

盆地和含油气系统模拟 (BPSM) 研究现状及发展趋势

刘可禹^{1,2*}, 刘建良^{1,2}

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

2 青岛海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

* 通信作者, liukeyu@upc.edu.cn

收稿日期: 2017-04-05

摘要 盆地模拟在现代油气勘探、石油地质综合研究以及油气资源评价中都发挥着重要的作用。本文基于大量文献调研, 结合近几年研究认识, 系统概述了盆地和含油气系统模拟(Basin and Petroleum System Modelling, BPSM)在国内外的研究现状及存在的问题, 指出了地层正演和含油气系统耦合及地应力和含油气系统耦合模拟的盆地模拟发展趋势。认为盆地模拟将来的发展方向是: 1) 三维、高精度和高计算速度模拟; 2) 新算法应用和新模块嵌入; 3) 静态地质要素定量表征精细化; 4) 构造复杂地区盆地模拟; 5) 常规-非常规油气系统联合模拟。

关键词 盆地模拟; 研究现状; 发展趋势; 耦合模拟; 鄂尔多斯盆地

0 引言

传统的盆地和含油气系统研究多以定性的描述和分析为主, 但随着数学、现代电信科学以及计算机技术的发展, 研究手段开始由定性向定量方向转变, 这也是自然学科的一般发展趋势^[1-2]。由于地质过程所涉及的空间大、时间长、影响因素多、相互作用复杂, 很难用实物的物理模拟和化学模拟方法来再现, 在一定程度上阻碍了人们对各种地质过程深入和全面的认识, 也阻碍了地质科学的量化进程^[3], 这就亟需一种量化方法解决这一挑战。盆地和含油气系统模拟(BPSM)是量化研究盆地演化过程的常用手段。

盆地模拟是基于物理、化学基本原理和地质过程, 在时空概念下由计算机定量地模拟油气盆地的形成和演化, 烃类的生成、运移和聚集, 能够直接揭示含油气盆地的本质规律^[4]。盆地模拟综合了地球科学中几乎所有的学科, 包括基础地质、地质力学、地球物理、

地球化学以及地球热力学等^[5], 能够将一系列与油气形成与分布相关的地质要素和地质过程量化^[6], 还能对输入的基础地质数据进行合理性和准确性的快速检测^[7]。含油气系统是油气地质学与系统科学相结合的产物, 为油气地质工作者提供了一种新的思想和方法^[8]。吴冲龙等建议采用“广义的”油气系统概念, 将研究对象和模型在垂向上划分3个级别, 即油气区(或超大型盆地)级油气系统、盆地(或叠合盆地)级含油气系统和凹陷(或亚盆地)级含油气系统^[3,8-9]。含油气系统模拟的原理和方法与盆地模拟基本一致, 但在模拟的尺度上有所差异, 更加灵活。早在1984年, Tissot和Welte就认为盆地模拟技术将会在石油工业领域, 尤其是油气勘探方面, 产生革命性的影响, 也预测了定量地球科学时代的来临^[10]。近些年来, 仍有多位国内外权威学者表达对盆地模拟的高度认可和评价, 其中Hantschel和Kauerauf认为盆地模拟是现代地球科学的一大进步^[7], 而石广仁也认为盆地模拟仍是目前油气勘探大力发展的技术, 是石油地质量化研究的

引用格式: 刘可禹, 刘建良. 盆地和含油气系统模拟(BPSM)研究现状及发展趋势. 石油科学通报, 2017, 02: 161-175

LIU Keyu, LIU Jianliang. Current status and future development trends of Basin and Petroleum System Modeling (BPSM). Petroleum Science Bulletin, 2017, 02: 161-175. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.02.016

热门手段,被誉为油气勘探七大关键技术的第二个技术^[4]。盆地模拟在油气勘探的各个阶段都有所应用,已成为油气勘探日常地质分析的必备技术,能够很好的帮助地质学家理解油气系统^[4,11-12]。本文在大量文献调研的基础上,结合近几年研究认识,首先概述了盆地和含油气系统模拟的发展历程,进而总结了研究现状并发现目前存在的问题及不足,然后阐述了盆地模拟的发展趋势,最后介绍了一个地层正演与盆地耦合模拟的应用实例。

1 发展历程

盆地和含油气系统模拟的兴起和发展与计算机技术的迅猛发展和人们对地质过程的认知程度密切相关,随着计算机计算能力的不断提高以及人们对各种地质过程理论认知的逐渐深入,盆地和含油气系统模拟技术发展至今,总体沿着由简单向复杂、由一维向三维、由自用向商业化的方向发展(表1)。

世界上第一个盆地模拟系统是在1978年由原西德尤利希公司石油与有机地球化学研究所建立起来的,即基于正演地史的一维盆地模拟系统^[13]。自此,国内外各大石油公司和研究机构相继开展方法研究和软件研制工作,推出了不同维度、规模以及各具特色的盆模软件^[14-16]。日本石油勘探公司在1981年建立了世界上第一个简化的二维盆地模拟系统^[17];后又于1987年建立了一个一维排烃模型,完善了1981年盆模系统中的排烃部分^[18];随后又在1988年与美国南卡罗拉那大学合作推出了一个较完整的二维盆地模拟系统^[19]。法国石油研究院于1984年建立了较完整二维盆地模拟系统^[14],同年英国BP石油公司开发出油气二次运移聚集二维模型^[20]。在完善一维盆地模拟系统的基础上大力发展二维模拟,是20世纪80年代国外盆地模拟发展的特色。进入90年代,盆地模拟开始全面发展,软件系统由早期的剖面二维向平面二维和三维模型发展,盆地模拟在广泛的实际应用中得到不断的发展和完善,整体形成以法国石油研究院(IFP)的TemisPack、德国有机地化研究所(IES)的PetroMod(后于2008年被斯伦贝谢公司收购)以及美国Platte River公司(PRA)的BasinMod为代表的三大主力商业化盆模软件,这三大软件目前仍在根据勘探和用户需求不断推出新的版本,除BasinMod目前只能进行1D、2D和2.5D的模拟外,其他两款软件均可以进行1D、2D和3D的模拟。其他一些商业化盆地模拟软件,如Zetaware公司的Trinity和哈里伯顿公司的Permedia,也都是在20世纪90年

代至21世纪初相继推出及完善的,Trinity目前版本为T3,可以进行1D至3D的模拟;而Permedia的前身是MPath,主要用于高分辨率的油气运移路径预测及油气充注历史模拟,后于2010年被哈里伯顿公司收购,并于2011年更名为Permedia。此外,还有国际多家油气公司都在不同程度上研发了公司专有的系统,如挪威石油公司开发的SEMI盆地模拟软件^[21]。

我国的盆地模拟技术是在20世纪80年代初期跟踪西方技术的基础上发展起来的^[12,16]。最早的一套盆地模拟软件系统是在1980年由中石化胜利油田建立的,是在原西德一维模拟软件的基础上进行改进,建立的一套SLBSS模拟系统^[12,22]。之后,国内三大石油公司都对盆地模拟系统进行大力发展。中国海洋石油勘探开发研究中心在1987年开发出一维盆地模拟系统(HYBSS);在1989年相继推出一维盆地模拟专家系统(PRES-BAES)和烃类运聚评价系统(PRES-MIGS),在全国第二轮油气资源评价中发挥重要作用;在1996年,与美国加州大学GeoSolv公司合作研制出二维盆地模拟评价系统(ProBases)^[23-24]。中国石油勘探开发研究院于1989年自主研发出一维盆地模拟系统(BAS1)^[25];随后在1990年推出二维盆地模拟图形工作站系统(BMWS);在1996年,研制出全新的盆地综合模拟系统(BASIMS)^[26]。中石化无锡地质研究所于20世纪90年代,基于朱夏先生提出的大地构造与油气聚集系统关系的3T(Tectonics, Time, Thermal regime)-4S(Subsidence, Sedimentation, Stress, Style)-4M(Material, Maturity, Migration, Maintenance)程式,即“环境-作用-响应”关系式,开发出了TSM盆地模拟系统^[27-28]。1998年,中国地质大学(武汉)与中海油研究院在明确含油气系统各子系统之间相互作用及反馈控制的基础上,建立了油气生、排、运、聚的动力学方程,进而联合研制出油气成藏系统动力学模拟软件(PSDS),初步实现了油气成藏动力学的整体模拟^[29]。此外,中石化勘探开发研究院也于近几年推出了自主研发的一体化油气资源评价软件(PetroV)^[30]。

