

文章编号: 0253-2697(2023)09-1445-14 DOI:10.7623/syxb202309004

全油气系统

# 盆地沉积充填演化与含油气系统耦合模拟方法在超深层油气成藏模拟中的应用

——以四川盆地中部震旦系灯影组为例

刘可禹 刘建良

(1. 深层油气全国重点实验室 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 山东青岛 266580)

**摘要:**21世纪初开始的非常规油气(致密油气、页岩油气)革命改变了人们对传统油气系统范式的认知。基于经典含油气系统模式所建立的“蛋糕式”简单且独立的“生-储-盖”分层模式已无法有效模拟非常规油气的富集规律和有利区分布。盆地沉积充填正演模拟与含油气系统耦合模拟相结合,可充分考虑盆地沉积充填过程中各含油气系统要素的非均质性,能够形成较精细的地质模型,预测深层和非常规油气的成藏过程与有利区分布,为盆地全油气系统的定量研究提供有效的模拟手段。以四川盆地中部超深层震旦系灯影组为例,在资料匮乏和精度不高的情况下,利用基于过程约束的沉积正演模拟方法模拟灯影组的构造-沉积演化过程,建立灯影组精细的沉积相/岩相非均质性地质模型,在明确灯影组构造-热演化史以及震旦系—寒武系烃源岩发育特征的基础上,开展灯影组的沉积-成藏耦合数值模拟,预测了灯影组的油气运移方向及有利聚集区。与传统的简单层状模型的模拟结果相对比,盆地沉积充填-成藏耦合的数值模拟更充分地考虑了灯影组沉积的非均质性,能模拟灯影组内部由于沉积相变而在岩性圈闭内形成的油气聚集,模拟得到的油气富集位置和规模与实际勘探发现更吻合。

**关键词:**地层正演模拟;含油气系统模拟;震旦系灯影组;深层油气;四川盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

## Application of basin modeling method coupling sedimentary filling evolution with petroleum system in simulating ultra-deep oil-gas accumulations: a case study of Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin

Liu Keyu Liu Jianliang

(1. National Key Laboratory of Deep Oil and Gas, Shandong Qingdao 266580, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China)

**Abstract:** The revolution of the unconventional petroleum (e.g., tight oil and gas, shale oil and gas) at the start of the 21st century has changed our understanding of the traditional petroleum system paradigm. The over-simplified “layer-cake” and discrete “source, reservoir and cap” model established from the classic petroleum system model is no longer effective in simulating the enrichment patterns and favorable distribution of unconventional oil and gas. Coupled forward stratigraphic and petroleum system modeling can fully consider the heterogeneities of various petroleum system elements during the basin filling process, and can generate more refined geological models for numerical simulations. Such a coupled approach may be used to more effectively predict the formation process and favorable distribution of deep and unconventional oil-gas reservoirs, providing a simulation tool for quantitative evaluation of the whole petroleum system in a basin. Taking the ultra-deep Sinian Dengying Formation in the central Sichuan Basin as an example, with sparse drilling data and low-quality seismic data, a process-based forward stratigraphic modeling method was used to simulate the tectono-sedimentary evolution process of the Dengying Formation, and to generate a refined three-dimensional heterogeneous sedimentary model. Based on existing understanding of the tectonic and thermal evolution history of the Dengying Formation and the characteristics of the Sinian and Cambrian source rocks, we carried out petroleum system modeling of the Dengying Formation using the refined sedimentary model and predicted the direction of oil-gas migration and favorable accumulation areas within the Dengying Formation. Compared with the simulation results from the classic “layer-cake” basin model, the coupled stratigraphic and petroleum system modeling takes full consideration of the sedimentary heterogeneities of the Dengying Formation, and is able to simulate oil-gas accumulations within lithological traps developed by lithofacies changes within the Dengying Formation. The simulated oil-gas enrichment locations and magnitudes are more consistent with actual exploration discoveries compared with that from the traditional basin and petroleum system modeling.

**Key words:** forward stratigraphic modeling; petroleum system modeling; Sinian Dengying Formation; deep oil-gas; Sichuan Basin

基金项目:国家自然科学基金项目(No.92055204, No.41821002和 No.42002115)和中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA14010401)资助。

第一作者及通信作者:刘可禹,男,1963年10月生,1993年获澳大利亚国立大学博士学位,现为中国石油大学(华东)教授,主要从事沉积学和石油地质学方面研究。Email:liukeyu@upc.edu.cn

引用:刘可禹,刘建良.盆地沉积充填演化与含油气系统耦合模拟方法在超深层油气成藏模拟中的应用——以四川盆地中部震旦系灯影组为例[J].石油学报,2023,44(9):1445-1458.

Cite:LIU Keyu,LIU Jianliang.Application of basin modeling method coupling sedimentary filling evolution with petroleum system in simulating ultra-deep oil-gas accumulations:a case study of Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin[J].Acta Petro-lei Sinica,2023,44(9):1445-1458.

盆地与含油气系统模拟(Basin and Petroleum System Modeling, BPSM),通常又被称为盆地模拟,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模拟盆地的形成和演化,烃类的生成、运移和聚集的技术,能够直接揭示含油气盆地的本质规律<sup>[1-2]</sup>。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<sup>[3]</sup>,能够对一系列与油气形成与分布相关的地质要素和地质过程进行定量化分析<sup>[4]</sup>,还能对输入的基础地质数据快速地进行合理性和准确性检测<sup>[5]</sup>。盆地模拟已被应用于油气勘探的各个阶段,已成为油气勘探日常地质分析的必备技术,能够很好地帮助地质学家理解油气系统<sup>[6]</sup>。目前,盆地模拟技术的应用包括:数据质量控制、油气勘探风险评价、参数敏感性分析<sup>[7]</sup>、油气成藏期和成藏过程定量分析<sup>[8]</sup>、油气资源评价、钻井过程中地层压力预测<sup>[9]</sup>以及非常规油气勘探<sup>[10]</sup>等。

近年来,贾承造等<sup>[11-12]</sup>、庞雄奇等<sup>[13]</sup>提出了全油气系统理论,强调含油气盆地内既包括油气在源外长距离运移形成的常规油气资源,也包括近源短距离运移形成的致密油气资源,还包括源内滞留形成页岩油气资源,油气具有“源-储耦合、有序聚集”的特点,应该从烃类的生-排-运-聚全过程开展研究<sup>[11-13]</sup>。盆地模拟技术为全油气系统内非常规与常规油气形成、分布的全过程定量恢复提供了有效的模拟手段。而合理且精细的三维地质模型是含油气盆地全油气系统定量模拟的基础,可以为后续油气的生成与源内富集、排出与运聚成藏模拟提供有效的时空模拟范围<sup>[14]</sup>。基于经典含油气系统模式<sup>[15]</sup>所建立的简单的“蛋糕式”且具有独立“生-储-盖”分层的盆地模型可有效地模拟浮力主导下构造型油气藏的形成与分布,但对于分析全油气系统中的源内非常规油气的富集和深层致密油气藏、岩性油气藏的成藏则表现出一定的不适用性:①源内非常规油气一般具有源-储一体的地质特征,地层的非均质性强,简单层状的地层模型无法有效地模拟烃源岩内油气的成藏特征和“甜点区”的分布<sup>[10]</sup>;②深层—超深层储层普遍致密,有效储层的发育是深层油气富集的基础,而根据前人的研究,有利沉积相带及其叠加同沉积的频繁暴露改造是深层—超深层优质储层形成的关键<sup>[16-17]</sup>,因此需要考虑深层储集层沉积的非

均质性,即在同一套储集层内寻找与相控和同沉积暴露改造相关的有利储层。基于三维地震的储层反演技术和基于井数据的地质统计方法在构建中—浅层非均质地层的精细模型方面可发挥积极作用,但考虑到深层—超深层领域地震资料少、资料精度差、钻探成本高、钻井资料少,建立有效的基于数据约束的地层非均质性反演模型的难度大。

道达尔(Total)公司于2016年提出的“iBasin”盆地模拟理念认为,盆地是一个整体,盆地模拟应该对整体进行模拟,要求将尽可能多的地质数据、地质过程和地质认识整合到同一个地质模型中,通过耦合不同的地质条件和过程、多方案测试等方法进行模拟,以降低勘探风险,建立一个“灵活的、多技术协作、多过程耦合”的勘探盆地模型,这种综合模拟模型是盆地定量评价的发展方向<sup>[18]</sup>。基于过程约束的沉积地层正演数值模拟方法(Stratigraphic Forward Modeling, SFM)能够在明确初始沉积底面的基础上,以质量守恒和能量守恒的原理为约束,正演模拟沉积物侵蚀、搬运和沉积(生长)的演化过程,定量刻画地层沉积相与岩相的非均质性,且具有较高的垂向与横向分辨率。该方法将沉积模拟与盆地模拟相结合,能够充分考虑目的层沉积的非均质性,有效模拟深层、非常规和岩性油气藏的形成与演化过程,预测油气的有利分布区。Liu等<sup>[10]</sup>和Liu等<sup>[19]</sup>基于SFM提出了沉积与成藏耦合的盆地模拟方法,并在鄂尔多斯盆地开展了应用,建立了三叠系延长组8段—6段、二叠系山西组的沉积模型,精细刻画了烃源岩与储集层的沉积非均质性,从全油气系统的角度定量模拟了致密油气藏的形成演化过程与时空分布。此外,法国石油研究院(IFP)也提出了沉积-成藏耦合的模拟方法,并在阿尔及利亚北部的近海盆地开展了应用<sup>[20]</sup>;斯伦贝谢(Schlumberger)公司在2018年之后推出的Petrel软件中也将沉积正演模拟作为一个软件模块嵌套在地层建模中。在盆地模拟中地质体的精细建模越来越受到人们的重视,精细建模在拓展盆地模拟技术应用领域的同时,也使得模拟结果更加合理。

四川盆地震旦系灯影组是重要的常规天然气产层,其发育的超深层气藏是中国最古老的天然气藏<sup>[21-22]</sup>,包含威远气田、安岳气田和资阳含气区3个主要产气区<sup>[23]</sup>,天然气主要富集在灯影组二段(灯二段)

