成因法评价油气资源的方法原理

油气资源来自沉积有机质的降解作用及其自源岩层生成和排出油气后在浮力主导下的运聚成藏作用,油气的生成量越大、油气的资源潜力就越大。基于成因法评价油气资源量通常需要开展多方面的研究工作。首先,需要通过恢复含油气盆地地层的埋藏史和热演化史,并结合源岩层的地质地球化学特征参数来模拟计算生成油气的总量;其次,需要通过生油气总量减去源内油气滞留量、运移损耗量、聚集后的构造破坏量等获得原地的油气资源总量,然后,基于物质平衡原理用资源总量减去已探明油气储量,预测剩余资源量;最后,依据资源评价结果指导油气勘探方向和探井部署。在地质条件复杂的情况下,研究油气的运移损耗量和构造破坏量较困难,通常采用油气生成总量乘以运聚系数来获得油气资源总量。油气运聚系数指研究区富集成藏的各类资源量与生油气总量的比率,通常依据剖析成熟探区的油气地质条件、研究已发现油气的储量分布特征予以确定。已有研究表明,液态石油的运聚系数介于1%~10%,天然气运聚系数介于1%~10%。

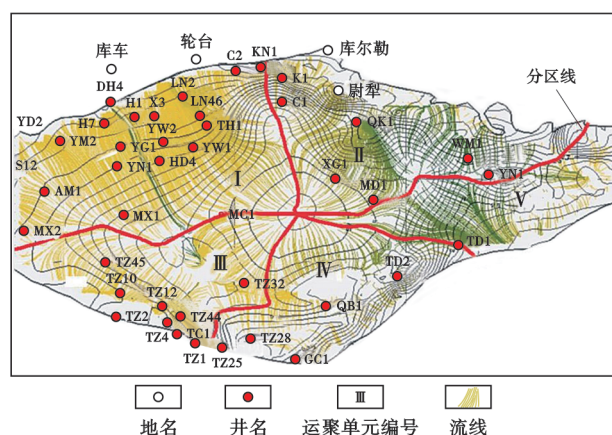
1.2 盆地模拟技术评价油气资源的主要研究进展

1.2.1 盆地模拟理论研究取得的主要进展

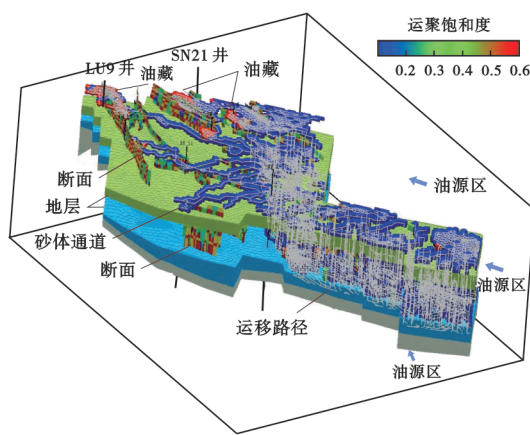
盆地模拟指依据构造地质学、沉积地层学、地质流体学、油气地质学、有机地球化学、石油地球化学等相关学科的基本原理,模拟沉积盆地在形成演化过程中油气藏的形成、分布特征,并在此基础上预测评价油气资源及其分布规律。经典的盆地模拟研究主要涉及地质过程定量模拟、油气成藏过程定量模拟、油气资源预测评价3方面12项基本内容。国内

外学者在相关领域已做过大量研究工作并取得了一定的应用成果^[10-12](图1)。调研发现,目前全球有关盆地模拟评价油气资源量的专著(中文和英文)共计有53部,其中39部(占比为74%)来自中国学者。这些专著可以概括为3类:①侧重地质过程定量模拟,内容主要涉及含油气盆地地层的埋藏史、热演化史和生烃史,代表性著作有《Basin analysis: principles and applications》^[13]《地质过程定量模拟》^[14]《Basin modelling》^[15]等;②侧重油气成藏过程定量模拟,内容主要涉及油气生成史、运聚史、成藏史以及油气成藏期后的调整改造,代表性著作有《石油地质过程定量研究概论》^[16]《Basin analysis: quantitative methods》^[17]《油

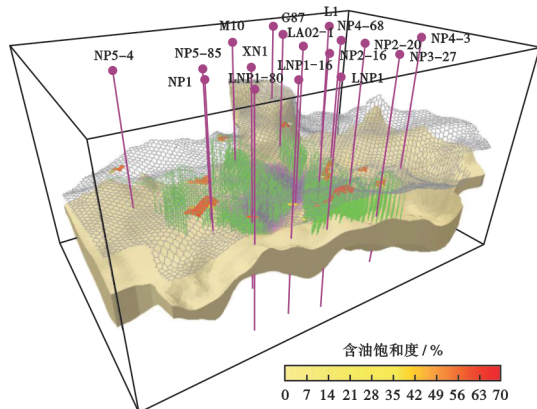
气成藏定量模拟》^[18]《油气藏调整改造与构造破坏烩量模拟》^[19]《油气运移定量动力学研究与应用》^[20]等;③侧重盆地模拟和成藏模拟结合并评价油气资源量,代表性著作有《A quantitative basin analysis system for petroleum exploration》^[21]《含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价》^[22]《油气盆地数值模拟方法》^[23]《盆地模拟原理与方法》^[24]《油气成藏数值模拟技术与应用》^[25]《Quantitative evaluation of the Whole Petroleum System: hydrocarbon thresholds and their applications》^[26]《天然气水合物资源评价方法与原理——全油气系统理论应用研究实例》^[27]等。



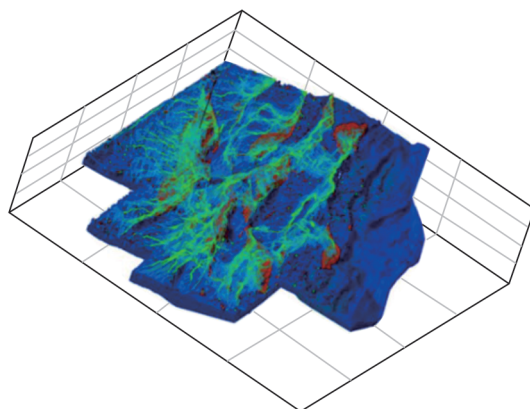
(a) 塔里木盆地满加尔坳陷下古生界油气输导路径与流线特征模拟结果



(b) 准噶尔盆地腹部白垩系砂岩层石油输导与运移模拟结果



(c) 渤海湾盆地南堡凹陷东营组石油运移追踪结果



(d) 河套盆地兴隆构造带断块油气藏形成分布模拟结果

图1 含油气盆地油气输导运聚成藏数值模拟应用实例(据文献[10-12]修改)

Fig. 1 Application of numerical simulation for hydrocarbon migration and accumulation in petroliferous basins

1.2.2 盆地模拟应用软件研究取得的主要进展

不同学者和公司应用盆地模拟技术试图解决油气资源评价相关问题的侧重点不同,所取得的成果也不相同,但最终都以实际应用软件的形式表现出来。表1概括了在中国市场上流行的39种盆地模拟应用软件或算法^[1-2,25,28-32],其中有75%来自国外公司。目前,在国际油气勘探市场上广泛应用的盆地模拟软件主要包括PetroMod(Schlumberger公司)、Trinity(Zetaware公

司)、Mpath(Halliburton公司)、Temis[法国石油研究院(IFP)]、Stellar(ExxonMobile公司)、BasinMod[美国Platte River公司(PRA)]、SEMI[挪威科技工业研究院(SINTEF)]、Migris(挪威Migris AS公司)。这些软件都来自国外公司且大多都不出售,仅提供对外服务且价格昂贵。油气勘探市场上的盆地模拟技术是目前中国最为要紧的卡脖子技术之一,对油气资源评价构成了最大的挑战。

表1 中国市场上常用的盆地模拟应用软件汇总

Table 1 Summary of basin simulation software commonly used in the Chinese market

序号	推出时间	软件名称	功能	公司/机构	说明
1	1978	无	地史模拟、热演化史模拟	联邦德国尤利希核能研究公司石油与有机地球化学研究所	一维盆地模拟系统算法,未见软件报道
2	1978	PetroMod	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟	德国 IES 公司	
3	1978	Petrel	集地震解释、构造建模、岩相建模、油藏属性建模和油藏数值模拟显示及虚拟现实于一体	Schlumberger 公司	
4	1978	CMG	油藏数值模拟	加拿大计算机模拟集团(CMG)	可开发更多功能的石油工程专业软件
5	1980	SLBSS	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟	中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司	一维盆地模拟软件
6	1981	无	计算埋藏史、古热流史、烃类成熟度史以及油聚集史,预测断层封闭性及地层圈闭	日本石油勘探公司	二维盆地模拟算法,未见软件报道
7	1984	TemisPack	地史模拟	法国石油研究院(IFP)	较完整的二维盆地模拟系统
8	1987	无	地层埋藏史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟	日本石油勘探公司	原有排烃模型进一步完善
9	1987	HYBSS	热演化史模拟、生烃史模拟	海洋石油勘探开发研究中心	一维盆地模拟系统
10	1988	无	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟	日本石油勘探公司与美国南卡罗来纳大学	较完整的二维盆地模拟算法,未见软件报道
11	1989	PRES-BAES	地层埋藏史模拟、热演化史模拟、成熟史模拟、生/排烃史模拟	中海油研究总院有限责任公司	一维盆地模拟专家系统
12	1989	PRES-MIGS	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟	中海油研究总院有限责任公司	烃类运聚评价系统
13	1989	BAS1	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟	中国石油勘探开发研究院	自主研发的一维盆地模拟系统
14	1990	BMWS	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟	中国石油勘探开发研究院	二维盆地模拟图形工作站
15	1990	Stellar	盆地模拟	ExxonMobile 公司	
16	1990	ECLIPSE	油藏数值模拟	Schlumberger 公司	
17	1990	BasinMod	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟	美国 Platte River 公司(PRA)	比较成熟的商业化软件
18	1996	ProBases	地史模拟、热演化史模拟、生烃史、油气运聚史模拟	中海油研究总院有限责任公司与加利福尼亚大学伯克利分校 Geo-Solve 公司	多功能综合盆地模拟评价系统
19	1996	BASIMS	基于石油地质机理,定量模拟探区的地史、热演化史、生烃史、排烃史和运移聚集史,从而进行综合评价,指出有利勘探区带	中国石油勘探开发研究院	盆地综合模拟系统
20	1996	Nexus	油藏数值模拟	Halliburton 公司	
21	1997	TSM	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、油气运聚史模拟	中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所	基于大地构造与油气聚集系统关系 T-S-M 程式的盆地模拟系统
22	1998	PSDS	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟	中国地质大学(武汉)与中国海洋石油集团有限公司	油气成藏系统动力学模拟
23	1998	Mpath	用于高分辨率的油气运移路径预测及油气充注历史模拟	Halliburton 公司	比较成熟的商业化软件
24	2000	INTERSECT	油藏数值模拟	Schlumberger 公司	
25	2000	PRIS	油藏数值模拟	北京数系科技有限责任公司	
26	2002	Trinity 3D	盆地模拟	ZetaWare 公司	
27	2004	SKUA	勘探开发建模	Paradigm 公司	
28	2005	SEMI	盆地模拟	挪威科技工业研究院(SINTEF)	
29	2005	Mpath	盆地模拟	Halliburton 公司	
30	2006	tNavigator	油藏数值模拟	Rock Flow Dynamics(RFD)公司	
31	2009	BasinMod2009	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟	美国 Platte River 公司(PRA)	成熟的商业化软件
32	90年代	TemisFlow	地史模拟、热演化史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟、参数敏感性分析与风险评价等	法国石油研究院(IFP)	
33	90年代	Trinity	地史模拟、热史模拟、生烃史模拟、排烃史模拟、油气运聚史模拟、圈闭体积及相态分析等	Zetawera 公司	
34	90年代	TrapTester	断层侧向封堵性、预测断块圈闭的可能烃柱高度和圈闭完整性评价	英国 Badleys Geoscience Ltd 公司	
35	2010	Migris	盆地模拟	挪威 Migris AS 公司	
36	2012	CougarFlow	基于试验设计,研究油藏认知中不确定参数对生产结果的影响,实现参数不确定分析;基于优化方法,找到最优历史拟合的数模模型	法国石油研究院(IFP)	辅助历史拟合及不确定性分析软件
37	2012	RMS	地震解释、测井解释及其测绘、地质建模、网格定位和流体模拟	美国 Roxar 公司	
38	2012	Tempest	油藏模型建立、模拟计算、历史拟合、不确定性分析、方案优化等油藏数值模拟工作	美国 Roxar 公司	成熟完整的油藏数值模拟软件
39	2013	EnABLE	历史拟合、不确定性分析、方案优化等油藏数值模拟工作	美国 Roxar 公司	辅助历史拟合及不确定分析软件