2 研究现状

2.1 技术方法研究现状

盆地和含油气系统模拟的内涵都是在地质时间格架内,对一系列地质过程进行动态模拟^[7]。完整的模拟系统需要由五个模型(简称“五史”)有机组成,分别为地史模型、热史模型、生烃史模型、排烃史模型

表 1 盆地和含油气系统模拟发展历程简表

Table 1 Basin and petroleum system modelling development history

维数	国内				
	时间	研发机构	软件名称	说明	时间
1D	1978 年	原西德尤利希公司石油与有机地球化学研究所		世界上第一个一维盆地模拟系统	1980 年 中石化胜利油田
	1987 年	日本石油勘探公司		原有的排烃模型进一步完善	1987 年 中海油勘探开发研究院
					1989 年 中海油勘探开发研究院
					1989 年 中海油勘探开发研究院
					1989 年 中海油勘探开发研究院
2D	1981 年	日本石油勘探公司		第一个二维盆地模拟系统	1990 年 中海油勘探开发研究院
	1984 年	法国石油研究院	TemisPack	较完整的二维盆地模拟系统	
	1988 年	英国 BP 公司 日本石油勘探公司与美国南卡罗拉那大学合作		油气二次运聚模型 较完整的二维盆地模拟系统	1996 年 中海油研究院与美国加州大学联合研制
	2000 年	美国 Platte River 公司	BasimMod	比较成熟的商业化软件	
					1996 年 中国石油勘探开发研究院
3D	1995 年	德国有机地化研究所 (后被斯伦贝谢公司收购)	Petromod		1996 年 盆地综合模拟系统
	1998 年	Permedia 研究和发展公司 (后被哈里伯顿收购)	Mpath(后更名为 Permedia)	比较成熟的商业化软件, 目前仍在不断更新版本	1997 年 中石化无锡所
	90 年代至现今	法国石油研究院	TemisFlow		1998 年 中国地质大学(武汉)与中海油联合研制
					1998 年 中石化勘探开发研究院
					2014 年 中石化勘探开发研究院

(初次运移)和烃类运聚史模型(二次运移)^[4,16],每个模型又是由多个地质过程组合而成。盆地模拟的基本流程为:在盆地分析的基础上,对每一个地质过程建立相应的概念模型,再用数学方法定量化表达,然后利用计算机语言将各数学模型有机的衔接起来,最后形成可视化的操作界面并输出模拟结果。地质过程描述的越详尽,数学模型建立的越精确,模拟出来的结果就越接近实际地质。

盆地模拟的五史模型并非相互独立,而是相互依存和相互支撑的。地史模型是油气系统赋存的地质基础,主要是对油气盆地沉积和构造演化过程的重建,可以为后续的热史、生烃史、排烃史和运移聚集史的模拟提供有效地时空模拟范围^[26]。采用的模拟方法有:回剥方法^[31]、超压方法以及回剥与超压相结合的方法^[16]。

热史模拟是地质系统向油气系统转化的关键,它的作用在于恢复盆地的古热流史和古温度史,进而为生烃史的模拟提供温度场^[26,32]。目前,常用的热史恢复方法有三种,即地球热力学法、地球化学法和结合法^[33]。地球热力学法是以地壳中热传导的原理或者盆地的形成机制来重建盆地的热史,是一种正演恢复技术,包括有扩张模型和Falvey模型,前者只考虑热传导,适用于拉张盆地,后者不仅考虑热传导,还考虑了孔隙介质流动时的热对流,而且不考虑盆地的力学性质,适用于各类盆地^[34]。地球化学法是利用地化数据来恢复古地温及其演化规律,是一种反演方法,常用的数据有镜质体反射率、流体包裹体、磷灰石裂变径迹和生物标志物等,其中利用镜质体反射率确定古热流的方法^[35]被认为是“最准确、最好的方法”^[36]。结合法在热史恢复中应用最为普遍,是将正演和反演技术相结合,利用已知的地层信息和古温标资料作为约束条件,对盆地的热史进行模拟。

生烃史模拟是在对烃源岩地化特征综合评价的基础上,对其成熟度史和生烃量史的重建,为油气的生成及后续的排出和运移提供直接的物质基础。由于生烃机理研究的已比较深入,生烃史是五史模型中相对最成熟的模型^[12]。目前盆地模拟中主要利用两种指标来表达烃类的成熟度:镜质体反射率(R_o)和干酪根降解率^[26],它们同时也是生烃量史计算的重要参数。重建烃源岩成熟度史就主要利用上述两种参数,方法有TTI- R_o 法^[10,16]、Easy R_o 法^[37]和化学动力学法^[10,26,38]。生烃量史是指每套烃源岩层在各个时期的生烃量,包括实验模拟法、热化学动力学法和物质平衡模拟算法^[2],其中物质平衡法是前苏联学者B.A. 乌斯宾斯基

(1954)针对煤中有机质转化产气量计算出来的^[2],被国内外学者认为是最有论据性的办法,后来这一方法被庞雄奇改进后能应用于任何母质在不同地史阶段产油量计算,考虑的产物组分可达十种以上^[39]。

排烃史模型是油气运移的关键环节,其作用是重建油气盆地的排烃量史,为后续的二次运移及聚集史模拟提供烃类演化环境。常用的排烃史模拟方法包括压实排油法^[16]、压差排油法^[16]、有机质成气膨胀排气法^[40]和排烃门限法等^[39,41]。

烃类运聚史模拟建立在以上四史模型的基础上,是盆地模拟最重要的组成部分,对油气资源评价和有利勘探目标预测具有重要意义^[42]。目前,常用的运聚定量模拟技术有以下4个:多相达西流法(Darcy)^[43-44]、流径法(Flowpath)^[7,45]、侵入逾渗法(Invasion Percolation)^[46]和混合法(Hybrid)^[7]。多相达西流被认为是描述流体在孔隙介质中流动最精确和复杂的物理方法,目前已在油藏数值模拟中成功应用^[7],在盆地模拟中,适用于渗透性较差地层中油气运移的模拟^[47]。流径法主要适用于渗透性较好的地层,以浮力为主要驱动力,计算耗时较少。侵入逾渗法适用于模拟地层几何形状复杂、网格密度较高条件下油气的运移,模拟油气的运移是瞬时发生的,计算速度较快^[48]。混合法是将多相达西流法和流径法相结合,在低渗透条件下使用达西流方法,而在高渗透条件下利用流径法。

2.2 各主要模拟软件研究现状

盆地模拟技术兴起至今已有40多年的历史,目前国内外已研发出许多不同规模、各具特色的模拟软件。但近年来,新研发的盆模软件较少,主要是在原有较成熟的商品化软件基础上,通过改进模拟技术和增加新的模块等方法,来不断适应和满足油气勘探及地质科学发展的需求。

目前国内外应用较为广泛、认可度较高的盆模软件主要有斯伦贝谢的PetroMod、PRA公司的BasinMod、法国石油研究院的TemisFlow和Zetaware公司的Trinity。这些软件都可以进行完整的3D盆地模拟(除BasinMod外),但又各具特色。PetroMod软件:1)注重于“库概念”的建立,拥有最丰富的地质模板和经验参数,如生烃动力学模板和标准的岩性模板,使建模过程简单化;2)具有高度集成、个性化的操作界面;3)先进的油气运移算法,不仅提升了计算速度,而且更加贴近实际地质规律,例如达西和侵入逾渗组合法(Darcy+ Invasion Percolation)的提出,对非均质性较强的复杂岩相储集层以及网格数量庞大的模型

