

碳酸盐岩数字露头研究现状及应用实例

刘佳瑶, 黄诗怡, 卢书勤, 王旭, 林雪英, 胡忠贵*

长江大学地球科学学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年4月10日; 录用日期: 2024年5月19日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

数字露头的研究方法主要有激光雷达技术和数字摄影测量技术, 构建的实景三维模型, 可进行剖面量测、岩层岩性分析、岩层走向分析、岩层叠覆情况分析、构造和沉积信息等多种地质分析, 可为重现的虚拟实测(厚度、层/面理和线理等)及定量统计奠定可靠的数据基础, 可为碳酸盐岩岩溶缝洞型储层的预测和油藏开发提供重要的研究思路和依据。通过查阅相关文献, 调研了目前已开展的碳酸盐岩剖面数字研究实例: 四川盆地川东-鄂西三叠系飞仙关组和鄂西利川见天坝剖面长兴组, 塔里木盆地塔中地区良里塔格组和柯坪坝地区肖尔布拉克组等数字露头剖面。开展的研究内容包括: 基于多尺度区域卷积神经网络的露头孔洞自动提取; 基于数字露头表征的岩溶缝洞组构特征和碳酸盐岩储集层三维地质建模; 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及三维地质建模。

关键词

碳酸盐岩, 数字露头, 研究现状, 研究方法

Research Status and Application Examples of Digital Outcrop in Carbonate Rocks

Jiayao Liu, Shiyi Huang, Shuqin Lu, Xu Wang, Xueying Lin, Zhonggui Hu*

School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan Hubei

Received: Apr. 10th, 2024; accepted: May 19th, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

The research methods of digital outcrop mainly include lidar technology and digital photogrammetry technology. The 3D model constructed by the real scene can be used for a variety of geological analysis, such as section measurement, rock lithology analysis, rock strike analysis, rock

*通讯作者。

文章引用: 刘佳瑶, 黄诗怡, 卢书勤, 王旭, 林雪英, 胡忠贵. 碳酸盐岩数字露头研究现状及应用实例[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(5): 647-661. DOI: 10.12677/ag.2024.145060

overlying condition analysis, structure and sedimentary information. It can lay a reliable data foundation for repeated virtual measurement (thickness, bedding/plane bedding and linings, etc.) and quantitative statistics, and provide important research ideas and basis for the prediction and reservoir development of carbonate karst fracture-vuggy reservoirs. By referring to relevant literature, the digital research examples of carbonate profiles have been investigated, including the Feixianguan Formation of Triassic in eastern Sichuan and western Hubei, the Changxing Formation of Jianchangba section in Lichuan, western Hubei, the digital outgrowth profiles of Lianglitage Formation in Tazhong area, Tarim Basin, and Xiao Erbulak Formation in Kepingba area. The research contents include automatic extraction of outcrop holes based on multi-scale regional convolutional neural network; The fabric characteristics of karst fractures and caves based on digital outcrop characterization and 3D geological modeling of carbonate reservoirs; Multi-scale heterogeneity characterization and 3D geological modeling of carbonate reef outcrop based on UAV tilt photography.

Keywords

Carbonate Rocks, Digital Outcrops, Research Status, Research Methods

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

露头是地下储层在地面的真实刻画,对储层露头的调查和解剖是建立地下储层地质模型的有效手段[1][2]。传统的露头研究最常用的方法是现场调查,因此大批地质工作者为了解剖露头,通常带着地质锤、皮尺和放大镜等地质工具在野外进行定性研究。随着油气勘探逐渐向精细化发展,需要对储层露头进行精细的定量研究,而地面激光雷达可快速精确地获取被测物体的三维信息,是三维地理信息获取的重要手段。因此,利用地面激光雷达技术、高精度GPS和高精度数码影像等信息化资料,结合传统的地质研究手段,开展野外储层露头的高精度数字露头表层模型建模研究,建立典型剖面的数字露头表层模型,研究碳酸盐岩储层的展布规律[3]。本文收集整理碳酸盐岩数字露头建模的相关文献,并对其存在的问题和发展趋势进行分析,以便对实践提供参考依据。

2. 数字露头研究方法及研究现状

2.1. 数字露头应用的研究方法

1) 激光雷达技术

激光雷达,简称LIDAR(Light Detection And Ranging,光探测与测距)该词最早出现在1970年一篇关于大气气溶胶研究的论文中[4]。随着技术的进步,LIDAR的测量精度从最初的米级提高到现在的毫米级,目前主要应用于航空、航天及测绘领域,研究人员可以获得大量包含空间方位及强度信息的激光点,即激光点云,可以说LIDAR技术将是继GPS之后在测绘领域的又一重大技术革命[5]。把该技术应用到露头地层成图研究中,并利用计算机实现可视化,就能形成三维数字露头,可以更客观、全面地认识露头揭示的地质信息,进而建立更真实的三维露头地质模型。基于LIDAR技术的三维数字露头构建方法分三步:LIDAR扫描仪数据采集,LIDAR数据处理LIDAR数据解释。

① LIDAR 扫描仪数据采集

地面 LIDAR 扫描仪最佳的扫描对象是垂直的峭壁、峡谷或公路两侧的陡峭岩壁。数字露头表层建模的数据采集主要包括 3 部分：利用地面激光雷达获取用于精确描述露头表层空间信息的三维点云；利用差分 GPS 获取露头层的精确地理坐标信息；利用高分辨率数码相机获取露头层的高精度纹理影像。利用高分辨率数码相机采集露头照片时，尽量在激光扫描站点处并正对露头采集，相邻影像之间保持 15% 以上的重叠区(图 1) [2]。

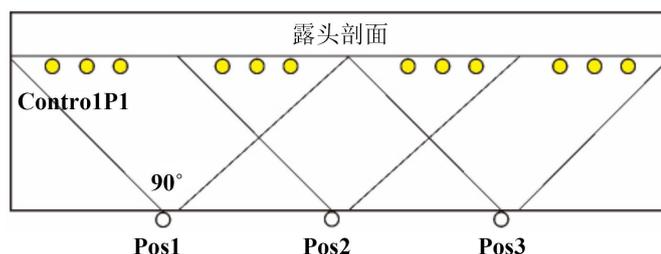


Figure 1. Schematic diagram of data acquisition scheme based on ground Lidar

图 1. 地面激光雷达数据采集方案示意图

② LIDAR 数据处理

LIDAR 数据采集完成后，先利用 Parser 软件对原始数据进行解析就能够看到激光点云图像，把这些图像拼接在一起即可形成一个完整的三维露头面[6]，然后可以在 PolyWorks 软件中，应用最优化算法完成对激光点云图像进行最优化处理，使拼接误差达到最小，从而构成完美的三维数字露头面。

③ LIDAR 数据解释

完成 LIDAR 数据处理后，就可以在三维空间中进行露头面解释，即在三维激光点云图中进行地层追踪、解释，并标记采样位置、特殊沉积与构造等信息，这一过程也是在 PolyWorks 软件中进行。加载完所有的剖面信息后，一个完整的三维数字露头就构建完成了[7]。

2) 数字摄影技术

数字摄影测量技术采用 SFM (Structure From Motion) 算法，根据不同角度拍摄的同一场景的多幅图像来重建三维物体，从而得到可视化三维数字模型，主要包括基于无人机倾斜摄影的数字露头和无人机多点位航拍高分辨率三维数字露头。

① 基于无人机倾斜摄影的数字露头

倾斜摄影技术是国际摄影测量领域近十几年发展起来的一项高新技术，该技术通过从 1 个垂直、4 个倾斜、5 个不同的视角同步采集影像，获取到丰富的地面目标顶面及侧视的高分辨率纹理。它不仅能够真实地反映地物情况，高精度地获取物方纹理信息，还可通过先进的定位、融合、建模等技术，生成真实的三维地物模型。