盆地模拟技术自20世纪80年代开始进入中国,90年代得到快速发展^[23-24,33-34]。2000年以来,盆地模拟技术除了在资源评价应用方面保留特色外,其重大发展主要体现在三维油气运聚模拟方面^[35-38]。中国的盆地模拟研究有过“百花齐放”的美好时光,但从2000年开始大多数单位没能坚持下来。迄今为止,中国保留和继承下来的主要应用软件有两个:一是中国石油勘探开发研究院研发的BASIMS^[37],二是中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所研发的TSM^[38]。BASIMS从1988年开始推出一维盆地模拟系统BAS1,到目前推出综合模拟软件系统BASIMS 7.0经历了30多年的发展过程。这套盆地模拟软件系统已经能全方位、多视角地模拟盆地演化、油气生成与运聚过程并揭示油气富集规律,是开展地质综合研究、油气成藏研究、有利区带预测与油气资源评价和钻探目标优选等不可或缺的技术工具。最新版本的BASIMS 7.0还包括了工程管理、基础数据与图形数据管理、模拟计算、统计分析、油气资源综合评价、成果显示等功能模块。截至目前,BASIMS 7.0推广了100余套。TSM盆地模拟系统遵循朱夏院士的盆地系统分析程式,成为含油气盆地“系统整合、动态成藏”的定量分析和评价的有力工具。目前推出的TSM盆地模拟与资源评价系统(v2.0+版本)实现了盆地从埋藏史、热演化史、生烃史到运聚史的全过程模拟。TSM的盆地模拟具有3方面的鲜明特点:一是以盆地分析为基础,建立符合实际地质条件及油气响应的模拟流程;二是开放式系统平台,可以根据地质研究、实验技术的新进展,随时开发、更新模拟模块;三是实现盆地、区带、目标的油气资源分级评价。该系统通过国家应用软件产品质量监督检验中心测试,在自然资源部油气中心、中国石油化工集团有限公司各油田以及部分高校得到了推广应用。

1.3 基于成因法和盆地模拟技术评价油气资源面临的主要挑战

盆地模拟技术的应用有效保障了中国各油田公司油气资源评价及其他相关攻关任务的顺利实施,模拟分析结果提供的生烃量及资源量为各油田探区编制和部署勘探规划提供了科学依据,模拟研究明确了各盆地主力生烃层系的展布特征、生烃能力和有利区带,为各油田确定战略勘探领域提供了资源依据、为优选有利区带并做出勘探部署提供了科学依据。然而,随着研究的深入,盆地模拟研究遇到了越来越多的挑战,迫切需要完善和发展。目前遇到的主要挑战包括以下3方面:①“从源岩到圈闭”的油气系统理论因其不受圈闭和浮力控制,不完全适用于非常规油气资源评价;

②常规和非常规油气联合成藏的模式尚未建立,时常出现常规资源评价结果远较已发现储量少的奇怪现象;③非常规资源评价的关键技术和评价标准还需完善,存在不同学者和机构的非常规资源评价结果差别巨大的现象。正是因为这些问题没有解决,油气资源预测评价中出现了一些奇怪现象:中国松辽盆地滨北地区的油气资源评价结果显示资源量非常大,但在经历了“三上三下”的勘探历程,共计钻探了70多口探井后,始终找不到商业性油气资源;柴达木盆地新生界多轮油气资源评价显示其资源量小,但后来找到的储量逐渐增大并已远超预期;全球早前评价的水合物资源潜力十分巨大,但随着科技不断进步,之后评价出来的结果却不断减少。所有这些结果表明,已有的油气资源评价理论和关键技术需要补充、完善和发展。

1.4 应对盆地模拟研究挑战的技术思路和工作流程

应对当前盆地模拟法评价油气资源面临的主要挑战,可采用全油气系统理论联合评价常规和非常规油气资源,包括判别资源类型、计算资源规模、确定资源等级以及评价资源风险。具体实施可分为6个步骤(图2):①收集含油气盆地或全油气系统相关资料,包括目的层沉积相、岩相展布特征、地层构造演化特征、生-储-盖及围岩地层展布特征以及研究区油气钻探结果和测井、录井结果等资料;②开展研究区地质过程模拟研究,主要包括地层埋藏史过程模拟、地层流压史过程模拟、地层热变史过程模拟、地层应力应变史模拟等基本内容;③重点开展油气生成过程模拟、油气排运过程模拟、油气聚集过程模拟、油气藏形成演化模拟等基本内容;④开展全油气系统分析,包括确定油气成藏动力边界、划分油气成藏动力场、研究不同动力场内油气运聚特征与主控因素并建立油气成藏定量模式;⑤依据成藏定量模式研发常规油气、致密油气、页岩油气3类资源及其现实的、接替的、未来的三级资源量预测、评价关键技术;⑥预测和评价常规和非常规油气的3类三级资源量。

2 全油气系统概念及其控油气藏形成分布基本理论

2.1 全油气系统理论概括了各类别资源联合共存的基本特征

针对“从源岩到圈闭”经典油气系统理论在预测评价非常规油气资源形成分布上的不足,Jia等^[39-42]提出了全油气系统(Whole Petroleum System)新概念,将其定义为含油气盆地内一个包括由相互关联的源岩层形成的全部油气、油气藏、油气资源,以及其形成条件、演化过程和分布特征在内的自然系统。全油气系统中的油气既包括油气长距离运移形成的常规类型油气资

源,也包括油气短距离运移形成的致密类油气资源^[43],还包括油气微距离运移形成的页岩类油气资源^[44-45]。全油气系统的分析研究涉及油气成藏的全要素和形成演化的全过程、资源分布的全序列和地质评价的全方位。利用全油气系统理论剖析中国和北美地

区主要含油气盆地中已发现的常规和非常规油气藏的地质特征和形成条件,揭示非常规油气具有自封闭的成藏机制^[46]。图3展示了中国准噶尔盆地二叠系和松辽盆地白垩系全油气系统的平面分布特征及其纵向发育特征,包括边界范围和基本分布模式。

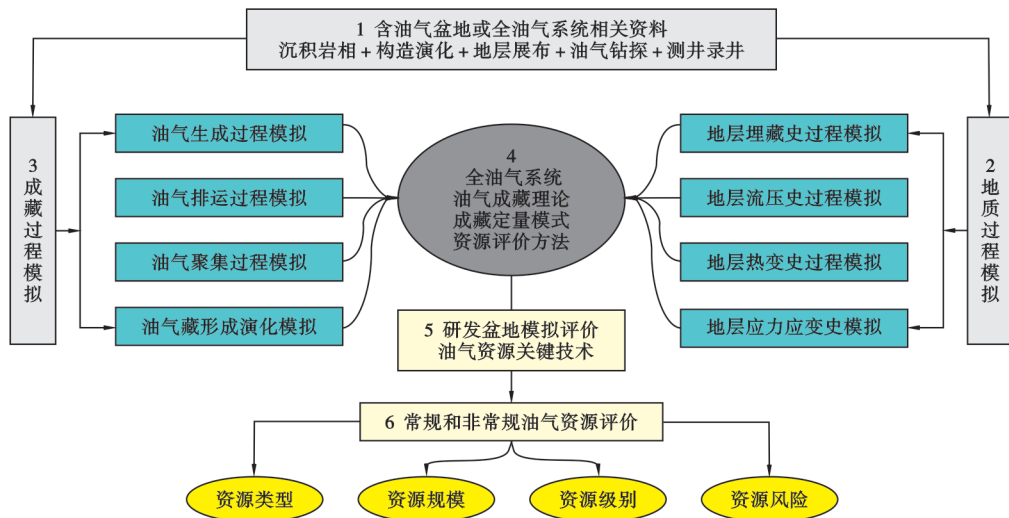


图2 基于全油气系统理论开展盆地模拟研究评价油气资源的技术思路和工作流程

Fig. 2 Technical ideas and workflow of oil-gas resource assessment through basin simulation research based on whole petroleum system theory

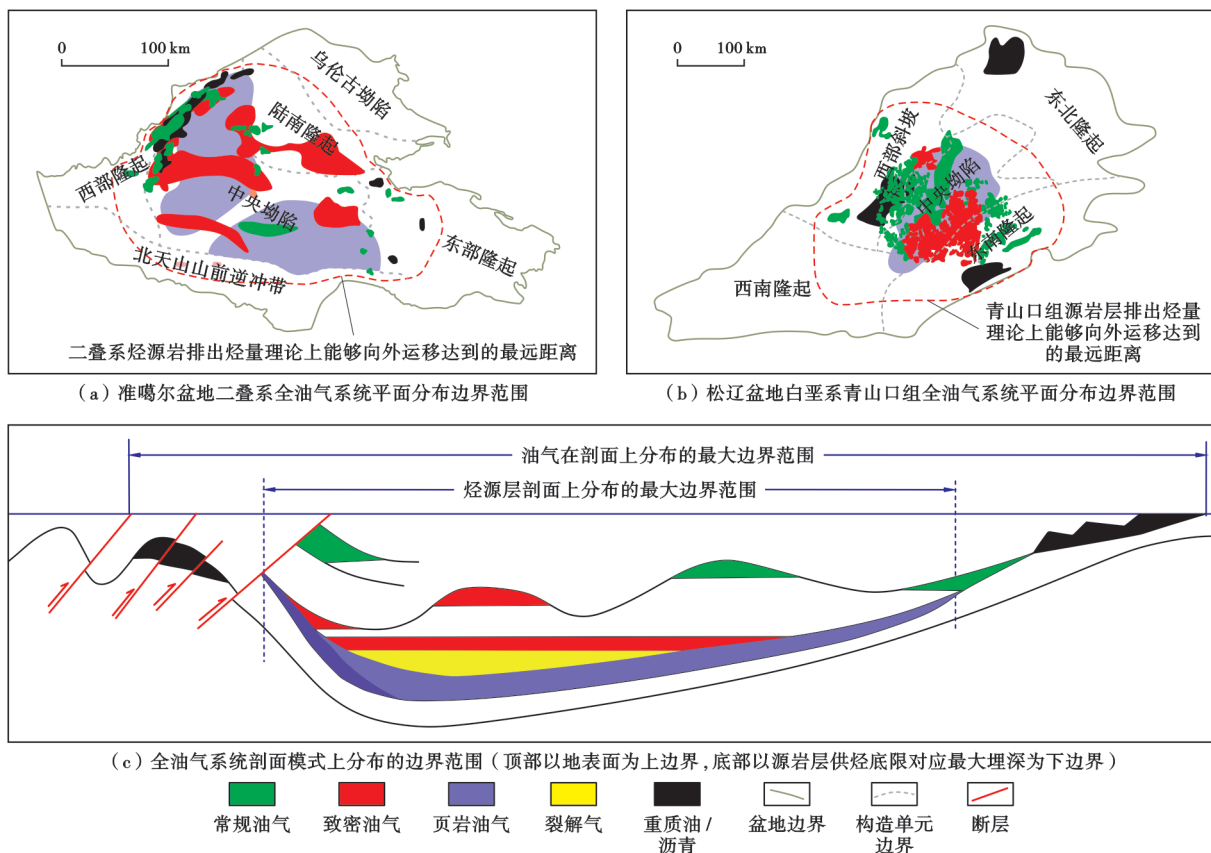


图3 全油气系统基本概念及其在平面和纵向分布的边界范围与各类油气藏分布特征

Fig. 3 Basic concept of whole petroleum system and its horizontal and vertical distribution boundary, and the distribution characteristics of various oil-gas reservoirs