都有较好的应用,可以对流体的充注、溢出及渗漏历史进行较好的模拟^[49-50];4)模拟精度较高,拥有局部网格加密技术,可进行多尺度(如盆地、凹陷和油藏)模拟;5)可与Petrel平台衔接,建立完善的油气勘探、开发、生产一体化流程。BasinMod模拟软件:1)注重与测井曲线的结合,不仅支持LAS格式文件的输入,还能进行测井孔隙度、剥蚀厚度的计算,直接为模型的建立提供参数;2)具有“Bridge”功能模块,支持多种格式数据输入,能将产业标准的数据(如Petra、IHS297数据)直接输入到盆模软件中,使模型的建立更加便捷、高效;3)支持通过现今TOC值进行原始TOC的恢复计算。TemisFlow软件:1)具有创新的数据管理方式,利用“方案树”的模式,可以处理连续多个模型,记录每个方案的工作,使各方案之间数据调用更加方便,并能够实现多个方案的对比;2)使用生烃动力学连续反应方法,能够有效、准确地描述干酪根转化成石油的过程,预测早期或晚期天然气的生成,并准确地描述天然气的组分和湿度;3)在油气运聚模拟方面,采用有限体积法,具有保证网块物质平衡、准确处理复杂边界和运算速度快的优点;4)具有精细的局部网格加密技术;5)能够与Dionisos沉积地层正演模拟软件很好的结合,将地层正演模拟的结果输入到TemisFlow软件中,完成对目的层岩相的精细刻画,进行高精度的盆地模拟。Trinity模拟软件:1)具有使用便捷的特征,不仅能与几乎所有数据类型兼容,还能自动检测和选取合适的输入数据文件;2)对不同的Scenarios(方案)能够进行快速的测试,优选出合适的方案或进行敏感性分析;3)若一套厚层烃源岩中包含多套不同类型的烃源岩小层,可分别进行定义及赋值,选取不同的生烃动力学模型,而不是简单的将其混合平均后选取一个动力学模型,模拟结果更加接近实际地质;4)提出一种利用地壳厚度和沉积速率来预测大地热流值的方法,优化了热史模型;5)开发出油气运移滞后新模块,定量地建立起烃类生成、运移散失、圈闭大小以及流体性质之间的关系,对油气勘探风险评价和流体性质预测都具有重要的意义^[51]。近些年来,随着非常规油气勘探热度加大,上述四个软件公司都加大了盆地模拟技术在非常规油气领域应用的研究,推出了各自的“非常规油气”模拟模块,主要集中在对页岩气和煤层气的吸附气量模拟计算,个别软件还可以进行溶解气和游离气含量的计算(如Trinity)。

与国外软件相比,国内盆地模拟软件尽管在某些方面考虑的比国外周到,但整体上在数值方法、软件

水平及商品化程度方面均存在一定的差距,而且大部分国内软件推出新版本的速度较慢。目前,由中石油勘探开发研究院自主研制的BASIMS软件已在国内各大油田和研究机构应用,是应用最为广泛的国内盆模软件。BASIMS软件:1)在地质模型构建方面比国外稍强,其考虑了多种复杂的地质现象,如断层和盆地类型等;2)已开发了将“模拟结果”、“其他地质资料”及“地质家经验”三者结合起来的操作平台,在综合评价方面优于国外软件^[16]。此外,TSM盆地模拟系统侧重于对复杂含油气盆地的数值模拟,通过对盆地形成过程中不同时期盆地原型和叠加关系的分析,来得到原型盆地中烃源岩的分布预测以及多期叠加作用下烃源岩的演化和油气响应模型^[52],适用于对我国中西部叠合盆地的数值模拟。油气系统动力学模拟(PSDS)考虑到油气成藏过程的非线性特征,以及常规盆地模拟中普遍存在的缺陷,采用系统动力学的思路和方法,避开了尚存争议的一系列化学动力学和物理动力学问题,运用一些确定性的物理、化学定律,从总体上把握其中能量转化、物质转移和信息转移规律,进而实现对油气资源量和勘探目标的预测和评价^[8],是侧重于含油气系统的一种模拟方法。

2.3 应用现状

盆地和含油气系统模拟在油气勘探和开发的多个方面都有应用,本文主要总结了以下8个方面的应用。

1)数据的质量控制:盆地模型建立的过程就是对输入数据进行质量控制的过程,一些错误的或不合地质规律的数据不能输入到盆模软件中或模拟出来的结果与实测数据相差较大,通过模拟的方法都可以识别出来,进而确保地质数据的真实可靠。

2)勘探风险评价:通过对影响油气生成或聚集的几个关键参数进行正态、三角或二次分布的分析,利用概率为50%(P50)的值,对多个可能的油气聚集区进行勘探风险评级,进而指导油气勘探^[53],还可以利用蒙特卡洛方法进行油气勘探风险的评价^[54]。

3)参数敏感性分析:利用单变量分析的方法,即改变一个变量的值而保持其他输入参数不变,建立多个模拟方案,通过模拟结果与实测数据的校正来优选该变量最合适的值,并分析该变量的变化范围与模拟值的响应关系,进行敏感性分析,如对热流值和剥蚀厚度的敏感性分析^[55-56]。

4)油气成藏期和成藏过程定量分析:目前普遍认为盆地模拟中埋藏史、热史和生烃史模型较为完善,而在油气运移方面的研究较为薄弱^[42]。在实际应用中

也可以看到,与油气运移相关的2D和3D模拟相对较少,而1D模拟相对较多,且主要应用于单井的热史和烃类成熟度史分析,再结合其他手段,如流体包裹体等,进行油气成藏期的定量确定。利用2D和3D的盆地模拟,还可以定量地分析油气成藏过程^[57-58]。

5) 油气资源评价:盆地模拟是进行油气资源评价的重要方法之一,目前可进行3D和部分2D/2.5D盆地模拟的软件都可以定量地计算平面范围内油气的生、排、运、聚量,进而对油气资源量定量评价。

6) 钻井施工过程中的应用:盆地模拟可以有效地预测地层压力,其预测的准确性在油气钻井施工过程中非常重要,准确的地层压力预测不仅能保障钻井施工过程中的安全性,还能节省钻井的时间和成本,并为后期试井及生产提供准确的压力参数^[59]。在非常规地层中,地层孔隙压力还对人工压裂和完井的成功起着非常重要的作用,也影响着非常规油气的生产速率及最终采收率^[60]。

7) 非常规油气勘探领域:盆地模拟技术已在非常规油气勘探的多方面开始应用,主要包括:页岩气和煤层气中含气量的计算^[61]、地层压力的预测^[60]、致密油气和页岩油气聚集甜点区的优选^[62-64]、天然气水合物资源量评价^[65]、生物气的生成、运移及保存^[66]。此外,盆地模拟技术也开始在其他地质资源(如地热和二氧化碳存储)评价中应用。

8) 与其他软件相结合:对于一些复杂的地质问题,只利用盆地模拟技术往往很难准确的模拟出来,这就需要与其他软件相结合。目前,盆地模拟软件已成功的与SedSim和Dionisos等地层正演模拟软件结合起来,能够精细地定量表征烃源岩、储集层和盖层的沉积非均质性,可以较好的应用于岩性和非常规油气领域^[62,67-68]。对于挤压构造地区,盆地模拟还可以与构造恢复软件(如Dynel)相结合,构建准确的地质模型。此外,盆地模拟软件还可以与Petrel软件整合,进行油气勘探开发一体化研究。

3 问题与挑战

虽然目前盆地与含油气系统模拟已在油气勘探开发的许多方面应用,但仍存在一些亟待解决的问题,也面临着挑战。吴冲龙等早在20世纪90年指出盆地动力学与油气成藏模拟当时普遍存在系统观念薄弱且对盆地系统及其各子系统之间的反馈控制机理重视不够;与盆地分析脱节导致概念模型过于简化,难以反映实际油气成藏过程;数学模型单一且偏于确定

性,难以具体地描述油气成藏动力学过程的非线性特征^[69]。现今来看,这些问题依然没有很好的解决,许多模型还需进一步完善,如流体动力模型、断层封闭性模型、孔隙流体压力模型、成岩作用模型、构造模型、地质模型等,而且软件研发者多侧重对单个模块的完善或添加新模块,也缺乏对各模块之间反馈的非线性关系研究。