基于无人机倾斜摄影的数字露头实景三维模型构建的技术路线如图 2 所示，实际工作流程主要分为两个部分：地质露头倾斜摄影数据采集和基于倾斜摄影数据的实景三维模型构建。结合地质工作实际情况，将无人机野外数据采集方式分为航线自动飞行数据采集和人工手动飞行采集两类。航线自动飞行数据采集方式所获取数据质量高、影像重叠度均一。人工手动飞行数据采集方式所获取数据分辨率通常高于自动采集方式，且获取较为灵活。实景三维模型构建主要依赖于倾斜摄影模型建立原理进行三维重建。主要有以下 6 个步骤：区域整体平差、空中三角测量、多视角影像密集匹配、三维 TIN 格网构建、白体三维模型创建、纹理映射，实际工作流程如图 3 所示[8]。

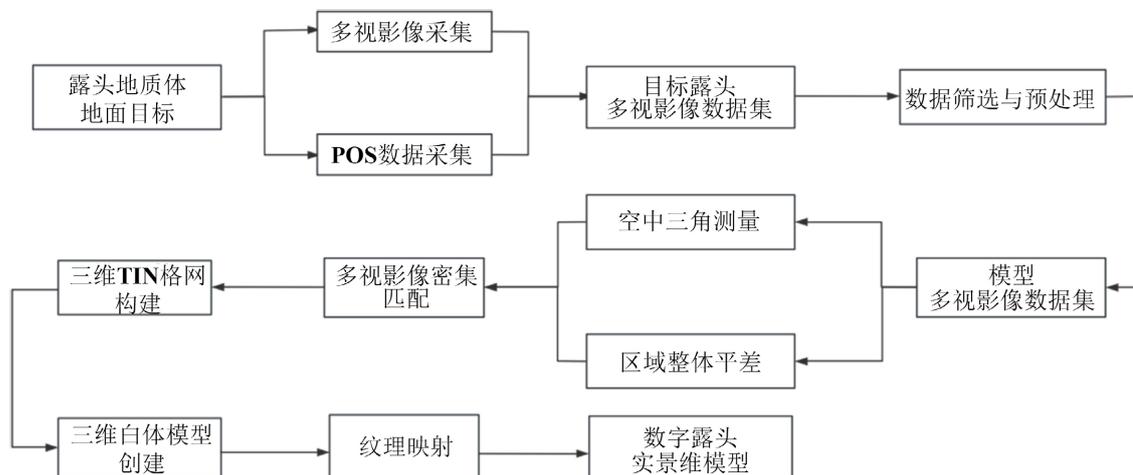


Figure 2. Technical route for constructing digital outcrop real scene 3D model based on drone tilt photography [8]

图 2. 基于无人机倾斜摄影的数字露头实景三维模型构建技术路线[8]

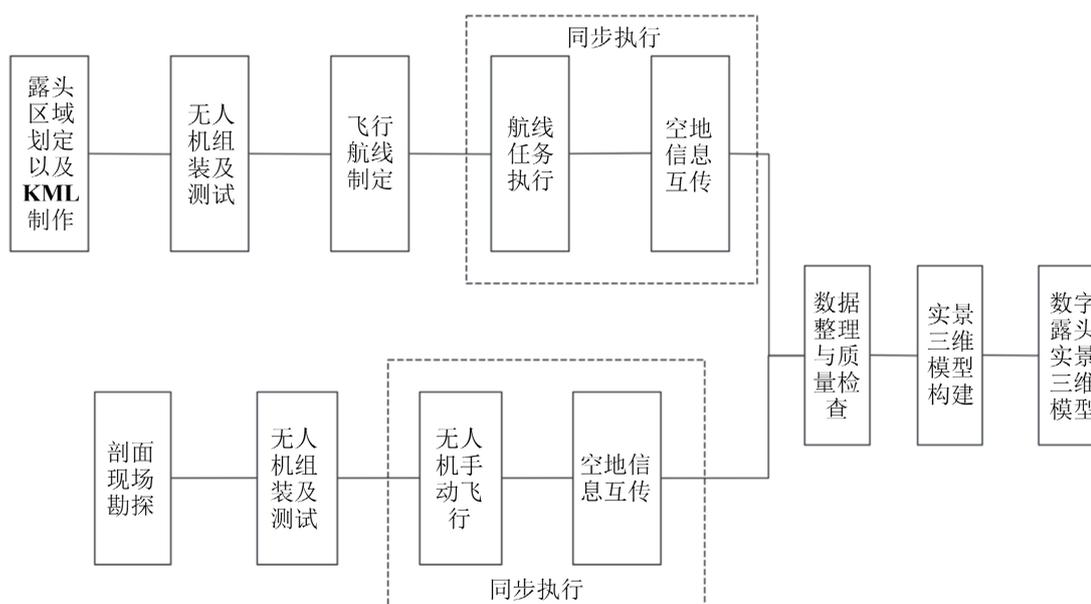


Figure 3. The workflow of constructing digital outcrop real-scene 3D model based on drone tilt photography [8]

图 3. 基于无人机倾斜摄影的数字露头实景三维模型构建工作流程[8]

② 无人机多点位航拍高分辨率三维数字露头

野外露头形态各异，为保证三维数字露头模型的完整性和实现厘米级分辨率三维数字露头建模，根据野外露头几何特征和无人机可灵活规划调整航线的特点，建立不同露头几何形态与无人机航线规划和多点位航拍的空间关系，有效提高露头三维数据的采集效率。基于无人机的三维数字露头建模主体由数据采集、现场预处理、数据处理和成果输出 4 个阶段组成(图 4) [9]。

二维图像数据的采集是三维数字露头建模中及其关键的环节，由于 SfM 算法允许有选择的使用图像数据，所以在计算机配置有保障的条件下，更多的数据量更有利于成功实现三维露头模型高精度的重建。预处理环节主要是完成图片的初步匹配，快速检查图像数据是否能预处理出一个低精度的数字模型。数据预处理无误后开始建立高精度三维数字模型。建模软件基本遵循数据导入、识别特征点、生成点云及纹理、成果输出原则。成果输出通过建模软件运行，实现露头二维图片数据的三维重建，生成数字地表

模型(DSM)和正射影像图。

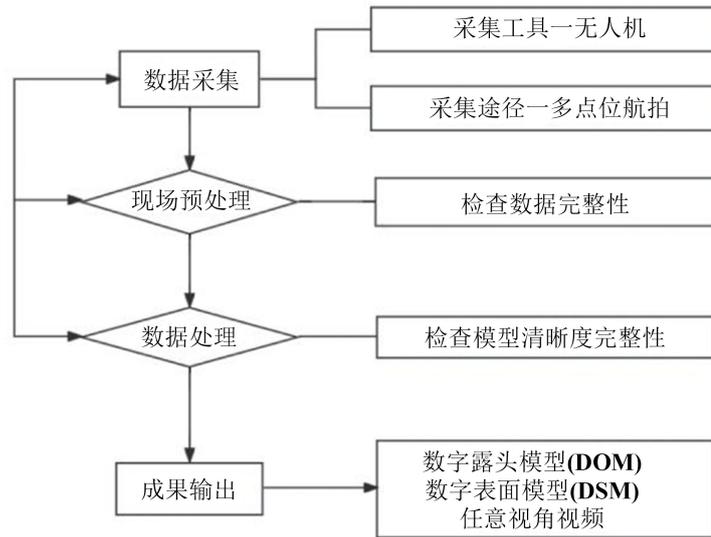


Figure 4. 3D digital outcrop modeling session [9]
图 4. 三维数字露头建模环节[9]