2.2 全油气系统理论揭示了各类别资源联合共存的成因机制

基于定量分析发现,全油气系统中存在3类原始烃量、3类动力场、3类储层介质,三者系统在系统演化过程中相互耦合,形成了常规油气、致密油气和页岩油气3类资源(图4):①在源岩层进入浮力成藏下限之前,早期排出烃量在自由动力场作用下进入高孔高渗储层,形成常规油气资源;②在源岩层进入浮力成藏下限之后,晚期排出烃量在局限动力场作用下进入低孔低渗介质中,形成致密或页岩油气资源;③当源岩生成

后,不能排出的滞留烃量在源内束缚动力场内形成页岩或煤层类油气资源。

2.3 全油气系统理论揭示了各类别油气资源联合共存的分布规律

笔者在总结常规和非常规油气藏之间的差异性和关联性后,建立了全油气系统控制常规和非常规油气藏有序分布的基本模式(图5):页岩类油气资源(S)主要形成分布于系统下部的源岩层内,向上形成与其紧密接触或交互叠置的致密类油气资源(T),再向上形成与源岩层分离的常规油气资源(C),在地表附近还

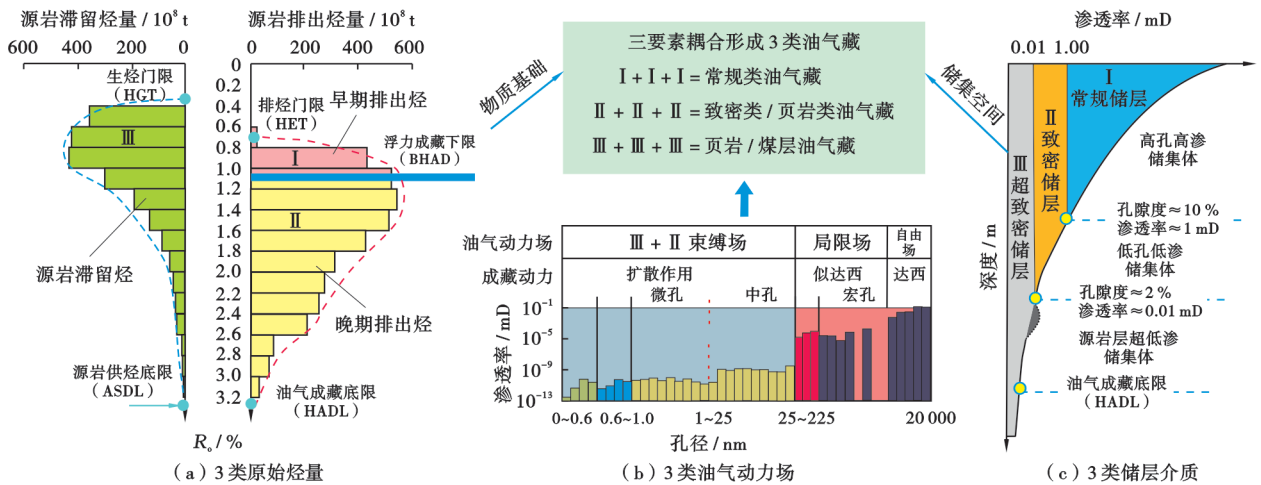


图4 全油气系统内油气成藏的主控因素及其耦合成藏机制(据文献[41]修改)

Fig. 4 Main controlling factors and coupling mechanism of hydrocarbon accumulation in whole petroleum system

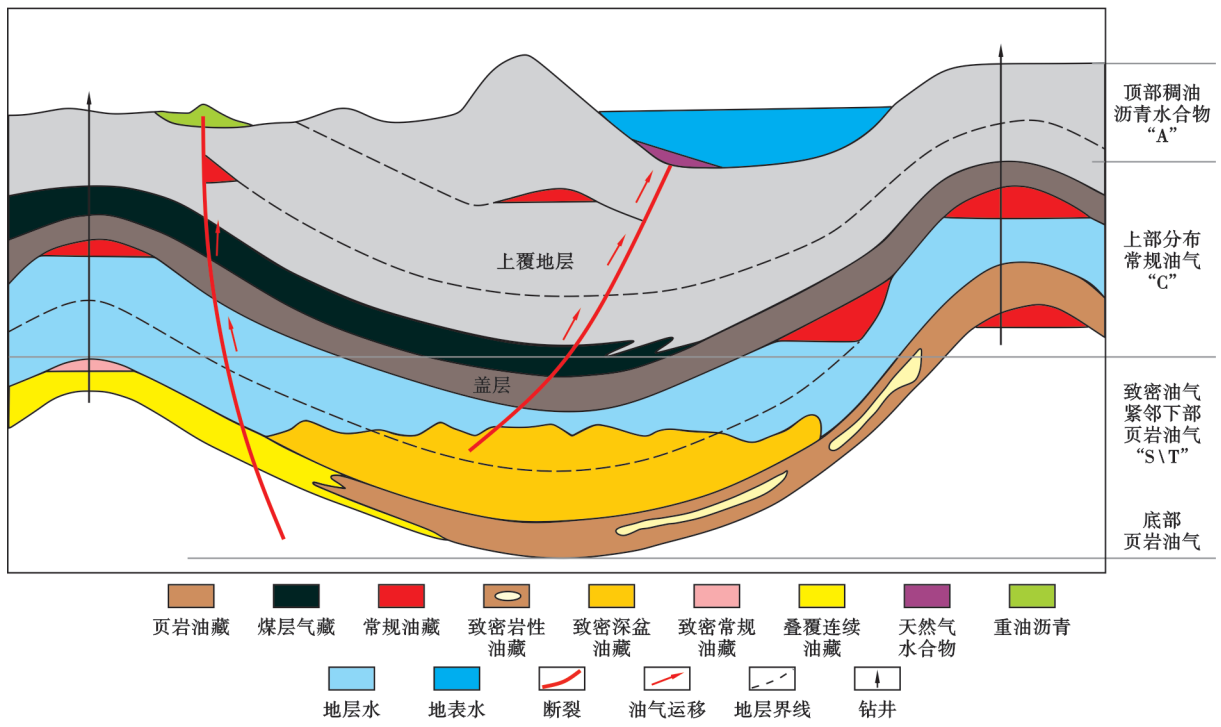


图5 全油气系统内常规和非常规油气藏有序分布的基本模式

Fig. 5 Basic pattern of orderly distribution of conventional and unconventional oil-gas reservoirs in whole petroleum system

注:S—页岩油气藏;T—致密油气藏;C—常规油气藏;A—变异改造型油气藏。

可能形成调整改造后的稠油沥青和天然气水合物等异常特征的油气资源(A),可用S\T-C-A表示其自下而上的分布特征。在复杂地质条件下,全油气系统内油气(藏)资源有序分布的形式会有所变化,呈现出3种有序分布的特殊模式^[42]。第1种特殊模式为页岩油气与致密油气彼此分离,展示出“S-T-C-A”

的分布特征,可见于准噶尔盆地[图6(a)]。第2种特殊模式为油气自源岩层向上和向下呈两个方向有序分布,展示出“C-T\S\T-C”的分布特征,可见于鄂尔多斯盆地[图6(b)]。第3种特殊模式是油气的侧向有序分布,呈现出“S\T-C”的分布特征,可见于松辽盆地[图6(c)]。

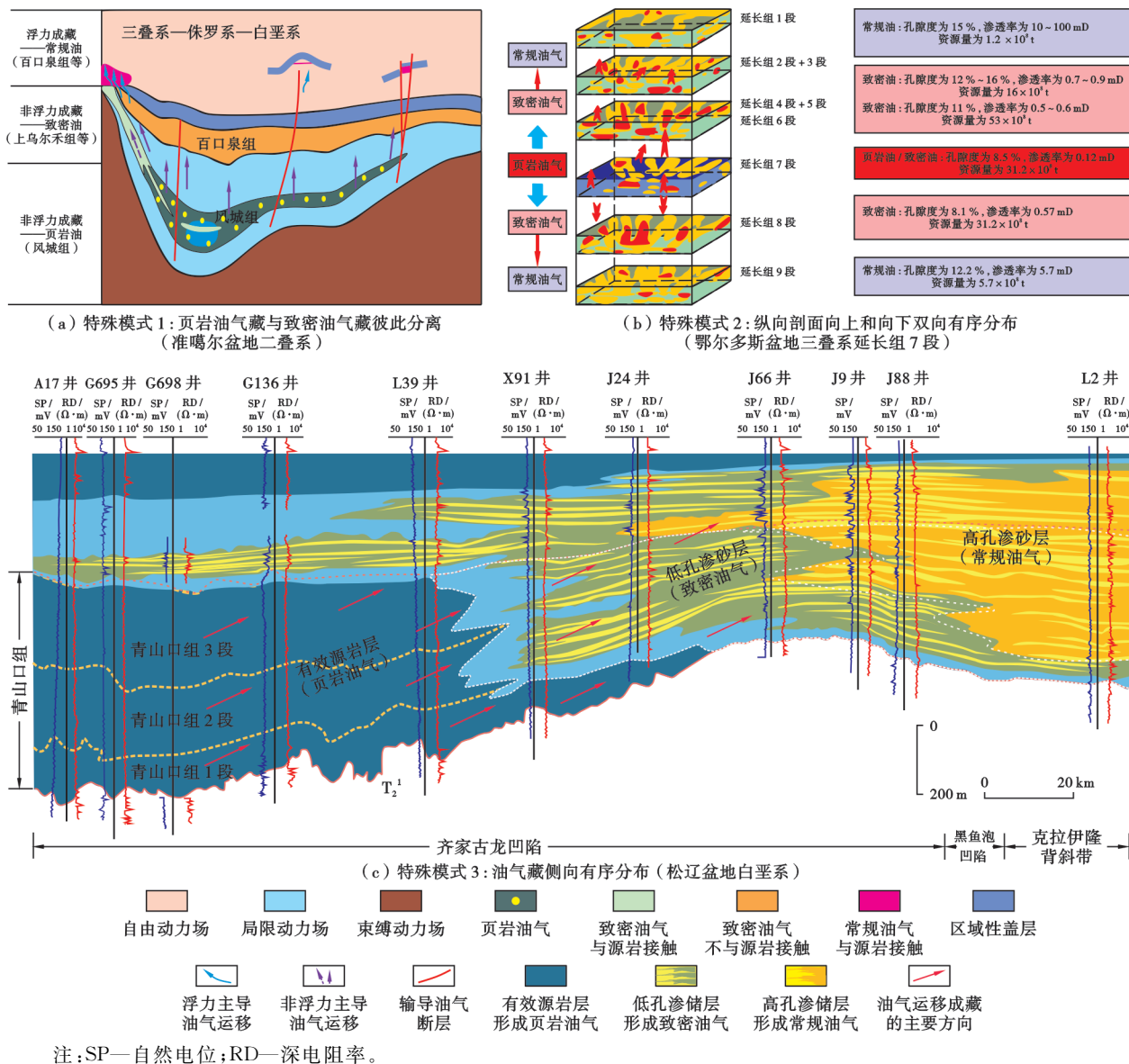


图6 全油气系统内常规和非常规油气藏有序分布的特殊模式(据文献[42]修改)