三维空间内油气的运聚模拟被认为是世界级的技术难题^[12],尽管有些软件产品的理论与算法比较全面和完善,但也都未达到实用化的水平,大部分油气运聚模拟应用体现在理论性和探索性研究方面,缺乏实际指导价值^[70]。这是由于油气的运聚模拟需考虑多方面的问題,包含多个子模型,而部分子模型本身还需进一步完善:1)地质模型:岩性的非均质性对油气的运移路径及聚集位置均具有控制作用,尤其在岩性和非常规油气中,但常规的盆地模拟在构建地质模型时很难考虑目的层在空间范围的岩性非均质性;2)断层封闭性模型:断层在油气运移及聚集方面具有重要作用,但目前较为常用的方法是利用人工干预方法进行断层开启和封闭时间的设置,缺乏利用专业模型模拟的技术方法;3)构造模型:目前的三维盆地模型还无法进行侧向构造运动的模拟,但是在构造复杂地区,侧向构造运动也是油气运移的关键因素之一;4)流体动力模型:经典的油气运聚模式是基于浮力和毛细管力相互作用的,没有考虑复杂的多物理场(地温场、地压场、地应力场)作用下油气的运、聚模式。此外,对于非常规油气的流动状态也需要进一步研究,因为非常规油气的勘探和开发常常涉及到纳米尺度(接近分子尺度)的孔喉,而在分子尺度下,许多在牛顿力学理论下的假设已不再成立,另外在纳米孔中分子流动存在滑移边界效应,即在流动边界流体速度不是零,因此需要在盆地与含油气系统模拟中增加分子动力学模块,以实现对非常规油气赋存状态、运移和聚集更准确的定量模拟。

成岩作用模拟也是目前盆地模拟中较薄弱的环节,一般通过人工干预的手段实现在某一时期孔隙的增减,没有建立在沉积微相、沉积间断和流体成分的基础上,对水-岩相互作用下的岩石胶结、交代、溶蚀等成岩作用的正演模拟。

4 发展趋势

近些年来,客观上随着计算机技术的不断进步,主观上由于人们对地质理论认识的不断完善以及油气

勘探需求正逐渐由常规、构造相对简单的油气藏向非常规、岩性以及构造复杂地区的油气勘探领域发展, 常规的一维、二维和简化的三维盆地模拟已无法满足人们对这些领域油气勘探的需求, 这就促使着盆地模拟技术不断向更加精细以及更为接近和反映实际地质规律的方向发展。作者在追逐和调研了国内外研究现状基础上, 总结出目前盆地模拟的五个发展趋势。

4.1 向三维、高精度和高计算速度方向发展

含油气盆地的勘探程度不同, 宜采用的盆地模拟维数也不同。在勘探程度较高的盆地, 由于钻井数量较多及地震覆盖面积较广, 有充足的数据用于构建盆地模型并进行校正, 可进行精细的三维盆地模拟; 对于勘探程度中等的含油气盆地, 适宜进行二维的盆地模拟; 在勘探程度较低的盆地, 由于井控数量少, 可进行一维单井的埋藏史、热史和生烃史的模拟^[4]。一维盆地模拟又被称为成熟度史模拟, 在油气勘探中应用最广, 也最为成功^[71]。相比之下, 二维和三维的盆地模拟更加侧重于剖面 and 空间范围的油气运移和聚集模拟, 目前在油气勘探和资源评价中的应用也越来越多。相对于一维和二维的盆地模拟, 三维模拟具有以下三个明显的优势: 1) 能够对盆地内各沉积单元的沉积量进行表征, 对含油气系统中各要素的确定更为准确; 2) 可以提供空间范围的古、今温度和热流场, 对烃源岩成熟度演化史的模拟更为准确; 3) 可以在三维空间内对油气的运移和聚集进行模拟^[57]。对含油气盆地进行三维模拟已经成为盆地模拟的一个主要发展趋势。

盆地模拟技术的发展在很大程度上依赖于计算机技术的进步, 主要与其运算能力紧密相关。在对含油气盆地进行二维或三维模拟时, 需要将地质模型划分成多个网格。一般地, 网格数目越多, 建立的地质模型就越精细, 模拟结果也就更加接近于实际地质, 但对计算机运行和存储能力的要求也就越高; 反之亦然。庆幸的是, 近些年来, 随着计算机技术突飞猛进的发展, 我们已经有能力对几百万甚至上千万网格的地质模型进行盆地模拟运算^[49]。同时, 计算速度也是人们关注的一个关键问题, 如果网格分辨率较高的盆地模型在模拟运算时速度很慢, 势必也不会油气勘探中有广泛的应用。早在 1998 年, Waples 就提出盆地模拟软件将朝着操作简单、运行速度快的方向发展^[71]。斯伦贝谢公司也在其 2015 版 PetroMod 软件中, 新增了“并行计算”模块, 可对网格数目多、分辨率高的模型进行多核同时运算, 大大提高了模拟运算的速度。

4.2 各子模块中新方法的提出和新模块的加入

盆地模拟“五史”模块的每一个模块都包含着许多地质模型和数学运算方法, 它们是构成盆地模拟的核心部分。但是, 随着人们在实际勘探中遇到不同的问题以及对地质认识的不断深入, 可能发现一些原来的地质模型不能准确的反映实际地质情况, 或某些计算方法尚需改进, 这些问题都不断地促使和激励着人们提出新方法、增加新模块, 如最近提出来的油气运移^[49-50]、孔隙度计算^[72]和压力预测^[59,73]的新方法以及油气运移滞后新模块^[51]。

4.3 静态地质要素定量表征精细化

在传统的三维盆地模拟中, 烃源岩、储集层和盖层的岩相一般被赋予均一相, 或从各自沉积相图、测井和地震资料解释中获取, 这种岩相表征方式比较粗糙, 一般不考虑沉积地层的非均质性或非均质性考虑的比较简单, 这样的盆地模型对构造型圈闭发育的地区有一定的适用性, 但却无法满足岩性和非常规油气的运移和聚集模拟。这是因为在岩性储集层中砂泥岩在空间范围内交互频繁、相互叠置, 而在非常规油气勘探过程中, 烃源岩和储集层经常混合在同一地层, 难以分开, 在空间上都表现出较强的沉积非均质性。随着油气勘探不断向岩性和非常规油气领域过渡, 对这些静态地质要素进行精细的岩相和其他输入参数的定量表征, 再进行三维盆地模拟, 是有效预测油气勘探有利区及资源评价的重要手段, 也是在传统的盆地模拟基础上前进了一步。目前, 已有学者开始在这方面进行探索性研究, 提出了利用地层正演模拟与盆地模拟相耦合的方法, 在对三维空间内沉积非均质性定量表征的基础上, 进行地史模型的构建及后续的热史、生烃史和油气运聚史模拟, 如地层正演模拟软件 Sedsim 分别与 PetroMod^[62]和 TemisFlow^[67]相耦合, 以及 Dionisos 与 TemisFlow 相耦合^[68]。此外, 地层正演模拟还可以输出沉积时古水深结果, 进而可以建立古水深与烃源岩有机质丰度(TOC)之间的定量关系, 是烃源岩输入参数精细化的发展方向之一。

4.4 构造复杂地区的盆地模拟

对构造复杂条件下的含油气系统进行盆地模拟依然是一项复杂且富有挑战性的任务^[7]。在构造复杂地区, 尤其是挤压断层和盐构造发育环境下, 利用常规的回剥法进行地史恢复已不再适用, 因为在地史恢复过程中, 不仅要考虑垂向上地层的厚度变化, 还要考

虑水平方向上地层的缩减,可能会造成一套地层在垂向上多次钻遇,具有多个深度值的情况,而传统的盆模软件已不能有效地模拟这种类型盆地。

目前,一些学者尝试利用构造恢复与盆地模拟相结合的方法,对复杂构造地区进行二维盆地模拟,虽然该方法还存在一些不足,但也在墨西哥湾盐构造地区和阿尔巴尼亚挤压构造地区成功应用^[74]。利用PetroMod软件中的TecLink模块也可以对逆冲断层发育地区进行二维的盆地模拟,该方法需要将地层剖面划分成多个“Block”,但在构造演化过程中,仍保持其结构的完整性,通过对每一个“Block”的模拟,来实现对整个地层剖面的模拟^[58]。此外,考虑水平挤压应力作用下孔隙度的变化也是今后的一个研究方向,对构造挤压型盆地模拟的准确性会有较大的提高。法国石油研究院与道达尔公司(2016)共同提出将盆地模拟与地质力学相结合,来实现在垂向压实和水平挤压应力共同作用下,对地层孔隙度的计算^[72]。因此,完善构造复杂条件下的二维盆地模拟技术并发展三维模拟技术也是盆地模拟的发展方向之一。