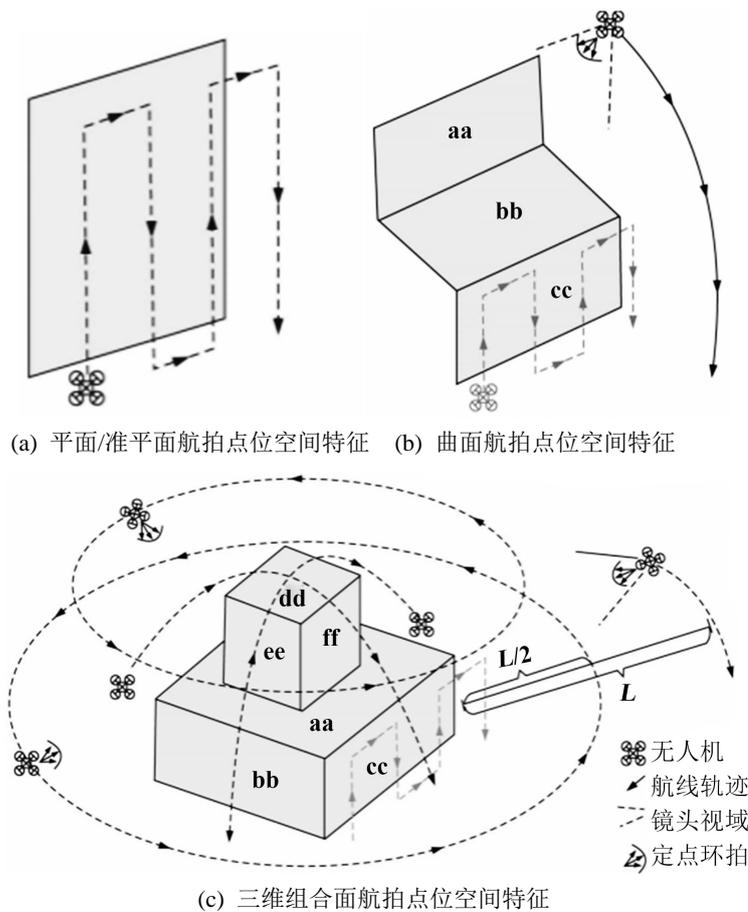


Figure 5. Spatial relationship between outcrop geometric features and aerial point locations [9]
图 5. 露头几何特征与航拍点位空间关系[9]

野外地质露头二维数据采集质量制约着模型成品的质量。采用均一的航线采集数据容易造成数据缺失导致模型空洞。因此建立露头几何特征与航线特征的空间关系,以提高二维数据采集质量。野外地质露头常见几何形态主要分为平面/准平面、曲面和三维组合面 3 大类,分别对应排线直拍、环飞定点环拍结合排线直拍、不同纵深环飞定点环拍结合排线直拍 3 种航线规划方式,进而实现完整清晰的数据采集,通过对数据采集环节的精密规划,降低了模型对软件的依赖程度(图 5) [9]。

2.2. 数字露头研究现状

随着现代信息技术和摄影测量技术的发展进步,野外露头表征的方法已经由野外实地考察的传统方式逐渐被一些新的技术所丰富。数字露头概念早期是指通过遥感影像解译分析露头剖面岩石元素成份的差异。随着技术方法的进步,数字露头技术的研究对象、内容不断变化,其研究历程可分为三个阶段:

① 1983 年~1999 年:以研究野外地质剖面遥感图像解译分析研究为主;

② 2000 年~2003 年:利用可视化软件技术,利用数字高程模型(DEM)、地理信息系统(GIS)以及高精度灰度照片解译等手段,进行露头剖面裂缝、断裂划分与识别,并开展高精度定量分析沉积物变化规律的相关研究;

③ 2004 年以来:主要利用三维地面激光雷达精确构建露头模型体,并叠加遥感、图像、钻井地震等信息,开展露头沉积储层与构造特征分析。2017 年,无人机倾斜摄影测量技术开始用于数字露头的构建,开展露头三维沉积体形态、结构与沉积充填形态的精细刻画,测量相关沉积体参数(沉积体厚度、宽度、面积)、露头储集体属性解译、构建三维储层模型、识别量化露头剖面断裂、裂缝空间展布特征等方面研究。

总之,数字露头技术方法就是在已建立的实际地表模型体上,加载所有涵盖露头地质剖面数字化采集的地质信息,最终对综合数字露头模型开展研究与分析。相对于沉积储层领域的研究,就是建立三维数字露头模型,进而模拟储层分布,具有数据采集快、数据类型多、数据可视化强、数据准确与分辨率高的特点,是客观准确开展露头地质研究的新方法。

利用测绘的方法获取露头三维信息建立三维露头模型实现露头的数字化,在国外已经广泛使用,但在国内仍处于起步阶段。通常用地面激光雷达和摄影测量技术进行露头的数字化。

1) 地面激光雷达技术

2013 年朱如凯等人利用地面激光雷达扫描了 3 km 长度的地质露头,在地面激光雷达采集露头点云数据的同时利用数码相机获取露头的影像数据,相机采集的影像与点云进行空间位置配准用于为点云赋予颜色,建立露头的三维模型[10]。2015 年郑剑锋等人利用地面激光雷达扫描露头,获得了礁滩复合体的三维激光点云数据,并利用它来进行地层追踪和解释地层[7]。2015 年 Battista Matasci 等针对因使用传统的工具定位和测量垂直露头面中的地质特征和参数的低效性,难以获取垂直露头有效的地质特征参数和信息,造成了考察区中存在盲点的问题,提出利用地面激光雷达的激光强度值对垂直露头面岩石类型和褶皱结构进行了详细的远程识别,结果表明可提供良好岩石类型分类,生成精确的三维岩性地图,表明了利用激光强度建立地质数字露头的良好潜力[11]。

2) 摄影测量技术

高分辨率的数据收集成本高,在地质考察中许多情况下,需要更加便捷、成本更低的测量平台进行数据的获取工作,随着计算机和摄影测量技术的进步,使得利用影像数据得到数字露头成为可能。2012 年 M J Westoby 等基于 SFM (Structure From Motion) 技术对利用消费级数码相机获取到的露头区影像数据构建数字露头,证明了该方法是一种廉价、有效且灵活的得到露头三维模型的一种方法[12]。2013 年 Santiago Martin 等利用近景摄影测量技术进行地质现象解释,首先对山口、悬崖和山坡的地质露头剖面上布设控制点,然后拍摄影像数据,最后基于露头区域影像立体像对进行地质解释,该方法能够在受任

何构造体制影响的区域和不同的变形条件下产生几何形状正确的地质剖面[13]。2015年 Kristian Svennevig 等利用直升机作为平台对露头区域拍摄倾斜影像, 利用倾斜摄影测量技术建立露头区三维地质模型得到数字化露头, 但是直升机平台增加了数据获取的成本[14]。

随着无人机技术的成熟发展, 使得影像数据获取的成本相对于有人机更低。2017年, 印森林等人利用多旋翼无人机搭载五镜头倾斜相机获取露头影像数据, 基于倾斜摄影测量技术建立露头三维模型。通过验证模型的可用性和有效性, 无人机倾斜摄影技术用于数字露头的构建是一种可靠的技术[15]。

近 10 年来, 国外已形成了一系列基于数字露头的地质建模方法, 在油气开发领域收获显著成效。国外许多地质学家基于摄影三维激光扫描建模技术建立地质露头模型, 并用于地质研究(Sturzenegger 和 Stead, 2009; Bistacchi 等, 2011、2013; Favalli 等, 2012; Vollgger 和 Cruden, 2016), 特别是广泛应用于地质构造和构造要素(断裂和褶皱)的表征(McCaffrey 等, 2008; Bemis 等人, 2014; Vollgger 和 Cruden, 2016; Corradetti 等, 2017)。Qiao 等结合利用激光雷达、RTK-GPS、探地雷达等对露头壁进行数字化, 从激光扫描得到的点云数据中提取了基于实测剖面 and 样本的岩相、孔隙度、渗透率、声速, 并通过建模软件建立四川盆地西北部乌东梁露头三叠系飞仙关组鲕粒储层数字露头模型[16], 为类似地质条件下地下储层的地震资料解释和储层预测提供了更可靠的依据。激光扫描技术不仅应用到了地层的演化和发育情况的研究中, 也应用到了特定岩性地区的地质勘探中。Numair 等利用激光扫描技术获取点云数据, 并结合对婆罗洲沙巴山打根组的实地调查, 构建了基于真实砂岩相的数字露头模型, 对其表征进行描述, 探究了此地砂岩的发展情况[17]。Villarreal 等也在岩石上进行激光扫描, 获得了其表面是裸露的砂岩特征, 显示出垂直陡坡和共轭节理系统[18]。在沉积学研究中, 激光扫描技术也发挥着重要的作用。Mutasim 等对沙特阿拉伯中部 Khuff 组早三叠世上 Khartam 段进行了数字露头建模, 并提出了沉积学集成工作流程[19]。Patricia 等利用激光扫描技术建立了蒙塔尼亚桥数字露头模型, 对其河道沉积特征进行了研究, 并进行了流动模拟探索河流的发育情况[20]。2017年 Adam J Cawood 等人比较了利用无人机采集得到的数字露头 and 地面激光雷达采集得到的数字露头精度, 结果表明虽然基于 LiDAR 建立的露头表面结构精度高于影像数据建立的露头表面结构, 但是无人机可提供更大范围的影像数据, 更多的数据可提供更多的地质参数, 从而能更好的对地质现象进行解释预测[21]。

