

陈星月,印森林,孙敬,等,2025.鄂西北见天坝生物礁露头三维建模与气藏数值模拟:以传统露头数据集和 无人机倾斜摄影模型为例[J]. 沉积与特提斯地质,45(2):282-293. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.03001 CHEN X Y, YIN S L, SUN J, et al., 2025. Three-dimensional modeling and gas reservoir numerical simulation of the Jiantianba reef outcrop in northwestern Hubei: A case study using traditional outcrop data set and the UAV oblique photography model[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(2): 282-293. doi: 10.19826/j.cnki. 1009-3850.2025.03001

鄂西北见天坝生物礁露头三维建模与气藏数值模拟:以传统露头数据集和无人机倾斜摄影模型为例

陈星月1,印森林2,6*,孙 敬3,高全慧4,唐 攀2,雷章树5,段志文2

(1. 长江大学计算机科学学院,湖北 荆州 434023; 2. 长江大学录井技术与工程研究院,湖北 荆州 434023; 3. 长江大学石油工程学院,湖北 武汉 430100; 4. 中国石油集团西部钻探公司克拉玛依录井工程公司,新疆 克拉 玛依 834000; 5. 长江大学地球科学学院,湖北 武汉 430100; 6. 长江大学南方复杂页岩油气地质与开发湖北省 重点实验室,湖北 武汉 430100)

摘要:本文利用传统人工考察、无人机倾斜摄影数字露头技术、三维地质建模等多种技术手段建立三维定量原型模型,以 鄂西北见天坝上二叠统长兴组碳酸盐岩台地边缘生物礁露头为例,开展气藏数值模拟。结果表明,露头剖面自下而上划分 出13个沉积微相和5个完整的沉积旋回,礁体微相、垂向序列均表现出水体逐渐变浅的演化过程,岩性上表现出生屑灰岩 一骨架岩—障积岩—黏结岩—泥晶生屑灰岩的演化特征。三维地质建模表明晶粒白云岩呈团状分布在礁顶及礁盖,海绵骨 架礁灰岩呈带状在礁体中上部,藻黏结海绵礁灰岩呈不规则连片状在礁体中下部,藻黏结礁灰岩呈片状在礁体下部,生屑 泥晶灰岩呈点状在礁基分布。压力模拟结果显示储层初始压力值41.5 MPa,生产1年后,压力平均值为28 MPa,5年后, 压力平均值为12 MPa。设置储层原始含气饱和度为70%,经过1年后,礁顶部位降至56%,礁体中上部降至60%;5年后, 礁顶部位降至14%,礁体上部降至38%。礁顶物性好,含气饱和度以较快速度降至42%,礁体上部物性相对较差,含气饱 和度以较慢速度降至22%。研究认为,三维地质模型显示了生物礁体的复杂性和非均质性,礁体上部(礁盖)的白云岩的 储集性能总体最优;数值模拟结果反映了生物礁气藏呈早期下降快、晚期下降慢的特点。以三维数字露头模型为数据框架 建立露头地质模型,可较好地模拟生物礁气藏数值渗流与剩余气分布规律。 关键 词:无人机;数字露头;礁滩相;三维建模;气藏数值模拟;长兴组气藏

中图分类号: P618.13 文献标识码: A

Three-dimensional modeling and gas reservoir numerical simulation of the Jiantianba reef outcrop in northwestern Hubei: A case study using traditional outcrop data set and the UAV oblique photography model

CHEN Xingyue¹, YIN Senlin^{2,6*}, SUN Jing³, GAO Quanhui⁴, TANG Pan²,

收稿日期: 2023-06-14; 改回日期: 2023-09-18; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 杨平

作者简介: 陈星月(1998—),女,在读博士研究生,研究方向主要为无人机倾斜摄影露头建模。E-mail: chenxyah@foxmail.com

通信作者:印森林(1983—),男,副教授、博士生导师,研究方向主要为数字露头表征与建模。E-mail: yinxiang_love@126.com

资助项目: 长江大学地质资源与地质工程一流学科开放基金项目(2019KFJJ0818022); 油气藏地质与开发工程国家重点实验室开放基金(PLN2022_19)

为例

LEI Zhangshu⁵, DUAN Zhiwen²

(1. School of Computer Science, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 3. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 4. Karamay Mud Logging Engineering Company of Xibu, CNPC, Karamay 834000, China; 5. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 6. Hubei Key Laboratory of Complex Shale Oil and Gas Geology and Development in Southern China, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: By integrating traditional field investigation, UAV oblique photogrammetry, and 3D geological modeling techniques, a 3D quantitative prototype model was established using the outcrop of the Upper Permian Changxing Formation carbonate platformmargin reef at Jiantianba in northwestern Hubei as a case study. Numerical simulation of gas reservoirs was subsequently conducted. From bottom to top, 13 sedimentary microfacies and 5 complete depositional cycles are identified at the outcrop section, exhibiting a shallowing-upward evolution vertically, with lithological evolution from bioclastic limestone (reef base) to framestone, bafflestone, boundstone, and finally micritic bioclastic limestone (reef top). 3D modeling demonstrates significant spatial heterogeneity: micritic dolostone occurs as clusters in the reef top and cap, sponge-framestone forms banded layers in the middle-upper reef, algal-bound sponge reef limestone exhibits irregularly connected patches in the middle-lower reef, algal-bound reef limestone appears as sheetlike units in the lower reef, bioclastic micritic limestone is distributed as isolated points at the reef base. Pressure simulations show rapid pressure depletion (with an initial pressure of 41.5 MPa decreasing to 28 MPa after 1 year, and further to 12 MPa after 5 years) and gas saturation decline (with an initial level of 70% dropping to 56% at the reef top and 60% in the upper reef after 1 year, and further decreasing to 14% at the reef top and 38% in the upper reef after 5 years). The reef top, with superior reservoir quality, shows a rapid decline in gas saturation (to 42%), while the upper reef, with poorer properties, exhibits slower saturation reduction (to 22%). This study highlights that: The 3D geological model demonstrates the complexity and heterogeneity of the reef structure, with the dolomite in the upper part of the reef (reef cover) displaying the best reservoir characteristics. The numerical simulation results reflect that reef gas reservoir is characterized by a rapid decline in pressure during the early production stages and a slower decline in the later stages. In summary, the outcrop geological model based on the 3D digital outcrop model can better simulate the numerical seepage and residual gas distribution of reef gas reservoirs.