和灯影组四段(灯四段)。笔者针对川中地区灯影组,采用沉积模拟与盆地模拟相结合的方法,在正演模拟灯影组构造-沉积演化过程的基础上,定量刻画了灯影组沉积相-岩相的非均质性,进而将灯影组沉积模拟的结果耦合到盆地模拟的模型中,模拟预测了灯影组超深层油气的成藏过程和有利区分布。

### 1 研究区概况与灯影组发育特征

四川盆地自埃迪卡拉纪灯影组沉积期后,经历了多期构造运动叠加改造,形成复杂的叠合含油气盆地,具有多层系含油含气的特点。研究区位于四川盆地中部,工区的 EW 向长为 195 km,SN 向宽为 115 km[图 1(a)],自下而上发育震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、二叠

系、三叠系、侏罗系和白垩系,缺失泥盆系、石炭系和新生界。灯影组发育在震旦系上段,自下而上划分为灯影组一段(灯一段)、灯二段、灯影组三段(灯三段)和灯四段,其中,在灯二段、灯四段沉积末期分别发生了桐湾 I 幕和 II 幕构造运动。灯影组岩性整体以碳酸盐岩为主,仅在灯三段发育碎屑岩沉积。灯一段是晚震旦世早期海侵的产物,岩性组合主要为浅灰色—深灰色层状泥晶白云岩、粉晶白云岩夹层纹石白云岩。灯二段主要发育浅灰色—灰白色凝块石白云岩和粉晶白云岩,凝块组构、叠层组构和层纹组构较为发育,呈多层积壳的葡萄状-花边状构造发育;在灯二段沉积末期,桐湾 I 幕运动使得地层抬升遭受风化剥蚀,以红土风化壳、钙结壳覆盖为标志,发育大量溶蚀孔洞,形成岩

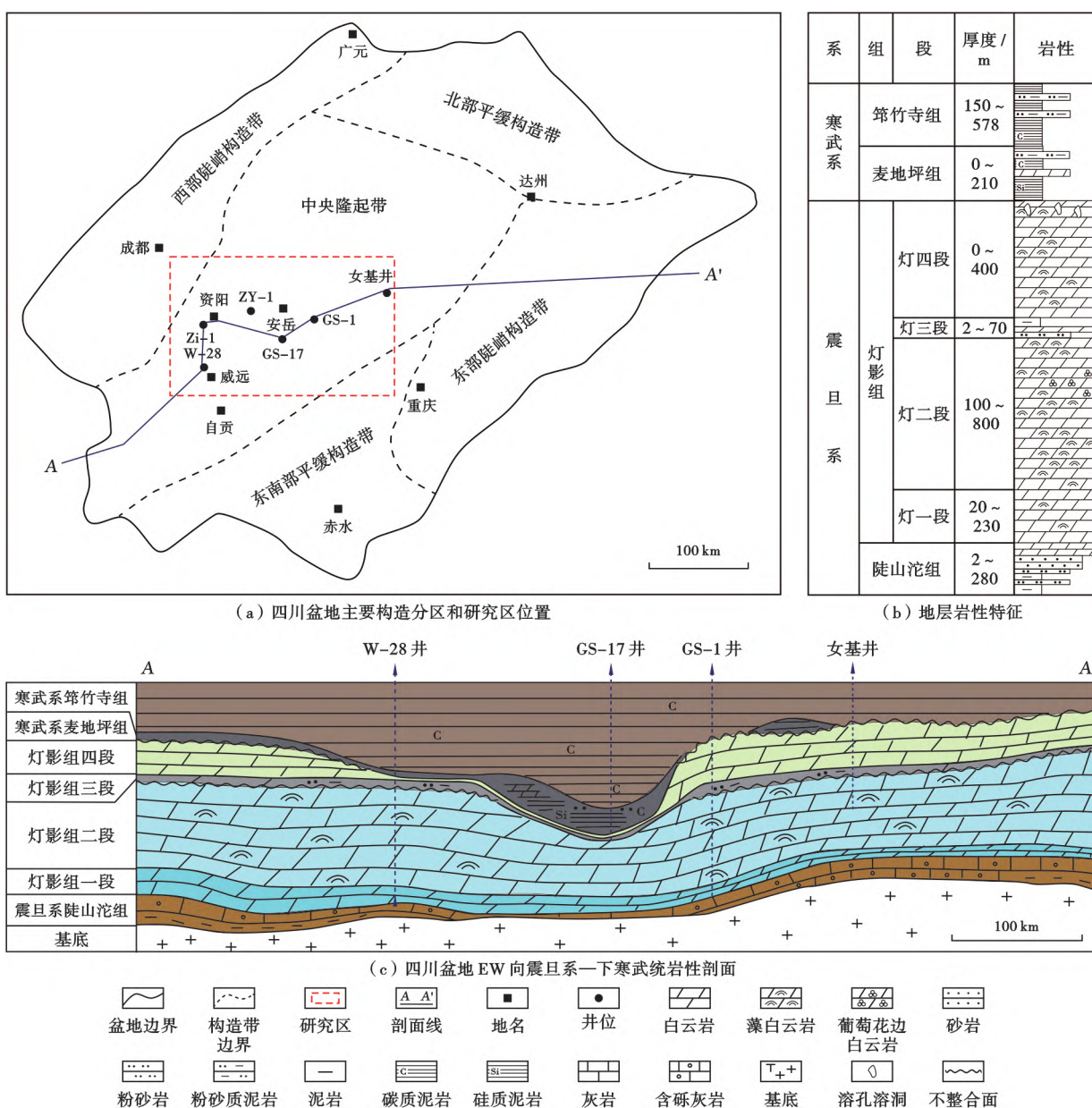


图 1 四川盆地主要构造分带与震旦系灯影组发育特征

Fig.1 Major tectonic zonation and development characteristics of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin

溶储集层。灯三段主要发育深灰色—灰色白云质粉砂岩或白云质泥岩。灯四段发育浅灰色—灰色层状粉晶白云岩、砂屑白云岩和凝块石云岩,局部发育硅质白云岩和硅岩;受桐湾Ⅱ幕构造运动影响,灯四段内发育大量溶蚀孔洞[图 1(b)]。灯影组沉积期,华南陆块处于 Pannotia 超大陆的北部边缘,整体处于区域拉张应力作用下<sup>[24]</sup>,在上扬子地台内部,长期持续的拉张作用导致四川盆地内部形成台内裂陷[图 1(c)]。

## 2 地层正演模拟与含油气系统耦合模拟方法

### 2.1 地层正演模拟方法

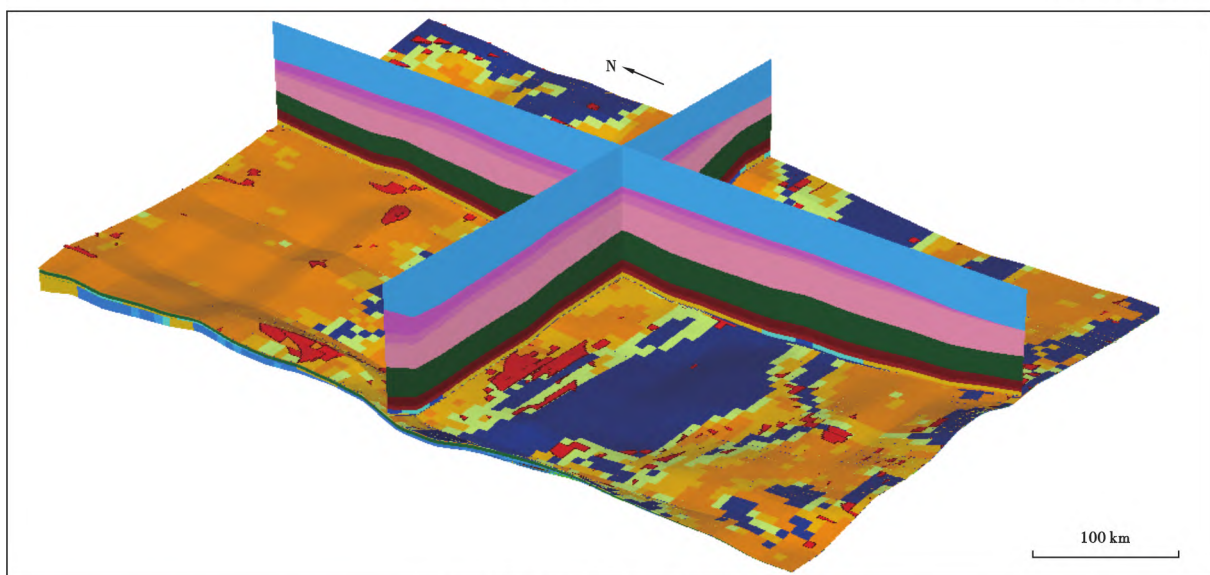
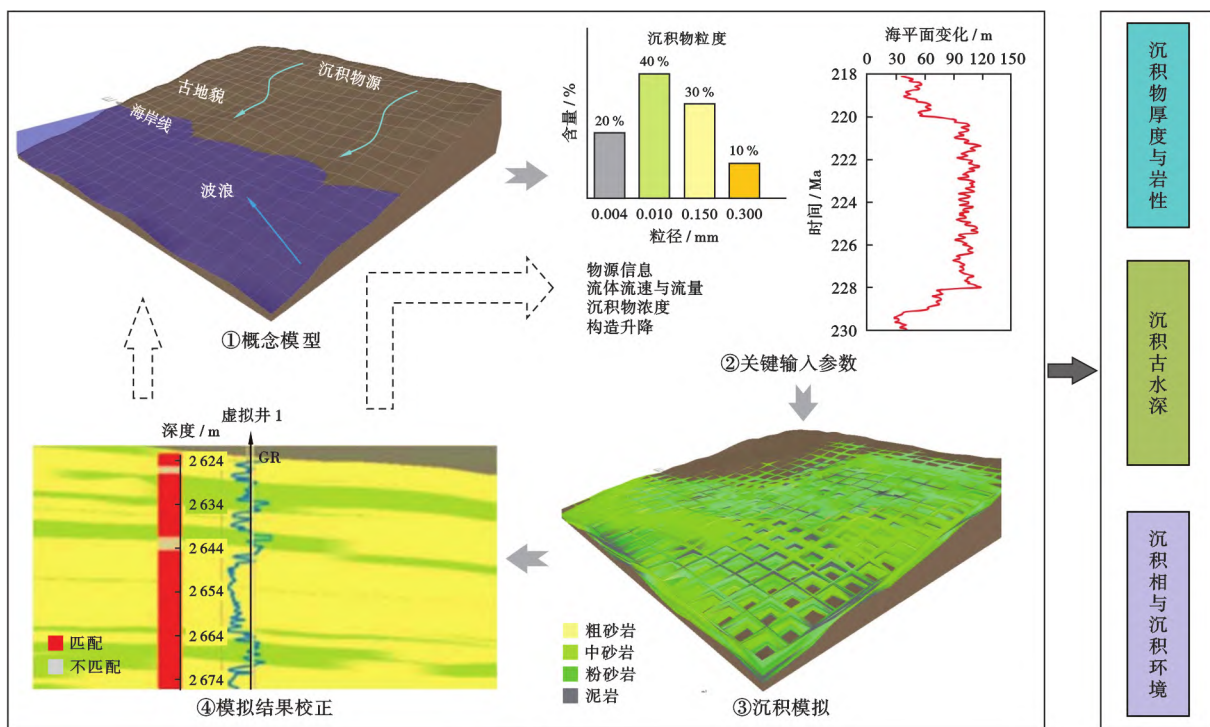
沉积地层正演模拟建立在假定过程参数(如海平面升降、构造升降、沉积物供给等)和地层响应之间相互依存基础上,通过设置一系列不同过程的地质参数,获取不同参数之间相互作用所产生的地层响应,以此实现对地层、岩性和储层的模拟与预测<sup>[25]</sup>。沉积地层正演模拟具有 3 方面优势:①能够直接、合理地反映沉积物对沉积环境变化的响应<sup>[26-27]</sup>;②基于实际工区获取模拟参数,模拟结果可对比<sup>[28]</sup>;③基于确定性数理公式,可准确、重复地获取沉积模拟结果,避免了随机过程模拟的不确定性<sup>[29-30]</sup>。根据不同的模拟算法,可将沉积正演模拟的模型总结为:几何模型(如 Sedpak 软件)<sup>[31-32]</sup>、扩散方程模型(如 Dionisos 软件)<sup>[33]</sup>、基于规则的分析模型(如 Carbonate 3D、Carb3D+、Carb-sim、GPM 等软件)<sup>[34-37]</sup>、模糊逻辑模型(如 Fuzzim 软件)<sup>[38]</sup>和水动力学模型(如 Sedsim、SedFlux、Sedfill3D 等软件)<sup>[39-40]</sup>。

