

引用格式: 印森林, 王友伟, 尹艳树, 张小红, 白凯, 唐友军, 程乐利, 唐攀. 无人机倾斜摄影技术在沉积地质学中若干应用进展[J]. 沉积学报, 2025. doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.035. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.035.[YIN SenLin, WANG YouWei, YIN YanShu, ZHANG XiaoHong, BAI Kai, TANG YouJun, CHENG LeLi, TANG Pan. Recent Advances in UAV-Based Oblique Photogrammetry Applications for Sedimentology, Stratigraphy and Reservoir Geology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.035. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.035.]

无人机倾斜摄影技术在沉积地质学中若干应用进展

印森林¹, 王友伟², 尹艳树³, 张小红⁴, 白凯⁵, 唐友军⁶,

程乐利¹, 唐攀¹

1. 长江大学录井技术与工程研究院, 湖北荆州 434023

2. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

3. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

4. 中国石油新疆油田分公司, 新疆克拉玛依 834000

5. 长江大学计算机科学学院, 湖北荆州 430023

6. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100

摘要 【意义】随着信息化、智能化和自动化技术的快速发展, 无人机倾斜摄影技术的应用越来越广泛, 近年来在辅助野外沉积地质学研究中的应用进展较快。【进展】基于此, 开展了摄影测量学基本原理与进展、无人机倾斜摄影技术在沉积地质学中的应用, 以及未来潜在发展方向的综述。【结论与展望】研究发现, 目前的研究进展主要集中在如下几个方面: 数字露头数据采集范式、可视化呈现与数字孪生、层序地层学与现代沉积源—汇区应用研究以及定量储层沉积学与三维建模等。结合文献调研和技术发展现状, 分析认为未来无人机倾斜摄影技术将在智能化沉积地质特征识别与建模算法研究、数字孪生系统与可视化呈现的升级、储层成因解释与原型模型深度挖掘、地下(深层)多尺度数据信息的标定和辅助以及沉积地质学教学与研究方向的拓展等方面发挥更重要的作用。

关键词 无人机; 倾斜摄影技术; 露头建模; 储层构型; 现代沉积; 数字孪生

第一作者简介 印森林, 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 博士生导师, 无人机倾斜摄影露头表征与建模, E-mail: yinxian_love@qq.com

通信作者 王友伟, 男, 副研究员, E-mail: youweiwang2021@outlook.com

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

文章编号: 1000-0550(2025)00-0000-00

0 引言

无人驾驶飞机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV), 简称无人机, 是一种具有动力、可重复使用且能够执行多种任务的无人航空器(Colomina and Molina, 2014)。自 1917 年英国成功研制出第一架无人机以来, 经过一个多世纪的发展, 无人机能够搭载自动驾驶仪、电

收稿日期: 2025-04-30; 收修改稿日期: 2025-08-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024GX06); 国家科技重大专项(2025ZD1400404); 国家自然科学基金项目(42402158); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2024QZKK0301)

传操纵系统、基于航路点的导航系统以及先进的传感器，实现对复杂任务的自主执行（Floreano and Wood, 2015）。当前，无人机广泛应用于农业监测、工业巡检、物流运输、灾害救援和军事侦察等领域（Barrientos *et al.*, 2011; Zhang and Kovacs, 2012; 郑明等, 2024; 张永刚等, 2024; 张国栋, 2024; 黄海峰等, 2024）。在地球科学研究中，无人机以其高灵活性和高分辨率的数据获取能力，正在革新传统的地质调查与研究范式（Turner *et al.*, 2012; Carrivick *et al.*, 2016）。

无人机倾斜摄影技术通过获取多视角影像（既可通过在同一无人机上安装多个不同角度的相机，也可通过单台相机在飞行中调整姿态连续拍摄），并结合像对的匹配与三维重建方法，生成带有地理坐标信息的高分辨率三维实景模型（Nex and Remondino, 2014; 孙信尧等, 2023）。相比传统的垂直摄影，倾斜摄影能够获取目标物体的侧面信息，提供更全面和真实的空间数据。这项技术最初源于对三维城市建模和建筑物侧面纹理获取的需求（Remondino and Rizzi, 2010）。随着计算机视觉、摄影测量和遥感技术的迅猛发展，无人机平台搭载上述设备可高效地获取大范围、高精度的三维地理信息，为地质研究提供了全新的手段（Watts *et al.*, 2012; Colomina and Molina, 2014）。在沉积学、地层学和储层地质学等领域，精细化的地质信息采集与分析对于深入理解地质过程和资源分布至关重要（Engel *et al.*, 2007; Buckley *et al.*, 2008）。传统的野外地质调查方法在空间覆盖范围、数据精度和工作效率等方面存在一定局限性。无人机倾斜摄影技术的引入，有效地克服了这些不足，显著提升了野外数据采集的效率和精度（Bemis *et al.*, 2014）。近年来，该技术在数字露头模型构建、层序地层分析、旋回地层学、沉积源—汇系统研究、定量储层表征和三维地质建模等方面取得了重要进展（James and Robson, 2012; Vasuki *et al.*, 2014）。例如，利用无人机倾斜摄影，可以快速获取露头的高精度三维模型，实现对地质体的非接触式测量和分析

(Vasuki *et al.*, 2014)；在层序地层学研究中，能够精细刻画地层界面和沉积构型；在旋回地层学方面，可以基于光学相机与激光雷达等多源传感器，将周期性沉积节律与三维地貌特征进行耦合分析 (Wan and Wei, 2024)；在储层地质学中，有助于构建高精度的三维地质模型，提升储层预测的准确性 (Fabuel-Perez *et al.*, 2010)。以无人机和三维建模为聚类关键词，梳理了近 20 年来的共现图谱 (图 1)，前者聚焦数据采集与建模技术，核心关键词为无人机、倾斜摄影和数字露头，凸显低空遥感与摄影测量对高精度三维模型的驱动作用；后者以三维建模、三维模拟和三维仿真为核心，指向工业、城市等动态场景的仿真应用。二者通过“三维模型”实现了技术链条的衔接。整体来看跨聚类连接较弱，需深度探索如“人工智能自动化建模”等新兴方向以增强闭环能力。

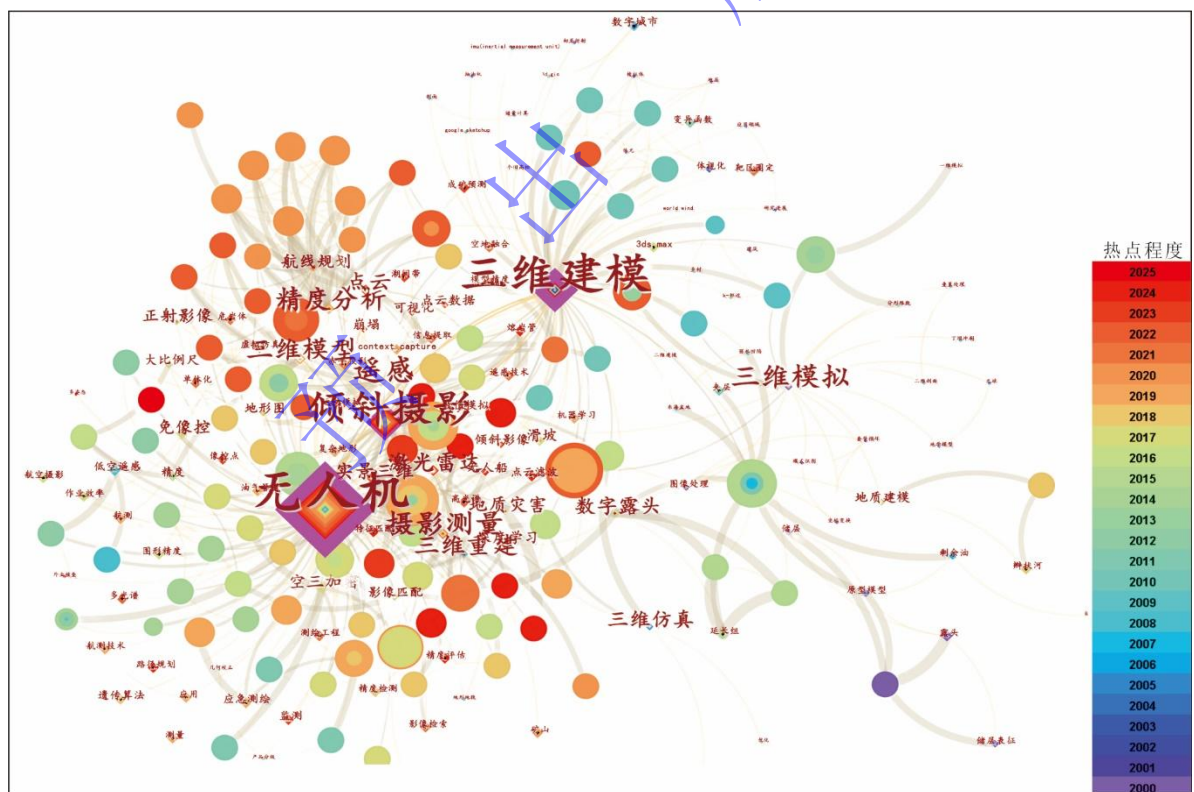


图 1 文献关键词共现分析图
Fig.1 Co-occurrence analysis of literature keywords

鉴于无人机倾斜摄影技术在地质领域应用的迅速发展，系统地综述其在沉积地质学中的应用进展具有重要意义。本研究旨在梳理和总结该技术在该领域的最新研究成果和应用案例，

为沉积地质学研究者提供有价值的参考，并推动无人机倾斜摄影技术在沉积地质领域的深入应用。

1 无人机倾斜摄影成像原理与发展

1.1 摄影测量学原理与发展

摄影测量学 (Photogrammetry) 是一种利用影像获取物体形状、尺寸和空间位置的技术，广泛应用于地理信息系统 (GIS)、考古学、建筑学和制造业等多个领域 (Luhmann *et al.*, 2014)。

1.1.1 摄影测量学的基本原理和步骤

摄影测量学的核心在于通过多角度影像的获取和处理，实现三维空间信息的重建 (Szeliski, 2011)。首先，需要从不同角度对目标对象进行多张照片的拍摄，以确保全面覆盖 (图 2)。这通常需要至少几十张照片，相邻照片之间的重叠率应达到 60% 至 80%，以保证有足够的共同特征点用于后续处理 (Harwin and Lucieer, 2012)。接下来，使用专业软件 (如 Agisoft Metashape 或 Pix4D) 对图像进行处理，自动识别各图像间的相同特征点。通过对所有图像的关键点进行三角测量，结合拍摄角度和位置信息，计算每个点在空间中的位置，生成点云数据 (Westoby *et al.*, 2012)。然后，将点云数据转化为网格模型 (Remondino and El-Hakim, 2006)，这一过程涉及点云数据的清理、平滑和连接，以形成稳定的三维网格表面。最后，将原始照片的纹理映射到三维网格上，以重建物体的表面纹理和颜色，确保纹理与模型表面的准确对齐。

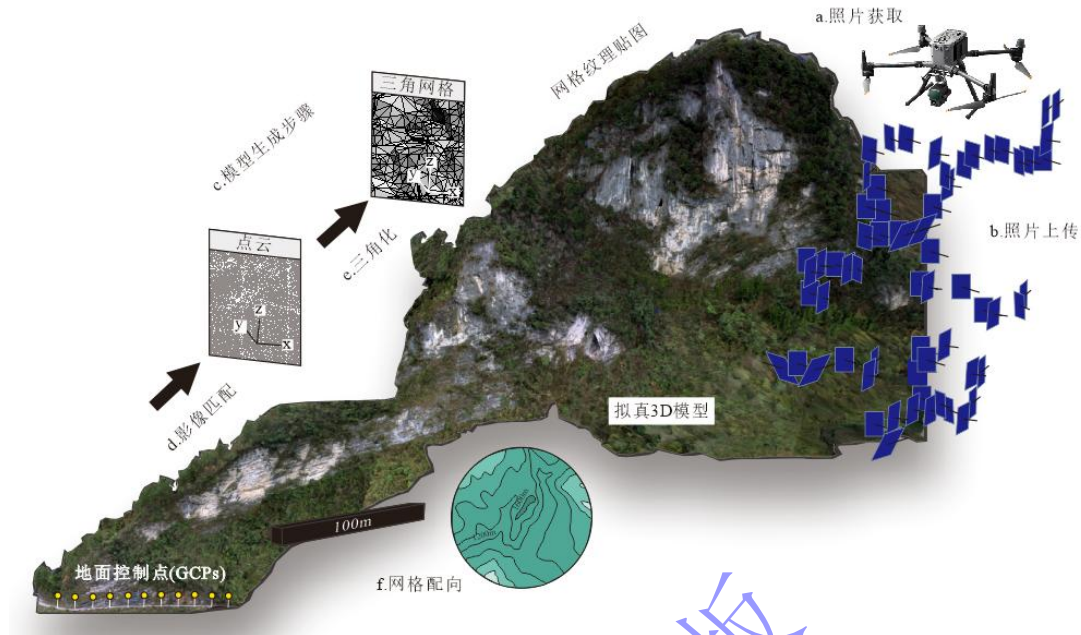


图2 摄影测量与成像示意图（据孙信尧等，2023 修改）
Fig.2 Schematic diagram of photogrammetry

1.1.2 摄影测量学发展过程

早期的摄影测量主要依赖于垂直影像技术，随着技术的进步，倾斜摄影测量学逐渐拓展了其应用领域（Kraus，2007）。20 世纪初，摄影师通过不同角度的拍摄实验，逐步认识到倾斜角度拍摄有助于捕捉更多地理信息。20 世纪中期，航空摄影测量技术逐步成熟，虽然以垂直影像为主，但多角度影像采集的理论逐渐成形（McGlone，2013）。