Fig. 6 A special pattern of orderly distribution of conventional and unconventional oil-gas reservoirs in whole petroleum system

3 全油气系统理论评价油气资源的方法原理与定量模式

3.1 全油气系统内常规和非常规油气藏联合的成因模式

通过剖析全油气系统的结构特征,发现油气藏的形成、分布受3个油气动力边界、3个油气动力场联合控制,在此基础上建立了常规和非常规油气藏的联合

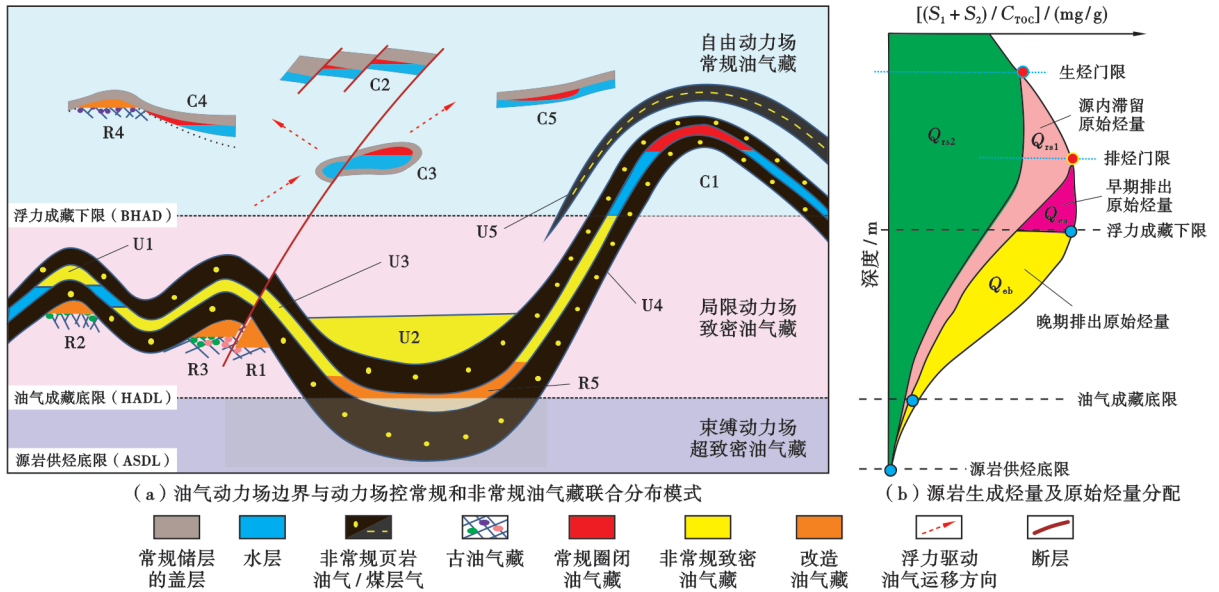
成因模式^[47-52](图7),这为全油气系统理论走向实际应用创造了条件,架起了桥梁并开拓了新的途径。全油气系统的3个油气动力边界分别指浮力成藏下限(BHAD)^[48]、油气成藏底限(HADL)^[49]、源岩供烃底限(ASDL)^[50],这3个动力边界分别控制着常规类、致密类和页岩类油气资源形成、分布的最大埋深。全油气系统的3个油气动力场分别指自由动力场(Free-HDF)、局限动力场(Confined-HDF)、束缚动力场(Bound-HDF)。

3 个油气动力场^[51]的油气运聚成藏受不同动力驱动,其成藏的主控因素不同且形成后呈现出不同的产状特征^[52]。全油气系统的 3 个动力场控制着 3 类油气藏的形成和分布。自由动力场控制着常规类油气资源的形成和分布,早期排出的原始烃量控制其最大资源潜力^[53];局限动力场控制着致密类油气资源的形成和分布,晚期排出的原始烃量控制其最大资源潜力^[54-55];源内束缚动力场控制页岩类油气资源的形成和分布,滞留烃总量控制其最大资源潜力^[56-57]。Pang 等^[52]依据

各动力场形成油气藏的差异性和关联性对其进行了统一成因分类,将油气(藏)资源分为 3 大类 6 亚类 15 种 49 样。

3.2 全油气系统的生油气总量与各类别油气资源量及损耗烃量之间的物质平衡关系

全油气系统中,源岩层生成的烃量在演化过程中转变为 3 类不同的原始烃量,之后,各自又进一步演化为 4 类不同形式的烃量,制约着不同类别油气资源的形成和分布(图 8)。



注: C1—常规背斜油气藏; C2—常规断块油气藏; C3—常规岩性油气藏; C4—常规地层油气藏; C5—常规复合油气藏; U1—致密常规油气藏; U2—致密深盆油气藏; U3—致密连续油气藏; U4—致密页岩油气藏; U5—致密煤层气藏; R1—裂缝改造油气藏; R2—孔洞改造油气藏; R3—裂缝孔洞复合改造油气藏; R4—氧化改造稠油沥青藏; R5—高温裂解改造干气藏; $(S_1 + S_2)/C_{TOC}$ —生烃潜力指数, 其中, S_1 为游离烃, S_2 为热解烃, C_{TOC} 为总有机碳含量; Q_{rs1} —源内滞留原始烃量; Q_{rs2} —源内待转化的有机质; Q_{eb} —自由动力场源岩排出原始烃量; Q_{cb} —局限动力场源岩排出原始烃量。

图 7 全油气系统油气动力边界和动力场联合控藏模式及原始烃量的分配特征(据文献[47-50]修改)

Fig. 7 Combined reservoir control model of oil-gas dynamic boundary and field, and the distribution characteristics of primitive hydrocarbon quantity in whole petroleum system

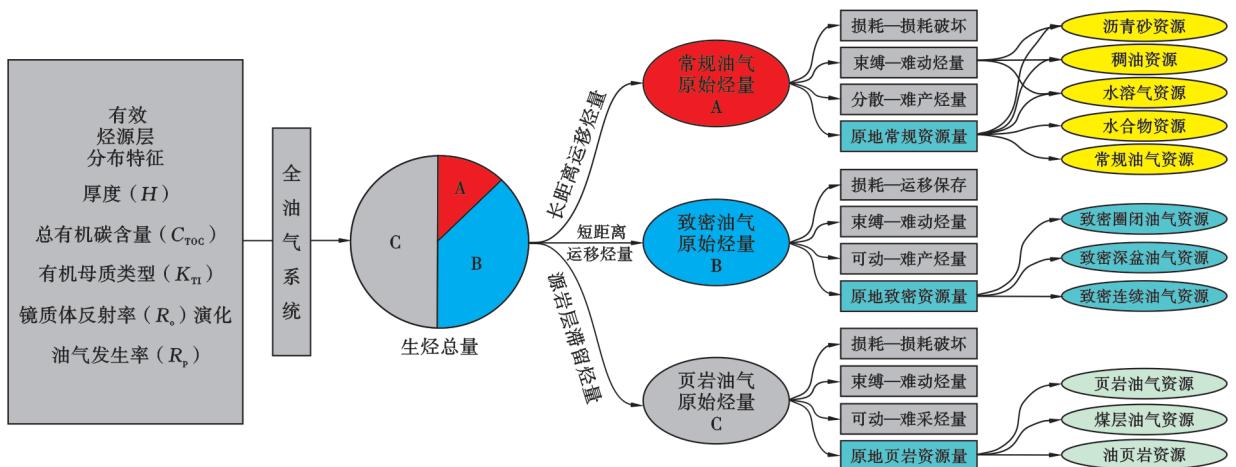


图 8 全油气系统的生油气总量与 3 类形式原始烃量及其演化产物之间的关联模型

Fig. 8 Correlation model between the total oil-gas generation and three types of primitive hydrocarbon quantities and their evolution products in whole petroleum system

图8所述的原地资源量评价在原理上包含3层地质意义:①全油气系统中,源岩层生成的油气总量被分解为3类原始烃量,即形成常规资源的原始烃量、形成致密资源的原始烃量以及形成页岩油气的原始烃量;②每一类原始烃量又被分解为3种无价值的烃量和1种原地资源量;③每1类原地资源量又进一步被分解为各类有效资源量。这表明,在确定了各类原始烃量及其分解出来的无价值烃量后,原地资源量能够依据物质平衡方程反演出来。

3.3 全油气系统各类别油气资源形成分布的主控因素与定量评价模型

3.3.1 依据自由场物质平衡方程研发的常规油气资源量预测评价关键技术

基于全油气系统理论预测评价常规油气资源的新方法的原理是:常规原地资源量(Q_{con})等于自由场原

始烃量(Q_{free})减去各类无价值烃量(Q_u),包括运移过程的和聚集成藏后的损耗破坏烃量、致密储层内难动的“死烃”量、聚集后规模较小而难以开采的烃量。其关系式可表示为:

$$Q_{con} = Q_{free} - Q_u \quad (1)$$

这一新方法与传统评价方法相比有3个优点:①采用自由动力场内源岩层早期排出的原始烃量控制了原地常规油气资源量的可能最大值;②通过研究油气运移过程中的损耗破坏烃量、储层内束缚难动烃量、无效聚集烃量等,以此替代早前使用的运聚系数的经验取值,降低了油气资源预测评价结果的不确定性;③除考虑浮力主导下的油气运聚成藏作用外,还能够考虑流体压力、毛细管压力差、水动力等对常规油气资源形成分布的影响,使资源评价的结果更接近客观实际。图9展示了在自由动力场作用下常规油气资源预测评价需要注意的关键问题。