4.5 向非常规油气勘探领域发展

作为含油气盆地分析中广为应用和接受的方法之一,盆地模拟已经在常规油气勘探和资源评价中起到重要作用。近几年来,随着非常规油气勘探成为热点,盆地模拟也开始在非常规油气领域应用,并且取得不错的应用效果^[75]。与常规油气系统模拟有所不同,对非常规含油气系统模拟时,还需考虑其他的一些地质因素,如烃类的吸附作用、有机质在热演化过程中的增孔作用、地层应力场分布以及沉积的非均质性等。整体上,盆地模拟在非常规油气勘探领域的应用尚处于尝试和初始阶段,但无论从油气勘探需要、学科发展还是软件功能完善的角度考虑,非常规油气领域都将成为盆地模拟发展的趋势之一。

5 实例应用

沉积地层正演与含油气系统的耦合模拟对非均质性较强的岩性和非常规油气的运聚模拟具有较好的适用性,也是目前盆地模拟的前沿技术和发展趋势之一。

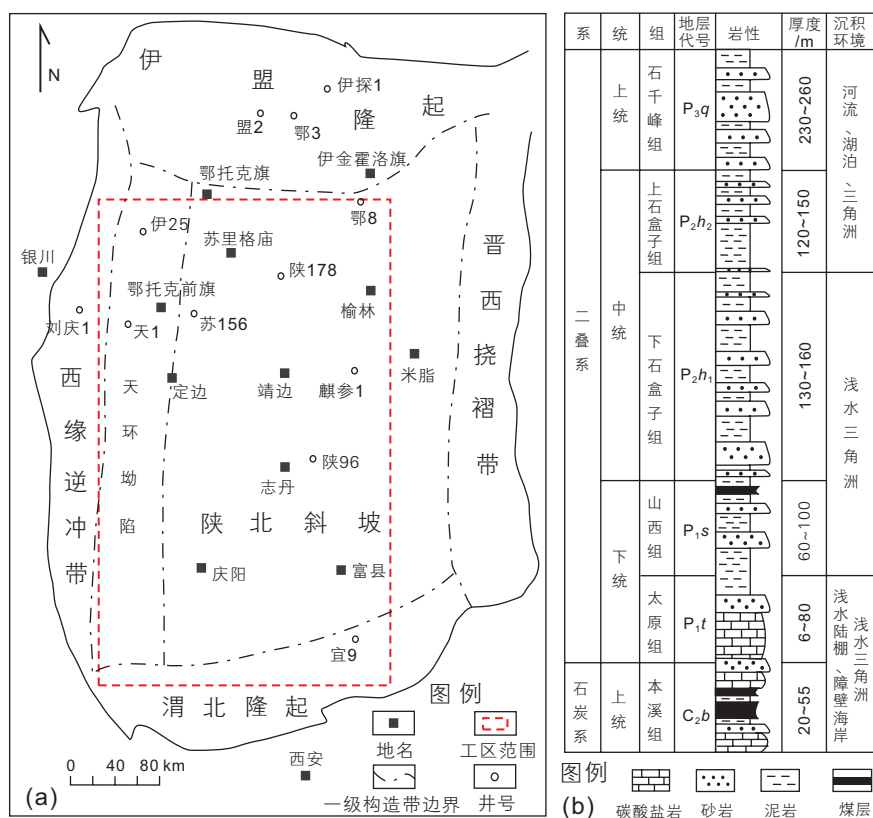


图1 鄂尔多斯盆地构造分区及研究区范围(a)与上古生界岩性综合柱状图(b)

Fig. 1 Location of the study area in the Ordos Basin showing major tectonic zones (a) and generalized lithological column of the Upper Paleozoic sequence (b)

本文以鄂尔多斯盆地上古生界含油气系统模拟为例,介绍该耦合方法的模拟流程,并将模拟结果与传统的“简单层状地层”模型模拟结果进行对比。

5.1 研究区概况

鄂尔多斯盆地分为六个一级构造单元^[76-77],分别为伊盟隆起、渭北隆起、西缘逆冲带、天环坳陷、陕北斜坡和晋西挠褶带,研究区位于盆地中部,包括天环坳陷和陕北斜坡的大部分区域(图 1a)。受加里东构造运动影响,上古生界下部地层整体缺失,只发育晚石炭世本溪组和二叠系地层。盆地在晚古生代经历了由陆表海向内陆湖盆过渡的阶段,主要发育浅水陆棚、浅水三角洲、河流和湖泊等沉积环境。烃源岩主要发育在上石炭统本溪组及下二叠统的太原组和山西组,是发育在海陆交互相的一套含煤层系,平面上呈“广覆型”的沉积特点,发育有煤层、暗色泥岩和灰岩三种类型烃源岩^[78]。储集层主要发育在山西组和下石盒

子组,以河道砂体和三角洲砂体为主,储层物性差,孔隙度主要分布在 2%~8%,渗透率多小于 1 mD^[79]。上石盒子组和石千峰组发育大量泥质和粉砂质泥岩,被认为是上古生界含油气系统的一套重要的区域性盖层。

5.2 耦合模拟流程

本文利用 SedSim 软件进行地层正演模拟。SedSim 是一款以水动力学方程为核心的正演模拟软件,可以模拟沉积物的侵蚀、搬运和沉积作用,遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒^[80]。模拟结果在垂向上的分辨率为厘米到米级,横向分辨率为米到千米级别,而且每个网格都包含了岩性(如粒度大小和组分)和沉积环境(如古水深、距沉积岸线的距离等)的信息。

如图 2 所示,耦合模拟的具体流程是:1)基于对目的层地质认识,建立其概念模型,明确模拟目标;2)进行主要参数获取和输入,包括沉积古地形、构造

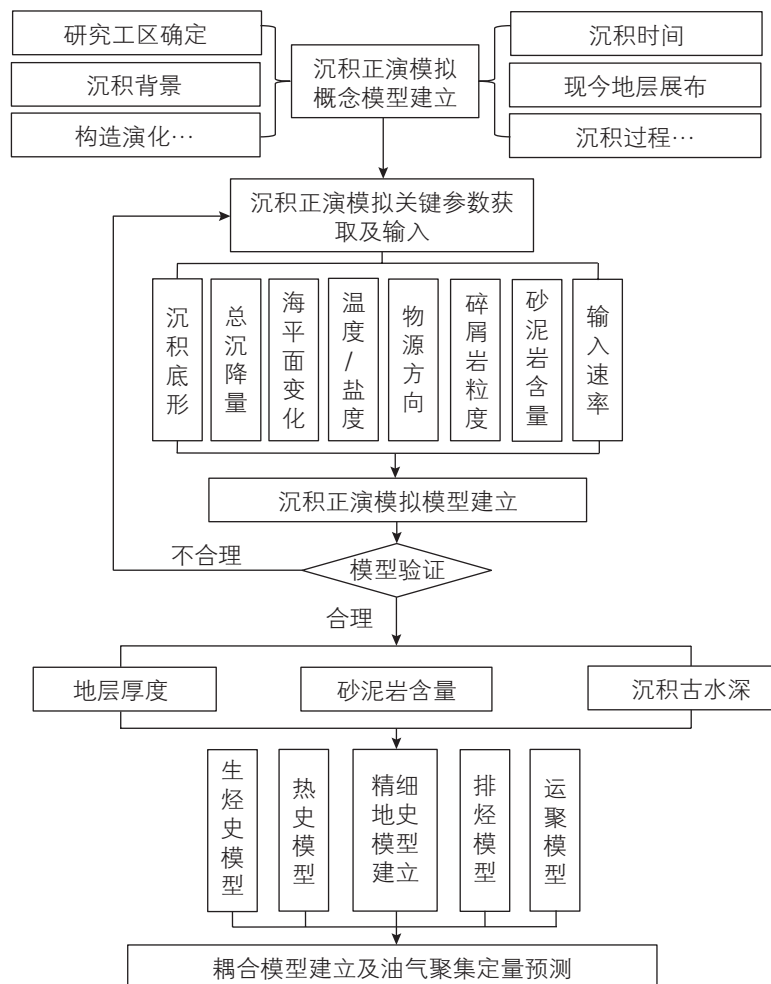


图 2 地层正演与含油气系统耦合模拟流程

Fig. 2 Workflow of coupled stratigraphic forward and petroleum system modelling

沉降、湖/海平面升降曲线、沉积物物源、沉积物粒度及供给速率等, 如果需要对碳酸盐岩和有机质生长进行模拟, 则需要明确古温度、盐度及其生长速率; 3) 在此基础上, 进行沉积模拟, 将模拟结果与实际地质资料进行对比, 如地震、测井、岩心等, 如果模拟结果与实际数据差距较大, 则重新调整输入参数再次进行模拟, 直到模拟结果与实际数据的误差在合理范围内为止; 4) 沉积正演模拟结果输出, 包括目的层压实后的厚度、砂/泥岩百分含量和古水深等, 可将这些结果直接或经过转换输入到盆地模拟软件中, 比如, 需要将各网格中砂/泥岩百分含量转换成岩性数据输入, 将古水深数据与烃源岩TOC进行关联和转换; 5) 利用沉积模拟结果建立目的层精细地质模型, 充分考虑目的层的空间非均质性, 其他的盆模输入参数需要根据相关研究来获取, 最后完成耦合模拟, 定量预测油气聚集有利区。