进入 20 世纪末，数字化革命为摄影测量学带来了新的发展契机（Atkinson，1996）。地质学家和测绘人员开始意识到倾斜影像在三维重建中的潜力，探索其在地质研究、城市规划等方面的应用（Eisenbeiss，2009）。20 世纪 90 年代后期，全球定位系统（GPS）和 GIS 的发展大大提高了影像采集的精度。与此同时，倾斜摄影测量技术在地质灾害监测中开始崭露头角，被首次用于滑坡、泥石流等灾害区域的三维建模（Niethammer *et al.*，2012）。

进入 21 世纪，倾斜摄影测量学迎来了革命性的技术突破。计算机视觉与人工智能的结合，使得自动化图像识别和地形分析变得更加高效和准确（Goodfellow *et al.*，2016）。倾斜摄影测量技术可以对地质结构、城市规划中的细节问题进行精确分析（Stumpf and Kerle，2011）。

过去十年，倾斜摄影测量技术经历了从城市应用到广泛行业渗透，再到与人工智能和大数据的深度结合。随着技术的不断进步和应用领域的拓展，倾斜摄影测量学已经成为智慧城市建设、生态保护和灾害监测中的关键技术力量（Nex and Remondino, 2014; 李欢, 2020）。

1.2 无人机技术与摄影测量技术的融合成像

无人机技术与倾斜摄影测量技术的结合，在成本、灵活性和对探测难度较大地区的适应性方面具有显著优势（Wehr and Lohr, 1999; Kersten and Lindstaedt, 2012; Colomina and Molin, 2014）。无人机倾斜摄影测量的流程包括任务规划、地面控制点设置、飞行执行、数据采集与处理、数据分析与应用以及报告和交付等（图3）。

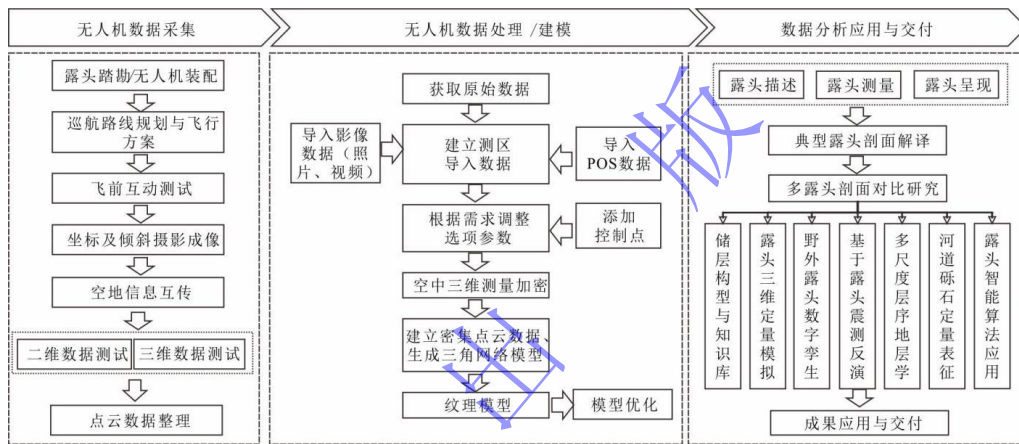


图3 无人机数据采集、处理建模与地质应用流程图（据印森林等，2018a 修改）
Fig.3 UAV data collection, processing, modeling and geological application workflow

在任务规划阶段，需要确定测绘目标，选择合适的无人机平台和传感器（如光学相机、多光谱相机、热成像仪或激光雷达），并制定飞行计划，考虑飞行高度、航线、影像重叠率以及天气条件等因素。为了提高测绘结果的精度，通常需要在地面布设已知坐标的控制点（Ground Control Points, GPCs），GPCs 通过高精度 GPS 测量获得。这些控制点可用于校正无人机飞行过程中因姿态变化等因素引起的影像畸变（印森林等，2018a, b）。

在飞行任务前需要对无人机和传感器进行检查和校准，严格遵守航空法规和安全操作规程，确保飞行安全。数据采集完成后，使用专业软件（如 Pix4D 或 Agisoft Metashape）对影像进行处理，包括影像预处理、特征匹配、点云生成和三维建模等（Turner *et al.*, 2012）。之后，根据项目需求，对处理后的数据进行深入分析，可应用于地质解译、地形测量、资源评估等领域（Turner *et al.*, 2015）。最后，编制详细的技术报告，包含测绘方法、数据处理

流程、精度评估和分析结果，将最终的三维模型及相关数据交付给相关方。

建模成像过程是无人机倾斜摄影数据处理的重要环节，特别是在三维地图创建、精确测量和 GIS 分析中。数据采集阶段，基于任务目标的规划要求开展数据采集工作。执行飞行任务时，应在良好的光照和气象条件下进行飞行，获取高质量的影像数据。

在数据处理与建模阶段，首先对采集的影像进行校正和增强处理，然后利用摄影测量软件将多幅影像拼接成正射影像，识别并匹配特征点。接着，根据匹配的特征点生成稠密点云，构建三维模型。在这一步中，地面控制点的使用可提高模型的绝对精度。然后，对初始模型进行优化，删除噪点和冗余数据，完善细节和纹理。

数据分析阶段，将优化后的三维模型导出为不同格式，供 CAD、GIS 等专业软件使用。在模型上进行距离、面积、体积等测量，支持地质分析和模拟研究（Buckley *et al.*, 2008）。

通过上述流程，无人机与倾斜摄影测量技术的融合应用，可以高效、精确地获取地质领域所需的三维空间数据，为沉积学、地层学和储层地质学的研究提供强有力的技术支撑（Westoby *et al.*, 2012）。

1.3 无人机与倾斜摄影设备及软件的发展

近年来，无人机技术的迅速发展为倾斜摄影测量在地质领域的应用提供了强大的技术支持（Colomina and Molina, 2014）。主流的无人机平台主要包括多旋翼和固定翼无人机，具备飞行灵活性高、操作简便、适应复杂地形等特点（Eisenbeiss, 2009）。其中，多旋翼无人机由于其悬停和低速飞行能力，适合高精度、小范围的地质调查；固定翼无人机则因航程远、速度快，适用于大面积的地质勘测（Eisenbeiss, 2009）。

当然，倾斜摄影照相机作为无人机的重要配套设备，其技术性能不断提升。现代倾斜摄影相机通常配备高分辨率的影像传感器，具备大视场角和多镜头组合，能够同时获取目标区域的多角度影像，实现对地表细节的精细捕捉。这些技术进步使得地质学家能够获取高精度的三维地形和地质构造信息。

此外，在数据处理方面，三维建模软件的发展极大地提升了倾斜摄影数据的处理效率和模型精度（James and Robson, 2012）。主流的软件如 Agisoft Metashape、Pix4Dmapper、Bentley

Context Capture（已更名为 iTwin Capture Modeler）和 Open Drone Map 等，采用先进的计算机视觉和摄影测量算法，能够高效地完成影像的匹配、点云生成、模型构建和纹理映射（Westoby *et al.*, 2012）。这些软件支持大规模数据的处理，具备良好的用户界面和丰富的功能模块，满足了地质领域对高精度三维模型的需求。

1.4 无人机倾斜摄影的误差来源

在无人机倾斜摄影测量中，传感器姿态解算误差主要源于机载惯性测量单元（IMU）和航向角传感器精度不足，导致滚转、俯仰、偏航等姿态角偏差。该偏差经由空中三角测量平差过程传递至三维点云，显著削弱最终成果的定位和几何精度。研究表明，即便仅有微小的姿态角误差，其引起的地面坐标偏移也远大于同等量级的平面位置误差，并成为制约整体测量精度的关键瓶颈（Yuan and Zhang, 2008）。例如，在缺少地面控制点时，仅依赖全球定位系统（GPS）与 IMU 直接定向，对地面采样距离（GSD）约 1 cm 的影像，其绝对定向误差可达 1.2 m（Sanz-Ablanedo *et al.*, 2018）。通过在空中三角测量平差中布设足量且分布均匀的地面控制点，可将高程均方根误差从数倍地面采样距离显著降低，实现模型精度的质的飞跃（Sanz-Ablanedo *et al.*, 2018）。地面采样距离定义了影像像素在地面上的实际投影尺寸，与点云密度及重建精度密切相关（Yang *et al.*, 2024）。在传感器标定严谨、航线布设合理且地面控制充分的理想条件下，平面精度可达 $(1\sim2)\times\text{GSD}$ ，垂直精度可达 $(1.5\sim2)\times\text{GSD}$ ；而当控制点稀缺或外方位约束不足时，平面与高程均方根误差可分别升至 $4\times$ 和 $5\times\text{GSD}$ （Sanz-Ablanedo *et al.*, 2018）。因此，除通过采用高精度 IMU 降低姿态误差外，还应通过降低飞行高度或提升相机像素密度以减小地面采样距离，才能进一步提升三维重建的精度与细节表现。总之，实现高精度、高密度的倾斜摄影测量，需在系统误差控制与空间分辨率优化两方面协同发力。

2 无人机倾斜摄影技术在地质露头应用进展

无人机倾斜摄影技术使得露头数据采集从传统单一数据采集发展到多源数据融合，加强了数据的应用与挖掘的深度与广度。一方面，基于数据采集范式的变化，三维露头可视化呈

现与数字孪生成为现实，大大推动了地质露头的智能化进程。此外，针对露头数字化的地质应用与数据挖掘等理论也取得了很大的进展，例如，对大中尺度高分辨率的数字露头模型基于多尺度层序地层学解译与研究、源汇区的砾石定量关系研究、构型要素定量关系与知识库构建和小尺度单一构型要素的储层质量差异等。

2.1 数字露头采集范式、可视化呈现与数字孪生

2.1.1 野外地质数据采集范式进展

野外地质数据的采集与应用在地质学研究中具有关键作用，尤其是在露头和现代沉积研究方面。传统的野外地质数据采集工作通常在不同尺度上展开。首先，在大尺度（大于千米级别）上，主要利用遥感数据和高分辨率卫星影像（如 Google Earth 等）获取地质体的宏观信息（表 1）。其次，在中尺度（百米至千米级别）上，通过相机拍摄结合比例尺、全站仪、激光雷达（LiDAR）等方法，获取地质体的精细结构数据（印森林等，2018a, 2021；孙信尧等，2023）。再次，在小尺度（米至几十米级别）上，利用探地雷达技术获取地质体内部的反射结构信息，配合高精度影像采集进行详细测绘（Guo *et al.*, 2022）。最后，在微观尺度（厘米至米级别）上，通过实地采样和实验室分析，对露头和现代沉积样品进行精细研究。

随着技术的发展，野外地质数据采集范式从传统的手工测量和样品收集，逐步演变为现代的自动化、高效化和智能化采集方法，主要体现在以下几个方面：

首先，数字化采集工具的应用极大地提升了数据采集的效率和精度。移动设备如智能手机和平板电脑被广泛用于数据记录，配合专门的地质调查应用程序，可以直接记录地理坐标、拍摄高分辨率照片、填写地质属性信息，实现数据的实时上传和共享。例如，移动摄像机三维扫描技术利用手持式三维扫描仪，结合校准功能和线激光技术，配合工业相机捕捉物体的三维数据，通过软件转换生成高精度的三维模型。这种技术在复杂地质体的三维信息获取中具有重要作用。

其次，遥感与激光技术的发展为地质数据的获取提供了新的手段。卫星遥感技术被用于宏观地质结构、矿产资源和环境变化的监测。无人机遥感通过搭载多光谱、高分辨率摄像头、

红外线或 LiDAR 传感器（张金荣，2024），实现详细的地形测绘、地质裂缝分析和滑坡监测等。LiDAR 技术通过激光雷达系统发射激光脉冲并接收反射信号，测量激光发射点与目标物之间的距离，能够穿透植被覆盖，快速、精准地获取大范围地表数据，生成数字高程模型（DEM），计算地质结构的关键参数，如坡度、曲率等微地貌因子（盛辉等，2020）。三维激光扫描技术利用高速激光扫描快速获取地质体的高精度三维坐标数据，生成密集的点云，用于构建地质结构的三维模型（詹容若等，2021）。

再次，高精度定位技术的应用提高了地质数据的准确性。全球导航卫星系统（GNSS）设备被用于高精度的地理位置定位，辅助地质样本和数据的精确记录。全站仪通过测量目标点的水平和垂直角度以及距离，确定目标点的精确坐标，帮助地质学家进行精确的地形测绘和地表变化监测。

表 1 无人机倾斜摄影与传统露头表征方法对比
Table 1 Comparison between UAV oblique photography and traditional characterization method

技术名称	技术定义	技术特点	地质应用范围	优点	不足
Google 地图	基于网络的地图服务	全面的地质体表面地形地貌数据	导航、位置搜索、街景查看、地图制作	数据全面、界面友好、离线地图功能、谷歌服务集成	信息可能不完整或不准确、依赖互联网连接
全站仪	集光、机、电于一体的测绘仪器	高精度、多功能、高效性、数据处理能力强	地形、高程和目标距离测量	高精度测量、多功能、操作简便、安全性高	成本高、需要专业操作、环境受限
三维激光扫描	激光测距记录被测物体表面大量密集点的三维坐标和反射率信息	非接触式测量、高精度、高密度数据采集、速度快、自动化程度高	地质灾害现场数据采集、野外地质数据采集	数据采集快速、精度高、自动化程度高、能够提供丰富的细节信息	成本高、光线敏感、数据量巨大、需要专业处理、受遮挡影响
探地雷达	利用高频电磁波探测介质内部物质特性	高精度、高效率、无损探测、适用性强	矿产勘查、灾害地质调查、岩土工程勘察、现代沉积测量	非破坏性探测、高分辨率、提供地下结构图像	技术要求高、需要专业知识、穿透力有限
LiDAR	发射激光束并接收反射回来的信号以测量物体距离和速度	高精度、高分辨率、能够生成详细的三维模型	无人机、自然资源调查、地图测绘	精度高、抗干扰能力强、能够提供丰富的空间信息	成本高、设备体积较大、对环境条件敏感
无人机倾斜摄影技术	无人机搭载多角度摄像头，获取地面目标的多视角影像	高效率、多样化的数据获取、能够捕捉露头详细信息	自然灾害监测、资源管理、野外地质数据采集	数据获取效率高、成本低、安全性好、能够快速生成三维模型	受天气影响较大、稳定性要求高、需要专业软件