Key words: UAV; digital outcrop; reef-beach facies; 3D modeling; numerical simulation of gas reservoir; Changxing Formation gas reservoir

0 引言

碳酸盐岩作为重要的沉积岩类型,在我国分布 广泛,且蕴藏着丰富的油气等矿产资源,是油气勘 探开发的重要对象。国内生物礁研究历经数十年, 在岩相命名、定义、分类、结构等基础理论上取得 显著进展。进入 21 世纪,礁滩相油气储层勘探取 得更大成果,如北方礁滩相储层的勘探突破以及四 川盆地普光气田的发现等(黄思钦,2022)。同时, 川西南地区及鄂西二叠系—三叠系地层中的礁滩 体也受到广泛关注(冯许魁等,2024)。由于地质条 件复杂且经历多期构造演化,生物礁的分布规律变 得十分复杂(汪泽成等,2012);沉积作用和成岩作 用对生物礁内部结构的塑造和岩石微观孔隙特征 有着重要影响(胡明毅等,2012;梅青燕等,2020)。 为了深入探索礁体特征,前人运用多种技术手段对 储层特征开展定量分析,如利用测井资料识别微相、 预测地震属性以及建立三维地质模型等(马永生等, 2014;张红英等,2020;彭才等,2019;柯光明等, 2019),结合数字露头和现代珊瑚礁的研究,对生物 礁进行精细表征和描述(Yin et al.,2023;王立芙等, 2023)。尽管国内生物礁研究进展较大,但由于碳 酸盐岩的复杂性及储层非均质性较强等原因,碳酸 盐岩生物礁小尺度非均质性及其气藏开发与渗流 特征的研究也亟待深入。此外,为满足复杂地质条 件和油气藏类型的勘探需求,生物礁勘探技术和方 法急需创新改进。

本文以鄂西北见天坝上二叠统长兴组碳酸盐 岩台地边缘生物礁露头为例,对碳酸盐岩生物礁储 层开展多尺度的三维空间非均质性研究,研究岩性/ 岩相非均质性对台地边缘生物礁储层中流体流动 特征与油气分布规律的影响,并开展动态模拟分析, 以期为类似地质条件下的礁滩体油气勘探提供指导,对储层预测提供依据。

1 区域地质概况

在中泥盆世一早三叠世期间,上扬子地块西缘 发生"峨眉地裂运动"(王东等,2023;徐皓玮, 2025), 开江—梁平海槽由此形成, 是晚二叠世长兴 期沉积地貌的雏形(李阳等, 2022)。长兴期海平面 上升, 基底稳定, 气候湿润, 能量充足, 适合礁体生 长繁殖(魏国齐等, 2021), 研究区处于鄂西—川东 地区的开阔台地, 在此顶部发育了见天坝礁(图 1a)。 研究露头位于湖北省恩施自治区利川市柏杨



a. 长兴组沉积相模式图; b. 长兴组生物礁分布图; c. Google Earth 卫星图像、人工考察点位及建模区域; d. 沉积相-层 序地层综合柱状图(图 a、d 据唐雨等, 2021 修改; 图 b、c 据印森林等, 2022 修改)

图 1 开江-梁平海槽东侧上二叠统长兴组沉积相模式、研究区构造与礁体地理分布位置及沉积特征图 Fig. 1 Sedimentary facies model of the Upper Permian Changxing Formation on the eastern side of the Kaijiang-Liangping trough 镇东北部约 25 km 的见天村。根据沉积环境划分 为开阔台地相、台地边缘礁滩相、台地边缘斜坡相 以及陆棚相,进一步分为礁基亚相、礁核亚相和礁 坪/礁盖亚相(印森林等, 2022),各礁体内部微相类 型多样,不同部位岩性组合与地层结构存在差异。 长兴组自下而上分为生物礁发育较少的长一段(以 生屑灰岩和泥晶灰岩为主)、生物礁较发育的长二 段、长三段(以白云岩、礁灰岩、生屑灰岩为主),与 下伏上二叠统龙潭组以及上覆下三叠统飞仙关组 呈平行不整合接触(文华国等, 2017; 牟传龙, 2022; 图 1d),地层连续性较好,垂直厚度在 100~300 m。

2 基于传统数据集和无人机数字露头模型集开展露头研究

见天坝采石场剖面出露宽度最长为 94.52 m, 最高为 20.77 m,面积约为 2 091.05 m²。该剖面出 露完整,本研究采用无人机航拍与人工勘测相结合 的方法,构建三维数字露头原型模型并开展定量研 究(印森林等, 2021)。具体的技术流程包括:通过 无人机采集多视角高清影像,每张影像具有岩石丰 富的真实纹理信息(Picke et al., 2015)和经纬度坐 标的定位定向系统数据(POS 数据);在剔除模糊不 清的影像后,利用 Context Capture 软件进行三维网 格和纹理叠合匹配,建立了摄影图像与经纬度坐标 相对应的无人机三维数字露头模型(图 2),该模型 可定位任意点位坐标,分辨率约为2 cm,关键点位 清晰度高。通过对20个点位(01~20号点)进行 人工勘测地层剖面(比例尺为1:50)并测量方位, 对6个重点考察的关键点位(01~05号点、10号点) 进行岩性精细描述(图1c),与无人机采集的200张 高清影像构建了传统样本数据集。