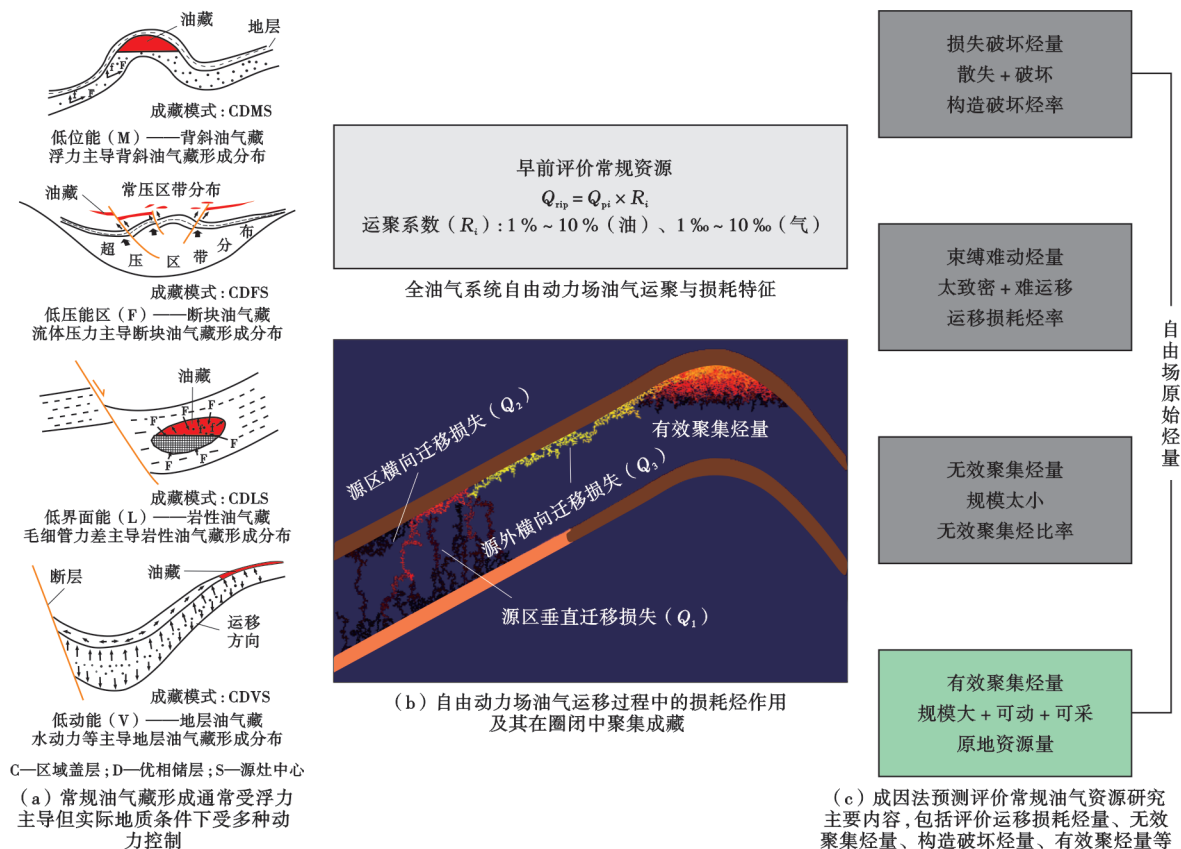


图9 全油气系统自由动力场常规油气资源预测评价方法的原理及关键问题(据文献[58]修改)

Fig. 9 Principle and key issues of prediction and assessment for conventional oil-gas resource in free hydrocarbon dynamic field of whole petroleum system

3.3.2 依据局限场物质平衡方程研发的致密油气资源量预测评价关键技术

基于全油气系统理论预测评价致密油气资源的新方法的原理是:致密原地资源量(Q_{tight})等于局限场原始烃量($Q_{limited}$)减去各类无价值烃量(Q_u),包括运移过程的和聚集成藏后的损耗破坏烃量、致密储层内难动的“死烃”量、聚集后规模较小而难以开采的烃量。其

关系式可表示为:

$$Q_{tight} = Q_{limited} - Q_u \quad (2)$$

这一新方法与传统评价方法相比也有3个优点:①采用局限动力场内源岩层晚期排出的原始烃量约束了致密原地油气资源量的可能最大值;②通过从原始烃量中扣除各类无价值烃量能够控制致密原地资源量的可能最小值;③通过考虑当前采收率和科技进步后

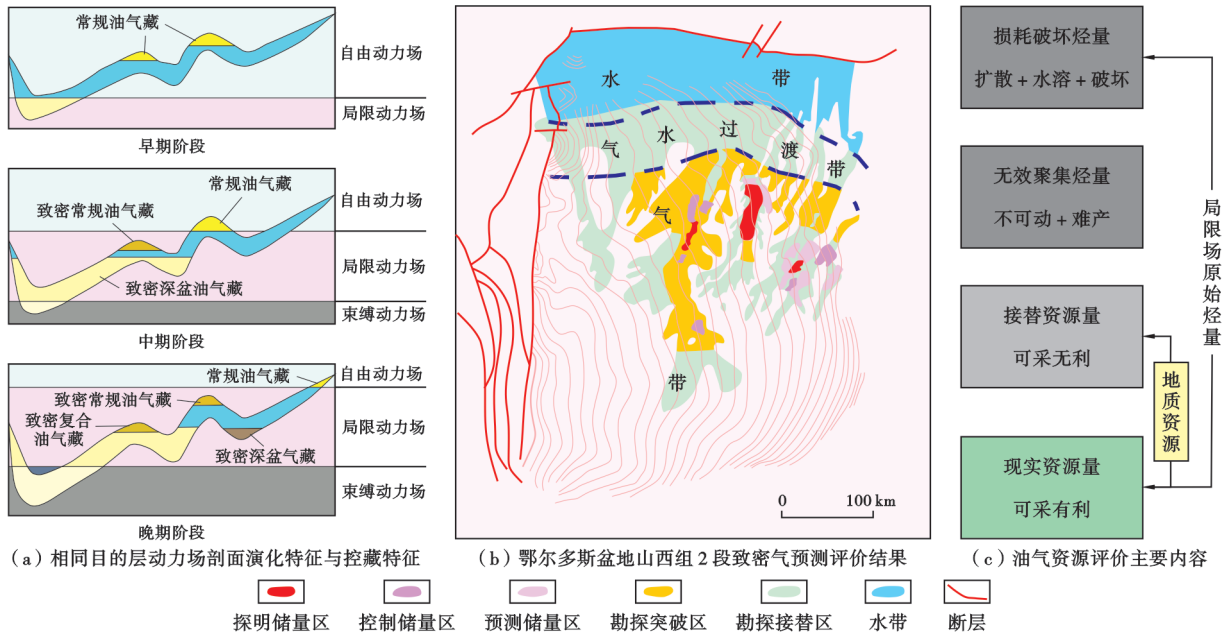


Fig. 10 Principle and key issues of prediction and assessment for unconventional tight oil-gas resource

的采收率能够将致密原地资源量分解为现实资源量、接替资源量等不同等级,从而有利于油气资源的持续发展和充分利用。图 10 展示了在局限动力场作用下致密油气资源预测评价需要注意的关键问题。

3.3.3 依据源内束缚场物质平衡方程研发的页岩油气资源量预测评价关键技术

基于全油气系统理论预测评价页岩油气资源的新方法的原理是:页岩原地资源量(Q_{shale})等于源内束缚场原始烃量(Q_{bound})减去各类无价值烃量(Q_u),包括运移过程的和聚集成藏后的损耗破坏烃量、致密储层内难动的“死烃”量、聚集后规模较小而难以开采的烃量。

其关系式可表示为:

$$Q_{shale} = Q_{bound} - Q_u \quad (3)$$

这一新方法与传统评价方法相比也有 3 个优点:①采用源内束缚场滞留的原始烃量约束页岩原地油气资源量的可能最大值;②通过从原始烃量中扣除各类无价值烃量能够控制页岩原地资源量的可能最小值;③通过考虑当前采收率和科技进步后的采收率能够将页岩的原地资源量分解为现实资源量、接替资源量等不同等级,从而有利于页岩油气资源的未来持续发展和充分利用。图 11 展示了在源内束缚动力场作用下页岩油气资源预测评价需要注意的关键问题。

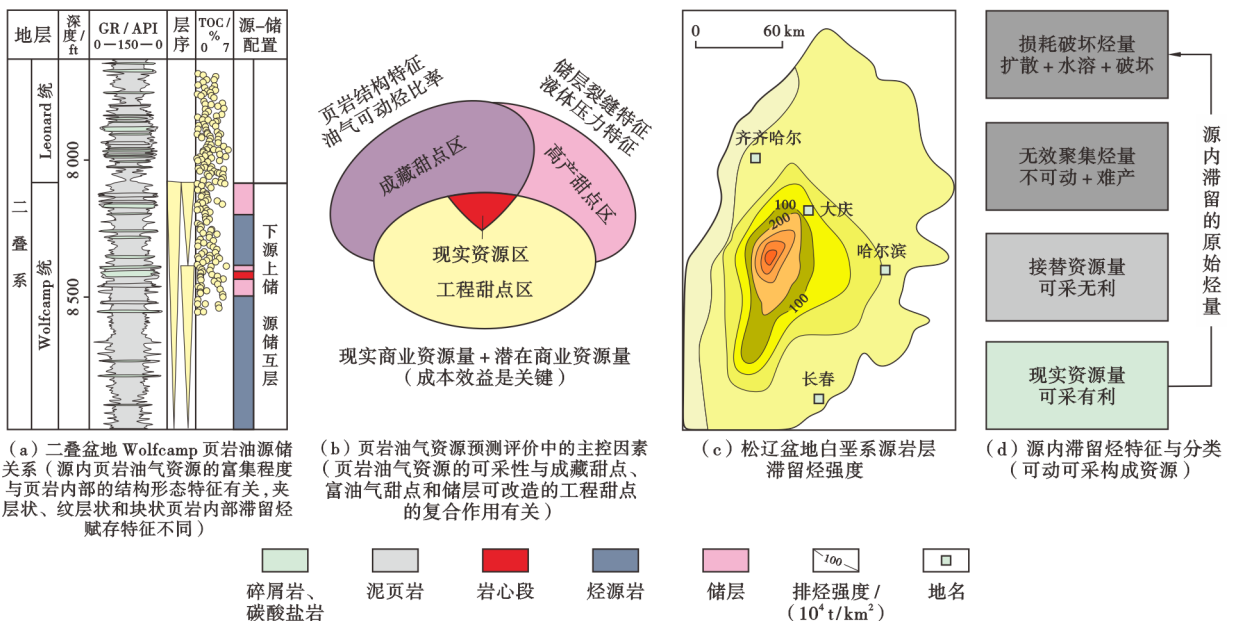


Fig. 11 Principle and key issues of prediction and assessment of shale oil-gas resources in bound hydrocarbon dynamic field

4 全油气系统理论用于盆地模拟和资源评价的关键技术

4.1 全油气系统理论评价油气资源中的5组物质平衡方程

4.1.1 生烃总量演化的物质平衡条件

生烃总量(Q_{pi})指全油气系统内各相关源岩层在演化过程的不同阶段生成的油气量之和,可被分解为3部分:①由进入浮力成藏下限之前排出烃量构成的常规油气资源的原始烃量(Q_{pc});②由进入浮力成藏下限之后排出烃量构成的致密油气资源的原始烃量(Q_{pt});③由生成后不能排出且滞留在源岩层内的烃量构成的页岩油气资源的原始烃量(Q_{ps})。三者之间的关系式表示为:

$$Q_{pi} = Q_{pc} + Q_{pt} + Q_{ps} \quad (4)$$

4.1.2 原始烃量演化的物质平衡条件

原始烃量被定义为源岩层生成和排出之后能够在今后的演化过程中形成不同类别油气资源的初期烃量(Q_{p0})。其在演化过程中通常可分解为4种形式的烃量:运移损耗破坏烃量(Q_{ll})、聚集在致密介质中的难动烃量(Q_{ml})、规模太小的难采烃量(Q_{ul})以及聚集后构成的原地资源量(Q_{rip})。关系式可表示为:

$$Q_{p0} = Q_{ll} + Q_{ml} + Q_{ul} + Q_{rip} \quad (5)$$

4.1.3 原地资源量演化的物质平衡条件

原地资源量(Q_{rip})被定义为在现有条件下有望获得可采烃量的油气藏在实际地质条件下的地质储量。其在演化过程中形成了包括现实可采获利的资源量($Q_{reality}$)和现实可采无利的接替资源量($Q_{replace}$)两部分,其中, $Q_{replace}$ 在科技进步的情况下可以转化为 $Q_{reality}$ 。三者之间的关系式可表示为:

$$Q_{rip} = Q_{reality} + Q_{replace} \quad (6)$$

4.1.4 现实资源量演化的物质平衡条件

现实资源量($Q_{reality}$)指当前条件下能够实现商业性开采的资源量。其在演化过程中可分解为已发现且采出储量(Q_{rrd})、已发现待采出储量(Q_{rrn})、剩余待发现资源量(Q_{rrm})3部分。关系式可表示为:

$$Q_{reality} = Q_{rrd} + Q_{rrn} + Q_{rrm} \quad (7)$$

4.1.5 剩余资源量演化的物质平衡条件

剩余资源量(Q_{rrm})被定义为全油气系统内尚未被发现的油气资源量。其计算需要基于生烃总量扣除各类不可动用的烃量($Q_{ll} + Q_{ml} + Q_{ul}$)、扣除接替资源量($Q_{replace}$)、扣除已经发现储量($Q_{rrd} + Q_{rrn}$)后获得。关系式可表示为:

$$Q_{rrm} = Q_{p0} - (Q_{ll} + Q_{ml} + Q_{ul} + Q_{rrd} + Q_{rrn} + Q_{replace}) \quad (8)$$