此外，地质传感网络和电磁波探测技术的应用，促进了地质数据的实时监测和地下结构的探测。地质传感器网络在关键区域部署多种传感器，持续监测地质变动、地下水位、土壤气体泄漏等数据，为预警系统和灾害管理提供实时信息。探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）通过发射电磁波短脉冲，并由接收天线检测反射信号，对地下结构进行成像，帮助地质学家在不破坏地表的情况下获取地下结构的详细信息（詹容若等，2021；Guo *et al.*, 2022）。

然而，尽管上述技术在野外地质数据采集中发挥了重要作用，但仍存在一些局限性。由于地形高低起伏、植被覆盖和 GPS 定位误差等因素的影响，数据采集的精度和广度受限，

导致量化困难，数据的整体连续性和系统性不足。这些因素可能导致最终的地质解释与实际情况存在差异。此外，三维激光扫描等技术虽然能够获得毫米级别的高精度数据，但在数据处理和抽稀化方面面临巨大挑战，对高陡地形和植被遮挡严重地区的测量准确性有限（印森林等，2018a，2021）。

为克服这些不足，无人机倾斜摄影技术在野外地质数据的采集中得到了广泛应用。该技术通过无人机搭载多角度摄像头（郑红霞等，2023），能够进行多种飞行方式（如顶飞、侧飞、旋转飞和仿地飞行）（图4），获取多视角的高清叠覆影像照片。利用专业的建模软件，建立高精度的三维纹理模型，使得在三维实景场景中开展地质识别和研判成为可能。

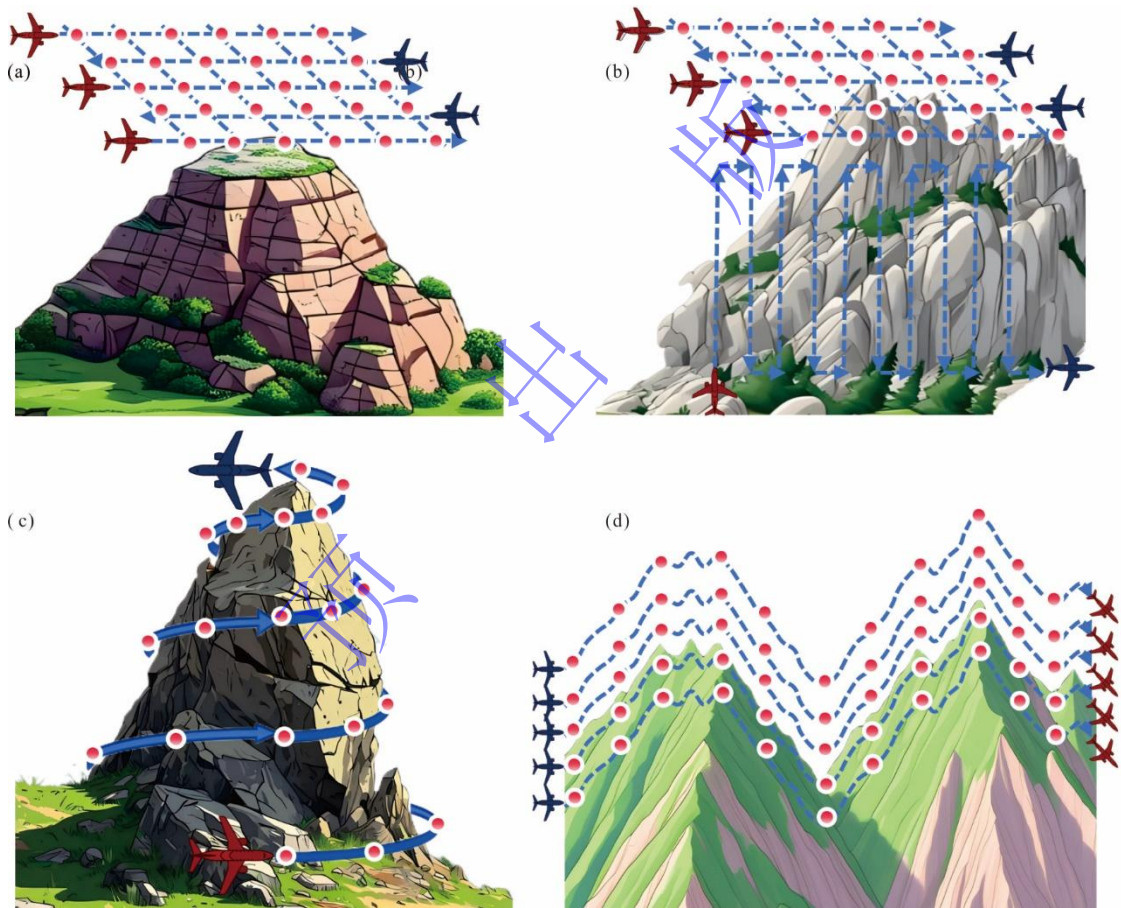


图4 无人机倾斜摄影姿态与巡航路线

(a) 顶飞模式；(b) 顶飞与侧飞结合模式；(c) 旋转飞行模式；(d) 仿地飞行模式

Fig.4 UAV oblique photography attitudes and cruise routes

(a) top-flying mode; (b) combined mode of top-flying and side-flying; (c) rotational flight mode; (d) terrain-following flight mode

研究表明，无人机倾斜摄影技术具有以下优势：一是数据获取效率高，能够快速覆盖大面积区域；二是成本相对较低，操作灵活，适用于各种地形条件；三是安全性高，适用于人类无法或不宜进入的危险区域；四是能够生成高精度的三维模型，为地质体的精细刻画和定

量分析提供可靠的数据基础。

随着科技的进步,野外地质数据采集的方法将继续向自动化、远程化和智能化方向发展。这将极大地提高地质研究的效率和范围,同时也对地质学家在数据处理和新技术应用方面的能力提出了更高的要求。综上所述,在无人机倾斜摄影技术的广泛应用下,野外地质数据的采集的范式发生了重大转变,从传统手工、半自动化数据采集逐渐迈向智能化采集阶段,数据的量化程度和维度大大增加。围绕不同尺度的数据建模基础框架发生了质的变化,更加趋向于精细化和量化表征,为沉积学、地层学和储层地质学的研究提供了强有力的技术支撑。

2.1.2 中小尺度地形地貌精细数字化成图与应用

无人机摄影测量技术最早由 Eisenbeiss (2009) 提出,详细描述了通过遥控、半自主或自主的无人机平台获取影像的数字处理方法。该技术主要用于生成地理参照的密集点云、DEM 和正射影像,填补了地面摄影与传统航空摄影之间的空白,成为地形地貌研究的重要工具(万剑华等, 2019)。

值得注意的是,在中小尺度地形地貌的精细数字化成图过程中,首先需要进行高精度的数据采集。利用装备高分辨率相机的无人机进行航拍,可以在较低高度飞行,捕获中小尺度区域的高清影像,获得比卫星影像更高的空间分辨率。此外,对特定地形特征进行地面三维扫描,可获取地形表面的高精度数据。为提高数据的精确性,应使用支持实时动态载波相位差分(RTK)的高精度 GNSS 接收机对地面控制点进行精确测定,辅助校正航拍数据,确保空间定位的准确性。

在数据处理与分析阶段,采用专业软件(如 Pix4Dmapper、Agisoft Metashape 等)对无人机拍摄的多张影像进行拼接,生成连续的高分辨率正射影像。通过构建 DEM、数字表面模型(DSM)和数字地形模型(DTM),对地形地貌进行精细描述和三维重建。利用图像处理和模式识别技术,从数据中提取地形特征,如河流、山脊、谷地等,为地质分析提供翔实的数据支持(印森林等, 2018a, b)。

在成图与可视化环节,结合 DEM、DSM 和 DTM,制作详细的地形图,为地质研究和

工程应用提供精确的基础数据。借助增强现实（AR）和虚拟现实（VR）技术，提供交互式的地形视图，增强用户体验，特别在教育和科研展示领域具有重要意义。为确保数据的精度和可靠性，需要通过地面实测数据与遥感数据进行比对校验。同时，收集用户反馈，进一步优化地图的实用性和准确性（董志成等，2024）。

Vollgger and Cruden（2016）在澳大利亚维多利亚州中南部沿海地区利用多旋翼无人机和索尼 Nex 7 无反光镜数码相机，对泥盆纪基底岩石及其白垩纪覆盖层进行了层理和裂缝发育的测量。多旋翼无人机具备垂直起降和低速飞行能力，能够在有限空间内操作，获取高质量、恒定航线间距和足够重叠的航拍影像。这些影像由配备双频 ProMark 500 RTK GPS 的无人机拍摄，定位精度达到 1~5 cm，覆盖约 13 000 m² 的区域，共获取了 211 张重叠的航空影像。利用 Agisoft PhotoScan Professional 软件对这些影像进行处理，借助 12 个地面控制站点来优化外部参数，提高模型精度。最终建立的高分辨率数字模型，能够从难以接近的区域快速准确地提取构造测量结果（图 5），其效率远高于传统的野外实地工作方法。该方法为中小尺度地貌的精细数字化成图与应用奠定了坚实的数据基础，也为地质体结构的精细表征迈出了重要一步。

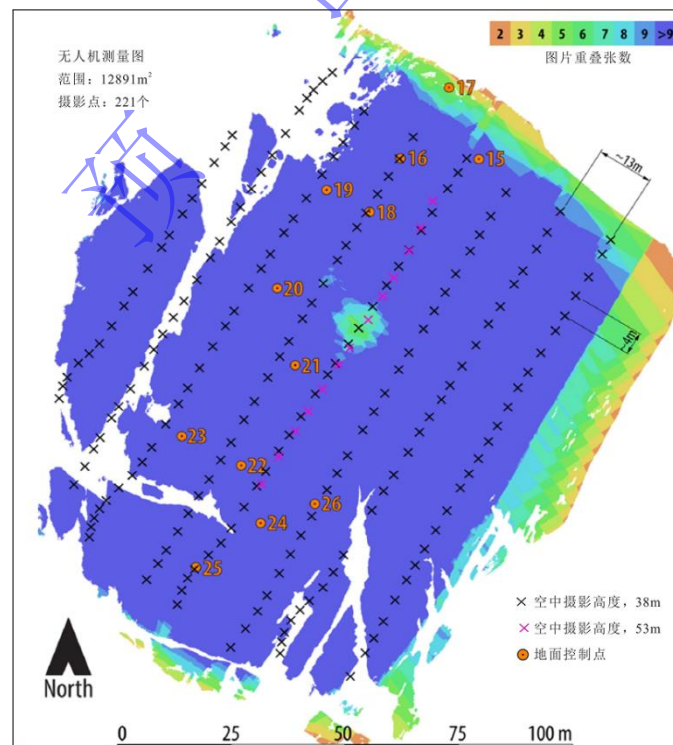


图 5 澳大利亚维多利亚州中南部层理和裂缝的方向测量（据 Vollgger and Cruden, 2016 修改）

Fig.5 Directional measurement of bedding and fractures in south-central Victoria, Australia

2.1.3 野外露头三维可视化呈现与数字孪生

把无人机采集野外露头生成的 OSGB (Open Scene Graph Binary) 模型与地理遥感 DEM 数据通过三维融合技术进行处理, 形成区域大尺度与局部小尺度的空间数据融合。随后, 将野外露头相关岩石体静态地质属性和工程参数属性等成果数据输入。在无人机采集三维模型上形成一套覆盖物理模型的露头地质参数数据。静态地质属性包括: 地层分层数据 (海拔高差、颜色、岩性与厚度数据)、沉积构造数据 (层理构造、层面构造、特殊构造)、储层砂体构型数据 (几何形态、规模、方向与叠置样式)、储层质量数据 (孔隙结构、孔隙度、渗透率、含油饱和度)。工程参数属性包括: 工程力学参数 (脆性指数、泊松比和杨氏模量)。构建目标倾斜摄影模型、露头数据模型和地质知识结构模型, 地质知识结构模型调用露头数据模型, 将地质知识结构模型映射到倾斜摄影模型中, 三种模型相互耦合演化构建野外露头场景数字孪生模型 (印森林等, 2023)。

近年来, 无人机数字露头平台发展日新月异, 比较成熟的有国内的深时数字地球平台 (DDE) (<https://outcrop3d.deep-time.org>), 国外的 V3Geo 平台 (<https://v3geo.com>) 等。以 V3Geo 为例, 它是一个专为地球科学设计的云端虚拟三维模型存储库, 旨在存储、搜索和可视化通过摄影测量和激光扫描等技术获取的网格模型。其数据内容涵盖地球科学家常用的多尺度模型, 从微观标本、手标本、化石到覆盖数米至数十千米的露头剖面或地形。技术上, V3Geo 通过云存储系统和定制的 3D 网页浏览器实现模型的高效流式传输, 用户无需安装专用软件即可交互式探索模型。平台定位是为地球科学社区提供可持续资源, 强调通过定义的元数据和分类模式支持专业数据共享, 同时提供公共和私有存储选项。功能特点包括支持超大模型 (含多段结构)、测量工具 (可测量宽度、厚度及断层落差等简单尺寸) 以及未来整合附加解释地层的潜力, 使其在教学、虚拟地质教育及野外考察准备中具有广泛应用前景 (Buckley *et al.*, 2022)。