3 露头剖面表征与非均质性分析

3.1 见天坝采石场露头剖面

剖面自下而上可划分 13 个沉积微相(图 3a-b), 内部可识别出5个完整的沉积旋回。礁体的沉积 旋回、垂向序列均表现出水体逐渐变浅的演化过 程(刘国萍等, 2017; 马德芹等, 2020; 图 3c)。采石 场生物礁沉积体系的岩性组合表现出明显的有序 性,总体上为生屑灰岩--骨架岩--障积岩--黏结岩 一泥晶生屑灰岩的演化特征。旋回 I 位于台地边 缘上、下斜坡,发育厚度约9m的浅灰色厚层--块 状生物碎屑灰岩;旋回Ⅱ位于开阔台地,沉积了厚 为9m的深灰色块状微晶生物碎屑灰岩,在此之上, 礁体开始发育,浅灰色的块状充填骨架海绵骨架礁 灰岩和充填骨架海绵障积石灰岩聚集,组成礁核, 厚约 23 m。旋回Ⅲ发育了具有正向生长趋势的礁 体骨架,浅灰色块状开放骨架海绵骨架岩与限制骨 架海绵岩逐渐堆积,与侵蚀骨架海绵骨架岩一起, 组成礁体下部,厚度约29m。旋回Ⅳ灰色的中厚



图 2 无人机倾斜摄影见天坝采石场露头三维模型(计算网格与纹理叠合模型)

Fig. 2 Three-dimensional model of outcrop of Jiantianba quarry by UAV oblique photography (calculation grid and texture superposition model)



a. 无人机倾斜摄影露头模型; b. 露头剖面解释; c. 海平面变化曲线
 图 3 无人机倾斜摄影见天坝采石场剖面解剖
 Fig. 3 Sectional anatomy of Jiantianba quarry by UAV oblique photography

层底栖生物黏结岩黏附、堆积于礁体骨架,与限制 骨架海绵障积石灰岩构成礁顶,厚度约 19 m。顶 部发育 2 m 的灰色生物碎屑白云岩,形成礁盖。旋 回 V 是礁体发育的最后阶段,灰色薄-中层的微生 物泥晶灰岩在礁前充填(Chen et al., 2018;图 3)。

3.2 生物礁露头剖面岩相结构解释

基于见天坝采石场的露头剖面探究礁体发育 与演化过程。生物礁在台地斜坡带上开始发育 (图 3a-b),由于斜坡水体较深,生物含量少,早期群 落以耐受低光照的底栖生物为主,主要为有孔虫等 底栖生物(图 3c),其遗骸与灰泥混合沉积,形成生物碎屑泥晶灰岩,亮晶方解石在孔隙间充填(图 4a-b)。碎屑滩作为生物礁生长演化的基底,在深水和较浅水之间的过渡环境下,串管海绵在基底上垂向发育,形成直立骨架,钙藻类黏结作用有限,海绵通过分泌碳酸钙维持自身稳定性,形成骨架岩(图 4c)。随着海平面下降,水体能量与营养供给增强,海绵、水螅类等积极参与造礁,生物数量增多,可见腕足类、双壳类、有孔虫、棘皮动物等(Leinfelder et al., 2005),钙藻类通过分泌碳酸钙包裹海绵骨架,

并黏结生物碎屑,形成黏结岩,同时藻类活动导致 海绵体腔内部微晶灰泥充填与部分孔隙保存,(图 4d)。在波浪、水流的作用下,部分海绵骨架遭受 物理破坏,倒伏枝状体阻碍水流并捕获细粒沉积物, 形成障积岩(图 4e-g)。当礁体加积速率超过海平 面上升速率时,礁顶间歇性暴露,遭受大气淡水淋 滤(形成溶孔)与波浪侵蚀,崩解后的碎屑向礁前搬 运,堆积为生物碎屑灰岩(图 3,图 4)。

3.3 储层孔隙结构类型与参数获取

基于 26 份薄片及岩石样品分析发现,见天坝 长兴组剖面岩石孔隙类型主要有:晶间孔、晶间溶 孔、生物体腔孔、溶孔、黏结格架孔及重结晶后形 成的晶间孔。储层物性最好的晶间孔和晶间溶孔 主要分在礁盖的晶粒白云岩,在礁体顶部较为发育。 因受到淡水溶蚀,一般孔隙体积较大,连通性一般, 孔隙度在 1.8%~4.8% 之间,均值为 3.7%,而渗透 率极大值为 1.3×10⁻³ μm²;次之的生物体腔孔和溶 孔孔隙主要分布于礁体中上部的海绵骨架礁灰岩 中,一般孔隙体积较大,但连通性差,孔隙度为 1.73%~2.81%,均值为 2.1%,渗透率极大值可达 0.38×10⁻³ μm²;最差的黏结格架孔及重结晶作用后 形成的晶间孔主要分布在礁体下部的藻黏结礁灰



a. 生物碎屑灰岩; b. 生物碎屑灰岩; c. 海绵骨架礁灰岩; d. 藻黏结礁灰岩; e. 海绵骨架障积灰岩; f. 海绵障积白云岩, 主要由纤维海绵、房室海绵和充填的粒泥白云岩基质组成,海绵含量 10%,大小多在数毫米至数厘米,局部可见生物 潜穴构造; g. 海绵障积灰岩,主要由纤维海绵、房室海绵及硬海绵和充填其间的泥粒灰岩基质组成,海绵含量约 55%, 海绵骨骼及腔体充填物发生过重结晶作用及不完全的白云石化作用; h. 礁白云岩,主要由泥一粉一细晶白云石组成, 泥晶白云石含量占 10%,粉一细晶白云石含量约 80%,另有约 5%粉一细晶方解石残余充填溶孔,可见未充填晶间孔 和溶孔; i. 后期溶蚀裂缝被沥青充填