5.3 “非均质地层”模型-盆地耦合模拟与传统“简单层状地层”模型盆地模拟结果对比

分别对研究区上古生界含油气系统进行传统的

“简单层状地层”模型模拟以及SedSim-PetroMod的耦合模拟, 其中“简单层状地层”模型是将目的层山西组定义为一层, 利用现今的沉积相图进行岩性赋值, 只简单考虑了其横向的岩相非均质性, 没有考虑其层内垂向非均质性(图3A), 而耦合模拟是将SedSim输出的山西组模拟结果输入到PetroMod中, 考虑其层内横向和垂向的岩相非均质性(图3B), 保持这两个模型中的其他输入参数不变。油气运聚模拟结果显示, 传统的“简单层状地层”模型模拟出山西组的聚气量和聚气范围都较小(图3C), 这是由于传统模型不考虑储集层的垂向非均质性, 油气在山西组内部运移受到的遮挡较少, 而且其上覆的下石盒子组也是一套储集层, 未能对山西组的油气形成有效遮挡, 油气大都穿过山西组向上运移或从边部散失; 耦合模型由于考虑了山西组内部垂向和水平方向的岩相非均质性, 油气在进入储集层后, 其内部的泥岩夹层会改变油气的运移方向或对油气形成遮挡, 形成众多小规模储盖组合体, 聚集大量油气(图3D)。很显然, 耦合模拟比传统模拟结果更加接近实际地质勘探, 也对下一步油气勘探具有一定的指导意义。

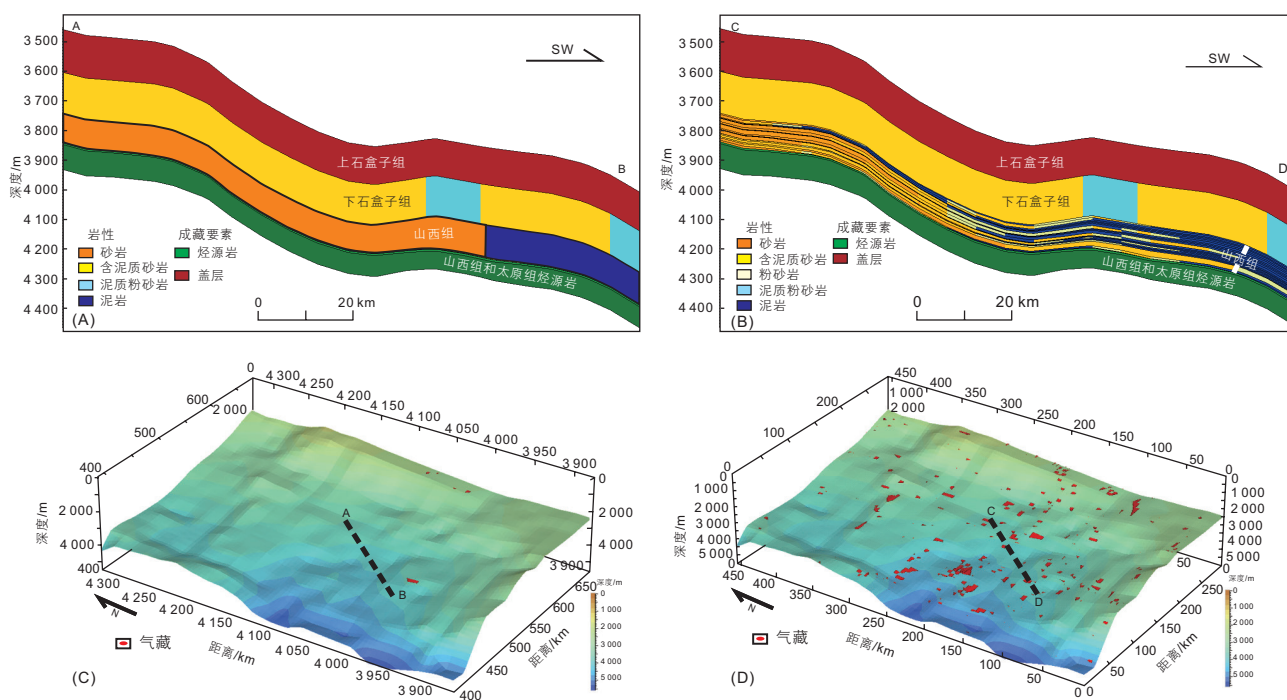


图3 鄂尔多斯盆地上古生界两种类型的地质模型和山西组天然气运聚模拟结果对比。(A)传统的“简单层状地层”地质模型二维剖面AB(剖面位置如图C所示);(B)SedSim-PetroMod耦合地质模型二维剖面CD(剖面位置如图D所示);(C)传统的“简单层状地层”模型山西组天然气聚集模拟结果;(D)SedSim-PetroMod耦合模型山西组天然气聚集模拟结果

Fig. 3 Comparisons of two geological models and gas accumulations within the Shanxi Formation in the Upper Paleozoic, Ordos Basin, from the (A, C) classical “layer-cake” model and (B, D) coupled SedSim-PetroMod model

6 结论

(1) 国内外盆地模拟技术经历了由简单向复杂、由一维向三维、由自用向商业化方向发展的研究历程, 已研发出多个较成熟、各具特色的商业化模拟软件平台, 并继续在完善模拟模块、提高模拟精度、增加运行速度等方面进行着探索。盆地模拟技术已被广泛应用在油气勘探开发多个方面, 包括数据质量控制、勘探风险评价、参数敏感性分析、油气成藏定量分析、常规油气资源评价、工程钻井安全性评价、非常规油气资源量计算和甜点区预测。

(2) 盆地和含油气系统模拟的发展趋势可总结为以下五个方向: 三维、高精度和高计算速度, 新方法和新模块的开发, 静态地质要素定量表征精细化, 构造复杂地区盆地模拟以及非常规油气勘探领域。

(3) 沉积地层正演和含油气系统耦合模拟是未来发展重要方向之一, 可以更有效地模拟岩性、地层及非常规油气藏的非均质性。鄂尔多斯盆地山西组的油气聚集耦合模拟实例证明, 与传统的“简单层状”模型相比, 地层正演和含油气系耦合模型充分考虑了山西组层内岩相空间分布的非均质性, 模拟出众多小规模岩性油气藏, 更加接近实际地质情况。