所述数字孪生系统由物理岩石结构模型和几何模型多层次、多尺度集成, 将物理空间中的物理岩石实体在虚拟空间进行全要素重构, 通过数据融合和迭代计算, 形成具有感知、分析、决策和执行能力的数字孪生体; 所述数字孪生体作为物理实体在虚拟空间的 1:1 映射,

采用集成的多物理、多尺度和三维渲染模型，基于机器视觉和深度学习算法，实现对物理实体的数字镜像和数据驱动。通过 AR 或 VR 人机接口和数据库接口（董志成等，2024），实现智能三维野外露头场景数字孪生体与物理实体的实时交互及虚拟现实的展示（图 6）。

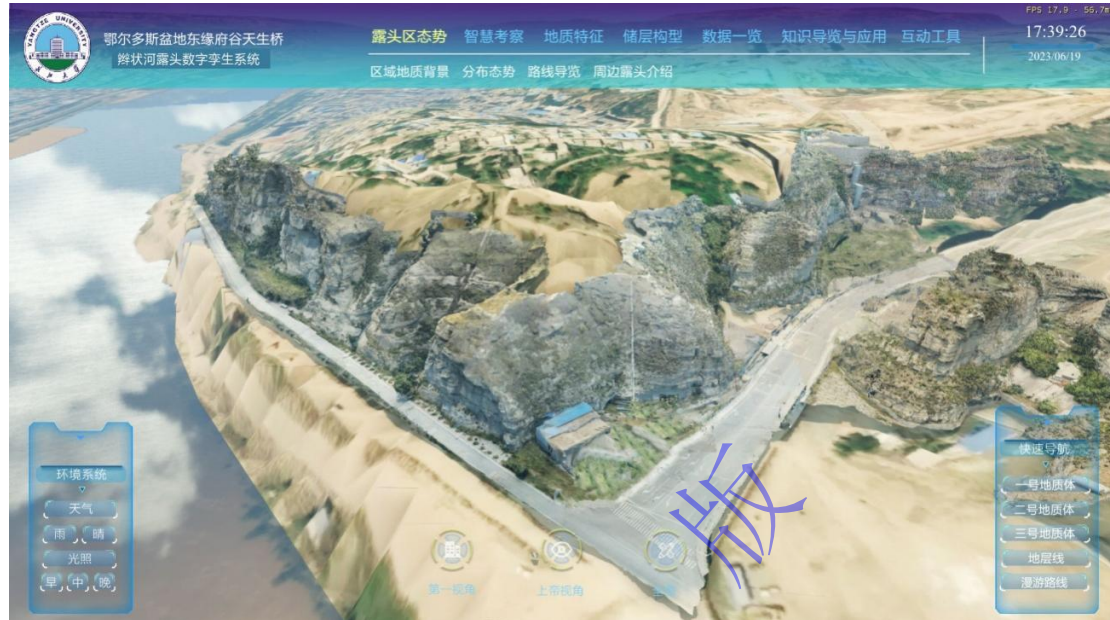


图 6 基于无人机倾斜摄影的鄂尔多斯盆地府谷天生桥野外露头数字孪生模型

Fig.6 UAV oblique photography of Ordos Basin Fugu natural bridge outcrop digital twin model

2.2 层序地层与现代沉积源—汇区应用研究

2.2.1 多尺度层序地层学应用

多尺度层序地层学是一种分析和解释沉积层序及其与全球海平面变化关系的学科，它在石油地质学、古气候学和海洋学等领域有着广泛的应用（Posamentier and Vail, 1988）。这种方法侧重于识别和解释沉积记录中的层序地层单元，这些单元通常与古环境的变化有关，尤其是海平面的升降（Catuneanu, 2006）。

在多尺度层序地层研究中，不同的空间尺度具有各自的关注重点。全球尺度（eustatic scale）：研究全球海平面变化如何影响沉积模式，重点关注长时间尺度上的大规模沉积层序和全球性事件（如冰期和间冰期的变化）。区域尺度（regional scale）：研究特定区域的地质构造活动如何与全球海平面变化相互作用，共同影响沉积模式，包括盆地内部的沉积体系及其对海平面变化的响应。局部尺度（parasequence scale）：着眼于较小范围内的沉积环境和层序建立。而露头区是研究如泥岩、砂岩等不同岩性的堆积和侵蚀过程，以及它们如何记

录更短周期的海平面波动的重点对象。

利用无人机倾斜摄影技术,可以在上述不同尺度的层序地层学研究中发挥重要作用。该技术能够以高分辨率获取露头的三维空间数据,为精细地层划分和对比提供了新的手段。

Wang *et al.* (2023) 基于无人机摄影测量模型追踪了美国怀俄明州比格霍恩盆地北部麦卡洛峰地区威尔伍德组的泛滥平原加积旋回。他们使用 DJI Phantom 4 Pro 多旋翼无人机,在 34 次飞行中拍摄了 21 144 张照片,覆盖面积为 10 km²。所研究的地层序列厚约 300 m。为了保证精度,使用 Emlid Reach GNSS 接收机布设并测量了 57 个地面控制点,并使用后处理的动态定位技术对其进行了标定。利用 Agisoft PhotoScan 软件建立三维数字模型。再将三维露头模型导入 LIME 软件进行可视化和解释(图 7)。他们进一步计算了泛滥平原加积旋回厚度的二维变差函数,发现古河流方向对旋回厚度变化起到了决定性作用,并通过数值模型(Wang *et al.*, 2021)验证了这一发现。此外,他们的研究还强调了三维地质数据的重要性,可通过构建复合剖面来降低一维剖面中地层厚度变化对异旋回信号提取的影响(Wang *et al.*, 2024)。

以 Wang *et al.* (2023) 定义的泛滥平原加积旋回为基础,建立了一个综合地层框架。Wang *et al.* (2024) 通过整合地层数据进行了年代标定,并与天文目标曲线进行了对比,揭示了河流类型及泛滥平原沉积物对天文周期的响应。该研究在地层沉积序列中明确区分出两种主要的地层类型:一类以曲流河河道砂岩(Wang *et al.*, 2022)及偏红的古土壤为主,特别显著的是层位 II 和 IV(图 8F);另一类则主要由辫状河河道砂岩(Wang *et al.*, 2022)及色调较浅的相对不发育的古土壤构成,这主要出现在层位 I、III 和 V(图 8f)。通过将 Bighorn 盆地的地层剖面(图 8F)与标准化的偏心率曲线(图 8A)进行对比,并利用 ETM2 和 H2 两个极热事件期间的碳同位素偏移作为关键对比点(图 8B, C),发现长偏心率的低值期通常与占绝对优势的辫状河道砂体、相对不发育的古土壤和较高的含砂量相关;相反,长偏心率的高值期则与普遍的曲流河道砂体、更发育的古土壤和较低的含砂量有关。

近年来,多项研究利用无人机采集的高分辨率地层数据开展色度提取与旋回地层学分析。为了构建更为严谨的时序解释框架,Meyers (2019) 提出了基于天体年代学的测试方法,系

统分析了沉积色度与轨道周期之间的定量联系。Wan and Wei (2024) 将无人机倾斜摄影与数字图像分析相结合, 通过三维数字露头模型提取剖面色度信息, 并对获得的色度序列应用光谱分析, 成功识别出地层中的天文周期变化。未来研究可结合多光谱影像、LiDAR 强度及纹理特征, 利用时频分析技术(如小波变换与快速傅里叶变换)开发自动化旋回地层学工具, 以提升大范围野外沉积序列的定量分析能力。

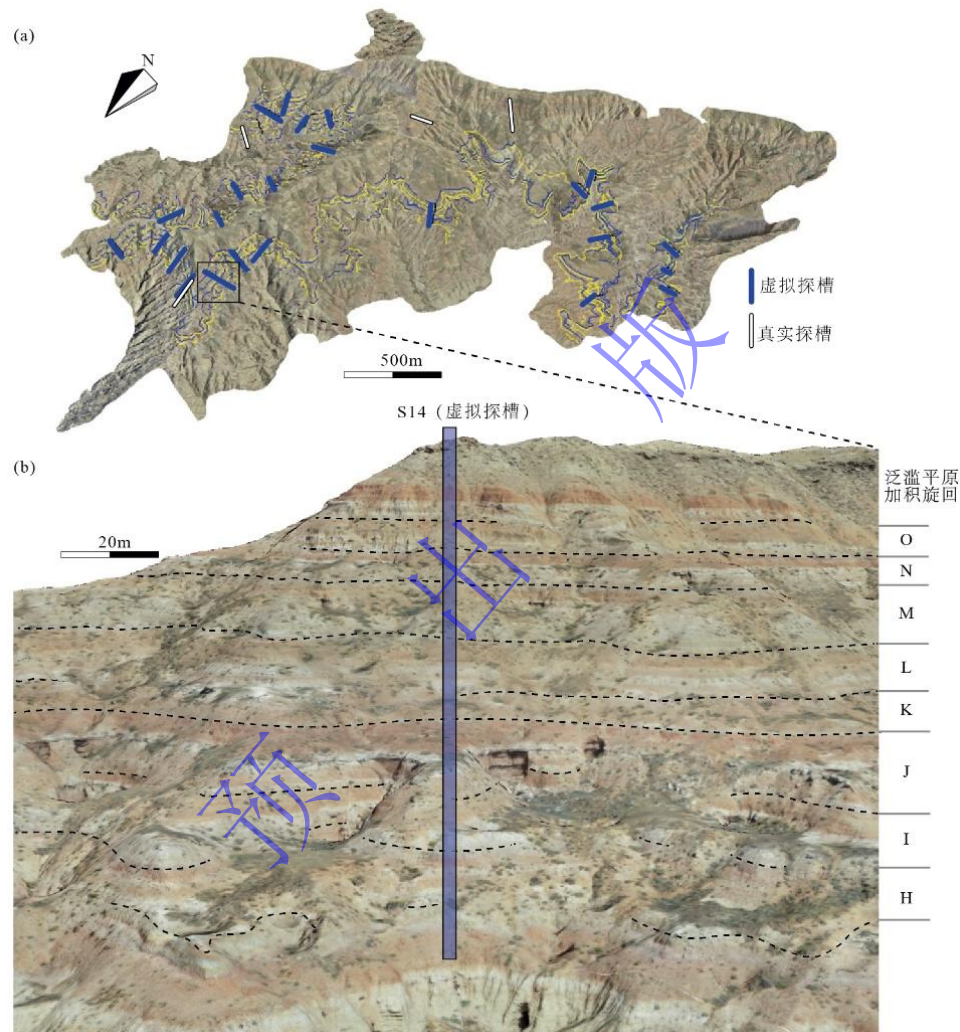


图7 利用无人机倾斜摄影和单独航拍及单反照片追踪泛滥平原加积旋回古土壤层的顶部(据 Wang *et al.*, 2023)

Fig.7 Floodplain aggradation cycles traced using both photogrammetric models and individual UAV and camera photographs

此外, 露头区的小尺度等时精细地层对比框架同样重要 (Abels *et al.*, 2013; 印森林等, 2021)。与地下研究工作类似, 无人机倾斜摄影露头剖面也能开展小尺度基准面旋回的对比工作, 可较好地定位不同位置的剖面特征, 为小尺度基准面旋回等时对比建立坐标框架体系。基于处理后的倾斜摄影模型结合井点岩性数据, 可以开展基准面旋回控制下小层的精细对比。

流程如下：（1）宏观浏览与观察；（2）细分小层，以地层发育最全、厚度最大和出露最好的中间部位向两侧追踪；（3）基准面旋回约束小层对比，为方便识别与对比，将小层的界限定在基准面旋回的转换位置，结合岩石组合特征，由中间向侧翼逐渐展开，建立连井点对比剖面（图9）；（4）露头小层顶底数据获取。通过露头区基准面旋回对比，利用定量模型提取了横纵坐标和海拔数据值。这种方法提供了新的露头对比研究手段，提高了研究的精度和准确度。