图 4 岩石样品和薄片照片 Fig. 4 Observation of rock samples and thin sections 岩, 孔隙度为 0.38%~1.6%, 均值为 0.9%, 渗透率极 大值为 0.17×10⁻³ μm²(表 1)。通过孔隙结构数据 的统计分析, 为建立孔隙度、渗透率物性模型奠定 数据基础(胡明毅等, 2012; 高树生等, 2022)。

4 碳酸盐岩露头三维地质建模

以沉积旋回作为建模单元,通过确定性与随机 性相结合的相控方法构建碳酸盐岩储层的地质模 型(唐洪等, 2012; 何治亮等, 2023)。模型覆盖范围 为长 110 m, 宽 12 m, 厚约 20 m(图 2)。储层建模 工作流程包括:(1)基于露头区范围设置 20 个虚拟 井点,通过无人机数字露头模型的岩性定量分析结 果, (Yin et al., 2022), 将生物礁岩性划分为晶粒白 云岩、骨架礁灰岩、障积礁灰岩、藻黏结礁灰岩、 生屑灰岩、生屑泥晶灰岩六种,并赋值至虚拟井点; (2)基于无人机数字露头模型的三维坐标数据,识 别地层界面几何形态,依据沉积旋回特征,自上而 下划分 C5、C4、C3、C2、C1 共 5 个沉积单元, 建立 等时地层格架模型(图 5),在地层格架约束下建立 1 m×1 m 的网格单元,通过地质统计法(序贯指示 模拟)融合虚拟井数据,生成三维岩相模型;(3)基 于岩相模型参考前人研究成果赋予孔隙度初始值 (表1),采用算术平均法粗化至网格单元,结合序 贯高斯模拟与沉积相控约束,生成三维孔隙度模型; 基于调和平均-算术平均联合算法,分别对垂向与 水平向渗透率进行各向异性粗化建模(Cabello et al., 2018)

三维空间上的模拟结果显示,晶粒白云岩主要 在东北方向的礁体顶部及礁盖位置呈团状分布,整 体向西侧向扩展(向岸生长),孔隙度、渗透率均值 分别为 7.9% 和 1.2×10⁻³ μm²,表明礁体上部(礁盖) 的白云岩的储集性能总体最优(图 5a-d);骨架礁灰

岩主要位于西北方向的礁体顶部以及西南方向的 礁前部位,与晶粒白云岩紧密叠置分布,孔隙度、 渗透率均值分别为 4.2% 和 0.6×10⁻³ µm²; 障积礁 灰岩自礁体中上部向西北方向呈带状分布,孔隙度、 渗透率较好,均值分别为 4.8%、 0.65×10⁻³ µm², 礁 核部位的骨架礁灰岩以及障积礁灰岩的储集性能 次之(图 5a-d);藻黏结礁灰岩自南沿东北方向在礁 体中部及下部呈不规则连片状分布,生屑灰岩主要 在西南的礁体下部以及中下部偏西北向呈片状分 布,生屑泥晶灰岩主要在南向的礁基部位呈点状分 布,生屑灰岩及生屑泥晶灰岩的孔隙度、渗透率在 模型结果中均值分别为 0.5%、0.15×10⁻³ um², 礁基 部位储集性能最差(图 5a-d)。三维地质模型不仅 显示了生物礁体的复杂性和非均质性,同时也客观 地反映了生物礁岩性和储层物性参数的空间分布 规律。

5 基于三维模型的气藏数值模拟

鉴于地下油气藏在资料有限的情况下精细表 征难度较大,将露头三维地质模型可视化后开展定 量化分析,为气藏数值模拟工作奠定基础(张岩等, 2010)。用较粗的三维网格对前述地质模型进行粗 化,通过 ECLIPSE 软件加载压力、产量等生产历史 以及相关基础参数(参考普光气田长兴组开发的实 际情况),以黑油模型为拟合基础,建立可靠的动态 模型,对气藏气井压力、产量等指标进行预测,为 现场生产管理措施的制定及后期开发方案的完善 提供依据(顾少华等,2020;计秉玉等,2022)。以粗 化后的地质模型为基础,通过历史拟合再现开发生 产过程,同时分析影响开发的不确定性地质参数, 使其更符合实际储层开发规律,进而指导开发方案 调整(许宁,2001;林承焰等,2023)。

表 1 鄂西利川见天坝长兴组生物礁不同类型岩石储层物性参数统计(胡明毅等, 2012) Table 1 Statistics of physical parameters of different types of rock reservoirs in Changxing Formation of Jiantianba in Lichuan, western Hubei (after Hu et al., 2012)

	山子坐画	 孔隙度/%		送送运过/10 ⁻³ ····· ²	
右 有分布	右有尖型	分布范围	平均值	- 诊透平/10 μm	
礁顶	晶粒白云岩	1.8~4.8	3.7	0.8~1.3	
礁体中上部	骨架礁灰岩	1.73~2.81	2.1	0.09~0.38	
	障积礁灰岩	$0.9 \sim 2.3$	1.5	$0.07\!\sim\!0.42$	
礁体下部	藻黏结礁灰岩	0.38~1.6	0.9	0.04~0.17	
	生屑灰岩	$0.65 \sim 1.21$	0.93	$0.07 \sim 0.11$	
礁基	生屑泥晶灰岩	0.5~1.15	0.8	0.06~0.1	