参考文献

- [1] 李汉林, 赵永军, 王海起. 石油数学地质 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2008, 1-4. [LI H L, ZHAO Y J, WANG H Q. Petroleum mathematical geology [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008, 1-4.]
- [2] 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, 1-12 [PANG X Q, QIU N S, JIANG Z X, et al. Quantitative modelling of hydrocarbon accumulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005, 1-12.]
- [3] 吴冲龙, 王燮培, 毛小平, 等. 油气系统动力学的概念模型与方法原理—盆地模拟和油气成藏动力学模拟的新思路、新方法 [J]. 石油实验地质, 1998, 20(4): 319-327. [WU C L, WANG X P, MAO X P, et al. The concept and principles of petroleum systems dynamics—New thinking and method of basin modeling and petroleum pool-forming dynamics modeling [J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(4): 319-327.]
- [4] 石广仁. 盆地模拟技术 30 年回顾与展望 [J]. 石油工业计算机应用, 2009, 61(1): 3-6. [SHI G R. Review and outlook for the 30th anniversary of basin modelling techniques [J]. Computer Applications of Petroleum, 2009, 61(1): 3-6.]
- [5] ALLEN J L, JOHNSON C L. Facies control on sandstone composition and influence of statistical methods on interpretations in the John Henry Member, Straight Cliffs Formation, Southern Utah, USA [J]. Sedimentary Geology, 2010, 230(1-2): 60-76.
- [6] 郭小文, 何生. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩热史及成熟史模拟 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(4): 420-425. [GUO X W, HE S. Source rock thermal and maturity history modeling in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(4): 420-425.]
- [7] HANTSCH T, KAUFMANN A I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [8] 吴冲龙, 王燮培, 何光玉, 等. 论油气系统与油气系统动力学 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2000, 25(6): 604-611. [WU C L, WANG X P, HE G Y, et al. Petroleum system and petroleum system dynamics [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(6): 604-611.]
- [9] 吴冲龙, 王燮培, 周江羽, 等. 含油气系统概念与研究方法 [J]. 地质科技情报, 1997, 16(2): 43-50. [WU C L, WANG X P, ZHOU J Y, et al. Concepts and methods of petroleum system [J]. Geological Science and Technology Information, 1997, 16(2): 43-50.]
- [10] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum Formation and Occurrence [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984.
- [11] WENDEBOURG J. Uncertainty of petroleum generation using methods of experimental design and response surface modeling: Application to the Gippsland Basin, Australia [J]. AAPG/Datapages Discovery Series, 2003, 7: 295-307.
- [12] 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 Q C, SHI G R, TIAN Z Y. Present developing situation and future prospects of basin simulation technology [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(3): 312-317.]
- [13] YVKLER A, CORNFORD C, WELTE D, et al. One-dimensional model to simulate geologic, hydrodynamic and thermodynamic development of a sedimentary basin [J]. Geologische Rundschau, 1978, 67(3): 960-979.
- [14] UNGERER P, BESSIS F, CHENET P Y, et al. Geological and geochemical models in oil exploration: Principles and practical examples [J]. Petroleum geochemistry and basin evaluation, 1984, 35: 53-77.
- [15] 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]. 勘探技术, 2006, 3: 50-55. [GUO Q L, MI S Y, HU S Y, et al. Application of basin modeling technology in petroleum resource evaluation [J]. Exploration Techniques, 2006, 3: 50-55.]

- [16] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. [SHI G R. Simulation method in petroleum basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.]
- [17] NAKAYAMA K, VAN SICLEN D C. Simulation model for petroleum basin exploration[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1230–1255.
- [18] NAKAYAMA K. Hydrocarbon-expulsion model and its application to Niigata Area, Japan[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(7): 810–821.
- [19] NAKAYAMA K. Two-dimensional simulation model for petroleum basin evaluation[J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 1988, 53(1): 41–50.
- [20] ENGLAND W A, MACKENZIE A S, MANN D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface[J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144: 327–347.
- [21] SYLTA O. Modelling secondary migration and entrapment of a multicomponent hydrocarbon mixture using equation of state and ray-tracing modelling techniques[J]. Geological Society of London Special Publications, 2004, 59(1): 111–122.
- [22] 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 X S. Discussion of a few problems concerning SLBSS basin simulation system[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1990, 11(1): 59–66.]
- [23] 王伟元, 王明君, 崔护社, 等. ProBases二维盆地模拟评价系统在崖13-1气田区的应用[J]. 中国海上油气地质, 1995, 9(3): 179–190. [WANG W Y, WANG M J, CUI H S, et al. The ProBases system of 2D basin simulation and evaluation and its application in Ya13-1 gas field[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(3): 179–190.]
- [24] 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 H S, WANG M J, WANG Q Y, et al. A supersystem of basin simulation-ProBases[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996, 10(5): 304–310.]
- [25] 石广仁, 李惠芬, 王素明, 等. 一维盆地模拟系统BAS1[J]. 石油勘探与开发, 1989, 16(6): 1–11. [SHI G R, LI H F, WANG S M, et al. 1-D basin modeling system BAS1[J]. Petroleum Exploration and Development, 1989, 16(6): 1–11.]
- [26] 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 G R, GUO Q L, MI S Y, et al. Basin integrated modeling system “BASIMS” [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 1–9.]
- [27] 徐旭辉. TSM盆地模拟资源分级评价技术及其在苏北溱潼凹陷中的应用[D]. 上海: 同济大学博士学位论文, 2004. [XU X H. TSM basin modeling for resource evaluation system and its application in the Qintong Depression, Northern Jiangsu[D]. Shanghai: Doctoral Dissertation of the Tongji University, 2004.]
- [28] 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 Y C, XU X H, XIANG X G, et al. Outlook for basin modeling[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 29–36.]
- [29] 何光玉. 南海珠三坳陷含油气系统动力学研究[D]. 武汉: 中国地质大学博士学位论文, 1998. [HE G Y. Petroleum system dynamics study in Zhusan Depression, South China Sea[D]. Wuhan: Doctoral Thesis of China University of Geosciences, 1998.]
- [30] 盛秀杰, 金之钧, 郭勤涛. 油气资源评价一体化技术及软件实现的探讨[J]. 地质论评, 2014, 60(1): 159–168. [SHENG X J, JIN Z J, GUO Q T. Discussion on integrated resource evaluation and software development[J]. Geological Review, 2014, 60(1): 159–168.]
- [31] UNGERER P, DOLIGEZ B, CHENET P Y, et al. A 2-D model of basin scale petroleum migration by two-phase fluid flow: Application to some case studies. In: Migration of Hydrocarbon in Sedimentary Basins, B. Doligez (eds), Editions Technip, Paris, 1987, 45: 415–455.
- [32] 查明, 张一伟. 盆地数值模拟方法研究与发展[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1992, 16(2): 106–114. [ZHA M, ZHANG Y W. Review of studies and development of basin numerical simulation methodology[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1992, 16(2): 106–114.]
- [33] 胡圣标, 汪集旸. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展[J]. 地学前缘, 1995, 2(3): 171–180. [HU S B, WANG J Y. Basic principles and progresses of heat study in the sedimentary basin[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3): 171–180.]
- [34] 刘新社. 鄂尔多斯盆地上古生界盆地分析模拟[D]. 西安: 西北大学硕士毕业论文, 2005. [LIU X S. Basin analysis and simulation of Upper Paleozoic in the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University Master Graduate Thesis, 2005.]
- [35] LERCHE I, YARZAB R F, KENDALL C G ST. Determination of paleoheat flux from vitrinite reflectance data[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(11): 1704–1717.
- [36] GUDISH T M, KENDALL C G ST, LERCHE I et al. Basin evaluation using burial history calculations: an overview[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69: 92–105.
- [37] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG bulletin, 1990, 74: 1559–1570.
- [38] 赵永军, 查明, 李汉林. 盆地模拟技术中的化学动力学学生烃模型与应用[J]. 地质论评, 1994, 40(增刊), 84–89. [ZHAO Y J, ZHA M, LI H L. The model of chemical kinetics for hydrocarbon generation in methodology of basin simulation and its application[J]. Geological Review, 1994, 40(Supp.), 84–89.]
- [39] 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 X Q, CHEN Z M, CHEN F J. Numerical simulations of geological, thermal, generation, residual and expulsion evolutions and quantitative evaluation of source rocks in a petroleum system. Beijing: Geological Publishing House, 1993.]