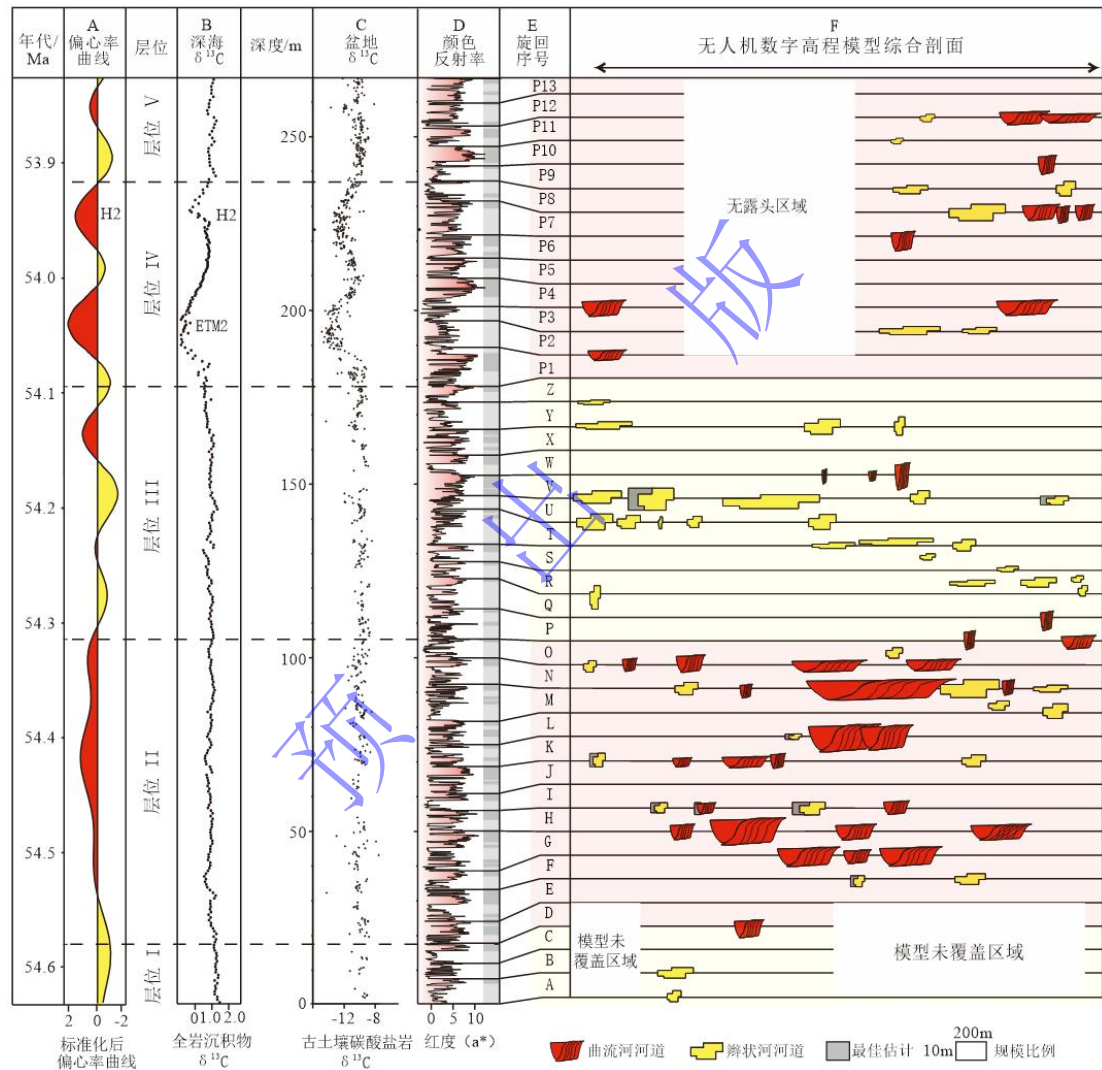


图8 轨道偏心率强迫及其在海陆地层记录中的响应对比（据 Wang *et al.*, 2024 修改）

(A) Zeebe and Lourens (2019) 提供的标准化偏心率曲线；(B) 来自大洋钻探站点 1262 的稳定碳同位素地层学 (Zachos *et al.*, 2010)；(C) 来自 Bighorn 盆地的稳定碳同位素地层学 (Abels *et al.*, 2016)；(D) 泛滥平原沉积的红色反射率记录 (Abels *et al.*, 2013)；(E) 泛滥平原加积旋回注释；(F) 在地层框架内按比例缩放的河道砂体（比例尺见图例）

Fig.8 Orbital eccentricity forcing and its expression in marine and terrestrial stratigraphic records

(A) normalized eccentricity curve provided by Zeebe and Lourens (2020); (B) stable carbon isotope stratigraphy from Ocean Drilling Program site 1262 (Zachos *et al.*, 2010); (C) stable carbon isotope stratigraphy from Bighorn Basin (Abels *et al.*, 2016); (D) redness reflectance records of floodplain deposits (Abels *et al.*, 2013); (E) annotated floodplain aggradation cycles; (F) channel sandbodies scaled proportionally within the stratigraphic framework (see legend for scale)

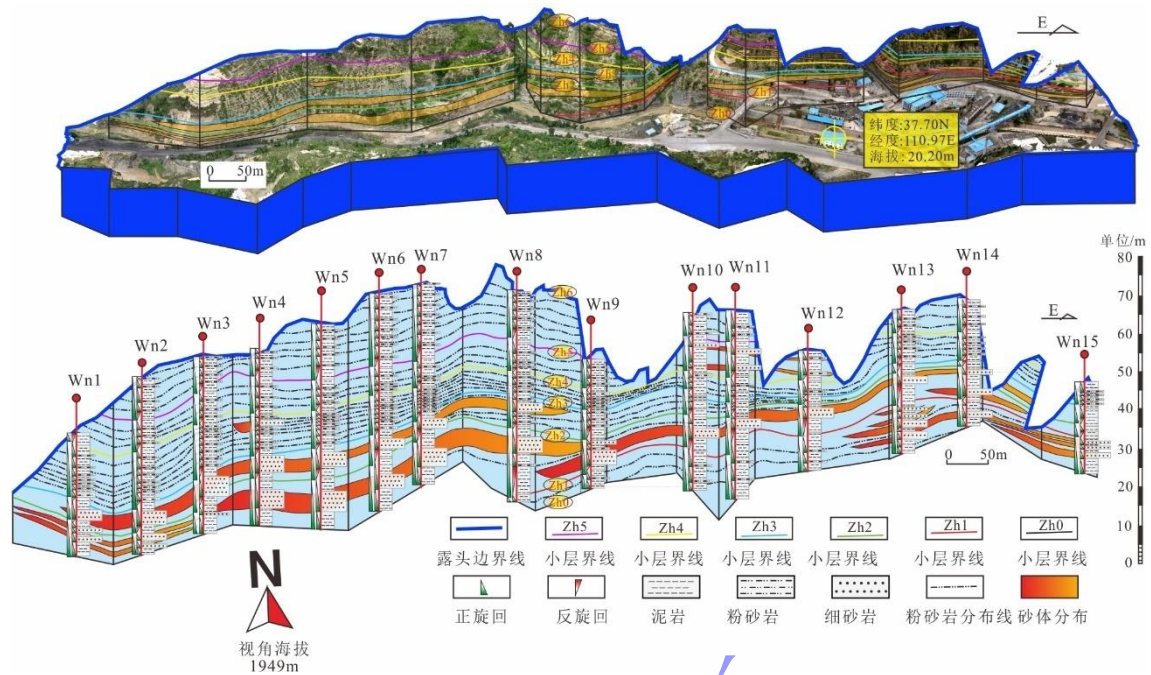


图9 野外露头剖面高频基准面旋回小层对比 (据印森林等, 2021 修改)

Fig.9 Outcrop section d high-frequency sequence boundary-based small layer comparison

2.2.2 现代沉积源—汇区应用和砾石定量关系表征

无人机倾斜摄影高精度模型不仅可以为现代沉积和源—汇区应用提供沉积单元定量化研究参数, 也可以为河(扇)上砾石参数定量关系表征提供数据来源。

(1) 源—汇区储层构型单元定量关系研究

借助于无人机倾斜摄影的敏捷性和高分辨率可以对现代冲积扇、全流程河流和现代三角洲等开展现代沉积扫描并建立三维模型。以此为基础, 开展现代沉积的多个储层构型单元的定量表征, 并建构型单元之间或者构型单元内部定量关系。例如, 针对新疆吉木萨尔西大龙口现代砾石辫状河内部坝的长度、宽度、周长和面积进行统计, 并建立其统计关系 (Vázquez-Tarrio *et al.*, 2017; 严一鸣, 2019; Yin *et al.*, 2023a) (图 10)。此类研究不仅可以指导地下构型单元的精细解剖, 还可以为基于沉积过程的三维模拟提供精细的原型模型与参数输入。

(2) 现代沉积砾石定量关系表征

一直以来, 对物源区与沉积区碎屑岩搬运距离远近的定量化表征较为缺乏。一方面因为

物源区不易定位，另一方面沉积区的颗粒不同大小、圆球度、扁平度、长短轴长度、周长、面积等定量测量工具比较缺乏，因此，对于山区某河流中海量的砾石定量表征一直存在较大的难度。基于无人机倾斜摄影的高精度模型为砾石的定量表征提供了量化工具与新的思路。针对新疆吉木萨尔县西大龙口河和东大龙口河不同位置沉积的砾石，Yin *et al.* (2023a) 开展了实地调查和无人机倾斜摄影地质工作（图 11）。

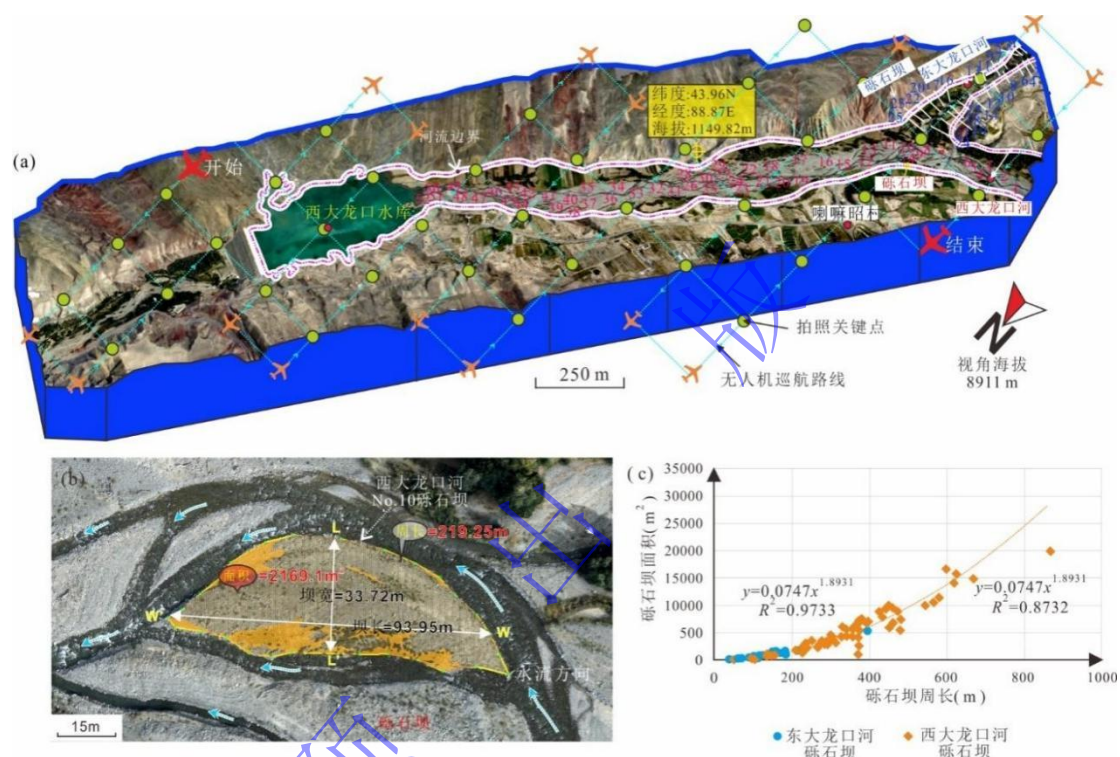


图 10 基于无人机倾斜摄影技术的现代沉积构型单元定量关系研究（据文献 Yin *et al.*, 2023a 修改）

(a) 新疆西大龙口河现代沉积；(b) 砾质心滩坝规模；(c) 砾质心滩坝定量关系

Fig.10 Study of quantitative relationships of modern sedimentary configuration units based on UAV oblique photography technology

(a) modern sediments of the Xidalongkou River, Xinjiang; (b) scale of gravel mid-channel bar; (c) quantitative relationship between the perimeter and area of gravelly mid-channel bars

在准噶尔盆地东部阜康断裂带的逆冲推覆作用下，新疆吉木萨尔县西大龙口发育了山前冲积扇，在夏季，受天山冰雪融化影响，水携大量石炭系母岩砾石顺扇上辫状河道向下游搬运并沉积下来，进入西大龙口水库，形成了一个完整的砾石质辫状河三角洲。利用无人机倾斜摄影的方法，采集了从上游到下游近 5 km 的两条前述辫状河的影像，发现砾石沿河道分布规律性明显，揭示了单个砾石周长和面积的定量变化规律。研究表明砾石颗粒的主次方向具有较好的线性关系（图 11a），同时，其周长和面积具有很好的指数关系（图 11b）。此

外，砾石颗粒的主方向长度与周长也具有非常好的线性关系（图 11c），从上游到下游的砾石主方向长度逐渐变小（图 11d），也呈较好的线性关系。研究揭示了沿着流程方向上下游砾石各项参数的相关定量关系，这为源—汇系统研究提供了新的证据，也为冲积扇的山口位置确定提供了依据。

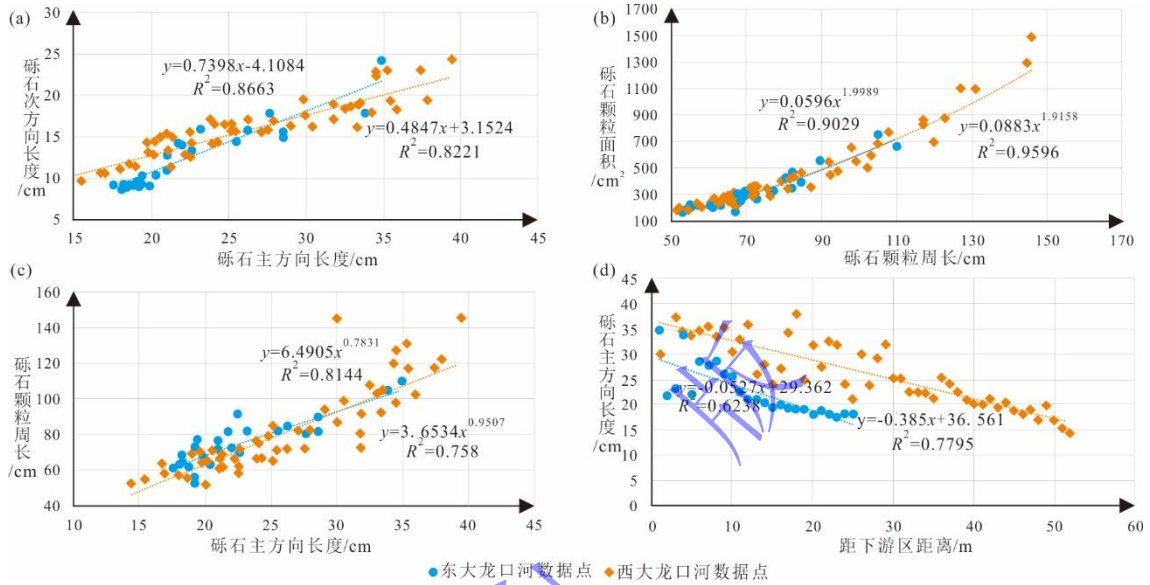


图 11 物源区（母岩区）到沉积区砾石定量表征（新疆西大龙口砾质辫状河）[据文献（Yin *et al.*, 2023a）]
 (a) 砾石颗粒的主次定量关系；(b) 砾石颗粒的周长和面积定量关系；(c) 砾石颗粒的主方向长度与周长定量关系；(d) 砾石主方向长度与距离定量关系