目前国内类似的研究尚处于开始阶段, 其应用实例也多集中于工程测绘等方面, 地学方面直接应用实例较为少见。诸多国内学者对于三维地质建模的研究, 始于 20 世纪 80 年代末, EarthVision 软件的引进, 标志着我国对三维地质建模研究的开始。随后, 在三维地质建模软件开发方面, 很多的学者在不同领域对其进行了研究, 提出了许多针对单位地下空间描述的建模方法。由于研究角度存在不同, 不同领域的三维地质建模技术其侧重点也存在较大差异, 因此对于不同的领域其建模方法也多种多样。三维地质建模在水利方面、边坡工程方面和工程地质方面等领域均取得了显著的成果。2015年, 刘学锋等将激光雷达技术应用到露头地层成图研究中, 并利用计算机技术实现地层图像可视化, 形成了鄂尔多斯盆地上三叠统延长组杨家沟剖面数字露头[22]。2015年, 曾齐红等运用地面激光雷达、高精度差分 GPS 和高精度数码影像资料, 对野外露头数据进行采集, 建立激光雷达点云数据拼接和坐标转换处理流程, 提出基于最佳趋势面的三角网建模方法和数字露头表层模型优化方法。并利用该方法建立了鄂尔多斯盆地延长组谭家河露头的数字露头表层模型[2]。2017年, 曾庆鲁等利用三维激光扫描技术对露头进行全方位全覆盖扫描和三维数据采集, 并与人工实测地质信息和分析化验资料相结合, 借助计算机模拟技术建立三维数字化地质模型, 有效的揭示了扇三角洲前缘砂体构型特征[23]。

上述学者的研究, 极大地丰富了野外露头观测方法, 解决了传统露头考察过程中的诸多问题, 但目前的数字露头考察技术依然存在一些问题和亟待面临的挑战。如① 露头考察的全面性、整体性问题。由于地质露头是地质现象的总表现, 其内部蕴含着大量沉积环境变化、构造运动、储层物性等多方面的地

质信息，然而目前的考察技术多局限于对某一关键方面进行考察，建立的数字露头模型包含的地质信息有限，不利于数据间的补充与共享。② 露头定量数据缺乏的问题。当前数字露头的研究多关注于三维图像建模和露头内部砂体层级的定量化分析，对于内部岩相级别的定量数据信息较少涉及，且受研究层次和关注焦点的限制，不同露头定量数据之间存在统计标准不统一，数据综合分析难度大的问题。③ 数据分析手段单一的问题。不同学者对于露头的研究均带有较强的目的性，往往依据考察目的进行数据采集和分析工作，数据分析方法和解决的问题较为单一，难以满足多方位、多露头的综合分析对比。

综合发现地面激光雷达虽然能得到露头的三维模型，解决了一定的问题，但是并不适合大面积、高效率的获取数字露头，LiDAR 设备在崖上、沟壑等复杂地形架设不便，仍需用相机拍摄影像以添加纹理信息。无人机由于其自身机动灵活且易于运输，成本效率高、能克服空间限制获取露头的图像数据，随着各项性能的提高，消费级无人机已经具备捕捉高分辨率图像的能力，逐渐成为三维数字露头建模的主流方式，基于无人机摄影构建数字露头广泛应用于各项地质调查和专业研究中[24]。

3. 四川盆地碳酸盐岩地层数字露头应用

3.1. 川东—鄂西三叠系飞仙关组数字露头

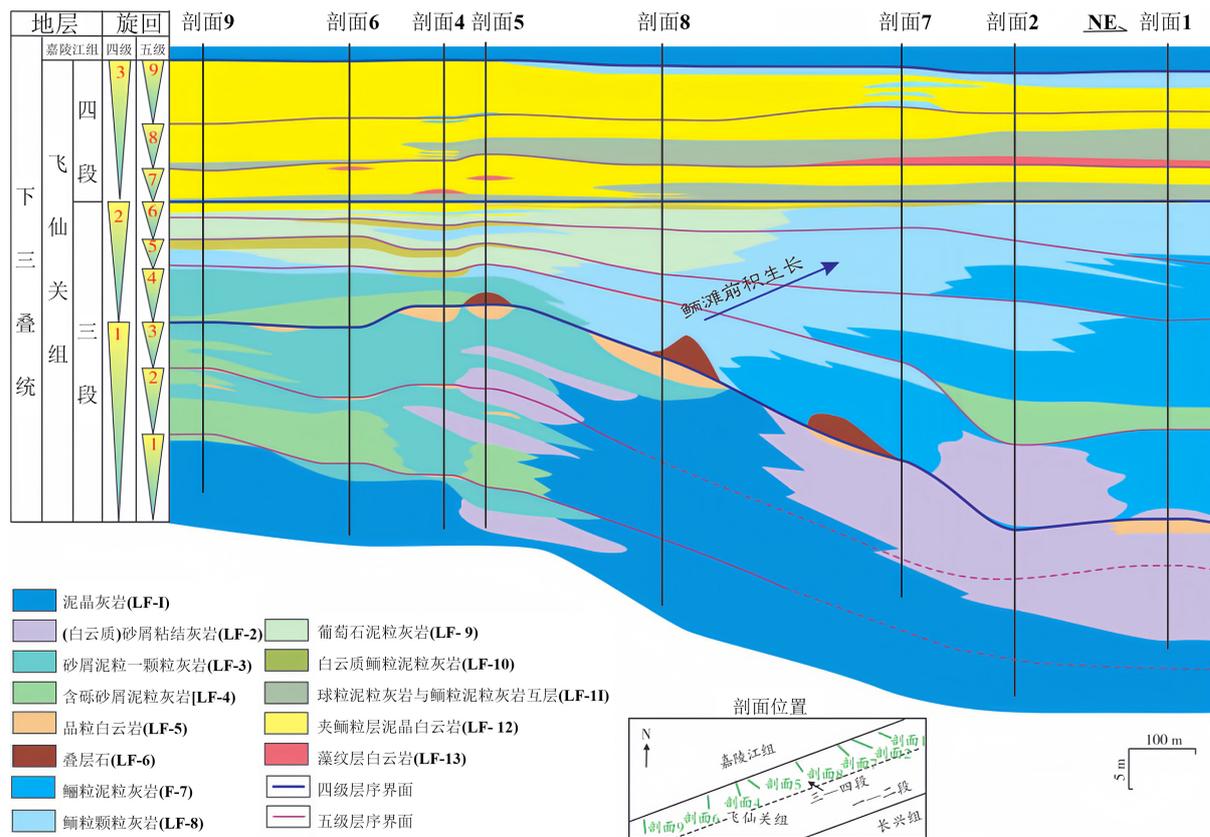


Figure 6. Two-dimensional reservoir geological model of the Fei Xian Guan Group Section III-IV outcrop of the Triassic System in Qiyue Mountain, East Sichuan-West Hubei [25]

图 6. 川东 - 鄂西齐岳山三叠系飞仙关组三段 - 四段露头二维储层地质模型[25]

1) 沉积背景

川东 - 鄂西地区飞仙关组为缓坡颗粒滩沉积体系。通过剖面实测及薄片观察，识别出 13 种岩相类型，及具有 3 种不同微相(潮下砂屑滩、潮下 - 潮间鲕粒滩、潮坪相)叠置特征的高频旋回；识别出 4 类储层，