- [40] 米石云, 石广仁, 李阿梅. 有机质成气膨胀运移模型研究[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(6): 35–39. [MI S Y, SHI G R, LI A M. Research on the migration model caused by gas generation expansion of organic matters[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(6): 35–39.]
- [41] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 1–147. [PANG X Q. Principle of controlling oil and gas with hydrocarbon expulsion threshold and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 1–147.]
- [42] 石广仁. 油气运聚定量模拟技术现状、问题及设想[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 1–10. [SHI G R. Status, problems and proposals of the quantitative modeling techniques for hydrocarbon migration and accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1): 1–10.]
- [43] UNGERER P, BURRUS J, DOLIGEZ B, et al. Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(3): 309–335.
- [44] WELTE D H, HANTSCHHEL T, WYGRALA B, et al. Aspects of petroleum migration modelling[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 711–714.
- [45] HANTSCHHEL T, KAUERAUF A I, WYGRALA B. Finite element analysis and ray tracing modeling of petroleum migration[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(7): 815–820.
- [46] MEAKIN P, WAGNER G, VEDVIK A, et al. Invasion percolation and secondary migration: Experiments and simulations[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(7): 777–795.
- [47] BAUR F, PRIMIO R, LAMPE C, et al. Mass balance calculations for different models of hydrocarbon migration in the Jeanne d’Arc Basin, offshore Newfoundland[J]. Journal of Petroleum Geology, 2011, 34: 181–198.
- [48] CARRUTHERS D J. Transport modeling of secondary oil migration using gradient-driven invasion percolation techniques[D]. PhD Thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, UK, 1998.
- [49] KAUERAUF A, KLEINE A, HANTSCHHEL T. New developments in petroleum systems modeling for near field exploration[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [50] KLEINE A, CALDERON J C H, HANTSCHHEL T. Modeling structural complexities in 3D: implication for geomechanics and fluid flow modeling[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [51] HE Z Y. Migration lag – what is it & how it affects charge risk & fluid properties[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [52] 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 X H, ZHU J H, JIN X H. Method for appraising hydrocarbon resource potential in relict marine basins in China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 865–870.]
- [53] PONTET M, BAUDINO R, LAIGLE J M. Rigorous and innovative risk quantification for basin modeling[J]. Rio Oil & Gas, September: 11–14.
- [54] TOMMERAS A, DASZINNIES M, MENCARONI D, et al. Pre-and post-well predictions of oil and gas columns using an interactive Monte Carlo technique with 3D petroleum systems modeling[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [55] NELSKAMP S, DAVID P, LITTKER R. A comparison of burial, maturity and temperature histories of selected wells from sedimentary basins in the Netherlands[J]. International Journal of Earth Sciences, 2008, 97: 931–953.
- [56] BELAID A, KROOSS B M, LITTKER R. Thermal history and source rock characterization of a Paleozoic section in the Awbari Trough, Murzuq Basin, SW Libya[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 612–632.
- [57] DURAN E R, DI PRIMIO R, ANKA Z, et al. 3D-basin modelling of the Hammerfest Basin (southwestern Barents Sea): A quantitative assessment of petroleum generation, migration and leakage[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 45: 281–303.
- [58] LIU J L, JIANG Z X, LIU K Y, et al. Hydrocarbon sources and charge history in the Southern Slope Region, Kuqa Foreland Basin, northwestern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 74: 26–46.
- [59] KACEWICZ M. Improved pore pressure prediction through an integration of basin modeling and seismic tomography[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [60] GONG C R, RODRIGUEZ L. Challenges in pore pressure prediction for unconventional petroleum systems[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [61] CHENG M, KRATOCHVIL T, DUNLEAVY J, et al. Unconventional resource play potential of the Pennsylvanian Leo/Minnelusa Formations of the Powder River and Denver Basins: A perspective via integrated petroleum systems analysis[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [62] LIU J L, LIU K Y, HUANG X. Effect of sedimentary heterogeneities on hydrocarbon accumulations in the Permian Shanxi Formation, Ordos Basin, China: Insight from an integrated stratigraphic forward and petroleum system modeling[J]. Marine and Petroleum Geology,

- 2016, 76: 412–431.
- [63] LUPO T, KRYSZTINIK L. Exploring for tight oil in the Pennsylvanian Cleveland sandstone on the Nemaha Uplift using high-resolution 3D seismic & stratigraphic analysis: A new “resource” play model?[C]. Tulsa Geological Society Luncheon Meeting, 2015.
- [64] GUO Q L, LI X D, ZOU C N, et al. Predicting the distribution of the tight sandstone gas in the Hechuan play, Sichuan Basin, China[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2012, 60(3): 186–199.
- [65] FUJII T, AUNG T T, WADA N, et al. Modeling gas hydrate petroleum systems of the Pleistocene turbiditic sedimentary sequences of the Daini-atsumi Area, Eastern Nankai Trough, Japan[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [66] PUJOL A, ROUCHON V, RAVIN A, et al. Simulation of anaerobic SOM biodegradation and biogenic methane production for basin modeling[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [67] LIU K Y, HUANG X, LIU J L. Coupled forward stratigraphic and basin modeling for unconventional petroleum system analysis[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [68] BARABASCH J, DUCROS M, NADER F H, et al. Towards an integrated 4D stratigraphic and petroleum system basin model in a frontier province – the case of the Levant Basin (Eastern Mediterranean)[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [69] 吴冲龙, 张洪年, 周江羽. 盆地模拟的系统观与方法论[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1993, 18(6): 741–747. [WU C L, ZHANG H N, ZHOU J Y. On theoretical problems in basin modelling[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1993, 18(6): 741–747.]
- [70] 米石云. 盆地模拟技术研究现状及发展方向[J]. 勘探技术, 2009, 2: 55–58. [MI S Y. Basin modeling technology development situation and its main trends[J]. Exploration Techniques, 2009, 2: 55–58.]
- [71] WAPLES D W. Basin modelling: how well have we done? In: Düppenbecker, S. J. & Illiffe, J. E. (eds) Basin Modelling: Practice and Progress[J]. Geological Society, London, Special Publication, 1998, 141: 1–14.
- [72] CORNU T, GOUT C, CACAS-STENZ M C, et al. NOMBA an integrated project for coupling basin modeling and geomechanical simulations[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [73] GUO X W, HE S, LIU K Y, et al. Quantitative estimation of overpressure caused by oil generation in petroliferous basins[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42: 1343–1350.
- [74] CALLIES M, ARBEAUMONT A, GIBOREAU R, et al. Honoring structural geology & basin modeling constraints: application of a new kinematic tool for basin modeling in complex geological settings[C]. AAPG Hedberg Research Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”, Santa Barbara, California, April 3–8, 2016.
- [75] ROMERO-SARMIENTO, DUCROS M F, CARPENTIER M, et al. Quantitative evaluation of TOC, organic porosity and gas retention distribution in gas shale play using petroleum system modeling: application to the Mississippian Barnett shale[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 45, 315–330.
- [76] 赵重远. 鄂尔多斯及山西地块地质构造及沉积盆地的形成、演化及其与油气关系[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988: 3–7. [ZHANG C Y. The analysis of geological tectonic and the formation, evolution and relationship with petroleum in Ordos and Shanxi Blocks[J]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 3–7.]
- [77] 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. 石油地质, 2006, 17(1): 17–24. [YANG H, XI S L, WEI X S, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology, 2006, 17(1): 17–24.]
- [78] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. [HE Z X. Evolution and petroleum of the Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.]
- [79] SHUAI Y H, ZHANG S C, MI J K, et al. Charging time of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin, central China[J]. Organic Geochemistry, 2013, 64: 38–46.
- [80] TETZLAFF D M, HARBAUGH J W. Simulating Clastic Sedimentation; Computer Methods in Geosciences[J]. Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.

Current status and future development trends of Basin and Petroleum System Modeling (BPSM)

LIU Keyu^{1,2}, LIU Jianliang^{1,2}

1 School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract Basin and Petroleum System Modelling (BPSM) is becoming an essential part of modern petroleum exploration in several aspects: including hydrocarbon resource assessment, frontier basin exploration and reservoir plays and fairway delineation in mature basins. On the basis of a comprehensive review of the up-to-date literature and experience of our own research, we summarized the current status of the applications of basin modelling, some outstanding challenges and outlined future development trends. A coupled stratigraphic (forward) and basin-and-petroleum-system modelling of the unconventional petroleum resources in the Ordos Basin is presented to demonstrate the necessity of considering fine-scale sedimentary heterogeneities in BPSM. The main development tendencies include: 1) three-dimensional, high-resolution and high-speed computation; 2) enhancement of new simulation algorithms and methods and independent add-in modules; 3) refined and quantitative characterization of petroleum system elements, including source rock, reservoir and seal rocks; 4) modelling tectonically complex basins and 5) integrated modelling of conventional and unconventional petroleum systems.

Keywords Basin and Petroleum System Modelling; current status; development trend; coupled modelling; Ordos Basin

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.02.016

(编辑 付娟娟)