笔者选用 Sedfill3D<sup>[41]</sup>沉积地层正演模拟软件对川中地区灯影组的构造-沉积过程进行模拟。Sedfill3D 是一款国际先进的三维沉积地层模拟软件,由中国石油大学(华东)刘可禹教授团队在美国斯坦福大学 20 世纪 80 年代开发的 Sedsim3.0 版本基础上继续研发和完善而成,能够实现碎屑岩沉积、碳酸盐岩与有机质生长以及碎屑岩与碳酸盐岩(有机质)相互作用过程模拟,实现三维定量可视化展示。针对碎屑岩,该软件综合考虑多种地质作用因素,在物质守恒、能量(动量)守恒的基本原理控制下,以简化的 Navier-Stokes 流体动力学方程为核心,采用“网格标记法”和等分时间间隔进行求解,正演模拟沉积物的搬运、侵蚀和沉积过程<sup>[39]</sup>,再现碎屑岩地层的构造-沉积演化过程。针对碳酸盐岩,该软件采用模糊逻辑方法<sup>[38]</sup>,将定性语言量化,同时考虑影响碳酸盐岩和有机质生长、剥蚀的多种地质因素,其模拟方法灵活、计算效率高。

地层正演模拟的一般流程如图 2(a)所示。在选定研究工区与目的层基础上,首先通过区域地质分析与类比等方法,建立研究区目的层构造-沉积演化的概念模型,明确沉积模拟的目标;然后获取沉积模拟的关键地质参数,包括沉积古地貌、构造沉降、海/湖平面变化、沉积物源方向与大小、碳酸盐岩发育类型与速率等;在此基础上,依据质量守恒和动量守恒基本原理,利用选定的沉积模拟算法(如碎屑岩采用水动力学方法、碳酸盐岩采用模糊逻辑方法),综合考虑多种地质作用过程,模拟碎屑岩沉积物的侵蚀、搬运和沉积过程或碳酸盐岩的生长、剥蚀演化过程,得到三维沉积模拟模型;将模拟结果与研究区实际勘探的地质资料(如单井资料、地震资料、沉积相认识和地层厚度等)进行对比,从沉积物充填程度、沉积样式、岩性组合、地质认识等角度充分检验模型的合理性,如果模拟结果与实际地质认识存在较大误差,则在地质概念模型不变的情况下,调整输入参数中不确定因素较大的地质参数,重复上述步骤,直到模拟结果与实际地质认识的误差在合理接受范围内为止,最终得到包含精细沉积非均质性结果的合理三维地层正演模拟模型。基于三维沉积模拟结果,可以获得目的层的沉积厚度与岩性、沉积古水深、沉积相与沉积环境等三维精细地质体数据[图 2(b)],作为盆地模拟的有效输入数据。

### 2.2 耦合地层正演与含油气系统模拟

盆地模拟是建立和模拟盆地的地质演化史、热演化史、生烃史、排烃史和油气运移聚集史“五史”模型。Hantschel 等<sup>[5]</sup>详细介绍了盆地模拟各方法的基本原理和算法。笔者采用斯伦贝谢公司的 PetroMod 软件开展研究区的盆地模拟。其操作步骤包括:首先,建立川中地区震旦系及其以上地层的三维地质模型,其中,对各地层基于各自的沉积相分析结果进行岩相赋值并建立岩相模型,而该地质模型只能简单地考虑地层在横向上岩相的非均质性;随后,利用单井与地震分层数据检验地质模型的合理性。在对同一工区范围的灯影组进行沉积模拟的基础上,输出压实后的地层厚度、沉积古水深和沉积相-岩相三维数据体,将其作为盆地模拟地质模型的输入参数,对传统简单层状地层模型中的灯影组进行替换,从而建立充分考虑目的层垂向和横向岩相非均质性的地质模型。之后,开展热演化史模拟与校验,建立合理的热演化史模型。然后,模拟震旦系陡山沱组和灯三段以及寒武系筇竹寺组 3 套烃源岩的生、排烃演化过程,模拟灯影组油气的运移和聚集成藏过程,得到沉积-成藏耦合模拟结果[图 2(c)]。



白垩系—第四系 中侏罗统 中—下侏罗统 上三叠统 延长组 中—下三叠统 上二叠统 中二叠统 盒子组上段 贫泥质砂岩 富泥质砂岩 粉砂岩 泥岩 天然气藏

图 2 耦合地层正演与含油气系统的模拟流程

### 3 灯影组构造-沉积演化数值模拟与沉积非均质性定量刻画

构造-沉积演化的概念模型是地层正演模拟的基础,需要根据前人研究和各类地质资料明确地层的沉积充填与构造演化之间的定性关系。灯影组沉积期,川中地区发育德阳—安岳“裂陷槽”,在成因机制上一直存在克拉通内裂陷<sup>[42]</sup>、拉张槽<sup>[43]</sup>、侵蚀谷<sup>[44]</sup>和拉

张-侵蚀谷<sup>[45]</sup>等认识上的争议,这对于灯影组沉积概念模型的建立有很大影响。Liu等<sup>[46]</sup>已在前期的研究工作中利用数值模拟方法论证了各成因观点的合理与不合理性,提出了拉张背景下碳酸盐岩“差异沉积”的“裂陷槽”成因的观点认识。笔者在此基于该成因观点,阐明沉积模拟关键输入参数的获取方法与途径,通过正演模拟灯影组的构造-沉积演化过程,定量刻画灯影组沉积的非均质性。