即(白云质)砂屑粘结灰岩储层、晶粒白云岩储层、(含膏)白云质鲕粒灰岩储层和泥晶白云岩储层。潮下(白云质)砂屑粘结灰岩储层位于斜坡部位,白云石化程度越高,孔渗条件越好。晶粒白云岩储层、(含膏)白云质鲕粒灰岩储层和泥晶白云岩储层,发育于高频旋回上部的潮坪相带。潮上泥晶白云岩储层和潮间上部的(含膏)白云质鲕粒灰岩储层,发育在台缘鲕滩后侧,而晶粒白云岩和潮下(白云质)砂屑粘结灰岩储层则发育在台缘鲕滩下方,由此构成上下2个储层组合,并随台缘迁移呈前积叠置发育。据此,建立了飞仙关组三段-四段露头二维储层地质模型(图6) [25]。

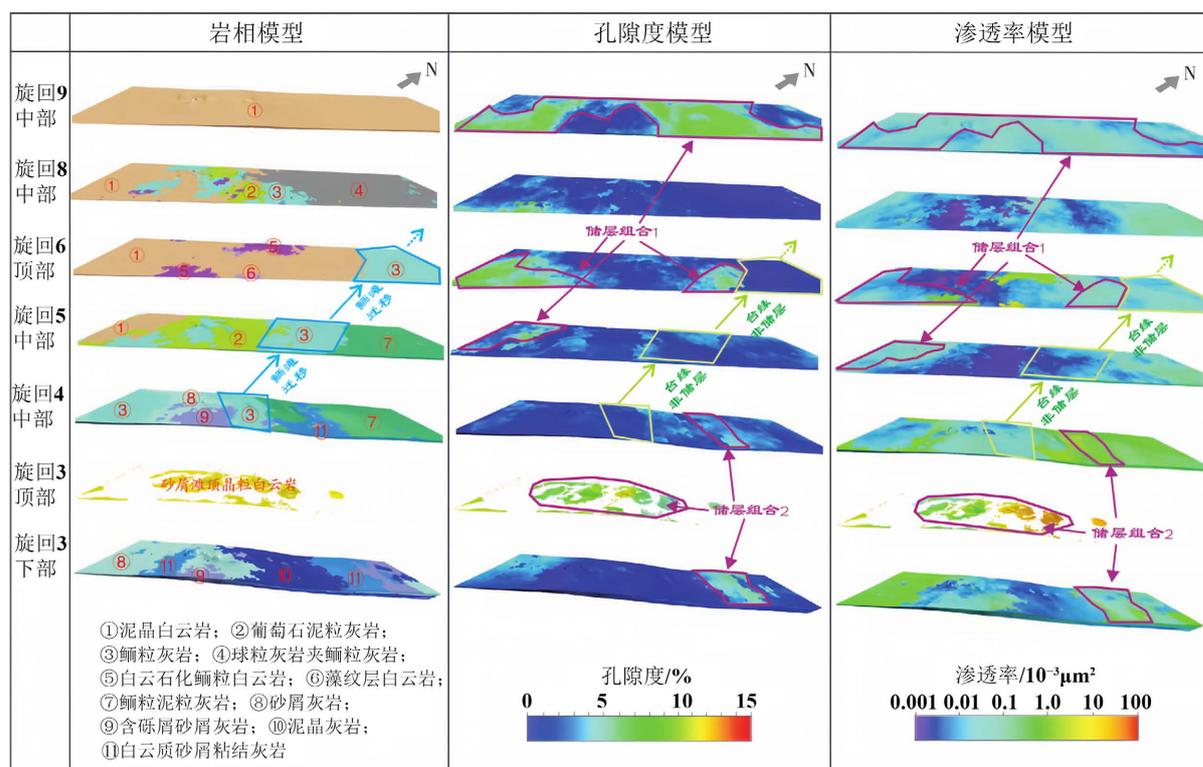


Figure 7. Time slices of the 3D reservoir geological model of the Fei Xian Guan Formation Section III-IV in the modeling area of Qiyue Mountain, East Sichuan-West Hubei [25]

图 7. 川东-鄂西齐岳山建模区飞仙关组三段-四段三维储层地质模型时间切片 [25]

2) 研究方法

由于露头平坦且地层倾角大,采用动态 GPS (RTK-GPS)进行露头数字化,对露头实测剖面、采样点、岩相界面、尖灭点等地质信息进行空间定位(数字化),共采集 2040 个数据点。应用 Petrel 软件,把 RTK-GPS 获取的含有空间信息的采样点和岩相界面点构成虚拟井,把 RTK-GPS 解释得到的层序界面和岩相界面作为不同级别的层面。根据不同级别层面开展确定性与随机模拟相结合的地质建模,把剖面追踪得到的岩相尺度、接触关系、发育频率等作为控制参数,开展储层模拟。基于前述对岩相和储层特征的认识,利用地表起伏揭示的空间信息,通过确定性与随机模拟结合,在建立岩相模型的基础上,结合白云石含量模型的约束,建立孔隙度和渗透率模型,构成三维储层地质模型,更清晰地展现各岩相及储层的发育分布、尺度规模、接触关系及演化规律(图7) [25]。

3) 研究成果

上述地质模型反映储层发育具有 3 个方面的规律: ① 储层发育具有明显的相控性,礁滩相仅 4 种岩相可构成储层,且分别发育于台缘滩侧后方和前下方; ② 层序界面控制储层的形成和发育,储层主要发

育于四级层序界面之下，在潮坪相环境，五级层序的控制作用明显；③ 虽然白云石化作用对储层形成不起决定性作用，但是目前的表现是储层发育与白云石化作用关系密切。因此，储层模拟应在层序格架下，在岩相和白云石化程度控制的基础上开展；相应地，储层预测应在层序地层格架下，按滩体→白云石化范围的思路展开。