图 5 无人机倾斜摄影见天坝采石场的三维地质模型 Fig. 5 3D geological models of Jiantianba quarry based on UAV oblique photography

5.1 气藏数值模拟模型参数选取

通过前述分析,岩相模型限定了不同岩性的孔 隙度和渗透率数值。为提升气藏数值模拟效率,对 前期建立的精细三维地质模型进行网格粗化。粗 化过程中,以重新划分的粗化网格层位为约束,同 时保留原始网格几何形态(包括网格单元方位与分 层组合),从而保留了岩相与孔隙度的空间非均质 性特征,以及小尺度模型有效渗透率差异。基于四 川盆地元坝长兴组气藏实际地质特征,结合气藏流 体 PVT 属性及气水分布关系(张勇等, 2009; 伍勇 等,2013;何东博等,2023),建立了直井衰竭式开采 数值模拟模型(图 6),模型相关参数见表 2。模拟 依据露头三维地质模型,模型区域面积为1km²,储 层有效厚度 12 m, 天然气储量 0.8×10⁸ m³, I、J、K 方向网格数分别为 80、120、12, 网格步长为 10 m× 10 m×1 m。气井采用定产工作制度,直井日产气 1×10⁴ m³/d, 模拟 5 年开发效果(李玉丹等, 2023)。

5.2 露头气藏模拟结果分析

模拟结果显示,压力模拟设置储层初始压力值 为41.5 MPa(图 6a), 生产1年后压力平均值为 28 MPa(图 6b), 生产 5 年后压力平均值为 12 MPa (图 6c), 呈早期下降快、晚期下降慢的特点。储层 原始含气饱和度为70%(图 6d),开发1年后,气藏 平均含气饱和度为 65%(图 6e), 西北方向的牛物

礁礁核中上部位降至约60%,西南方向的礁盖及礁 顶部位降至约 56%(图 6e); 开发 5 年后可见明显 变化, 气藏平均含气饱和度为 50% 左右, 西北方向 生物礁礁核中上部降至约38%,礁盖及礁顶部位饱 和度降至 14%~30%(图 6f)。礁顶物性好,含气饱 和度以较快速度降至42%,礁体上部物性相对较差, 含气饱和度以较慢速度降至22%。数值模拟结果 反映出礁盖与礁顶部位晶粒白云岩物性最好,礁核 中下部骨架礁灰岩次之,和三维地质模型表现一致, 达到较好的拟合效果。综上所述,三维数字露头数 据用于气藏数值模拟可对生物礁气藏的渗流与剩 余气分布规律进行有效验证(黄仁春等, 2019; 李玉 丹等, 2022; 陈建勋等, 2023; 肖富强等, 2025)。

本研究通过"无人机倾斜摄影采集—数字露 头建模--三维地质建模---气藏数值模拟"-体化 技术流程,实现了碳酸盐岩生物礁小尺度露头的精 细表征与开发动态模拟,为同类型生物礁气藏的高 效勘探开发提供了技术参考。但当前模型受限于 储层物性参数与高压流体数据缺失,模拟结果仍存 在一定不确定性,下一步将结合实验测试优化参数, 提升模拟可靠性。

结论 6

通过上述研究得出如下结论。



Fig. 6 Numerical simulation of gas reservoir pressure and saturation changes

表 2 数值模拟模型主要参数表(李玉丹, 2023) Table 2 Main parameters of the numerical simulation models (after Li, 2023)

储层深度/m	储层厚度/m	气藏压力/MPa	气藏温度/℃	平均孔隙度/%	平面渗透率/10 ⁻³ µm ²	垂向渗透率/10 ⁻³ μm ²	含气饱和度/%
$4000\!\sim\!4500$	12	41.5	150	见表1	见表1	见表1	70%

(1)生物礁露头剖面岩性分布具有明显规律性。 露头剖面自下而上划分出 13 个沉积单元,内部可 识别出 5 个完整的沉积旋回。礁体微相、垂向序 列均表现出水体逐渐变浅的演化过程,体现为岩性 从生屑灰岩—骨架岩—障积岩—黏结岩—泥晶生 屑灰岩的演化特征。

(2)三维地质模型模拟的结果较好地展示了生物礁三维空间分布特征。三维空间上,晶粒白云岩呈团状分布于礁盖,孔隙度、渗透率值最高,储集性能最好;海绵骨架礁灰岩呈带状分布于礁体中上部,孔隙度、渗透率值较高,礁体上部障积礁灰岩以及骨架礁灰岩的储集性能次之;藻黏结礁灰岩呈不规则连片状分布于礁体中下部,生屑灰岩则呈片状分布于礁体下部,生屑泥晶灰岩呈点状分布于礁基部位,藻黏结礁灰岩、生屑灰岩及生屑泥晶灰岩的孔隙度、渗透率最差。

(3)储层初始压力值 41.5 MPa, 生产 1 年后, 压 力平均值为 28 MPa, 生产 5 年后, 压力值为 12 MPa, 呈早期下降快晚期下降慢的特点。设置储层原始 含气饱和度为 70%, 经过 1 年后, 礁顶部位降至 56%, 礁体中上部降至 60%; 5 年后, 礁顶部位降至 14%, 礁体上部降至 38%。礁顶物性好, 含气饱和 度以较快速度降至 42%, 礁体上部物性相对较差, 含气饱和度以较慢速度降至 22%, 数值模拟结果较 好地反映了生物礁气藏的变化规律。