对川中地区灯影组开展正演模拟所需的关键参数包括:模拟时间与范围、初始沉积底形、构造沉降、海平面变化、灯影组不同类型碳酸盐岩的生长与剥蚀规

则(图3)、灯三段碎屑物质的物源方向与大小、碳酸盐岩斜坡的滑塌角度。具体参数获取方法与来源<sup>[47-58]</sup>如表1所示。

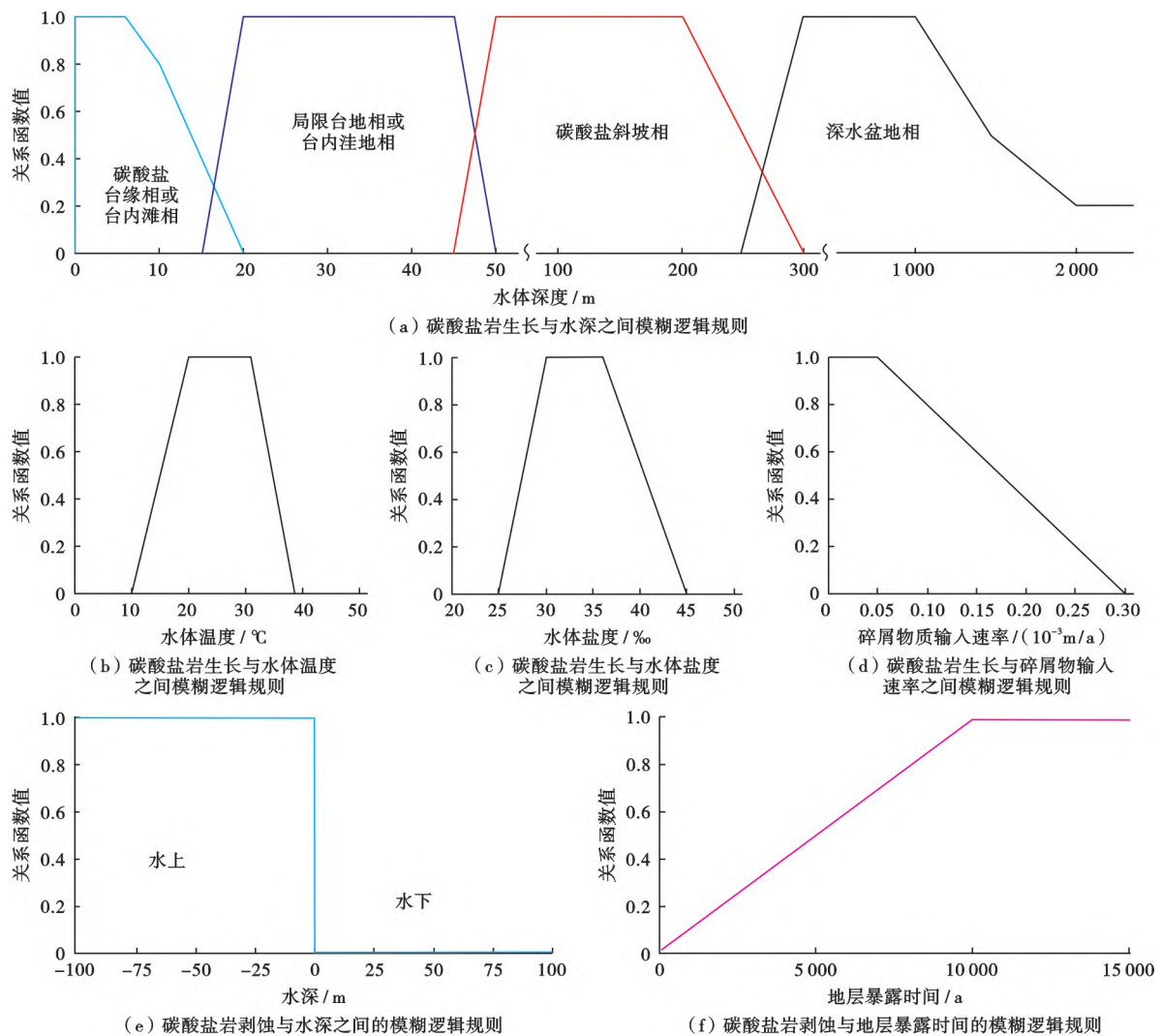


图3 与碳酸盐岩生长、剥蚀相关的水体深度、温度、盐度、碎屑物质输入以及地层暴露时间的模糊逻辑规则

Fig.3 Fuzzy logic rules of water depth, temperature, salinity, detrital material input, and exposure time related to carbonate growth and denudation

笔者在关键参数设定基础上,采用模糊逻辑方法模拟灯影组碳酸盐岩的生长与剥蚀过程,采用水动力学方法模拟灯三段碎屑岩以及沉积物发生滑塌后的侵蚀、搬运和沉积过程。通过将模拟结果与实际地质资料多次对比与校正,最终建立研究区灯影组合理的沉积模拟模型。模拟结果显示:①灯一段沉积期,裂隙槽锥形在研究区西北部发育;灯一段沉积期结束时,局限台地上沉积了厚度约为100 m(未压实)的微生物丘滩亚相和滩/丘间洼地亚相,而在裂隙槽内则以较深水的斜坡相碳酸盐岩沉积为主[图4(a)]。②灯二段沉积期,局限台地上沉积了厚度达数百米的微生物丘滩亚相和滩/丘间洼地亚相,两种相带垂向叠置且横向迁移

交替,裂隙槽在此阶段不断扩大[图4(b)]。③桐湾I幕运动导致研究区整体抬升,台地微生物丘滩体及滩间洼地暴露于地表形成不整合面,裂隙槽内可见由碳酸盐岩滑塌作用形成的重力流沉积[图4(c)]。④灯三段沉积期,陆源碎屑从研究区东部和东北部两个方向输入,以粉砂质和泥质为主,在台地内部形成陆源碎屑与碳酸盐岩的混积沉积[图4(d)]。⑤灯四段沉积期,裂隙槽向东、西两侧快速拉张,其内部以盆地相沉积为主,台地边缘丘滩亚相则随着裂隙槽的扩大而不断向台地地方向迁移,同时在台地内部,微生物丘/颗粒滩亚相以及滩/丘间洼地形成快速堆积并不断侧向迁移,形成厚几百米的微生物碳酸盐岩沉积[图4(e)]。⑥桐湾II幕构

表 1 川中地区震旦系灯影组正演数值模拟的关键参数及其获取方法

Table 1 Key parameters and acquisition methods for stratigraphic forward modeling of Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin

关键参数	参数及其获取方法	相关文献
模拟时间	晚震旦世灯影组沉积期—早寒武世初期;551.1~535.2 Ma,划分为灯一段沉积期、灯二段沉积期、桐湾 I 幕运动期、灯三段沉积期、灯四段沉积期和桐湾 II 幕运动期	文献[47-48]
模拟范围	川中地区;EW 向长为 195 km,SN 向宽为 115 km	
横向与垂向分辨率	横向网格分辨率 1 km×1 km,即 196×116 个网格节点;垂向上每 20 ka 输出一层,即垂向上可划分为 795 层	
初始底形	灯影组是陡山沱组继承性发育的地层;陡山沱组沉积期资阳地区发育初始裂隙,其他区域为碳酸盐台地相;基于陡山沱组沉积相图进行初始底形设置	文献[46,49]
构造沉降	灯影组的厚度经过古水深校正与去压实恢复,得到总沉降量,以此为初值,初步开展模拟,将模拟结果与实际井、震数据反复校正与迭代,得到最合理的构造沉降输入数据	
海平面变化	前寒武纪全球海平面变化曲线,叠加基于高频米兰科维奇旋回的海平面周期性升降变化	文献[46,50-52]
碳酸盐岩生长与剥蚀	碳酸盐岩生长速率和产物受水体深度、温度、盐度和水体能量等控制。在前人将灯影组细分为 5~9 个岩相类型的基础上,概括出 4 类碳酸盐岩,即碳酸盐台缘带与台内滩相、碳酸盐局限台地相与台内洼地相、碳酸盐斜坡相和深水台地相(远洋浮游生物软泥)。碳酸盐岩的剥蚀受地层暴露地表的时间影响。建立 4 类碳酸盐岩的生长和剥蚀与水体深度、温度、盐度、碎屑沉积物输入以及水深与暴露时间之间的模糊逻辑关系。以碳酸盐台缘相为例,台缘相的微生物碳酸盐岩适宜生长在浅水(水深<20 m 且以小于 6 m 最为合适)、温暖(水温在 20~31℃ 最合适)、盐度适中(30‰~36‰ 最合适)和水体干净(碎屑输入量少)的沉积环境中,只有当 4 个条件同时满足时(即关联函数值均为 1),台缘相的微生物碳酸盐岩的生长速率最大,若其中一个条件完全不满足(即关联函数值为 0)则碳酸盐岩停止生长,若均满足条件但关联函数值不为 1(即关联函数值介于 0~1),则碳酸盐岩的生长速率正比于各关联函数值的连乘。在充分调研与反复试验的基础上,给定不同类型碳酸盐岩生长与剥蚀的最大速率,模拟灯影组碳酸盐岩生长与剥蚀的演化过程	图 3 文献[53-57]
灯影组三段碎屑物质物源方向与大小	陆源碎屑沉积主要发育在灯三段,台地周边多处隆起形成古陆向盆地内供给物源,灯三段沉积期的古地貌高地主要在研究区的 NE 方向。钻井揭示川中地区该段的岩性以粉砂岩和粉砂质泥岩为主,表明物源供给区距离研究区较远	
碳酸盐岩斜坡滑塌临界角度	水上地层、水下浅水地层(微生物岩)和水下深水地层斜坡滑塌的临界角度分别为 5.5°、33°和 9°	文献[58]

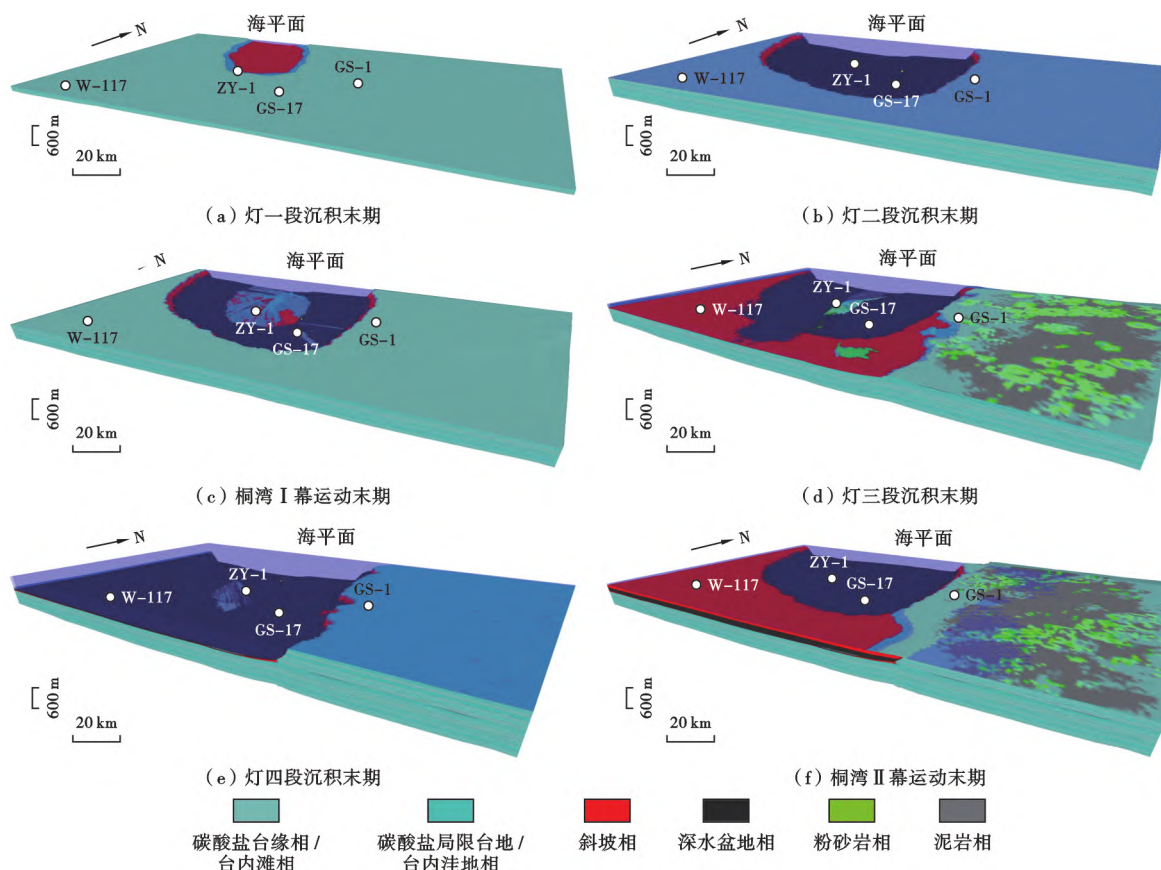


图 4 四川盆地中部震旦系灯影组构造-沉积演化过程的数值模拟

Fig.4 Stratigraphic forward modeling of tectono-sedimentary evolution of Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin

造运动使得整个研究区向上抬升,暴露地表的沉积物遭受差异剥蚀、溶蚀等地质作用,在灯四段顶部形成不整合面[图 4(f)]。

基于沉积模拟得到的古水深、沉积环境和 4 种碳酸盐岩以及 2 种碎屑岩沉积相的三维数据体,在表 2 所列赋值原则的约束下,笔者进一步将灯影组细分成 9 类沉积(亚)相/岩相,即潮坪亚相、微生物丘亚相、颗粒滩亚相、台内洼地亚相、混积陆棚粉砂岩相、混积陆棚泥岩相、斜坡相、盆地相和深水重力流沉积相,建立了充分考虑空间沉积非均质性的灯影组地质模型(图 5)。

表 2 基于水深与岩性约束的灯影组沉积相/岩相划分结果 (据文献[59-61]修改)

Table 2 Sedimentary facies/lithofacies subdivisions of Dengying Formation constrained by paleowater depths and lithologies

沉积(亚)相/岩相	赋值原则
潮坪	平均高潮线以上,水深 0~5 m
微生物丘	平均低潮线到平均高潮线之间,水深 5~10 m
颗粒滩	平均低潮线至浪基面附近,水深 10~20 m
滩间海/台内洼	在台缘内侧微生物丘以下,水深 20~50 m
混积陆棚粉砂岩	灯三段沉积期混积陆棚相粉砂岩
混积陆棚泥岩	灯三段沉积期混积陆棚相泥岩(被认为有效烃源岩 <sup>[61]</sup> )
斜坡相	水深 50~300 m
盆地相	水深 >300 m
重力流沉积	水深 >50 m,且以台地、斜坡带岩相为主

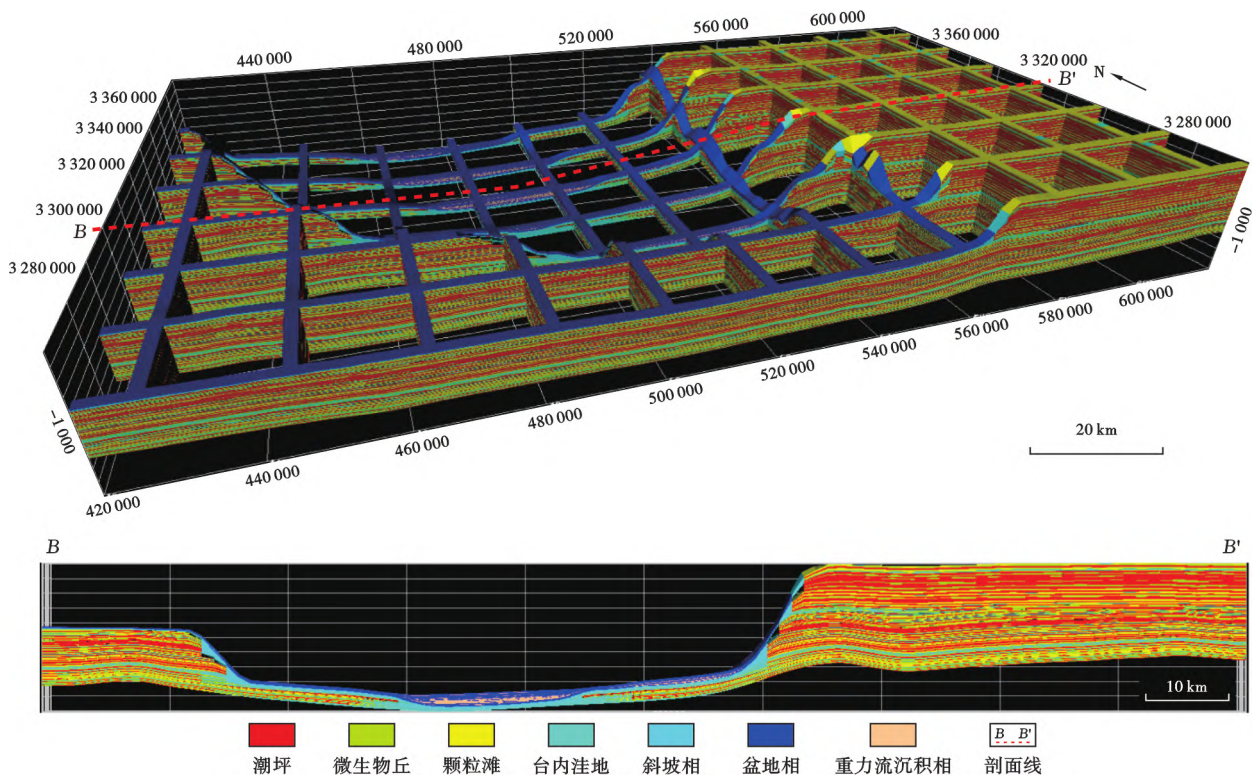


图 5 基于沉积模拟结果的四川盆地中部灯影组沉积相/岩相精细地质模型

Fig.5 A fine geological model of sedimentary facies/lithofacies of Dengying Formation in central Sichuan Basin based on stratigraphic forward modeling

#### 4 灯影组超深层油气沉积-成藏耦合模拟的结果与讨论

笔者选取与沉积模拟相同的工区范围,首先建立了川中地区震旦系至今的简单层状三维盆地模拟地质模型,其中,重点关注震旦系—寒武系下组合油气系统。所需的关键输入参数包括:地层发育时间、构造等值线图或地层等厚图、地层沉积相图、构造事件次序与时间、剥蚀量图、成藏要素划分等(表 3)。这类参数的获取途径包括前人最新发表的研究成果、油田或研究院的基础地质研究成果、专家交流讨论以及国际地层年代资料等。

基于沉积模拟结果,可建立灯影组横向最多 9 种岩相、垂向 506 个小层的精细地质模型。尽管在操作上可以直接把灯影组包含 506 个小层的精细岩相模型输入到模拟软件中,但考虑软件模拟油气运移、聚集所需的运行时间较长且适当粗化模型不影响地层整体的非均质性,笔者将灯影组的精细岩相模型在垂向上粗化为 50 小层。图 6 展示了其中 4 个小层的岩相分布情况,即灯二段下部、灯二段上部、灯三段和灯四段内部的岩相分布特征。耦合灯影组的沉积模拟结果,建立了充分考虑灯影组岩相非均质性的川中地区震旦系至今的三维盆地模拟地质模型[图 7(a)]。与传统的简单层状三维地质模型相比,耦合沉积模拟结果的灯



影组岩相划分模型更为精细,可以清楚地刻画垂向及横向上的沉积非均质性[图 7(b)]。

笔者在三维耦合地质模型的基础上,考虑四川盆地震旦纪至今的热演化史<sup>[62-63]</sup>和震旦系—寒武系的烃源岩(陡山沱组、灯三段和筇竹寺组)分布与有机地球

化学特征,模拟了烃源岩的生烃演化和灯影组油气的成藏演化过程。川中地区经历了寒武纪—志留纪的持续埋藏期、泥盆纪—石炭纪的缓慢抬升剥蚀期、二叠纪—侏罗纪的快速埋藏期和白垩纪至今的强烈抬升剥蚀期 4 个主要构造—沉积阶段[图 8(a)]。震旦系和上

表 3 川中地区震旦纪至今三维盆地模拟中地质模型的关键输入参数

Table 3 Key input parameters of geological model in 3D basin modeling from Sinian to present in central Sichuan Basin

地层	地层年代/Ma		剥蚀事件/Ma		岩相赋值依据	成藏要素	
	开始	结束	开始	结束			
白垩系	145.0	100.0	100	0	沉积相		
侏罗系	190.0	145.0			沉积相		
三叠系	上统	237.0	210.0	210	190	沉积相	上覆地层
	中统	247.0	237.0			沉积相	
	下统	252.0	247.0			沉积相	
二叠系	上统	259.0	252.0			沉积相	
	中统	280.0	259.0			沉积相	
志留系	444.0	427.0	427	280			
奥陶系	485.0	444.0			沉积相		
寒武系	中—上统洗象池群	497.0	485.0			沉积相	储层
	中统高台组	509.0	497.0			沉积相	盖层
	下统龙王庙组	514.0	509.0			沉积相	储层
	下统沧浪铺组	521.0	514.0			沉积相	储层
	下统筇竹寺组	537.0	521.0			泥岩	烃源岩
震旦系	灯影组四段	544.0	541.0	541	537	沉积相	储层
	灯影组三段	545.0	544.0			泥岩	烃源岩
	灯影组一段、二段	551.1	545.0			沉积相	储层
	陡山沱组	560.0	551.1			泥岩	烃源岩