3.2. 鄂西利川见天坝长兴组数字露头

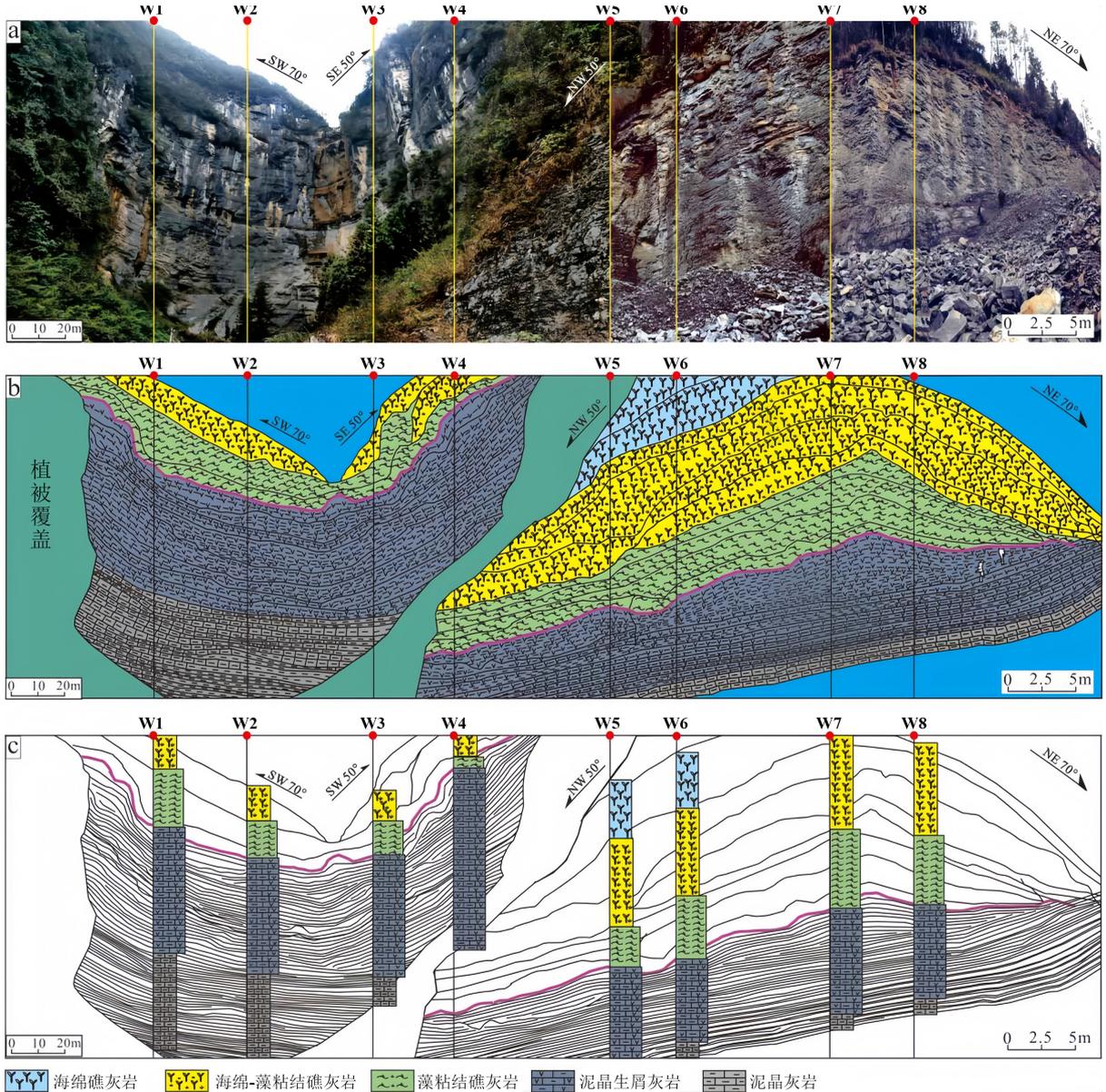


Figure 8. The typical outcrop and its schematic diagram of architecture geological model of Jiantiancun section, Lichuan City, Hubei Province [27]. (a) Realistic picture of shooting in field; (b) Artificial realism picture; (c) Schematic diagram of configurational geological model

图 8. 湖北省利川市见天村典型露头区剖面及其构型地质模式图[27]；(a) 野外拍摄实景图；(b) 写实图；(c) 构型地质模式图

1) 研究背景

见天坝长兴组剖面位于湖北省西部(鄂西)恩施州利川市,距团堡镇以北约 30 km,柏杨坝镇以东方向约 25 km。晚二叠世时自西向东,从开江—梁平海槽发育的开阔台地相向万州过渡为碳酸盐岩台地前缘斜坡,至利川碳酸盐岩台地相,到见天村露头区的碳酸盐岩台地边缘斜坡直至鄂西裂陷槽开阔台地沉积。鄂西利川市柏杨坝镇见天村露头剖面长兴组系列露头发育完整,地层厚度约为 250 m,与下伏龙潭组以及上覆下三叠统飞仙关组均为整合接触[26]。

2) 研究方法

以无人机倾斜摄影的先进技术结合传统人工考察为基础来开展工作,利用无人机搭载倾斜摄影相机针对野外露头采集获取了 3 个露头区的高清像(照)片数据与 POS (Positioning and Orientating System, 定位定向系统)数据,对野外采集的数据采用 Context Capture 软件系统进行了解释与处理[15] [27],构建了摄影图像与经纬度坐标相对应的野外露头三维数字化模型,开展了生物礁有利储层的分析与预测(图 8) [27]。

3) 研究成果

碳酸盐岩生物礁微观非均质性对储层的影响非常大,生物礁受海平面升降和后期成岩改造的影响,体现有利储层分布具有明显规律性。储集层岩性主要有晶粒白云岩、骨架礁灰岩、藻黏结岩和障积礁灰岩等类型。其中,晶粒白云岩储层主要分布在礁顶,晶间溶孔和晶间孔为生物礁储层岩性中储层物性最好的 2 类储集空间;骨架礁灰岩储层则分布在礁体中上部,主要储集空间为溶孔孔隙和生物体腔孔(如串管海绵等),其储层物性在生物礁各类储集岩岩性中整体较好(图 8)。而藻黏结礁灰岩形成的储集层则主要分布在生物礁体下部,主要储集空间为溶孔、黏结格架孔及重结晶作用后形成的晶间孔,其整体属于物性相对最差储层。

4. 塔里木盆地碳酸盐岩地层数字露头应用

4.1. 塔中地区良里塔格组数字露头

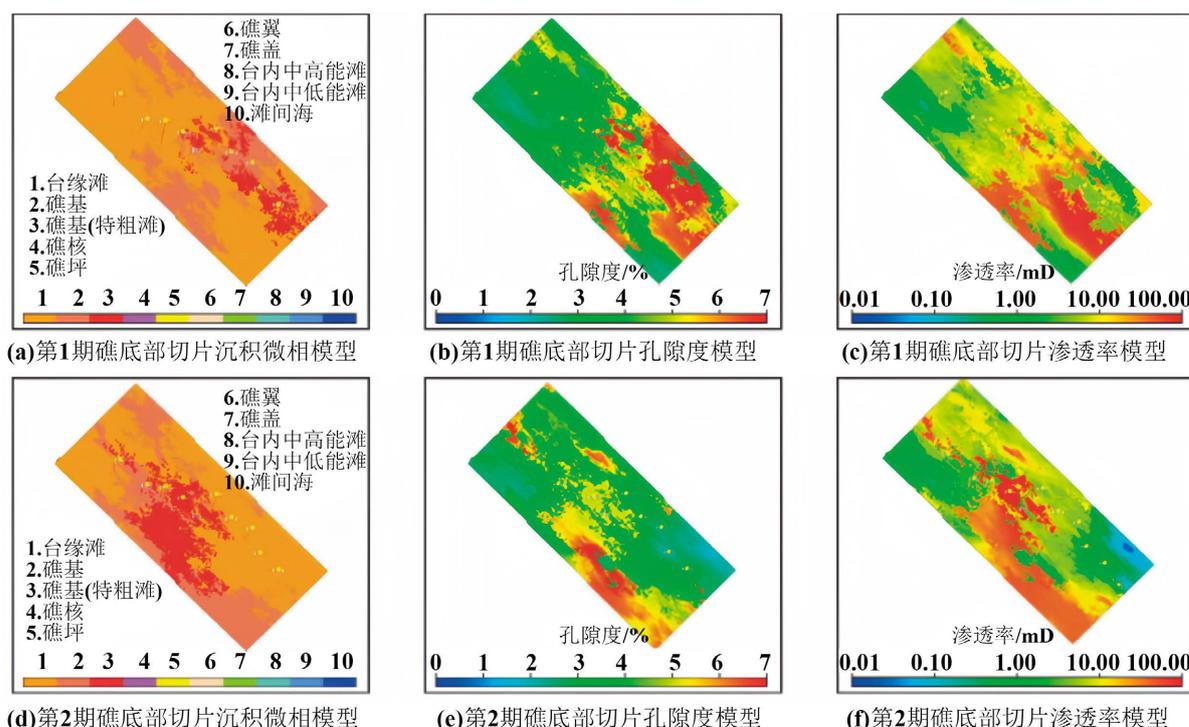


Figure 9. The model slices of No. 8 reef-shoal body in Yijianfang outcrop of Tarim Basin [5]

图 9. 塔里木盆地 - 间房剖面礁滩复合体三维地质模型切片[5]

1) 研究背景

塔里木盆地塔中地区良里塔格组礁滩复合体储层已进入开发阶段，需要精细刻画其储层在三维空间中的变化特征，而巴楚地区一间房剖面一间房组发育典型的礁滩复合体，储层的发育受沉积相控制，因此二者具有一定的可类比性[5]。

2) 研究方法

以该露头的 8 号礁滩复合体为研究对象，并以应用 LIDAR 技术和传统地质描述方法建立的数字露头为基础，建立基于数字露头的三维地质模型，以期为塔中地区良里塔格组礁滩复合体储层的油气勘探与开发提供依据。当建立好 8 号礁滩复合体的沉积微相模型后，就可以建立沉积微相控制下的孔隙度与渗透率模型了。对所有沉积微相单元模拟完成后，就得到了 8 号礁滩复合体的孔隙度与渗透率模型。

3) 研究成果

模型切片(图 9(b)~(f))均直观地表现了平面上不同位置储层物性的差异性，而三维孔隙度与渗透率模型则更直观、定量地表现了储层在三维空间的发育规律。基于数字露头的三维地质模型是根据真实地层建立的，也可适用于井下，为井下礁滩复合体储层的形态标定、层序地层划分、数值模拟方法及参数选取等提供依据。