这5组物质平衡条件限定了各种形式的常规和非常规油气资源量在地质条件下的变化特征和规模大小,可确保盆地模拟结果的客观性和科学性。

4.2 油气资源综合评价中的5个关键地质参数

油气资源综合评价中的5个关键参数涉及到全油气系统的生烃总量(Q_{pi})、某类资源的原始烃量比率(K_i)、油气运聚系数(R_i)、储层可动烃比率(M_i)、油气资源采收率(E_{ij}),其与油气资源量(Q_{ij})之间的定量关系可表示为:

$$Q_{ij} = Q_{pi} \cdot K_i \cdot R_i \cdot M_i \cdot E_{ij} \quad (9)$$

Q_{pi} 为第1个关键参数。在对全油气系统进行油气资源综合评价时,源岩层的生烃总量即为原始生烃总量或原始烃总量。在对一种资源进行评价时需要区分其原始烃量:早期的排出烃为常规油气资源的原始烃量、晚期的排出烃为致密油气资源的原始烃量、源内滞留烃为页岩油气资源的原始烃量。全油气系统内的油气生成总量受5方面地质条件控制:源岩层分布面积(S)、厚度(H)、密度(ρ)、总有机碳含量(C_{TOC})以及单位质量的有机母质在热演化过程中的油气发生率(R_p), R_p 的大小又受有机母质类型(K_{Ti})和热演化程度[以镜质体反射率(R_o)为指标计算]影响。上述参数的关系式可表示为:

$$Q_{pi} = S \cdot H \cdot \rho \cdot C_{TOC} \cdot R_p (K_{Ti}, R_o) \quad (10)$$

K_i 为第2关键参数。全油气系统内的油气资源类型可分为常规油气、致密油气和页岩油气3类。常规油气的原始烃量比率(K_c)指源岩层在自由动力场作用下的排出烃量与其生成油气总量的比率;致密油气的原始烃量比率(K_t)指源岩层在局限动力场作用下的排出烃量与其生成油气总量的比率;页岩油气的原始烃量比率(K_s)指源岩层内束缚动力场作用下的滞留烃量与其生油气总量的比率。在生油气总量不变的情况下,这3个比率之间具有此长彼消的相互影响,可以通过剖析同一油气系统内不同源岩层的地质地球化学特征并研究其生烃史和排烃史获得。笔者通过剖析中国塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地以及松辽盆地的主力源岩层获得 K_c 约为10%、 K_t 约为40%、 K_s 约为50%。

R_i 为第3关键参数。全油气系统内的运聚系数指聚集起来的油气量与生油气总量的比率,包含了油气在运移过程中水溶烃量、扩散烃量、吸附烃量以及构造变动破坏烃量对油气运聚成藏的影响。通过调研中国前三轮油气资源的研究成果并结合最近非常规油气资源的勘探结果发现:中国6个代表性盆地的常规油气资源的运聚系数为3.0%~65.0%,平均为25.5%;致密油气资源的运聚系数为7.0%~100.0%,平均为

52.5%;页岩油气资源的运聚系数为9.0%~100.0%,平均为57.0%。在实际工作过程中,结合研究区油气藏剖析可以获得更加符合实际的不同类别油气资源的运聚系数。

M_i 为第4关键参数。油气在地下储层介质中聚集之后,因受后期压实作用变得过于致密,致使一部分油气在现有技术条件下无法被驱动、运移从而构成有效资源,形成俗称的“死烃”(不可动烃)。大量分析测试结果表明,在不同类别油气聚集时,“死烃”的比率有很大差异:页岩油气中的不可动烃比率最高,通常为35.0%~90.0%,平均为72.5%;致密油气中的不可动烃比率居中,通常为30.0%~85.0%,平均为65.0%;常规油气中的不可动烃比率最低,通常为0~15.0%,平均为7.5%。在实际工作过程中,结合研究区油气藏的储层特征剖析和物理模拟实验研究可获得更加符合实际的不同类别油气资源的可动烃比率。

E_{ij} 为第5关键参数。油气采收率不是一个反映地下油气资源分布特征的地质参数,而是一个反映人类科技水平和开采条件的关键参数,通常随着时间进程而不断增大。例如,大庆油田在初期阶段(1965年前)的采收率不到5%,进入早期阶段(1965—1980年)可达30%,进入中期(1980—1995年)超过45%,进入后期(1995至今)则持续增加,目前最高可达55%以上。油气采收率的变化对于评价油气资源量有着十分重要的意义:通常情况下,依据研究区当前油气资源的开采条件或类比相同条件,选择一个当前条件下的现实采收率($E_{i, reality}$),然后可计算现实资源量;还可以依据科技进步的发展趋势,选择一个预期的采收率($E_{i, predict}$)计算预期资源量。预期资源量扣除现实资源量后即为今后的接替资源量。这里需要特别强调,采收率随诸多地下条件、地表条件、科技水平等不同而不同,往往是一个多要素影响下的综合平均值。

4.3 全油气系统理论评价油气资源的关键技术

完全基于全油气系统理论开展盆地模拟、评价油气资源量需要研发3类12项关键技术,其中涉及到油气藏的形成与分布以及不同油气资源评价的方方面面。

第1类为全油气系统边界划分与生、排烃量模拟。主要涉及4项关键技术:①油气来源对比研究及其主力源岩层判别和评价;②源岩层生、排烃量平面分布特征与最大边界范围;③源岩层生、排烃量纵向分布特征与顶底边界范围;④源岩层生、排油气临界条件和致密油气充注模拟。

第2类为全油气系统动力边界识别与成藏过程模拟。主要涉及4项关键技术:①浮力成藏下限对应临界条件判别及其分布发育预测评价;②油气成藏底限对应

临界条件判别及其分布发育预测评价;③源岩供烃底限对应临界条件判别及其分布发育预测评价;④各目的层油气动力场划分及其演化成藏史定量模拟。

第3类为全油气系统常规和非常规资源联合评价。涉及4项关键技术:①常规类油气藏分布预测与油气资源量综合评价;②致密类油气藏分布预测与油气资源量综合评价;③改造类油气藏分布预测与油气资源量综合评价;④油气资源评价结果定量表征与地质-经济-环境-生态风险综合评价。

5 基于全油气系统理论研发新一代盆地模拟系统的构想与重大意义

5.1 全油气系统理论为研发新一代盆地模拟系统提供了广阔空间和舞台

全油气系统理论为研发新一代盆地模拟系统提供了理论和方法指导(图12),在实际应用中表现出3方面显著的特色和优势。

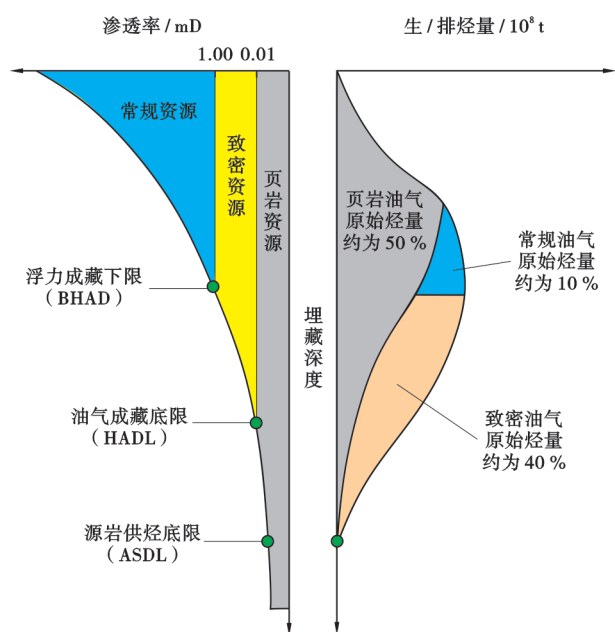


图12 全油气系统内资源赋存的介质条件及其与原始烃量的定量关系模型

Fig. 12 Occurrence conditions of resource and its quantitative relationship with primitive hydrocarbon quantities in whole petroleum system

(1)大幅拓展了盆地模拟研究的主要内容。早前的盆地模拟研究主要基于浮力成藏原理和圈闭控藏模式,即经典的“从源岩到圈闭”的油气系统理论,因此其适用的研究内容主要限定于常规油气运聚成藏和资源评价。全油气系统理论将其从模拟常规油气运聚成藏拓展到模拟非常规油气联合成藏,从而使得模拟研究涉及的资源量增大了5~8倍。

(2) 大幅拓展了盆地模拟研究的地层领域。经典的盆地模拟研究局限于埋深较浅的自由动力场内的常规油气资源,而基于全油气系统理论可以将盆地模拟研究的领域从模拟中—浅层自由场作用下的油气成藏扩大到中—深层和超深层多动力场作用下的油气成藏,这使得模拟研究涉及的深度增加了 3 倍以上。

(3) 大幅提高了油气资源研究成果的质量。经典的盆地模拟技术主要基于浮力运移原理和圈闭控藏模式来研发油气资源预测评价应用软件,并将源岩的生油气总量视为原始烃量,进而有时会导致资源量小于已发现的油气储量或在预测资源量大的地区找不到现实资源量的奇怪现象。全油气系统理论从模拟单一资源成藏到模拟 3 类资源联合成藏,通过物质平衡条件制约,能够将各类油气资源量的变化和规模大小限定在一个合理的区间范围内,这保障了资源量模拟结果的客观性和科学性。

5.2 采用与国内外传统方法接轨的油气资源分类分级体系

实际地质条件下存在的原地油气资源量是固定不变的,人类能够开发利用的现实资源量是随着开采技术的不断提高而增大的。为了与国内外传统方法接轨,笔者提出了基于全油气系统理论和盆地模拟技术预测评价油气资源的分类分级方案,建议将油气资源分为 2 类 3 级并用 3 种方式表征(图 13)。依据资