Fig.11 Gravel from source (parent rock) area to deposition area (Xidalongkou gravel braided river in Xinjiang): quantitative relationships between (a) primary and secondary gravel particles; (b) perimeter and area of gravel particles; (c) main direction length and perimeter of gravel particles; (d) main direction length and distance of gravel particles

2.3 定量储层沉积学与三维建模

2.3.1 定量地质知识库获取与建模算法试验

野外地质研究可为地下地质的研究提供原型模型。比如，野外露头观测可以获取丰富的地质参数，主要包括，岩相类型及其组合特征、对应测井曲线的响应特征、砂体构型单元命名及界面位置、砂体几何形态、砂体连续性与规模以及砂体叠置关系等（印森林等，2021；Yin *et al.*, 2023b）（图 12）。这些参数构成地质统计学建模的重要输入要素，包括主次变程、各向异性方向与基台值等统计指标，为露头模拟算法的准确运行奠定基础。

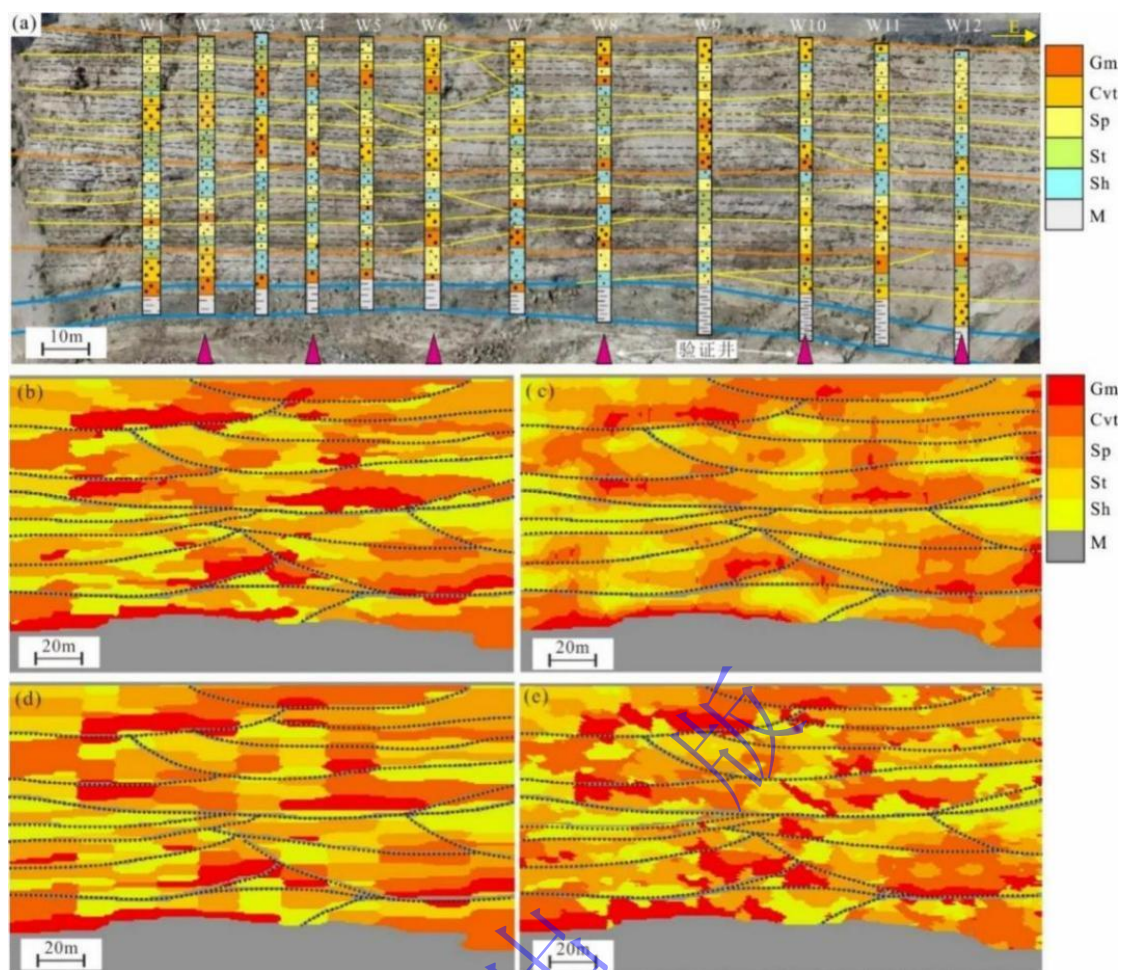


图 12 基于储层构型界面约束下露头模拟 (塔里木盆地鹰嘴山剖面侏罗系阿合组岩相三维建模)
 (a) 塔里木盆地鹰嘴山剖面侏罗系阿合组露头剖面; (b) 序贯指示模拟方法; (c) 截断高斯模拟方法; (d) 指示克里金模拟方法; (e) 多点地质统计模拟

Fig.12 Outcrop simulation based on outcrop section reservoir architecture interface constraints (3D modeling of Jurassic Ahe Formation in Yingzui Mountain section, Tarim Basin)
 (a) outcrop section; (b) sequential indicator simulation; (c) truncated Gaussian simulation; (d) indicator Kriging simulation; (e) multi-point geostatistical simulation

依据野外露头的定量知识库的工作成果 (表 2), 学者们开展了多种露头三维模拟 (严一鸣, 2019)。两点统计学模拟和多点地质统计学模拟均采用了设置虚拟井的方式, 把露头地质信息 (岩相、孔渗参数) 等赋值在井上, 结合定量知识库开展三维地质建模模拟工作。而基于面的模拟方法则在露头剖面解剖基础上, 针对不同构型单元进行界面识别后, 在界面里面开展序贯指示 (图 12a~d)、多点模拟方法 (图 12b)、截断高斯 (图 12c)、指示克里金方法 (图 12d) 等岩相模拟的方式, 主要以露头剖面多个数据点作为数据输入开展三维地质模拟工作 (张文彪等, 2019)。针对露头剖面的三维地质模拟是检验定量知识库的一个重要手段, 同时也可以针对露头大量的地质信息进行模拟结果的验证, 为不确定性评价提供

重要依据。传统的地质统计学建模方法，虽然在一定程度上可以与地质模式保持一致，但当地质模式特征变得复杂时，存在着明显的缺陷。深度学习中的生成对抗网络（GAN）在许多领域取得了成功，研究人员利用生成对抗网络进行有条件（以野外露头为原型模型）的三维相模拟，为上述问题的解决提供新的思路（Song *et al.*, 2021；宋随宏等，2022）。

表 2 露头定量知识库基本特征（塔里木盆地侏罗统阿合组露头砂体单元划分）（据严一鸣，2019）
Table 2 Basic characteristics of outcrop quantitative knowledge base (division of Ahe Formation sand body units of Lower Jurassic in the Tarim Basin) (after Yan, 2019)

构型要素		几何形态	自然伽马曲线及垂向层序	界面特征	岩相组成	古地理特征	侧向关系	单砂体规模
河道砂体	砾质河道砂体CH			①或②或④	Gm Gp	指状、透镜状或席状		约1000m
	砂质河道砂体CH			①或②或④	CSp Cst Mst	透镜状		500~800m
侧向加积砂体(LA)				①或②或③	CSp Gp CSt	席状、透镜状及层状		100~200m
砾石坝及床砂(GB、SG)				①或②	Gm Gp CSt CSp	席状、透镜状及层状		300~500m
大型前积砂体(点、坝、纵坝)(FM&DA)				①或②或③	CSp Gp	透镜状		300~500m
床砂(SB)				①或②或③	Sh Sp	透镜状、席状		约1000m
纹积层砂体(LS)				③或④	MSI MSt	席状、层状		500~800m
越岸细粒沉积砂体(OF)				①或②或④	FSI Mh	层状、席状		200~500m
河口坝及远砂坝(RMB)				①或②或③	MSt	透镜状、席状		500~800m

2.3.2 露头储层构型精细解剖与多维互动应用

传统的野外露头储层构型解剖工作通常局限于 1~2 个剖面，难以实现多剖面的互动分析，限制了对储层构型要素空间分布和组合关系的深入理解。借助无人机倾斜摄影技术，可以从不同视角获取露头的高精度三维模型，支持基于多剖面的互动解释（印森林等，2021，2022a，b；Yin *et al.*, 2023a，b）。这种方法能够更准确地表达构型要素的组合关系及其定量规模分布，显著增强了储层构型解剖的可信度，解决了长期困扰地质研究人员的难题。此外，该技术还克服了地质学家难以到达或无法开展工作的区域的限制。目前，可利用清华大学与北京清华山维公司联合开发的电子平板测图系统（EPS 软件，也称为 EPSW 系统，Engineering Profile System）对无人机倾斜摄影生成的 OSGB 数据模型进行储层构型解释。该软件允许

用户通过绘制线条(类似于多剖面的地震解释工作),开展不同储层构型级别的互动解释(图13)。

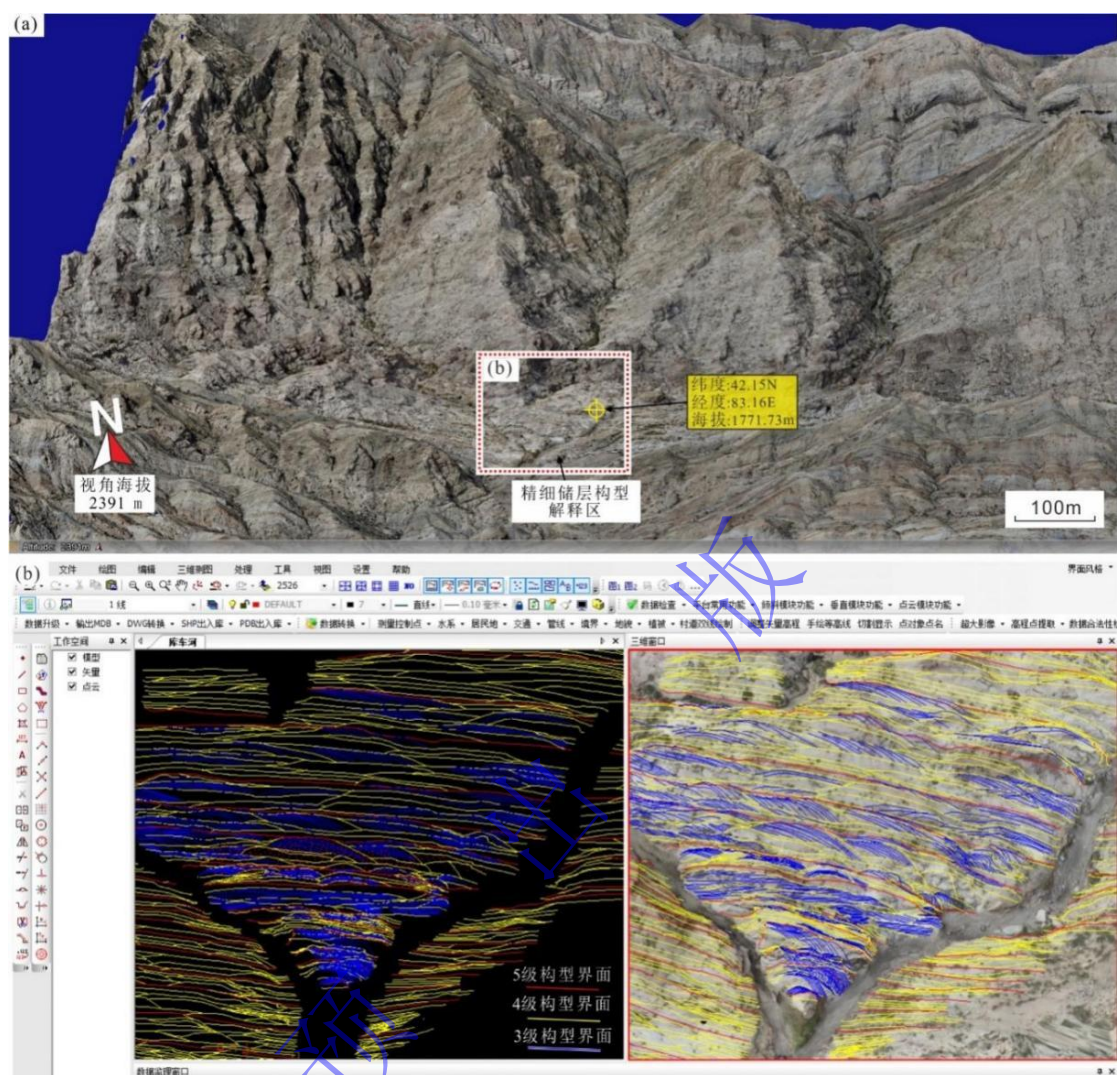


图13 塔里木盆地库车坳陷库车河辫状河露头剖面储层构型解剖

(a) 无人机倾斜摄影露头模型; (b) 基于倾斜摄影模型的储层构型界面解释

Fig.13 Reservoir configuration anatomy of outcrop sections of braided rivers in Kuqa River, Tarim Basin (scale)

(a) UAV oblique photogrammetry outcrop model; (b) interpretation of reservoir architecture interfaces based on oblique photogrammetry models