4.2. 柯坪坝地区肖尔布拉克组数字露头

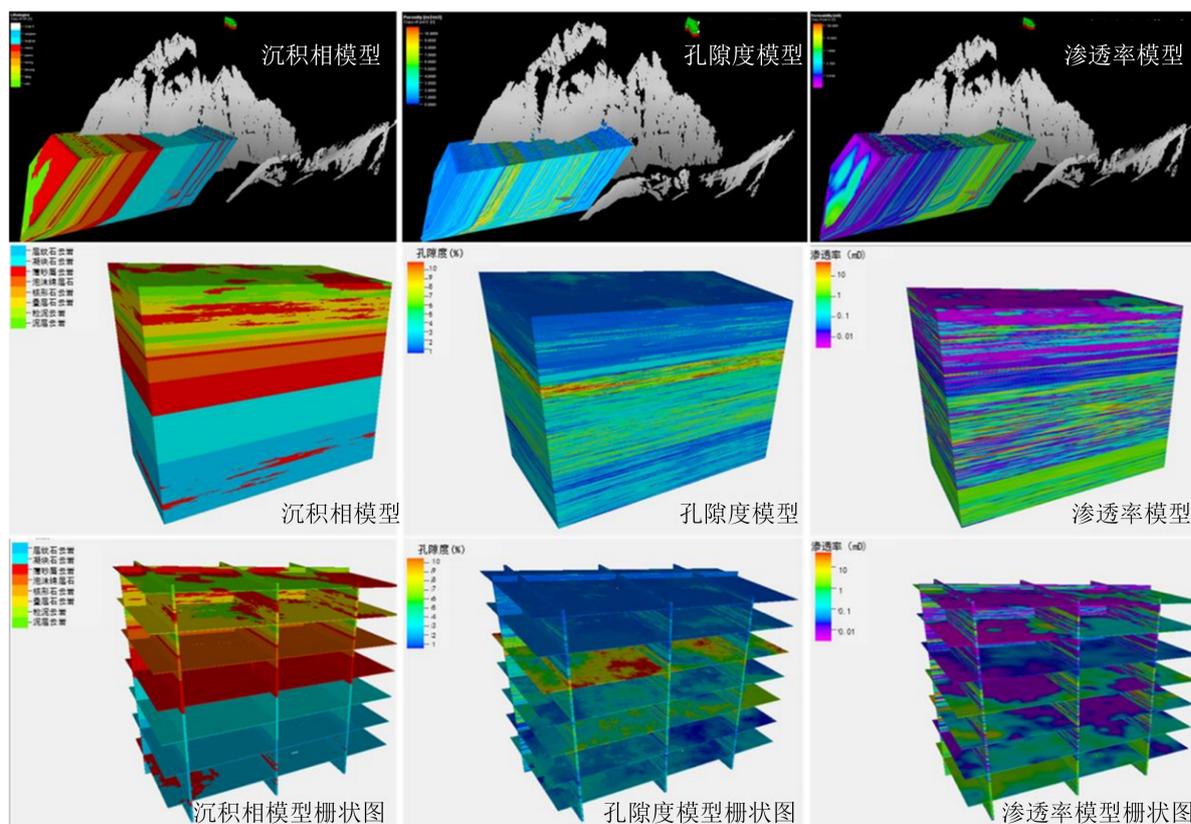


Figure 10. Three-dimensional geological model of Xiaerbulak Formation in Shaiirike section [28]

图 10. 什艾日克剖面肖尔布拉克组三维地质模型[28]

1) 研究背景

肖尔布拉克组储层呈“中上好下差”的分布特征，为了更好的表述肖尔布拉克组这一垂向特征的分布

规律,以什艾日克剖面为例,建立数字露头的地质模型,能够真实的反应肖尔布拉克组垂向上的岩相、储层物性变化[28]。

2) 研究方法

将形成的什艾日克剖面数字露头中的采样点及三维地层线加载到 Petrel 软件中,从而对该剖面进行三维地质建模。地层单元结构模型建立好后,以横向 10 m、垂向 0.1 m 的步长进行网格化,然后按照相控储层的思路,建立三维沉积微相模型,继而在每个相单元内进行孔隙度、渗透率模拟,建立孔隙度模型和渗透率模型(图 10),此该模型反映能清晰反映肖尔布拉克组垂向上的岩相、物性变化。

3) 研究成果

三维沉积相模型清晰刻画了肖尔布拉克组各沉积微相在垂向上的展布规律,丘滩体主要分布于中、上段,具有成层性好的特征。三维物性模型刻画出肖尔布拉克组总体发育肖上 1 亚段的丘滩相和肖下 3 亚段的微生物丘相两套储层,有效储层成层性分布,相同岩相段物性表现出一定的非均质性和旋回性。三维地质模型栅状图更直观地展示同一地层单元内沉积微相总体稳定展布,物性在平面上总体具有变化相对较小、非均质性弱的特征。

4. 应用实例总结

1) 无人机倾斜摄影处理后,数字模型具有与图像信息对应的三维坐标,可精准定位任意点坐标和测量地质体规模。依据采集信息精度建立的米级别的见天村宏观模型、分米级别的见天村陡崖剖面和厘米级别的采石场剖面等 3 个模型,为多尺度生物礁非均质性研究奠定了数据基础。无机倾斜摄影技术与传统露头研究方法相结合不仅可以定量表征不同尺度生物礁露头非均质性,而且对指导生物礁型气藏的勘探开发意义重大。

2) 在 GOCAD 软件中,根据三维数字露头的地质信息,以相控储层建模的思路建立了三维沉积微相模型、孔隙度模型和渗透率模型,其清晰地展示了礁滩复合体的沉积微相、孔隙度和渗透率在三维空间中的变化情况。该模型可运用于井下,为塔中地区良里塔格组礁滩复合体储层的勘探与开发提供依据。

3) 建立单剖面数字露头的地质模型,能够较好的反映肖尔布拉克组储层的层位性与相控性特征,储层纵向上具有中上部好、下部差的特征。并建立了柯坪地区肖尔布拉克组白云岩储层横向分布模式,中缓坡的微生物岩储层和滩相储层是肖尔布拉克组的主体储层,研究区东部有效储层厚度大于西部。

5. 碳酸盐岩数字露头建模存在问题和发展趋势

5.1 碳酸盐岩数字露头建模存在问题

1) 与常规储层不同,碳酸盐岩溶洞型储层是一种由古岩溶作用形成的特殊储层,其发育特征复杂,非均质性极强,碎屑岩储层建模中较为成熟的方法并不适用于该类储层。溶洞型储集体建模中的几个关键问题有:以溶洞型储集体成因特征为前提实现地质约束,考虑建模软硬数据的相对性,进行多类多尺度数据整合以及较完善的溶洞型储集体形态模拟方法;对溶洞型储集体建模研究中亟待发展的问题进行了展望,指出表征溶洞型储集体复杂形态、配置关系及内部充填特征是下一步的研究方向;认为多点地质统计学方法在表征溶洞型储集体复杂形态方面是可行的,根据溶洞型储集体充填程度及充填物类型进行属性表征有利于建立更准确的地质模型。

2) 建模露头筛选和露头地质研究在建模过程中至关重要。所筛选露头的出露条件决定最终模型的效果,而所筛选的露头与地下储集层的相似性直接决定最终模型可用性。储集层建模以地质认识为出发点,通过数学方法实现,因此前期的露头地质研究决定最终模型的效果和合理性,以及能否解决碳酸盐岩地下储集层研究存在的问题。

3) 虽然前人对四川盆地灯影组通过不同的方法从不同的方面做过详尽、全面的研究,并且在川中高磨地区、川西南威远地区以及资阳地区的天然气勘探获得了巨大突破,但灯影组的勘探总体依然处于较低效的勘探阶段,四川盆地优质储层的分布发育和不同构造带上储层特征差异的具体情况仍不清晰,存在问题如下:对于震旦系灯影组成岩作用的认识还存在争议;对沉积期岩溶和表生期岩的相关性认识不够深入;对震旦系灯影组储层流体充注期次以及储层成岩认识不够深入,并存在不小的争议;对四川盆地及北缘米仓山各个地区不同、不同构造部位或不同深度的灯影组储层特征的差异性对比研究少,而致使不能清楚的揭示灯影组储层的主控因素[29]。