源的商业可能性,将油气资源评价分为 2 大类:第 I 类为已发现的油气资源,称之为储量;第 II 类为尚未发现的油气资源。依据商业可采性,将油气资源评价结果分为 3 级:第 I 级为现实资源量,即在当前条件下能够实现商业开采的资源量;第 II 级为接替资源量,即在当前条件下可以技术开采但不能获利的资源量,其有可能在近 10~20 年内因科技进步而转变为现实资源量;第 III 级为未来资源量,即在当前条件下不能技术开采,更谈不上获利,或许在 20 年或更长时间以后有可能得到利用的资源量。建议采用蒙特卡洛方法模拟油气资源在实际地质条件下的分布概率,用累积概率 10% 对应的评价结果代表资源的可能最小值,称之为保守估算值,用可信度符号 P_{90} 表示;用累积概率 50% 对应的评价结果代表资源评价概率的中间值,用可信度符号 P_{50} 表示;用累积概率 90% 对应的评价结果代表资源的可能最大值,称之为乐观估算值,用可信度符号 P_{10} 表示。

5.3 借助现代信息科学实现油气资源预测评价定量化、自动化和智能化

研发新一代盆地模拟系统必须解决当前面临的 3 个关键难题。一是“从源岩到圈闭”的成藏理论不能满足非常规油气资源预测评价的需要,这一相关问题已经通过引入全油气系统理论予以解决。二是目前的盆地模拟研究不能应用到地质条件复杂的逆冲断裂发育的叠合盆地,需要引入统计模拟方法予以解决:①通过统计模拟,确定油气资源富集的主控因素并建立定量关键模式;②通过多要素组合,统计模拟油气资源形成分布的概率。统计模拟方法不仅可以将盆地模拟技术拓展到复杂叠合盆地,还可以预测油气资源的规模大小,定量表征资源存在的概率大小,为勘探部署提供更加详实的科学依据。三是油气资源评价中还存在一些既无法通过盆地正演模拟解决也无法通过钻探结果统计模拟解决的异常疑难问题,这些问题只有通过油气勘探大数据分析和机器学习等人工智能的方法预测解决。这些问题在新探区或地质条件异常复杂的情况下经常出现,其与油气资源量之间存在着目前尚未被研究者掌握的规律,这些规律虽然不能定量表征出来,但能够依据机器学习等人工智能方法予以掌握和应用^[59]。图 14 是新一代盆地模拟系统的设计构想。新一代盆地模拟系统应该包括 2 个资料成果数据库管理系统:其一负责勘探成果与数据资料的管理及应用,其二负责最终资源评价结果及其综合应用。包括 3 种途径的资源评价技术:①采用盆地演化数值模拟正演油气资源量形成分布,这主要适用于简单盆地;②采用钻探结果的统计模拟,反演油气资源量的形成分布,这主要适用于复杂叠合盆地;③采用大数据信息分析和机

原始地质资源量或原地资源量	已发现地质或原地储量	商业资源量	产 量			商业机会增加
			储量			
			1P (证实储量)	2P (概算储量)	3P (可能储量)	
	未发现地质或原地储量	次商业资源量	条件储量			
			1C (确定储量)	2C (推定储量)	3C (推测储量)	
			不可采部分			
现实可商采资源量	当前现实科技水平条件下	低估值 (P_{90})	最佳值 (P_{50})	高估值 (P_{10})		
		不可采部分				
		近 20 年内科技进步条件下				
接替可商采资源量	低估值 (P_{90})	最佳值 (P_{50})	高估值 (P_{25})			
		不可采部分				
		未来科技进步条件下				
未来可商采资源量	低估值 (P_{90})	最佳值 (P_{50})	高估值 (P_{25})			
		不可采部分				
		地质把握程度增加				

图 13 国内外接轨的油气资源分类分级体系

Fig. 13 Classification and classification system of oil-gas resources in line with domestic and international standards

器学习等人工智能技术模拟油气资源的形成分布,这主要适用于异常复杂的地质条件。3种方法获得的油气资源量及其分布特征最终都需要经历钻探结果检验:达到可靠性要求的,继续采用;达不到要求的,通过修正模型和相关参数后继续模拟油气资源的形成分布,如此反复直到满足要求为止。在这种情况下,油气资源评价无需几年后开展一次,而是可以通过随时钻

探获得结果、随时检测早前结果存在的问题,并在修正模型和参数后进行资源模拟和结果修正,然后继续指导下轮油气钻探,真正实现油气资源评价量化、自动化和智能化。最后,在评价油气资源量的同时,还必须开展油气资源综合风险评价,包括地质、经济、环境、生态4方面风险评价,以期满足社会发展的要求,真正实现油气资源的高效开发利用。

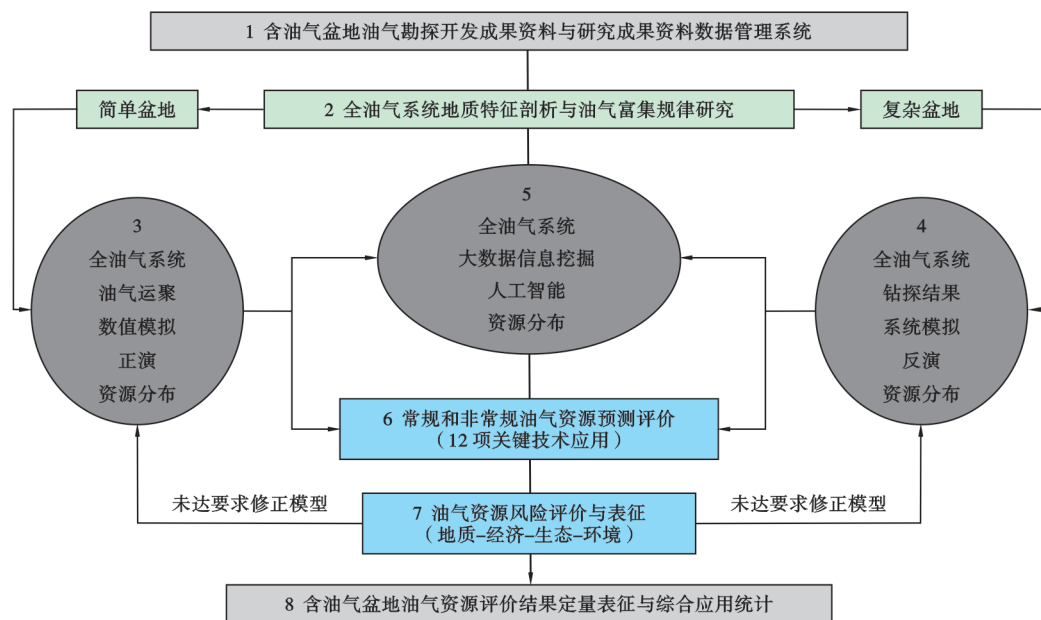


图 14 基于全油气系统理论研发盆地模拟评价油气资源系统的技术思路和工作框架

Fig. 14 Technical ideas and framework for developing basin simulation and assessing oil-gas resource systems based on whole petroleum system theory

5.4 研发新一代盆地模拟系统的重大意义

基于全油气系统理论研发评价油气资源的新一代盆地模拟软件系统有着多方面的重大意义,突出表现在以下3方面。第一,可以突破卡脖子关键技术并为实现中国的研究从跟踪美国等西方国家到引领全球发展的历史性转变搭建研究平台、汇聚研究队伍,为解决目前面临的难题形成合力。近20年来,在国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目和国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目等专项资助下,中国学者建立了全油气系统控藏理论和定量模式,为研发新一代油气资源评价的盆地模拟软件系统创造了条件。第二,研发具有独立知识产权的新一代盆地模拟应用软件,能够提升各类别油气资源的综合评价能力和水平,突破经典盆地模拟技术在油气资源评价中的局限性,提高中国在油气资源预测评价国际市场上的竞争力。第三,全面、系统地完成新时期中国含油气盆地油气资源评价,在获得常规类、致密类、页岩类油气资源现实资源量、接替资源量、远景资源量评价结果的基础上,可以客观、科学地查清中国油气资源家底并制定适合新时期中国经济发展的油气资源发展战略。

6 结 论

(1) 盆地模拟被认为是最为科学的油气资源评价方法,但当前遇到3方面挑战:现有理论不完全适用于非常规油气;常规和非常规油气的成藏模式还不完善;非常规油气资源预测评价的关键技术尚待建立。

(2) 应用全油气系统理论能够应对当前面临的挑战。全油气系统理论不仅能够阐明常规和非常规油气资源的联合成因机制和有序分布规律,还能够基于物质平衡原理研发常规和非常规油气资源联合的预测评价关键技术。新理论新技术的应用结果更加客观、科学。

(3) 基于全油气系统理论并借助现代信息技术研发新一代盆地模拟系统,有望实现油气资源预测评价的量化、自动化和智能化,解决中国油气资源预测评价领域最为关键的卡脖子技术难题,并实现弯道超车和引领全球发展。

符号注释: Q_{con} —常规原地资源量, t ; Q_{free} —自由场原始烃量, t ; Q_u —各类无价值烃量, t ; Q_{tight} —致密原地资源量, t ; $Q_{limited}$ —局限场原始烃量, t ; Q_{shale} —页岩

原地资源量, t ; Q_{bound} —源内束缚场原始烃量, t ; Q_{p0} —原始烃量, t ; i —油气资源的类型, i 为 c、t、s 可分别指代常规油气、致密油气、页岩油气; j —资源的等级, 可分别指代现实油气资源、接替油气资源、未来油气资源; Q_{pi} —一生烃总量, t ; Q_{pc} —常规资源的原始烃量, t ; Q_{pt} —致密油气资源的原始烃量, t ; Q_{ps} —页岩油气资源的原始烃量, t ; Q_{ij} —第 i 类第 j 等油气资源量, t ; Q_{il} —运移损耗破坏烃量, t ; Q_{ml} —聚集在致密介质中的难动烃量, t ; Q_{ul} —规模太小的难采烃量, t ; Q_{rip} —原地资源量, t ; Q_{reality} —现实可采获利的资源量, t ; Q_{replace} —现实可采无利的接替资源量, t ; Q_{rd} —已发现且采出储量, t ; Q_{rm} —已发现待采出储量, t ; Q_{rmm} —剩余待发现资源量, t ; K_i —某类资源的原始烃量比率, 可分为 K_c 、 K_t 、 K_s , 分别对应常规油气、致密油气、页岩油气的原始烃量比率; R_i —某类资源的油气运聚系数; M_i —某类储层内聚集烃量的可动烃比率; E_{ij} —某类某等级油气资源的采收率。