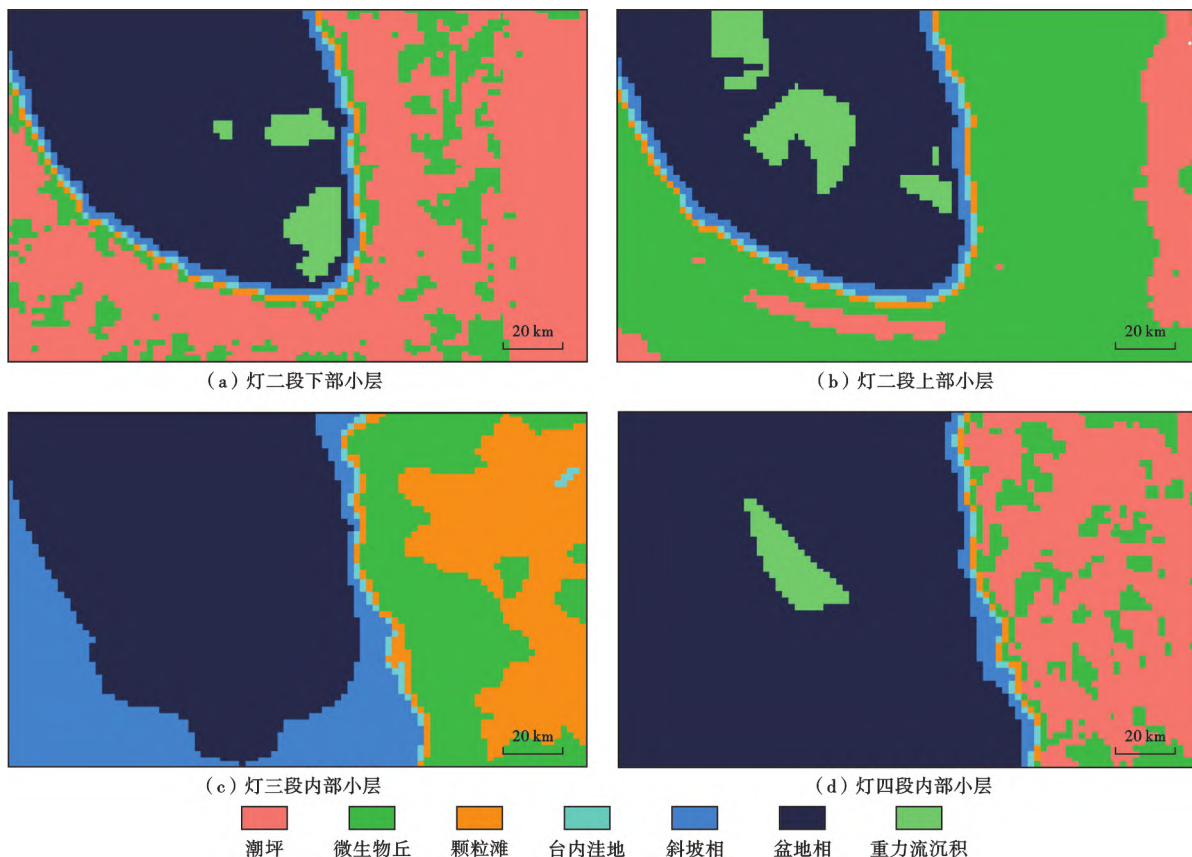


图 6 盆地模拟中输入的灯影组精细小层的岩相

Fig.6 Lithofacies of the submembers of Dengying Formation from stratigraphic forward modeling used as direct input for petroleum system modeling

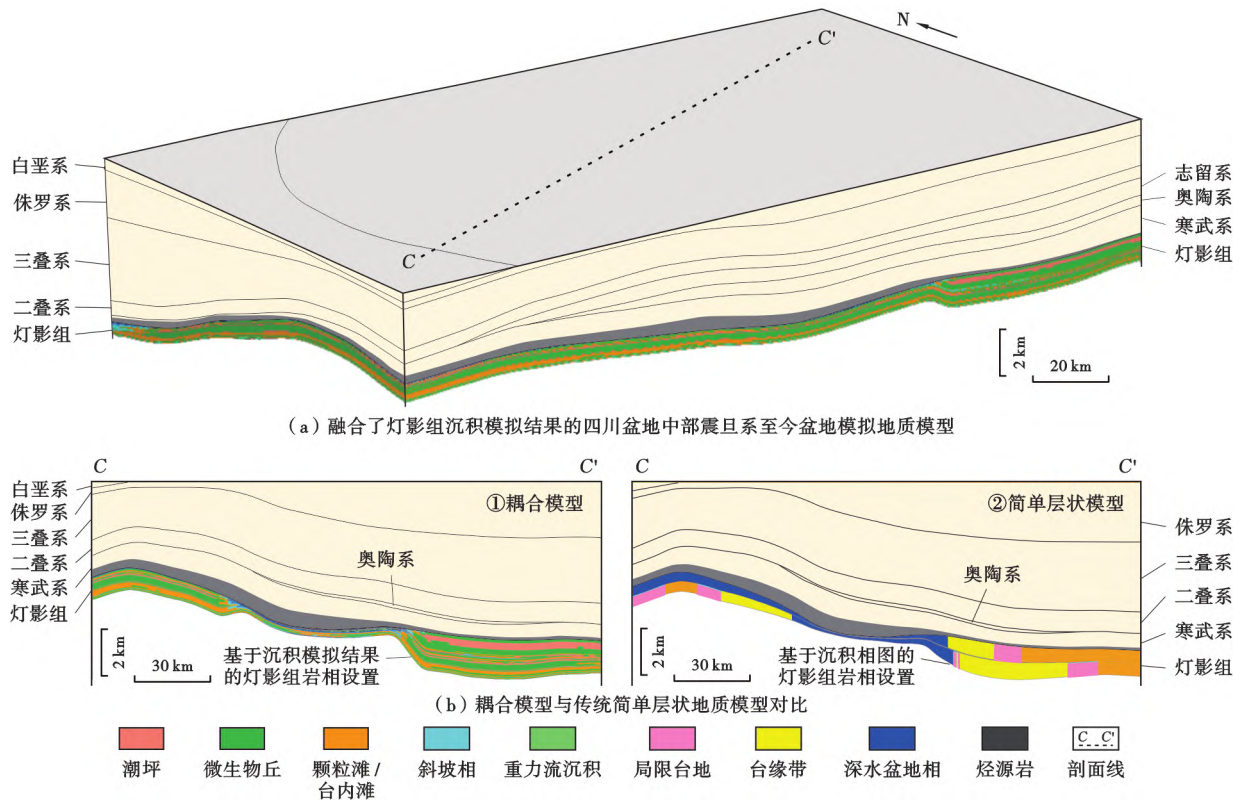


图7 耦合沉积模拟结果的川中地区三维地质模型及其与简单层状地质模型对比

Fig.7 A geological model integrated stratigraphic forward modeling of Dengying Formation in central Sichuan Basin and its comparison with the traditional 'layer-cake' geological model

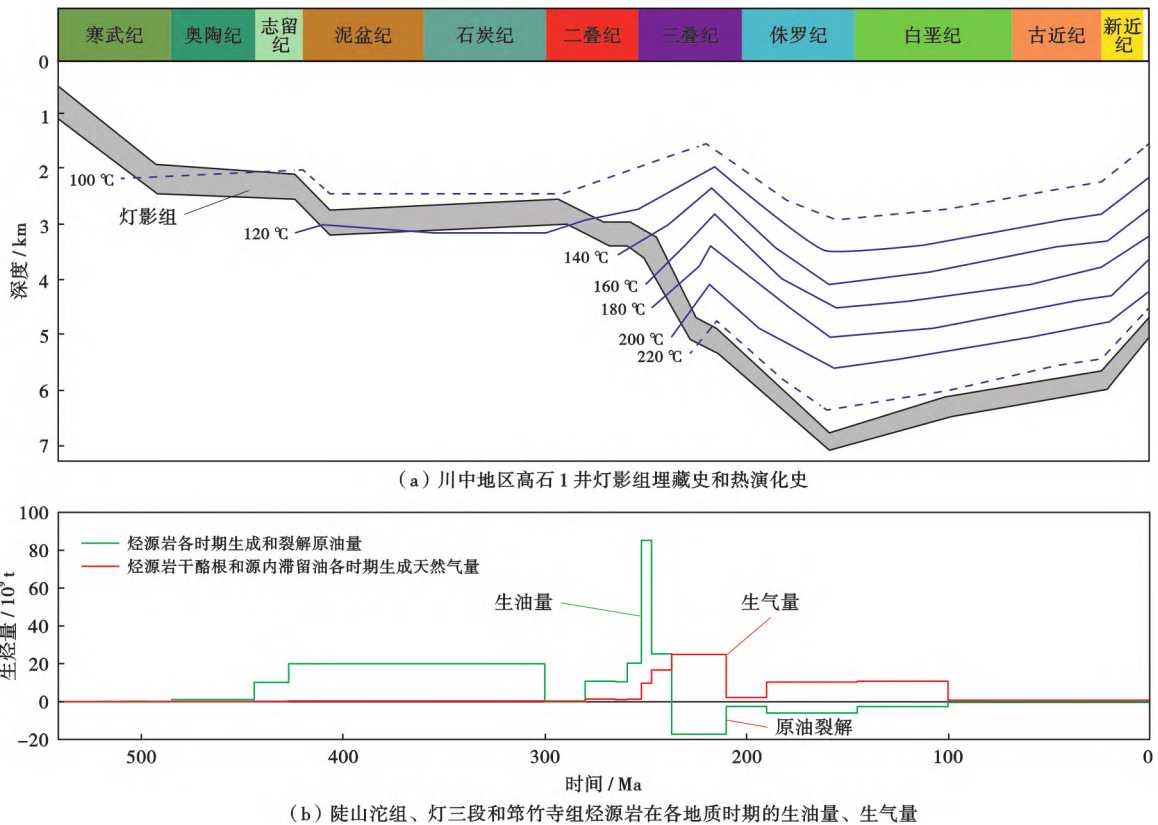


图8 川中地区灯影组埋藏史和震旦系一下寒武统烃源岩生烃演化史

Fig.8 Burial history of the Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin, and the hydrocarbon generation history of the Sinian to Lower Cambrian source rocks

寒武统烃源岩在志留纪开始生成原油;受二叠系—三叠系快速埋深以及二叠纪末期—三叠纪早期构造热演化事件影响,烃源岩快速成熟,在三叠纪早期生成大量原油,之后又在三叠纪晚期—侏罗纪发生原油裂解。天然气主要在三叠纪—侏罗纪生成,包括干酪根裂解气以及烃源岩内和早期油藏内的原油裂解气[图 8(b)]。