References

- Chen B C, Xie X N, Al-Aasm I S, et al., 2018. Depositional architecture and facies of a complete reef complex succession: A case study of the Permian Jiantianba reefs, western Hubei, south China[J]. Minerals, 8 (11) : 533.
- Cabello P, Domínguez, David, et al., 2018. From conventional outcrop datasets and digital outcrop models to flow simulation in the Pont de Montanyana point-bar deposits (Ypresian, Southern Pyrenees) [J].
 Marine and Petroleum Geology, 94: 19 42.
- Chen J X, Yang S L, Lü Q, et al., 2023. Experimental study on depletion development laws of deep heterogeneous carbonate gas reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 38 (4): 47-54 (in Chinese with English abstract).
- Feng X K, Yang Y, Zhu Y D, et al., 2024. Development characteristics, distribution patterns and favorable exploration zones of Permian reef shoals in Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan

Geology, 44 (2) : 278 – 294 (in Chinese with English abstract).

- Gao S S, Yang M H, Ye L Y, et al., 2022. Simulation experiment of water invasion performance in low-permeability bottom water gas reservoir and its influence on recovery factor[J]. Natural Gas Industry, 42 (3) : 61 70 (in Chinese with English abstract).
- Gu S H, Zeng D Q, Sun B, et al., 2020. High definition water intrusion numerical simulation of Puguang gas reservoir with tens of millions of grid[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 27 (6) : 774 - 777 (in Chinese with English abstract).
- He D B, Jia A L, Wei Y S, et al., 2023. Theory and technology of balanced development of conventional gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 43 (1) : 76-85 (in Chinese with English abstract).
- He Z L, Zhao X Y, Zhang W B, et al., 2023. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J].
 Oil & Gas Geology, 44 (1) : 16 33 (in Chinese with English abstract).
- Hu M Y, Wei H, Qiu X S, et al., 2012. Reef Composition and Their Forming Models of Changxing Formation in Jiantianba Section of Lichuan, Western Hubei [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 30 (1) : 33 – 42 (in Chinese with English abstract).
- Huang S Q, 2022. Gas accumulation mechanism in deep carbonate rocks of reef-beach facies: A case study of the Changxing Formation in southeastern Sichuan[D]. Chengdu University of Technology: 2 - 4 (in Chinese with English abstract).
- Huang R C, Xing F C, Fan X J, et al., 2019. Establishment of highprecision sequence stratigraphic framework of the Changxing-Feixianguan Formations and prediction of reef-shoal reservoirs in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 21 (2) : 369 – 378 (in Chinese with English abstract).
- Ji B Y, Zheng S Q, Gu H, et al., 2022. On the development technology of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on Tahe oilfield and Shunbei oil and gas field[J]. Oil & gas geology, 43 (6) : 1459 – 1465 (in Chinese with English abstract).
- Ke G M, Wu Y J, Xu S C, et al., 2019. Geological comprehensive evaluation of ultra-deep high-sulfur reef gas reservoir in Yuanba gas field[J]. Natural Gas Industry, 39 (S1) : 42 - 47 (in Chinese with English abstract).
- Leinfelder R R, Schlagintweit F, Werner W, et al., 2005. Significance of stromatoporoids in Jurassic reefs and carbonate platforms—concepts and implications [J]. Facies, 51: 287-325.
- Li Y, Wang X Z, Pu B Y, et al., 2022. Sedimentary characteristics of oolitic beach of Triassic Feixianguan Formation in eastern Kaijiang-Liangping trough, Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 34 (2) : 116 130 (in Chinese with English abstract).
- Li Y D, You Y C, Zeng D Q, et al., 2023. Numerical simulation of water intrusion in wet gas reservoirs: A case study of the Changxing gas reservoir in Yuanba[J]. Earth Science Frontiers, 30 (6) : 341 - 350 (in Chinese with English abstract).
- Li Y D, Zeng D Q, Zheng W B, et al., 2022. Reservoir characteristics

description and development key technology of marine carbonate acid gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 42 (S1) : 41 - 45 (in Chinese with English abstract).

- Lin C Y, Chen B Y, Ren L H, et al., 2023. A review of depositional numerical simulation and a case study[J]. Acta Geologica Sinica, 97 (8) : 2756-2773 (in Chinese with English abstract).
- Liu G P, You Y C, Feng Q, et al., 2017. Fine depict of reef reservoirs in Changxing Formation, Yuanba area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 52 (3) : 583 – 590 (in Chinese with English abstract).
- Ma D Q, Tian J C, Lin X B, et al., 2020. Differences and controlling factors of Changxing Formation reefs of the Permian in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 41 (6) : 1176 – 1187 (in Chinese with English abstract).
- Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R, et al., 2014. Characteristics and formation mechanisms of reef-shoal carbonate reservoirs of Changxing-Feixianguan formations, Yuanba gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 35 (6) : 1001 1011 (in Chinese with English abstract).
- Mei Q Y, Zou C, Yang S, et al., 2020. The influence of pore structure and heterogeneity on development of carbonate gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 31 (12) : 1757 1765 (in Chinese with English abstract).
- Mou C L, 2022. Suggested naming and classification of the word facies[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42 (3) : 331 – 339 (in Chinese with English abstract).
- Peng C, Zheng R C, Chen H, et al., 2019. Reef control factors and new seismic prediction techniques of Changxing Formation, east of Kaijiang-Liangping trough, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 41 (4) : 614 - 620 (in Chinese with English abstract).
- Picke A, Frechette J D, Comunian A, et al., 2015. Building a training image with Digital Outcrop Models[J]. Journal of Hydrology, 531: 53 – 61.
- Tang Y, Zhang Y F, Hu L H, et al., 2021. Characteristics and differences of the platform margin reservoir, Changxing Formation, central eastern region, west of the Kaijiang-Liangping trough[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39 (6) : 1593 1608 (in Chinese with English abstract).
- Tang H, Liao M G, Hu J, et al., 2012. Research on carbonate reservoir matrix model building based on porosity cycles [J]. Petroleum Geology & Experiment, 34 (3) : 330 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z C, Jiang H, Liu W, et al., 2012. Types of tectonic hinge zone and its effect on hydrocarbon accumulation in carbonate reservoirs of cratonic basins in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 33 (S2) : 11 – 20 (in Chinese with English abstract).
- Wang L F, Gong E P, Yang Z Y, et al., 2023. Basic characteristics and palaeoenvironmental background of a Sakmarian coral reef in southern Guizhou [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1 – 18[2023-12-11] (in Chinese with English abstract).
- Wang D, Liu H, Tang S, et al., 2023. Sedimentary architecture and