参 考 文 献

- [1] 石广仁, 郭秋麟, 米石云, 等. 盆地综合模拟系统 BASIMS[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 1-9.
SHI Guangren, GUO Qiulin, MI Shiyun, et al. Basin integrated modeling system "BASIMS"[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 1-9.
- [2] 郭秋麟, 米石云, 胡素云, 等. 盆地模拟技术在油气资源评价中的作用[J]. 中国石油勘探, 2006(3): 50-55.
GUO Qiulin, MI Shiyun, HU Suyun, et al. Application of basin modeling technology in petroleum resource evaluation[J]. China Petroleum Exploration, 2006(3): 50-55.
- [3] 郭秋麟, 陈宁生, 刘成林, 等. 油气资源评价方法研究进展与新一代评价软件系统[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1305-1314.
GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, LIU Chenglin, et al. Research advance of hydrocarbon resource assessment method and a new assessment software system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1305-1314.
- [4] 郭秋麟, 李峰, 陈宁生, 等. 致密油资源评价方法、软件及关键技术[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1566-1575.
GUO Qiulin, LI Feng, CHEN Ningsheng, et al. Methodology, new software system and key technology for tight oil resources assessment[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1566-1575.
- [5] 柳广弟, 刘成林, 郭秋麟. 油气资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
LIU Guangdi, LIU Chenglin, GUO Qiulin. Evaluation of oil and gas resources[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [6] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [7] MODICA C J, LAPIERRE S G. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation: example from the Mowry Shale in the Powder River Basin of Wyoming [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 87-108.
- [8] 郭秋麟, 陈宁生, 胡俊文, 等. 致密砂岩气聚集模型与定量模拟探讨[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 199-207.
GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, HU Junwen, et al. Geo-model of tight sandstone gas accumulation and quantitative simulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 199-207.
- [9] 郭秋麟, 陈宁生, 吴晓智, 等. 致密油资源评价方法研究[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(2): 67-76.
GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, WU Xiaozhi, et al. Method for assessment of tight oil resources[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(2): 67-76.
- [10] 郭秋麟, 陈宁生, 谢红兵, 等. 基于有限体积法的三维油气运聚模拟技术[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 817-825.
GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, XIE Hongbing, et al. Three-dimensional hydrocarbon migration and accumulation modeling based on finite volume method[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 817-825.
- [11] 郭秋麟, 刘继丰, 陈宁生, 等. 三维油气输导体系网格建模与运聚模拟技术[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 947-959.
GUO Qiulin, LIU Jifeng, CHEN Ningsheng, et al. Mesh model building and migration and accumulation simulation of 3D hydrocarbon carrier system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 947-959.
- [12] 郭秋麟, 陈宁生, 柳庄小雪, 等. 盆地模拟关键技术之油气运聚模拟技术进展[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 846-857.
GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, LIU Zhuangxiaoxue, et al. Advance of basin modeling key techniques: hydrocarbon migration and accumulation simulation[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 846-857.
- [13] ALLEN A P, ALLEN R J. Basin analysis: principles and applications[M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1990.
- [14] 庞雄奇. 地质过程定量模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
PANG Xiongqi. Modeling of geologic processes[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [15] MALAIERI M, MATOORIAN R. Basin modeling[M]. Tehran: National Iranian Oil Company, 2009.
- [16] 李泰明. 石油地质过程定量研究概论[M]. 东营: 石油大学出版社, 1989.
LI Taiming. Introduction to quantitative study of petroleum geological processes[M]. Dongying: Petroleum University Publishing House, 1989.
- [17] LERCHE I. Basin analysis: quantitative methods[M]. San Diego: Academic Press Inc., 1990.
- [18] 庞雄奇, 邱楠生, 姜振学, 等. 油气成藏定量模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
PANG Xiongqi, QIU Nansheng, JIANG Zhenxue, et al. Quantitative modeling of hydrocarbon accumulation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [19] 庞雄奇. 油气藏调整改造与构造破坏烃量模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
PANG Xiongqi. Alteration and reformation of hydrocarbon reservoirs and simulation of the hydrocarbon loss through major tectonic events[M]. Beijing: Science Press, 2014.

- [20] 罗晓睿,张立宽,雷裕红,等. 油气运移:定量动力学研究与应用[M]. 北京:科学出版社,2018.
LUO Xiaorong, ZHANG Likuan, LEI Yuhong, et al. Research and application of quantitative dynamics of oil and gas migration [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [21] CAO S, BACHU S, LYTIVIAK A. A quantitative basin analysis system for petroleum exploration[M]// HARFF J, MERRIAM D F. Computerized basin analysis. Boston: Springer, 1993.
- [22] 庞雄奇,陈章明,陈发景. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京:地质出版社,1993.
PANG Xiongqi, CHEN Zhangming, CHEN Fajing. Numerical simulation of hydrocarbon generation, remaining and expulsion of source rocks in geohistory and their quantitative evaluation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [23] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
SHI Guangren. Numerical simulation method in oil and gas basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [24] 郭秋麟,米石云,石广仁,等. 盆地模拟原理方法[M]. 北京:石油工业出版社,1998.
GUO Qiulin, MI Shiyun, SHI Guangren, et al. Principles and methods of basin modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [25] 刘可禹,黄秀. 油气成藏数值模拟技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2017.
LIU Keyu, HUANG Xiu. Petroleum reservoir numerical simulation techniques and applications [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [26] PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the Whole Petroleum System: hydrocarbon thresholds and their application[M]. Berlin: Springer, 2023.
- [27] 庞雄奇,胡涛. 天然气水合物资源评价方法与原理——全油气系统理论应用研究实例[M]. 北京:地质出版社,2022.
PANG Xiongqi, HU Tao. Natural gas hydrate resource evaluation methods and principles: example of theoretical application research of the whole oil and gas system[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2022.
- [28] 苑坤,陈彬滔,于兴河,等. 盆地模拟技术与 BasinMod 软件应用[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(2): 55-60.
YUAN Kun, CHEN Bintao, YU Xinghe, et al. Basin modeling techniques and application of the BasinMod software[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(2): 55-60.
- [29] 贺晓苏. SLBSS 盆地模拟系统几个问题的探讨[J]. 新疆石油地质, 1990, 11(1): 59-66.
HE Xiaosu. Discussion of a few problems concerning SLBSS basin simulation system[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1990, 11(1): 59-66.
- [30] UNGERER P, BESSIS F, CHENET P Y, et al. Geological and geochemical models in oil exploration: principles and practical examples[M]// DEMAISON G, MURRIS R J. Petroleum geochemistry and basin evaluation. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 1984: 53-77.
- [31] 石广仁,张庆春. 盆地模拟的参数敏感性与风险分析[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 61-63.
SHI Guangren, ZHANG Qingchun. The parameter sensitivity and risk analysis for basin modeling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(4): 61-63.
- [32] 崔护社,王明君,王其允,等. 超级盆地模拟系统—PROBASES [J]. 中国海上油气(地质), 1996, 10(5): 304-310.
CUI Hushe, WANG Mingjun, WANG Qiyun, et al. A supersystem of basin simulation—PROBASESS [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996, 10(5): 304-310.
- [33] 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, et al. TSM basin modeling: a case study of Qintong depression, northern Jiangsu [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [34] 王捷,关德范. 油气生成运移聚集模型研究[M]. 北京:石油工业出版社,1999.
WANG Jie, GUAN Defan. Study on the model of hydrocarbon generation, migration, and accumulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [35] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 3 版. 北京:石油工业出版社,2004.
SHI Guangren. Numerical simulation method for oil and gas basins [M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [36] 袁益让,韩玉芃. 三维油气资源盆地数值模拟的理论和实际应用[M]. 北京:科学出版社,2013.
YUAN Yirang, HAN Yujie. Theory and practical application of three-dimensional numerical simulation of oil and gas resource basins [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [37] 郭秋麟,谢红兵,任洪佳,等. 盆地与油气系统模拟[M]. 北京:石油工业出版社,2018.
GUO Qiulin, XIE Hongbing, REN Hongjia, et al. Basin and petroleum systems modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [38] 徐旭辉,方成名,陆建林,等. 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[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 824-836.
XU Xuhui, FANG Chengming, LU Jianlin, et al. 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 [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 824-836.
- [39] JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geology theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-10.
- [40] JIA Chengzao. Ordered accumulation characteristics and mechanism of conventional oil, tight oil, and shale oil sequences of Permian petroleum systems in Mahu sag, Junggar Basin [C]// Proceedings of the 17th National Organic Geochemistry Academic Conference. Fuzhou: Petroleum Geology Committee of Chinese Petroleum Society, 2019.
- [41] JIA Chengzao. Whole Petroleum System—from hydrocarbon source rock to unconventional oil and gas continuous accumulation and con-

- ventional oil and gas trap[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Petroleum Resource Evaluation. Beijing:Petroleum Geology Committee of Chinese Petroleum Society,2022.
- [42] JIA Chengzao,PANG Xiongqi,SONG Yan. Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs[J]. *Petroleum Science*,2023,20(1):1-19.
- [43] MASTERS J A. Deep basin gas trap, western Canada[J]. *AAPG Bulletin*,1979,63(2):152-181.
- [44] ZOU Caineng,ZHANG Guangya,TAO Shizhen, et al. Geological features,major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2010,37(2):129-145.
- [45] 金之钧,王冠平,刘光祥,等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. *石油学报*,2021,42(7):821-835.
- JIN Zhijun,WANG Guanping,LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*,2021,42(7):821-835.
- [46] JIA Chengzao,PANG Xiongqi,SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation:hydrocarbon self-sealing and intermolecular forces[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2021,48(3):507-526.
- [47] PANG Xiongqi,JIA Chengzao,CHEN Junqing, et al. A unified model for the formation and distribution of both conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs[J]. *Geoscience Frontiers*,2021,12(2):695-711.
- [48] PANG Xiongqi,JIA Chengzao,WANG Wenyang, et al. Buoyance-driven hydrocarbon accumulation depth and its implication for unconventional resource prediction[J]. *Geoscience Frontiers*,2021,12(4):101133.
- [49] PANG Xiongqi,HU Tao,LARTER S, et al. Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction[J]. *Gondwana Research*,2022,103:389-400.
- [50] PANG Xiongqi,JIA Chengzao,ZHANG Kun, et al. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction[J]. *Earth System Science Data*,2020,12(1):577-590.
- [51] 庞雄奇,周新源,姜振学,等. 叠合盆地油气藏形成、演化与预测评价[J]. *地质学报*,2012,86(1):1-103.
- PANG Xiongqi,ZHOU Xinyuan,JIANG Zhenxue, et al. Hydrocarbon reservoirs formation, evolution, prediction and evaluation in the superimposed basins[J]. *Acta Geologica Sinica*,2012,86(1):1-103.
- [52] PANG Xiongqi,SHAO Xinhe,LI Maowen, et al. Correlation and difference between conventional and unconventional reservoirs and their unified genetic classification[J]. *Gondwana Research*,2021,97:73-100.
- [53] WANG Wenyang,PANG Xiongqi,CHEN Zhangxin, et al. Quantitative prediction of oil and gas prospects of the Sinian-Lower Paleozoic in the Sichuan Basin in central China[J]. *Energy*,2019,174:861-874.
- [54] PANG Hong,CHEN Junqing,PANG Xiongqi, et al. Analysis of secondary migration of hydrocarbons in the Ordovician carbonate reservoirs in the Tazhong uplift, Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*,2013,97(10):1765-1783.
- [55] WANG Wenyang,PANG Xiongqi,CHEN Zhangxin, et al. Quantitative evaluation of transport efficiency of fault-reservoir composite migration pathway systems in carbonate petroliferous basins[J]. *Energy*,2021,222:119983.
- [56] HU Tao,PANG Xiongqi,JIANG Fujie, et al. Movable oil content evaluation of lacustrine organic-rich shales: methods and a novel quantitative evaluation model[J]. *Earth-Science Reviews*,2021,214:103545.
- [57] HU Tao,PANG Xiongqi,JIANG Shu, et al. Oil content evaluation of lacustrine organic-rich shale with strong heterogeneity: a case study of the Middle Permian Lucaogou Formation in Jimusaer sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Fuel*,2018,221:196-205.
- [58] 罗晓容,周路,史基安,等. 中国西部典型叠合盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京:科学出版社,2014.
- LUO Xiaorong,ZHOU Lu,SHI Ji'an, et al. Dynamical studies on hydrocarbon migration and accumulation in typical superimposed basins in northwestern China[M]. Beijing:Science Press,2014.
- [59] MA Kuiyou,PANG Xiongqi,PANG Hong, et al. A novel method for favorable zone prediction of conventional hydrocarbon accumulations based on RUSBoosted tree machine learning algorithm [J]. *Applied Energy*,2022,326:119983.

(收稿日期 2023-06-05 改回日期 2023-07-14 编辑 雷永良)