以塔里木盆地库车河剖面为例(图13a),在层次约束下,对3~5级构型单元进行精细解释。通过互动解释,呈现了5级河道带、4级单一河道、3级侧积体等储层构型单元的几何形态、规模、方向以及叠置关系(图13b)。CloudCompare 软件也是一款开源的3D点云处理软件,可实现大规模3D点云数据的滤波处理、去噪、配准、重采样以及定量的统计计算。在不同视角上,对构型单元进行闭合解释(由于构型单元在不同方向的剖面上形态存在差异),并对不同级次的构型单元规模进行精细测量,刻画了不同级次的定量知识库特征。

这标志着露头研究工作从定性、半定性向全定量研究的重大进步，也为地下储层构型解剖提供了关键的地质依据。

2.3.3 储层质量差异表征

如前所述，无人机倾斜摄影技术结合储层构型表征技术，能够有效呈现露头区宏观构型要素的定量化分布。随着油气勘探开发的不断深入，地下地质研究对精度的要求日益提高，地质研究人员希望获取露头剖面中特定构型要素的微观储层质量差异模式(印森林等, 2021, 2025)。然而，长期以来，野外采集的样品分析测试数据难以精确标定到露头上，亟须将宏观露头研究与野外采样分析测试工作相结合。基于三维定量化储层构型模型，开展相控储层质量的空间差异分布特征研究，深化储层参数的定量三维空间展布，为地下地质研究提供重要的指导和原型模型。例如，塔里木盆地侏罗系阿合组发育了一套厚层的辫状河三角洲沉积，主要由中细砂岩、中砂岩、细砂岩等岩性组成，储层为典型的致密砂岩，分流河道砂体叠置连片发育（图 14a, b）。通过密集采样和分析测试，揭示了露头砂体内部的非均质性特征。

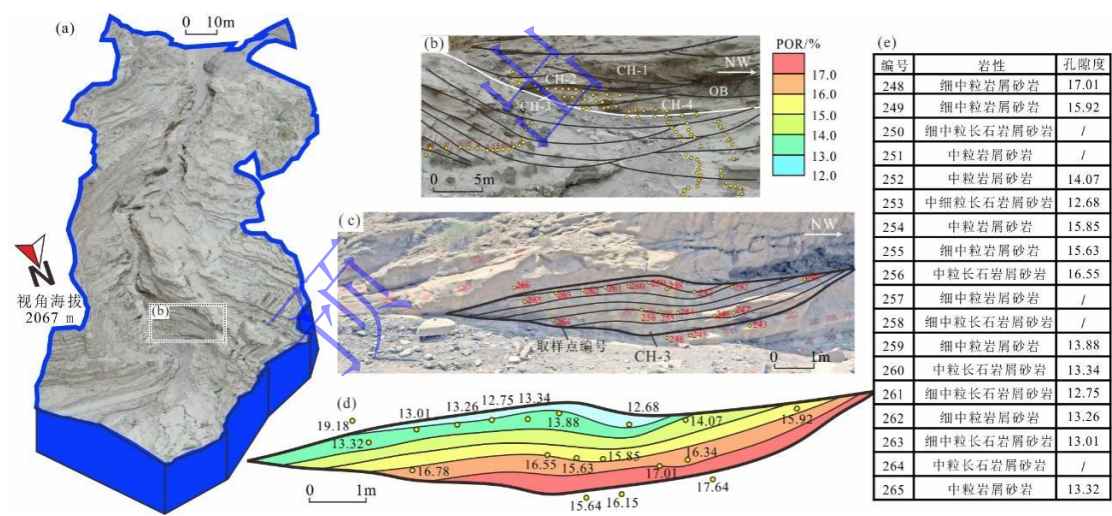


图 14 无人机倾斜摄影与样品测试结合致密砂岩储层质量差异模式
(a) 露头倾斜摄影模型；(b) 复合河道砂体叠置；(c) 单一河道；(d) 单一河道内部孔隙度分布；(e) 露头样品岩性与孔隙度参数

Fig.14 UAV oblique photography combined with sample testing to characterize differences in tight sandstone reservoir quality
(a) outcrop oblique photogrammetry model; (b) superimposed composite channel sandbodies; (c) single channel; (d) porosity distribution within a single channel; (e) lithology and parameters of outcrop porosity samples

研究结果显示，主河道砂体（17 个样品）内部孔隙度向上逐渐降低，呈现正韵律分布，反映了河道垂向充填式的沉积特征（图 14c, d）。这一发现有效指导了油田现场对致密砂岩甜点储层分布的认识。此外，页岩储层中微裂缝的空间分布特征也可通过样品采集和分析

得到，在模型中标定后，可开展三维建模和空间分布预测。

2.4 基于无人机倾斜摄影数据的人工智能数据挖掘与识别

目前，基于卷积神经网络的深度学习方法已广泛应用于无人机拍摄的露头图像的岩性分类。然而，对无人机拍摄的厘米级精度露头照片进行岩性智能解释的研究相对较少。Luo *et al.* (2024) 提出了一种基于 DeepLabV3 神经网络的高分辨率无人机图像自动岩性识别架构，旨在实现更程度的自动化。步骤包括数据采集、数据集制作、模型训练与对比、岩性地质分析和结果展示。

DeepLabV3 神经网络模型用于基于无人机倾斜摄影图像识别露头岩性。该模型由数据预处理和数据集构建、语义分割模型训练、露头岩性智能识别三层组成。为了训练基于深度卷积神经网络的语义分割模型，创建了符合深度卷积神经网络读取格式的数据集。该数据集分为岩性、植物和背景三种类型。Luo *et al.* (2024) 使用 RealityCapture 软件从 Sect.3 获得的三维模型中导出露头数字正射影像，然后使用 DeepLabV3 模型预测这些大尺度露头剖面的岩性分布特征。DeepLabV3 模型在碎屑岩岩性识别方面具有一定的准确性和可靠性（图 15）。图像中的遮挡物（如植被、建筑物等）以及光照条件对图像质量的影响可能导致一些细微的岩性特征难以识别。当然，DeepLabV3 神经网络方法也可以对倾斜摄影模型开展裂缝智能识别与信息挖掘，小尺度范围（米）裂缝识别效果较好，识别率约 95%，但大尺度范围（百米级别）则受到训练图像的多样性不足、模型的识别能力和算力影响则识别率明显下降，识别率约 75%。

值得注意的是，也有学者开展了基于激光点云的强弱来开展岩性识别的工作。例如，Živec *et al.* (2019) 研究发现，方解石和石英含量对激光强度存在良好相关性，可利用地面三维激光扫描技术（terrestrial laser scanning，简称 TLS）激光强度和 RGB 颜色信息构建分类决策树以区分岩性。其将 TLS 捕获的强度差、反射结构信息与 XRD（X 射线衍射）和岩性剖面的结果进行对比分析，以区分泥灰岩和砂岩（Živec *et al.*, 2019）。研究发现，两类岩石的强度值差异十分显著。因此基于激光的岩性识别受矿物颜色、粒度、风化程度等多因素影响较大（邵燕林等，2025）（图 16）。

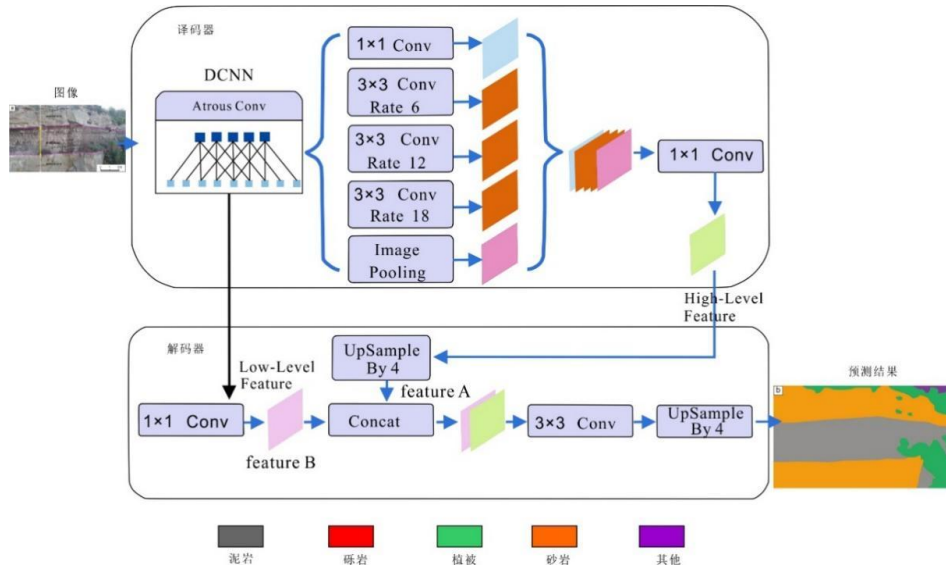
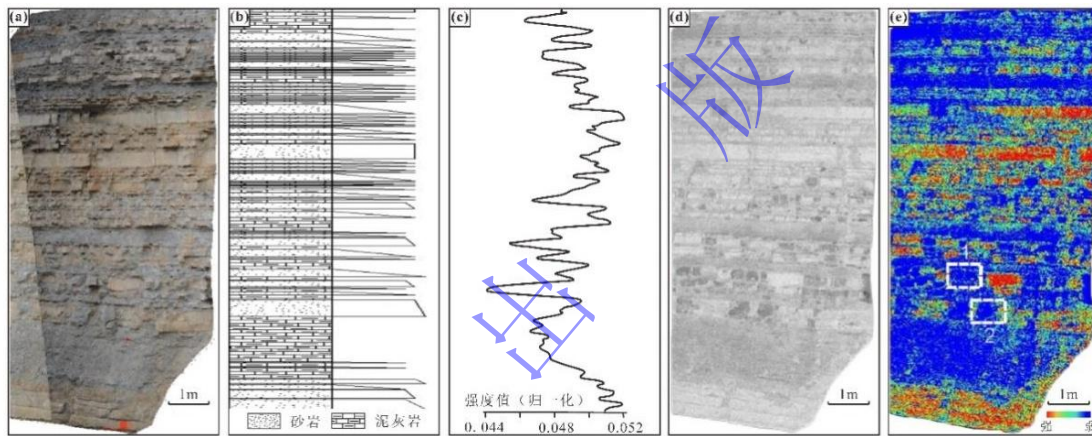
图 15 无人机倾斜摄影高分辨率图像岩性识别流程图 (据 Luo *et al.*, 2024)

Fig.15 Flow chart of rock identification in high resolution image of UAV oblique photography

图 16 基于激光点云强度岩性识别 (据 Živec *et al.*, 2019)

(a) 彩色点云图; (b) 岩性剖面图; (c) 强度值分布图; (d) TLS-RAW 强度值; (e) 浅蓝—黄—红砂岩层和深蓝色泥灰岩层

Fig.16 Rock type identification based on laser point cloud intensity(after Živec *et al.*, 2019)

(a) colored point cloud map; (b) lithological section; (c) intensity value distribution map; (d) TLS-RAW intensities; (e) light blue-yellow-red sandstone layers and dark blue marl layers

另外, 无人机技术与人工智能、物联网等领域的交叉创新日新月异, 如“无人机—边缘计算—实时建模”系统等, 以基于轻量化 AI 模型部署来说, 研究基于边缘计算 (如 NVIDIA Jetson、高通无人机平台) 的实时岩性、裂缝等目标精准识别检测。还有, 无人机—数字孪生—物联网融合, 基于无人机搭载 LiDAR 与多光谱传感器, 为野外露头区构建数字孪生体, 结合传感器实现虚实互动。这些技术进步大大加强了露头数据的实时处理、地质参数识别与挖掘的能力 (周红等, 2025)。

3 发展与展望

本文系统回顾了无人机倾斜摄影技术的发展历程, 以及其在数字露头可视化呈现、层序地层与源—汇系统研究、定量储层沉积学与三维建模、基于高分辨率野外地质影像的人工智

能数据挖掘与识别等方面的应用进展。为了进一步提高地下油藏地质研究的精度，建立指导地下油藏研究的原型模型，无人机倾斜摄影技术亟须在以下几个方面进行深化与拓展。

3.1 智能化的沉积地质特征识别与建模算法研究

传统的野外露头研究主要依赖于点（观察典型现象点）和线（测量剖面线）等手工方式，缺乏自动化和智能化的工作方法体系。借助无人机技术，实现了对露头区任意位置的精准定位。然而，下一步需要在露头区引入深度学习等人工智能算法，开展大尺度范围内的岩性智能识别与解释（常乐等，2023；刘彦锋等，2023）。随着倾斜摄影成像分辨率的不断提升（可达毫米级别），对各种沉积构造、多级次储层裂缝的智能识别需求日益迫切。此外，除前述对砾石的定量研究外，对相对细粒的沉积岩（粒度在细砂岩以下）的岩石颗粒进行智能识别，也是重要的发展方向（Yin *et al.*, 2023a）。

另外，露头智能化的沉积地质特征挖掘对三维建模算法研究意义十分重大。长期以来，诸多地质统计学方法被应用于各类储层的地质建模。其中，基于变差函数的方法可以较好地吻合井筒、地震等条件数据，然而在描述复杂的储层非均质性特征和空间结构时略显不足；基于目标的方法只能模拟预设的几种简单几何形态的地质体（Song *et al.*, 2021；宋随宏等，2022）；基于沉积模拟的输入数据通常都难以直接测量，不确定性较大，模拟结果与井数据、地震数据等条件数据吻合难度大，需要大量的手动调整工作，通常需耗时 1~2 个月才能获取与观测数据吻合度较高的模型，效率较低。由于当前建模方法的局限性和人工智能技术的发展，以深度学习为代表的人工智能地质建模方法以大规模训练样本为基础，地质知识蕴含在大规模训练样本中，相比于多点地质统计学，可以从训练样本中挖掘更丰富的地质知识，建立更符合地质规律的地质模型，并且在同类地质问题中可以一次训练多次应用（常乐等，2023）。野外露头信息丰富，微尺度、小尺度和中尺度的地质体知识丰富，是建立大量训练样本的重要来源。因此，开展基于建模的露头数据挖掘与提取工作对地质建模理论意义重大。