distribution of intra-platform shoal insequence framework of Permian Changxing Formation in central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 50 (2) : 346 – 359 (in Chinese with English abstract).

- Wei G Q, Yang W, Liu M C, et al., 2021. Characteristics and distribution of platform-margin reef-shoal reservoirs in Changxing-Feixianguan Formations to the west of ocean trough, E'xi-Chengkou area[J]. Oil & Gas Geology, 42 (3) : 661 – 672+764 (in Chinese with English abstract).
- Wen H G, Zhou G, Zheng R C, et al., 2017. The sedimentationdiagenesis-reservoir formation system of reef dolomites from Changxing Formation in the eastern of Kaijiang-Liangping platformshelf, Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 33 (4) : 1115 – 1134 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y, Lan Y F, Cai X L, et al., 2013. Research on numerical simulation fine history matching technology of low permeability carbonate gas reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 36 (2): 52-54 (in Chinese with English abstract).
- Xiao F Q, Xia W P, Xiao W D, et al., 2025. Geological conditions and exploration prospects of coalbed methane in the B4 coal seam of the Permian Leping Formation in Fengcheng mining area, Jiangxi Province[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 48 (2): 142 154 (in Chinese with English abstract).
- Xu N, 2001. Influence of lateral reservoir heterogeneity on gas reservoir development performance[J]. Natural Gas Industry, 21 (3): 62 – 65+4 (in Chinese with English abstract).
- Xu H W, Xu Q H, Zhang C M, et al., 2025. Diagenesis and pore evolution of tight sandstone reservoir of Sha 1 member in Tianfu area, Sichuan basin[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 48 (1): 40 - 52 (in Chinese with English abstract).
- Yin S L, Chen Q L, Yuan K, et al., 2022. Characterization of multiscale heterogeneity of carbonate reef outcrop by UAV oblique photography: Case study of Jiantian Village, Lichuan, western Hubei[J]. Natural Gas Geoscience, 33 (9) : 1518 – 1531 (in Chinese with English abstract).
- Yin S L, Feng K Y, Nie X, et al., 2022. Using unmanned aerial vehicle oblique photographic data to characterize marine shale in western Hubei Province[J]. Advances in Geo-Energy Research, 6 (3) : 252 - 263.
- Yin S L, Zhu B Y, Guo H P, et al., 2023. Architecture model of dryland gravel braided river based on 3D UAV oblique photogrammetric data: A case study of west Dalongkou River in the eastern Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 97 (1): 269-285.
- Yin S L, Gao Y, Hu Z M, et al., 2021. Multiple-point geostatistical simulation of outcrop based on UAV oblique photographic data: a case study of Shihezi Formation in Pingtou township, Lvliang city, Shanxi[J]. Acta Petrolei Sinica, 42 (2) : 198 – 216 (in Chinese with English abstract).

Zhang H Y, Xie B, Yuan Q, et al., 2020. Logging-based sedimentary

microfacies identification of Changxing Formation, Damaoping structure, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 43 (2) : 38 – 44 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Y, Zheng Z J, Lu G X, et al., 2010. Application of Threedimensional geological modeling and numerical simulation in exploitation of fractured water-gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 21 (5) : 863 – 867 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Du Z M, Guo X, et al., 2009. Numerical simulation method for thin oil ring in condensate gas reservoir with bottom water [J]. Acta Petrolei Sinica, 30 (1) : 88 – 91 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈建勋,杨胜来,吕琦,等,2023.非均质深层碳酸盐岩气藏衰竭 开发规律实验研究[J].西安石油大学学报:自然科学版, 38 (4):47-54.
- 冯许魁,杨雨,朱亚东,等,2024.四川盆地二叠纪礁滩体发育特征、分布模式及有利勘探区带[J]. 沉积与特提斯地质,44 (2):278-294.
- 高树生,杨明翰,叶礼友,等,2022.低渗透底水气藏水侵动态模 拟实验及其对采收率的影响[J].天然气工业,42(3):61-70.
- 顾少华,曾大乾,孙兵,等,2020.普光气藏千万级网格高精度水 侵数值模拟技术[J].断块油气田,27(6):774-777.
- 何东博,贾爱林,位云生,等,2023.常规天然气藏均衡开发理论 与关键核心技术[J].天然气工业,43(1):76-85.
- 何治亮,赵向原,张文彪,等,2023.深层-超深层碳酸盐岩储层精 细地质建模技术进展与攻关方向[J].石油与天然气地质, 44 (1):16-33.
- 胡明毅,魏欢,邱小松,等,2012.鄂西利川见天坝长兴组生物礁 内部构成及成礁模式[J]. 沉积学报,30(1):33-42.
- 黄思钦, 2022. 深层碳酸盐岩礁滩相气藏成藏过程研究——以川东 南地区长兴组为例[D]. 成都理工大学: 2-4.
- 黄仁春,邢凤存,范小军,等,2019.四川盆地元坝地区长兴组— 飞仙关组高精度层序地层格架的建立及礁滩储集层预测[J].古 地理学报,21(2):369-378.
- 计秉玉,郑松青,顾浩,等,2022. 缝洞型碳酸盐岩油藏开发技术 的认识与思考───以塔河油田和顺北油气田为例[J].石油与天 然气地质,43(6):1459-1465.
- 柯光明,吴亚军,徐守成,等,2019.元坝气田超深高含硫生物礁 气藏地质综合评价[J].天然气工业,39(S1):42-47.
- 李阳, 王兴志, 蒲柏宇, 等, 2022. 四川盆地开江-梁平海槽东侧 三叠系飞仙关组鲕滩沉积特征[J]. 岩性油气藏, 34(2): 116 -130.
- 李玉丹,游瑜春,曾大乾,等,2023.底水气藏水侵规律数值模拟研究:以元坝长兴组气藏为例[J].地学前缘,30(6):341-350.
- 李玉丹,曾大乾,郑文波,等,2022.海相碳酸盐岩酸性气藏储层 特征描述与开发关键技术[J].天然气工业,42(S1):41-45.
- 林承焰,陈柄屹,任丽华,等,2023.沉积数值模拟研究现状及实