5.2. 碳酸盐岩数字露头建模发展趋势

近年来,随着倾斜摄影技术的快速发展和三维建模技术的成熟,地质勘探等行业越来越多地采用三维数据模型代替以往的传统研究方式。LIDAR 技术是一种改进现有野外工作的非常有用的方法,它量化了地质工程师们所观察的结果。通过对露头进行扫描、采集激光点云数据,并进行处理和解释,所得到的三维数字露头真实地保留了实际露头的地质信息,使地质工程师们在室内描述和分析露头成为可能。数字露头的建立,不仅有利于地质调查质量的提高,而且研究人员可以充分利用数字露头的可反复性,进行多次调查研究[30]。

数字露头大大节约了调查成本,野外实地考察实习,对经费要求较高,多用于交通,食宿以及地质设备的购买与损耗。数字露头的应用不仅可以减少野外考察的次数,并且大大降低了地质调查的相关成本,同时,研究人员可以通过反复学习研究,对技术难点进行深入调研,逐渐发现了数字露头在地质勘探领域的实践过程中具有较强的应用价值,逐步推广应用国内各地矿单位进行实践,将大大改善地质勘探与开发应用环境,提高相关效率和质量。

基金项目

长江大学 2022 年大学生创新创业训练计划项目“四川盆地西北部震旦系灯影组剖面数字露头模型及对比分析”(项目编号 Yz2022014)。

参考文献

- [1] Bellian, J.A., Kerans, C. and Jennette, D.C. (2005) Digital Outcrop Models: Applications of Terrestrial Scanning Lidar Technology in Stratigraphic Modeling. *Journal of Sedimentary Research*, **75**, 166-176. <https://doi.org/10.2110/jsr.2005.013>
- [2] 曾齐红, 马乙云, 谢兴, 张友焱, 叶勇, 刘松. 鄂尔多斯盆地延长组数字露头表层建模方法研究[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 25-29.
- [3] 乔占峰, 沈安江, 郑剑锋, 常少英, 陈娅娜. 基于数字露头模型的碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 328-337.
- [4] Schuster, B.G. (1970) Detection of Tropospheric and Stratospheric Aerosol Layers by Optical Radar (LIDAR). *Journal of Geophysical Research*, **75**, 3123-3132. <https://doi.org/10.1029/JC075i015p03123>
- [5] 戴升山, 李田凤. 地面三维激光扫描技术的发展与应用前景[J]. 现代测绘, 2009, 32(4): 11-12, 15.
- [6] 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰, 常少英. 基于激光雷达技术的三维数字露头及其在地质建模中的应用——以巴楚地区大班塔格剖面礁滩复合体为例[J]. 海相油气地质, 2014, 19(3): 72-78.
- [7] 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰. 基于数字露头的三维地质建模技术——以塔里木盆地一间房剖面一间房组礁滩复合体为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 108-115.
- [8] 刘帅, 陈建华, 王峰, 曹礼刚, 王炳乾. 基于无人机倾斜摄影的数字露头实景三维模型构建[J]. 地质科学, 2022, 57(3): 945-957.
- [9] 詹容若, 段亮, 罗晓容, 史毅, 魏荣浩, 马楚萱. 无人机多点位航拍高分辨率三维数字露头建模[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(6): 1050-1058.

- [10] 朱如凯, 白斌, 袁选俊, 等. 利用数字露头模型技术对曲流河三角洲沉积储层特征的研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 867-877.
- [11] Matasci, B., Carrea, D., Abellan, A., *et al.* (2015) Geological Mapping and Fold Modeling Using Terrestrial Laser Scanning Point Clouds: Application to the Dents-du-Midi Limestone Massif (Switzerland). *European Journal of Remote Sensing*, **48**, 569-591. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20154832>
- [12] Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., *et al.* (2012) 'Structure-from-Motion' Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications. *Geomorphology*, **179**, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- [13] Martin, S., Uzkeda, H., Poblet, J., *et al.* (2013) Construction of Accurate Geological Cross-Sections along Trenches, Cliffs and Mountain Slopes Using Photogrammetry. *Computers & Geosciences*, **51**, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.014>
- [14] Svennevig, K., Guarnieri, P. and Stemmerik, L. (2015) From Oblique Photogrammetry to a 3D Model—Structural Modeling of Kilen, Eastern North Greenland. *Computers & Geosciences*, **83**, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.07.008>
- [15] 印森林, 陈恭洋, 刘兆良, 冯伟, 刘岩. 基于无人机倾斜摄影的三维数字露头表征技术[J]. 沉积学报, 2018, 36(1): 72-80.
- [16] Qiao, Z., Shen, A., Zheng, J., *et al.* (2015) Three-Dimensional Carbonate Reservoir Geomodeling Based on the Digital Outcrop Model. *Petroleum Exploration and Development*, **42**, 358-368. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(15\)30026-4](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(15)30026-4)
- [17] Siddiqui, N.A., Ramkumar, M., Rahman, A.H.A., *et al.* (2019) High Resolution Facies Architecture and Digital Outcrop Modeling of the Sandakan Formation Sandstone Reservoir, Borneo: Implications for Reservoir Characterization and Flow Simulation. *Geoscience Frontiers*, **10**, 957-971. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.008>
- [18] Villarreal, J.C.A., Rojas, D.J.D. and Ríos, R.C.A. (2020) 3D Digital Outcrop Modelling of the Lower Cretaceous Los Santos Formation Sandstones, Mesa de Los Santos Region (Colombia): Implications for Structural Analysis. *Journal of Structural Geology*, **141**, Article 104214. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104214>
- [19] Osman, M., Abdullatif, O. and Al-Farhan, M. (2017) Workflow of Integration of Digital Outcrop Modeling and Sedimentology of the Early Triassic Upper Khartam Member of Khuff Formation, Central Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, **10**, Article No. 297. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3082-1>
- [20] Cabello, P., Domínguez, D., Murillo-López, M.H., *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). *Marine and Petroleum Geology*, **94**, 19-42. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.03.040>
- [21] Cawood, A.J., Bond, C.E., Howell, J.A., *et al.* (2017) LiDAR, UAV or Compass-Clinometer? Accuracy, Coverage and the Effects on Structural Models. *Journal of Structural Geology*, **98**, 67-82. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.04.004>
- [22] 刘学锋, 马乙云, 曾齐红, 等. 基于数字露头的地质信息提取与分析——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组杨家沟剖面为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 13-18.
- [23] 曾庆鲁, 张荣虎, 卢文忠, 等. 基于数字露头技术的扇三角洲前缘砂体构型特征——以库车坳陷前陆区索罕村剖面为例[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(2): 30-37. <https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2017.02.005>
- [24] Nesbit, P.R., Durkin, P.R., Hugenholtz, C.H., *et al.* (2018) 3-D Stratigraphic Mapping Using a Digital Outcrop Model Derived from UAV Images and Structure-from-Motion Photogrammetry. *Geosphere*, **14**, 2469-2486. <https://doi.org/10.1130/GES01688.1>
- [25] 乔占峰, 郑晓锋, 张杰, 陈薇, 李昌, 常少英, 沈安江. 海相碳酸盐岩储层建模和表征技术进展及应用[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 15-26.
- [26] 印森林, 陈强路, 袁坤, 陈恭洋, 吴有鑫, 陈星月. 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, 2022, 33(9): 1518-1531.
- [27] 张颖旭. 基于无人机倾斜摄影的见天坝露头区三维地质建模[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2019.
- [28] 穆亚飞. 柯坪地区下寒武统沉积储层特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2019.
- [29] 侯加根, 马晓强, 胡向阳, 刘钰铭, 齐得山. 碳酸盐岩溶洞型储集体地质建模的几个关键问题[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 64-69.
- [30] 徐秀洋. 基于 WebGIS 的地质露头三维模型信息提取技术研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学, 2019.