灯影组沉积-成藏耦合的盆地模拟结果表明:①奥陶纪末期,烃源岩的生烃量较少,少量油气在灯影组的台缘带聚集[图 9(a)];②志留纪,烃源岩生成大量原油,原油主要从克拉通裂陷槽内部向外运移并在灯影组台缘带、台内滩和槽内滑塌体内部聚集[图 9(b)];③泥盆纪—二叠纪早期,受加里东期—海西期构造

运动影响,研究区地层抬升,早期形成的油气藏进行调整改造,之后,在二叠纪中—晚期持续埋深的影响下,生成的油气在裂陷槽内以及台缘与台内的有利相带富集[图 9(c)];④三叠纪为主生烃期,此时筇竹寺组烃源岩大量生烃,以干酪根生气和源内滞留原油裂解生成天然气为主,大量天然气充注到灯影组,在高磨地区(高石梯—磨溪地区)、威远地区和裂陷槽内富集[图 9(d)];⑤喜马拉雅期,四川盆地主体经历了强烈构造运动,地层大规模抬升,油气藏发生调整,油气向高部位聚集,油气主要富集在裂陷槽两侧的高磨地区和威远地区以及裂陷槽内的重力流沉积体内[图 9(e)]。

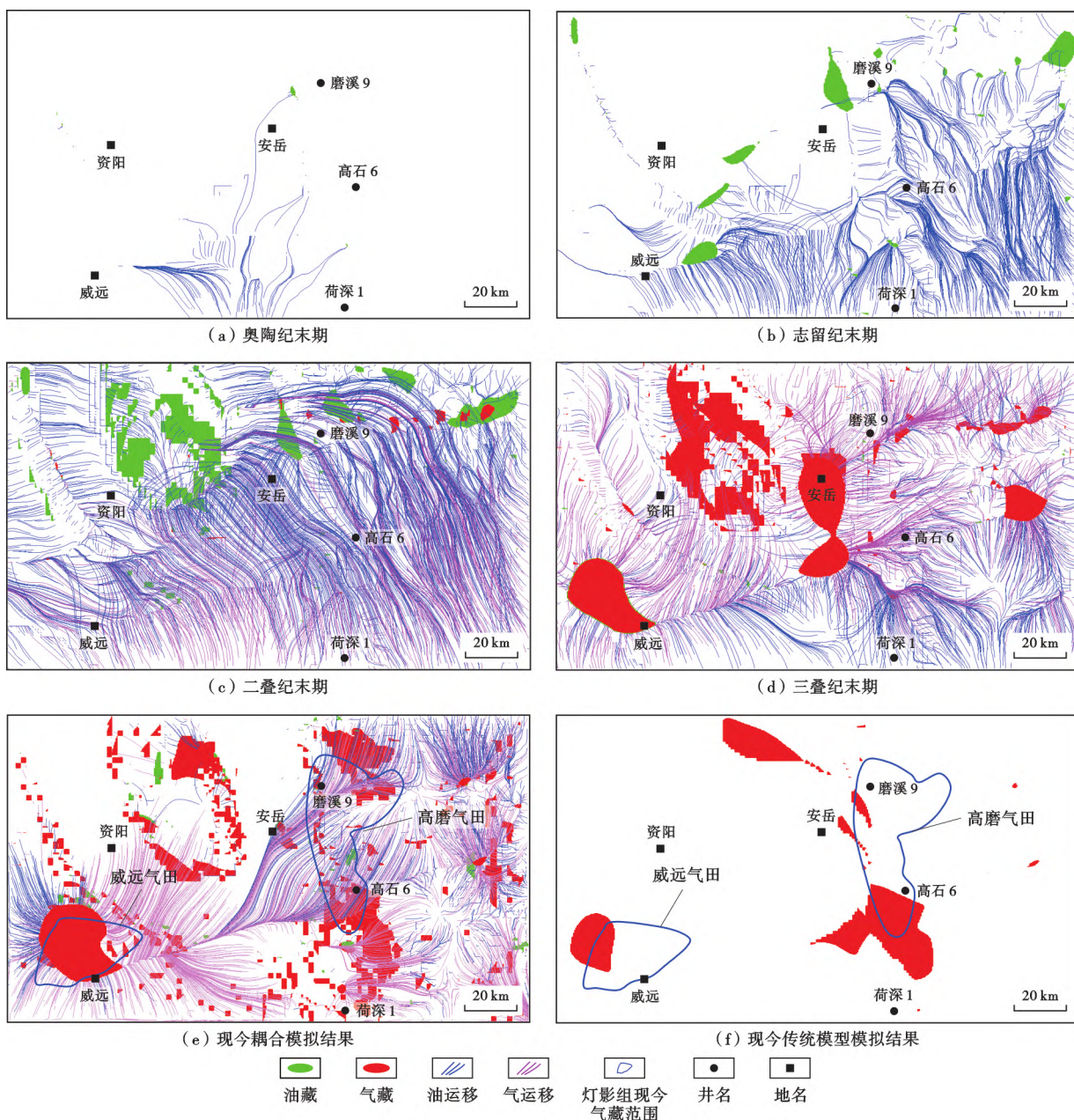


图 9 川中地区震旦系灯影组油气运移和聚集成藏过程数值模拟

Fig.9 Numerical simulation of hydrocarbon migration and accumulation processes of Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin

与传统的盆地模拟结果相比[图 9(f)],沉积-成藏耦合的盆地模拟结果充分考虑了灯影组沉积的非均质性,能模拟灯影组内部由于地层沉积相变而形成在岩性圈闭内的油气聚集过程。与实际勘探认识的灯影组威远气田和高磨气田的富集位置相比,尽管两个模型的预测结果均与实际存在一定差距,但沉积-成藏耦合模型预测的天然气运移方向和气藏发育位置显然更为吻合[图 9(e)]。沉积-成藏耦合的盆地模拟结果还预测了在灯影组裂陷槽内和与源岩交互发育的滑塌重力流沉积中富集天然气,即有效地模拟了源内/近源富集短距离运移的非常规油气、远源富集长距离运移的构造和岩性气藏的特征。沉积-成藏耦合的盆地模拟可作为全油气系统定量模拟的必要方法。

## 5 结 论

(1) 基于沉积过程的盆地充填正演模拟可充分量化含油气系统各要素(烃源岩、储集层、盖层)的沉积非均质性,可为从真实意义上实现“全油气系统”的盆地模拟提供更真实和精细的地质模型。沉积正演和含油气系统耦合的模拟能为深层油气、岩性圈闭油气和非常规油气的成藏过程与有利区分布预测提供更为有效的模拟手段。

(2) 利用模糊逻辑方法和水动力学方法模拟了川中地区震旦系灯影组的构造-沉积演化过程,建立了灯影组沉积相/岩相精细的非均质性地质模型,开展了灯影组沉积-成藏耦合的盆地模拟,预测了灯影组现今油气主要富集在裂陷槽两侧的高磨地区和威远地区以及裂陷槽内的重力流沉积体内。与传统盆地模拟结果相比较,沉积-成藏耦合的盆地模拟能有效地模拟非常规油气在源内/近源呈短距离运移、构造和岩性气藏呈远源长距离富集的特征,可作为全油气系统定量模拟的必要方法。对比发现,基于沉积-成藏耦合盆地模拟获得的油气富集位置与实际勘探发现更吻合。

## 参 考 文 献

- [1] 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(1):3-6.  
SHI Guangren.Review and outlook for the 30th anniversary of basin modeling techniques[J].Computer Applications of Petroleum,2009(1):3-6.
- [2] PETERS K E,BURNHAM A K,WALTERS C C.Petroleum generation kinetics:single versus multiple heating-ramp open-system pyrolysis[J].AAPG Bulletin,2015,99(4):591-616.
- [3] 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.

- [4] 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 Xiaowen,HE Sheng.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.
- [5] KAUEAUF A I,HANTSCH T.Fundamentals of basin and petroleum systems modeling[M].Berlin:Springer,2009:476.
- [6] WENDEBOURG J.Uncertainty of petroleum generation using methods of experimental design and response surface modeling: application to the Gippsland Basin, Australia [M] // DÜPPENBECKER S,MARZI R.Multidimensional basin modeling.Tulsa,Oklahoma:AAPG,2003:295-307.
- [7] 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(5):931-953.
- [8] 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.
- [9] KACEWICZ M.Improved pore pressure prediction through an integration of basin modeling and seismic tomography [C] // AAPG Hedberg Conference “The Future of Basin and Petroleum systems Modeling”.Santa Barbara,California:AAPG,2016.
- [10] LIU Jianliang,LIU Keyu,HUANG Xiu.Effect of sedimentary heterogeneities on hydrocarbon accumulations in the Permian Shanxi Formation,Ordos Basin,China:insight from an integrated stratigraphic forward and petroleum system modelling [J]. Marine and Petroleum Geology,2016,76:412-431.
- [11] 贾承造.论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J].石油勘探与开发,2017,44(1):1-11.  
JIA Chengzao.Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J].Petroleum Exploration and Development,2017,44(1):1-11.
- [12] 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.
- [13] 庞雄奇,贾承造,宋岩,等.全油气系统定量评价:方法原理与实际应用[J].石油学报,2022,43(6):727-759.  
PANG Xiongqi,JIA Chengzao,SONG Yan,et al.Quantitative evaluation of whole petroleum system:principle and application [J].Acta Petrolei Sinica,2022,43(6):727-759.
- [14] 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.
- [15] MAGOON L B,DOW W G.The petroleum system—from source to trap[M].Tulsa,Oklahoma:AAPG,1994:3-24.
- [16] 何治亮,马永生,朱东亚,等.深层—超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J].石油与天然气地质,2021,42(3):533-546.  
HE Zhiliang,MA Yongsheng,ZHU Dongya,et al.Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J].Oil & Gas Geology,2021,42(3):533-546.