例[J]. 地质学报, 97(8): 2756-2773.

- 刘国萍,游瑜春,冯琼,等,2017.元坝长兴组生物礁储层精细雕 刻技术[J].石油地球物理勘探,52(3):583-590.
- 马德芹,田景春,林小兵,等,2020.四川盆地二叠系长兴组生物 礁发育的差异性及控制因素[J].石油与天然气地质,41(6): 1176-1187
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等, 2014. 元坝气田长兴组—飞仙关组 礁滩相储层特征和形成机理[J]. 石油学报, 35(6): 1001-1011.
- 梅青燕, 邹成, 杨山, 等, 2020. 孔隙结构特征和非均质性对碳酸盐岩气藏开发的影响[J]. 天然气地球科学, 31 (12): 1757-1765.
- 牟传龙,2022.关于相的命名及其分类的建议[J]. 沉积与特提斯地 质,42(3):331-339.
- 彭才,郑荣才,陈辉,等,2019.开江—梁平海槽东侧长兴组生物 礁发育主控因素及地震精细预测技术[J].石油实验地质, 41 (4):614-620.
- 唐雨,张云峰,胡林辉,等,2021.开江—梁平海槽西侧中东段长 兴组台缘储层特征及差异性[J].沉积学报, 39(6):1593-1608.
- 唐洪,廖明光,胡俊,等,2012.基于孔隙旋回建模单元的碳酸盐 岩储层建模研究[J].石油实验地质,34(3):330.
- 汪泽成,姜华,刘伟,等,2012.克拉通盆地构造枢纽带类型及其 在碳酸盐岩油气成藏中的作用[J].石油学报,33(S2):11-20.
- 王立芙, 巩恩普, 杨臻元, 等, 2023. 黔南萨克马尔期珊瑚礁特征 及其环境背景[J/OL]. 沉积学报: 1-18[2023-12-11].
- 王东,刘宏,唐松,等,2023.川中二叠系长兴组层序格架内台内 滩沉积构型与分布规律[J].石油勘探与开发,50(2):346-

359.

- 魏国齐,杨威,刘满仓,等,2021.鄂西—城口地区"海槽"西侧 长兴组—飞仙关组台缘礁滩特征与展布[J].石油与天然气地质, 42(3):661-672+764.
- 文华国,周刚,郑荣才,等,2017.四川盆地开江—梁平台棚东侧 长兴组礁白云岩沉积-成岩-成藏系统[J].岩石学报,33(4): 1115-1134.
- 伍勇,兰义飞,蔡兴利,等,2013.低渗透碳酸盐岩气藏数值模拟 精细历史拟合技术研究[J].钻采工艺,36(2):52-54.
- 肖富强,夏为平,肖卫东,等,2025.江西丰城矿区二叠系乐平组 B4 煤层气地质条件与勘探前景[J].东华理工大学学报:自然科 学版,48(2):142-154.
- 许宁,2001.储层平面非均质性对气藏开发动态的影响[J].天然气 工业,21(3):62-65+4.
- 徐皓玮,徐清海,张昌民,等,2025.四川盆地天府地区沙一段致 密砂岩储层成岩作用及孔隙演化[J].东华理工大学学报:自然 科学版,48(1):40-52.
- 印森林,陈强路,袁坤,等,2022.基于无人机倾斜摄影的碳酸盐 岩生物礁露头多尺度非均质性表征——以鄂西利川见天村露头 为例[J].天然气地球科学,33(9):1518-1531.
- 印森林,高阳,胡张明,等,2021.基于无人机倾斜摄影的露头多 点地质统计模拟——以山西吕梁坪头乡石盒子组为例[J].石油 学报,42(2):198-216.
- 张红英,谢冰,袁倩,等,2020.四川盆地大猫坪构造长兴组测井 沉积微相识别[J].天然气勘探与开发,43(2):38-44.
- 张岩,郑智君,鲁改欣,等,2010.三维地质建模与数值模拟技术 在裂缝型有水气藏开发中的应用[J].天然气地球科学, 21 (5): 863-867.
- 张勇,杜志敏,郭肖,等,2009.底水凝析气藏薄油环开采数值模 拟方法研究[J].石油学报,30(1):88-91.