- [17] YANG Leilei, CHEN Donghua, HU Jing, et al. Understanding the role of sequence stratigraphy and diagenesis on the temporal and spatial distribution of carbonate reservoir quality: a conceptual modeling approach [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 147: 106010.
- [18] GOUT C. iBasin, a new paradigm for basin modeling software [C] // AAPG Hedberg Conference "The Future of Basin and Petroleum systems Modeling". Santa Barbara, California: AAPG, 2016.
- [19] LIU Keyu, LIU Jianliang, HUANG Xiu. Coupled stratigraphic and petroleum system modeling: examples from the Ordos Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(1): 1-28.
- [20] ARAB M, BELHAI D, GRANJEON D, et al. Coupling stratigraphic and petroleum system modeling tools in complex tectonic domains: case study in the north Algerian offshore [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(4): 289.
- [21] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 古老碳酸盐岩大气田地地质理论与勘探实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- DU Jinhu, WANG Zecheng, ZOU Caineng, et al. *Geologic theory and exploration practice of ancient large carbonates gas field* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [22] 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域 [J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(1): 3-14.
- HE Zhiliang, JIN Xiaohui, WO Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(1): 3-14.
- [23] 姜华, 李文正, 黄土鹏, 等. 四川盆地震旦系灯影组跨重大构造期油气成藏过程与成藏模式 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(5): 11-23.
- JIANG Hua, LI Wenzheng, HUANG Shipeng, et al. Process and model of hydrocarbon accumulation spanning major tectonic phases of Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(5): 11-23.
- [24] 刘树根, 王一刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(1): 1-23.
- LIU Shugen, WANG Yigang, SUN Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2016, 43(1): 1-23.
- [25] SHUSTER M W, AIGNER T. Two-dimensional synthetic seismic and log cross sections from stratigraphic forward models [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(3): 409-431.
- [26] ALLEN P A. Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems [M] // GALLAGHER K, JONES S J, WAINWRIGHT J. *Landscape evolution: denudation, climate and tectonics over different time and space scales*. London: The Geological Society of London, 2008, 296: 7-28.
- [27] ROMANS B W, CASTELLTORT S, COVAULT J A, et al. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 7-29.
- [28] ARMITAGE J J, JONES T D, DULLER R A, et al. Temporal buffering of climate-driven sediment flux cycles by transient catchment response [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 369-370: 200-210.
- [29] DULLER R A, WHITTAKER A C, FEDELE J J, et al. From grain size to tectonics [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115(F3): F03022.
- [30] WATKINS S E, WHITTAKER A C, BELL R E, et al. Are landscapes buffered to high-frequency climate change? A comparison of sediment fluxes and depositional volumes in the Corinth rift, central Greece, over the past 130 k. y. [J]. *GSA Bulletin*, 2018, 131(3/4): 372-388.
- [31] KENDALL C G S C, STROBEL J, CANNON R, et al. The simulation of the sedimentary fill of basins [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B4): 6911-6929.
- [32] LIU Keyu, LIANG T C K, PATERSON L, et al. Computer simulation of the influence of basin physiography on condensed section deposition and maximum flooding [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 122(1/4): 181-191.
- [33] GRANJEON D, JOSEPH P. Concepts and applications of a 3-D multiple lithology, diffusive model in stratigraphic modeling [M] // HARBAUGH J W, WATNEY W L, RANKEY E C, et al. *Numerical experiments in stratigraphy: recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations*. Tulsa, Oklahoma: SEPM, 1999: 197-210.
- [34] DUAN T, CROSS T A, LESSENGER M A. 3-D carbonate stratigraphic model based on energy and sediment flux [C] // AAPG Annual Convention and Exhibition. New Orleans, Louisiana: AAPG, 2000.
- [35] WARRLICH G M D, WALTHAM D A, BOSENCE D W J. Quantifying the sequence stratigraphy and drowning mechanisms of atolls using a new 3-D forward stratigraphic modelling program (CARBONATE 3D) [J]. *Basin Research*, 2002, 14(3): 379-400.
- [36] PATERSON R J, WHITTAKER F F, JONES G D, et al. Accommodation and sedimentary architecture of isolated icehouse carbonate platforms: insights from forward modeling with CARB3D+ [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(10): 1162-1182.
- [37] HILL J, WOOD R, CURTIS A, et al. Preservation of forcing signals in shallow water carbonate sediments [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 275-276: 79-92.
- [38] NORDLUND U. FUZZIM: forward stratigraphic modeling made simple [J]. *Computers & Geosciences*, 1999, 25(4): 449-456.
- [39] TETZLAFF D M, HARBAUGH J W. Simulating clastic sedimentation [M]. New York: Springer, 1989, 202.
- [40] SYVITSKI J P M, HUTTON E W H. 2D SEDFLUX 1.0C: an advanced process-response numerical model for the fill of marine sedimentary basins [J]. *Computers & Geosciences*, 2001, 27(6): 731-753.
- [41] 刘可禹, 刘建良, 操应长, 等. Sedfill3D 软件 V1.0: 2019SR0917977 [P]. 2019-09-03.
- LIU Keyu, LIU Jianliang, CAO Yingchang, et al. Sedfill3D software V1.0: 2019SR0917977 [P]. 2019-09-03.
- [42] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征 [J]. *天然气工业*, 2015, 35(1): 24-35.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1): 24-35.

- [43] 钟勇,李亚林,张晓斌,等.川中古隆起构造演化特征及其与早寒武世绵阳—长宁拉张槽的关系[J].成都理工大学学报:自然科学版,2014,41(6):703-712.  
ZHONG Yong, LI Yalin, ZHANG Xiaobin, et al. Evolution characteristics of Central Sichuan palaeouplift and its relationship with Early Cambrian Mianyang-Changning intracratonic sag[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2014, 41(6): 703-712.
- [44] 李伟,刘静江,邓胜徽,等.四川盆地及邻区震旦纪末—寒武纪早期构造运动性质与作用[J].石油学报,2015,36(5):546-556.  
LI Wei, LIU Jingjiang, DENG Shenghui, et al. The nature and role of Late Sinian-Early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(5): 546-556.
- [45] 李忠权,刘记,李应,等.四川盆地震旦系威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J].石油勘探与开发,2015,42(1):26-33.  
LI Zhongquan, LIU Ji, LI Ying, et al. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue extension-erosion groove in Sinian System, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 26-33.
- [46] LIU Jianjiang, LIU Keyu, LI Changwei, et al. Tectono-sedimentary evolution of the Late Ediacaran to Early Cambrian trough in central Sichuan Basin, China: new insights from 3D stratigraphic forward modelling[J]. Precambrian Research, 2020, 350: 105826.
- [47] CONDON D, ZHU Maoyan, BOWRING S, et al. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China [J]. Science, 2005, 308(5718): 95-98.
- [48] ZOU Caineng, YANG Zhi, DAI Jingxing, et al. The characteristics and significance of conventional and unconventional Sinian-Silurian gas systems in the Sichuan Basin, central China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 64: 386-402.
- [49] 文龙,杨跃明,游传强,等.川中—川西地区灯影组沉积层序特征及其对天然气成藏的控制作用[J].天然气工业,2016,36(7):8-17.  
WEN Long, YANG Yueming, YOU Chuanqiang, et al. Characteristics of Dengying Fm sedimentary sequence in the central-western Sichuan Basin and their controlling effect on gas accumulation[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(7): 8-17.
- [50] HAQ B U, SCHUTTER S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. Science, 2008, 322(5898): 64-68.
- [51] HINNOV L A. New perspectives on orbitally forced stratigraphy [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 419-475.
- [52] FORKNER R M, HINNOV L A, SMART P. Use of insolation as a proxy for high-frequency eustasy in forward modeling of platform carbonate cyclostratigraphy—A promising approach [J]. Sedimentary Geology, 2010, 231(1/2): 1-13.
- [53] ZHAO Wenzhi, WEI Guoqi, YANG Wei, et al. Discovery of Wanyuan-Dazhou intracratonic rift and its significance for gas exploration in Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 697-707.
- [54] 周进高,张建勇,邓红婴,等.四川盆地震旦系灯影组岩相古地理与沉积模式[J].天然气工业,2017,37(1):24-31.  
ZHOU Jingao, ZHANG Jianyong, DENG Hongying, et al. Lithofacies paleogeography and sedimentary model of Sinian Dengying Fm in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 24-31.
- [55] SCHLAGER W. Sedimentology and sequence stratigraphy of reefs and carbonate platforms: a short course [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1992: 71.
- [56] SPRACHTA S, CAMOIN G, GOLUBIC S, et al. Microbialites in a modern lagoonal environment: nature and distribution, Tikehau atoll (French Polynesia) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 175(1/4): 103-124.
- [57] GAGAN M K, AYLIFFE L K, HOPLEY D, et al. Temperature and surface-ocean water balance of the Mid-Holocene tropical western Pacific [J]. Science, 1998, 279(5353): 1014-1018.
- [58] LIU Jianliang, LIU Keyu, SALLES T, et al. Factors controlling carbonate slope failures: insight from stratigraphic forward modelling [J]. Earth-Science Reviews, 2022, 232: 104108.
- [59] MALLARINO G, GOLDSTEIN R H, DI STEFANO P. New approach for quantifying water depth applied to the enigma of drowning of carbonate platforms [J]. Geology, 2002, 30(9): 783-786.
- [60] PORTA G D, KENTER J A M, BAHAMONDE J R. Microfacies and paleoenvironment of Donezella accumulations across an upper carboniferous high-rising carbonate platform (Austurias, NW Spain) [J]. Facies, 2002, 46(1): 149-168.
- [61] 李剑,杨春龙,谢武仁,等.四川盆地安岳气田震旦系台缘带和台内地区天然气成藏差异性及其勘探领域[J].石油与天然气地质,2023,44(1):34-45.  
LI Jian, YANG Chunlong, XIE Wuren, et al. Differences of natural gas accumulation and play fairways in the marginal zone and interior of Sinian platform in Anyue gas field, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 34-45.
- [62] LIU Wen, QIU Nansheng, XU Qiuchen, et al. Precambrian temperature and pressure system of Gaoshiti-Moxi block in the central paleo-uplift of Sichuan Basin, southwest China [J]. Precambrian Research, 2018, 313: 91-108.
- [63] 何丽娟,许鹤华,汪集旸.早二叠世—中三叠世四川盆地热演化及其动力学机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1884-1891.  
HE Lijuan, XU Hehua, WANG Jiyang. Thermal evolution and dynamic mechanism of the Sichuan Basin during the Early Permian-Middle Triassic [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(12): 1948-1954.

(收稿日期 2023-06-05 改回日期 2023-08-09 编辑 雷永良)