3.2 数字孪生系统与可视化呈现的升级

随着人工智能、大数据、信息技术和虚拟现实技术的快速发展，将数字露头三维模型赋予沉积地质学内涵，利用数字孪生技术生动展示各种沉积地质现象成为可能。通过将无人机

生成的 OSGB 模型与地理遥感 DEM 数据进行三维融合处理, 实现区域大尺度与剖面小尺度的空间数据融合。随后, 将野外露头研究的相关岩石静态地质属性和工程参数数据输入模型, 在无人机采集的三维模型上形成覆盖物理模型的露头地质参数数据。构建目标倾斜摄影模型、露头数据模型和地质知识结构模型, 将沉积地质知识结构模型映射到倾斜摄影模型中, 三者相互耦合, 构建野外露头场景的数字孪生模型 (印森林等, 2023)。

数字孪生系统由物理岩石结构模型和几何模型多层次、多尺度集成, 将物理空间中的物理岩石实体在虚拟空间进行全要素重构, 通过数据融合和迭代计算, 形成具有感知、分析、决策和执行能力的数字孪生体; 所述数字孪生体作为物理实体在虚拟空间的 1:1 映射, 采用集成的多物理、多尺度和三维渲染模型, 基于机器视觉和深度学习算法, 实现对物理实体的数字镜像和数据驱动。通过 AR 或 VR 人机接口和数据库接口, 实现智能三维野外露头场景数字孪生体与物理实体的实时交互及虚拟现实的展示, 可以为沉积地质学的科普工作提供沉浸式的体验, 使得沉积地质学研究的内涵和魅力得以更加完美地彰显。

3.3 储层成因解释与原型模型深度挖掘

地质学家一直对储层的成因解释, 特别是其沉积演化过程十分有兴趣。然而, 受到资料条件的限制, 很多露头剖面的沉积过程、沉积现象与沉积规律的成因解释困难较大。无人机倾斜摄影露头建模后, 结合沉积过程数值模拟和水槽物理实验沉积模拟开展互动型成因解释, 为露头剖面的成因解释提供了新的思路与方法。基本思路如下: 以露头剖面中解释的构型面为约束, 结合沉积模拟结果, 对储层砂体进行成因综合解释。具体包括砂体连通性与储层构型相似性的定量评价, 对气候条件与物源条件等输入参数的相互验证与对比, 以及不同尺度和规模下自旋回与异旋回沉积特征的综合分析。这样可系统揭示储层空间格局与成因机制之间的内在联系。

3.4 地下(深层)多尺度数据信息的标定

地震资料是油气勘探开发中的核心资料。然而, 在深层、超深层 (6~12 km) 地震资料中, 信噪比低、分辨率不足的问题十分突出; 在中浅层 (2~3.5 km) 地层, 地震主频约 40 Hz 时对 8 m 以下砂体的分辨能力亦十分有限。尽管无人机倾斜摄影生成的高精度地表三维模型

无法直接“成像”深部地质体,其价值在于为多尺度数据的标定与综合解释提供关键的地表边界条件和几何约束。

首先,可以将倾斜摄影获得的数字高程模型与浅层地震及地面地球物理剖面进行尺度匹配,用以校正浅层速度模型并优化地震正演与反演参数,从而提高对深层和超深层微弱地震反射的识别能力。其次,可将三维数字高程模型中提取的断层面、层序界面及岩性分布等几何特征作为地震属性反演的先验信息或训练样本,减少超深层地震反演的不适应性。再次,基于露头观测的沉积相和断裂体系,可构建深部地层和构造演化模型,并结合热力学与流体流动模拟,推断深部物性参数和构造应力场,以增强对深部地质体的解释可靠性。

此外,在开发区块 2~3.5 km 地层中 8 m 以下的“泛连通体”砂岩储层 (<8 m) 时,也可利用无人机倾斜摄影获取分米级露头三维模型后,开展密集的露头储层构型研究,并结合多频率(高、中、低频)地震正演模拟,系统评估不同频段下砂体几何形态及弱反射特征,为小尺度单体砂体的地下解释提供坚实依据(Zhang *et al.*, 2021)。

测井资料虽然分辨率高,但受井筒环境和仪器特性影响,某些特殊地质体的曲线响应可能不够清晰。为此,可在露头剖面上实施表面测井(如 GR、声波、密度等),并与井下测井曲线进行对比较准。这一方法不仅能够精确识别不同岩性的测井响应特征,还可将露头与地下数据互为印证,显著提升测井资料在储层描述与地层对比中的可靠性和应用价值。

3.5 无人机倾斜摄影技术在沉积地质学的相关拓展

前述高精度数字露头模型不仅可辅助地质地理类专业虚拟沉积地质教育,也便于学生对宏观概念与微观沉积构造的互动理解,同时激发当代青少年的兴趣,使我们国家地质行业后继有人。基于露头三维定量模型的数值模拟研究是地质学家的重要探索方向。地质学家一直尝试开展看得见的注水/气开发试验工作,比较典型的是在河北滦平扇三角洲露头(贾爱林等, 2021),以及新疆克拉玛依市托里县三叠系上克拉玛依组辫状河沉积,开展的露头钻井与注水试验研究。其中辫状河露头为孤立性露头区,四周可以方便查看出水点(新疆石油管理局油田研究所, 1978)。此项工作耗时且经济成本较高。利用无人机倾斜摄影技术对露头进行三维建模,设置虚拟的关键参数,依据地质模型的实际情况,开展基于地下开发区开发

参数的数值模拟研究，是一种新颖的思路（Cabello *et al.*, 2018; 陈星月等, 2025）。这种方法不仅节约成本，同时可以多次试验，直到得到与地下实际情况较为吻合的结果。采用静动结合的研究方法，可指导地下油藏的小尺度砂体连通关系、注采对应性关系、剩余油分布的模式、井网井距设置和后期开发调整措施等工作。当然，作为当前关注热点，露头数字化建模技术在碳中和（如 CO₂ 地质封存监测）中大显身手，可以提供地下封存原型模型，完美可视化呈现地下模型与封存效果。

此外，基于水槽尺度的定量化源—汇系统研究也值得关注。由于自然界源—汇系统范围太大，不易搜集资料，其过程响应也无法全面监测，因此，可以在等比例缩小的源渠汇水槽模拟系统中，利用相似性原理开展研究。由于无人机倾斜摄影模型具有高分辨率与全局定量、定位的特点，开展空间源汇系统的定量化研究，为系统的表达沉积体系对异旋回的响应特征提供了新的思路。

再者，基于无人机与探地雷达的结合研究砂体的三维空间展布，也是一种有效的方法。无人机可对地表露头进行定量化采集，探地雷达则可对地表以下的内部结构进行研究分析，两者结合可完美表征地质体的空间分布（Guo *et al.*, 2022）。然而，需要加强两者分辨率的匹配，进行剖面的可视化标定工作，以最大限度地消除影响。

3.6 当前技术挑战与应对策略

尽管无人机倾斜摄影在沉积地质学中广泛应用，但其三维模型质量仍受传感器姿态抖动与空中三角测量系统误差制约，尤其在缺乏高精度 RTK/PPK 与地面控制点时，模型易出现碗形畸变和高程偏差（Sanz-Ablanedo *et al.*, 2018）。此外，风速扰动和复杂地形下的定位误差也可导致模型局部严重失真（Madjid *et al.*, 2018）。可通过部署高精度机载惯性测量单元与差分 GPS，结合在线自标定技术与更严格的最小二乘平差算法，动态校正姿态与定位误差，从而显著提升空中三角测量解算的绝对精度。

在人工智能驱动的岩性与构造识别方面，基于单一可见光影像的深度学习模型泛化能力有限，难以适应不同岩性、光照与遮挡条件。可尝试通过融合多光谱与 LiDAR 强度信息，结合层面产状等地质先验信息，提升识别鲁棒性（Franceschi *et al.*, 2009; Nováková *et al.*,

2022)。未来可继续引入迁移学习与生成对抗网络数据增强策略,以扩充训练样本并提升跨场景适应能力。

多源数据融合在实现影像、激光点云、DEM与多光谱信息的高精度配准时,常因坐标基准与分辨率差异而产生明显误差(Chen *et al.*, 2021)。当前进展包括结合特征匹配与迭代最近点算法进行迭代优化,以及利用断层面、层序界面等地质显著面作为配准参考,以增强融合稳健性(Franceschi *et al.*, 2009; Nováková *et al.*, 2022)。

在野外快速部署与实时处理方面,多旋翼无人机续航与本地计算资源仍不足,大范围三维建模往往需回到室内进行离线处理。“边飞、边传、边建”的实时建模系统正在兴起,通过嵌入式GPU与5G/卫星链路回传,可在数分钟内生成高分辨率三维模型。同时,将数字露头与地下地震、测井资料联合标定,亦面临尺度和坐标偏差挑战,未来可通过关键界面标志层匹配、正演/反演联合校准及跨尺度机器学习特征提取,构建露头—测井—地震一体化反演框架,进一步加强地表与地下的耦合解释。

4 结论

(1) 无人机倾斜摄影技术作为近十年来快速发展的融合技术之一,其产品和建模软件种类繁多,进展迅速。随着近年来国家低空经济战略的快速实施,在沉积地质领域,特别是油气地质领域,具有广阔的应用空间和巨大的市场潜力。其技术进步推动了相关理论的发展,本文首次系统梳理了无人机技术在沉积地质学中的多尺度应用、定量储层沉积学与三维建模理论等进展,技术应用主要体现在数字露头可视化呈现与数字孪生、大尺度的层序地层与源—汇系统,以及野外地质高分辨率影像的人工智能数据挖掘与识别等方面。

(2) 基于应用前景和发展特点,本文提出了下一步的展望,包括智能化的沉积地质特征识别与建模算法研究、数字孪生系统与可视化呈现的升级、储层成因解释与原型模型的深度挖掘、地下多尺度数据信息的标定与研究拓展等方面。当然,针对地下地质研究工作的指导作用等,许多工作还处于探索阶段,任重道远。未来,需要地质学家、工程师和技术专家

的共同努力, 推动无人机倾斜摄影技术在沉积地质领域的深入应用和持续发展。

致谢 感谢评审专家的宝贵意见, 感谢陈星月、张瑶崴、毛澄提供相关图件!

参考文献 (References)

- 常乐, 韩磊, 陈宗强, 等. 2023. 基于无人机遥感的大坡度地质露头岩性分类[J]. 测绘通报, (11): 42-47. [Chang Le, Han Lei, Chen Zongqiang, et al. 2023. Lithology classification of large slope geological outcrop based on UAV multi spectral remote sensing[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (11): 42-47.]
- 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. [Chen Xingyue, Yin Senlin, Sun Jing, 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.]
- 董志成, 陈恭洋, 印森林, 等. 2024. 基于 WebGL 的数字露头可视化表征与识别系统: 以无人机倾斜摄影依奇克里克剖面为例[J]. 科学技术与工程, 24(11): 4633-4642. [Dong Zhicheng, Chen Gongyang, Yin Senlin, et al. 2024. Digital outcrop visualization characterization and application system based on WebGL: A case study of UAV-based tilt photography in Yiqikelike section[J]. Science Technology and Engineering, 24(11): 4633-4642.]
- 黄海峰, 张瑞, 周红, 等. 2024. 小尺度山区地质灾害隐患的无人机精细化识别方法与实践[J]. 测绘通报, (1): 6-11. [Huang Haifeng, Zhang Rui, Zhou Hong, et al. 2024. Refined identification method and practice of unmanned aerial vehicle for geological hazards in small-scale mountainous areas[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (1): 6-11.]
- 贾爱林, 郭智, 郭建林, 等. 2021. 中国储层地质模型 30 年[J]. 石油学报, 42(11): 1506-1515. [Jia Ailin, Guo Zhi, Guo Jianlin, et al. 2021. Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past three decades[J]. Acta Petrolei Sinica, 42(11): 1506-1515.]
- 李欢. 2020. 低空无人机倾斜摄影测量成果精度研究[J]. 甘肃科学学报, 32(2): 27-33. [Li Huan. 2020. Study on the accuracy of oblique photogrammetry results of low-altitude unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Gansu Sciences, 32(2): 27-33.]
- 刘彦锋, 段太忠, 黄渊, 等. 2023. 沉积过程模拟驱动下的深度学习地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 44(1): 226-237. [Liu Yanfeng, Duan Taizhong, Huang Yuan, et al. 2023. Deep learning-based geological modeling driven by sedimentary process simulation[J]. Oil & Gas Geology, 44(1): 226-237.]
- 邵燕林, 刘浪, 曾齐红, 等. 2025. 激光三维点云在岩性语义分割中的应用综述[J]. 科学技术与工程, 25(4): 1313-1324. [Shao Yanlin, Liu Lang, Zeng Qihong, et al. 2025. Application of laser 3D point cloud in semantic segmentation of lithology[J]. Science Technology and Engineering, 25(4): 1313-1324.]
- 盛辉, 段政明, 刘善伟, 等. 2020. 大坡度地质露头高分辨率无人机影像采集方法与建模实践[J]. 古地理学报, 22(4): 799-806. [Sheng Hui, Duan Zhengming, Liu Shanwei, et al. 2020. High resolution UAV image acquisition method and modeling practice for geological outcrop with a large slope[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(4): 799-806.]
- 宋随宏, 史燕青, 侯加根. 2022. 基于生成对抗网络的储层地质建模方法研究进展[J]. 石油科学通报, 7(1): 34-49. [Song Suihong, Shi Yanqing, Hou Jiagen. 2022. Review of a Generative Adversarial Networks (GANs)-based geomodeling method[J]. Petroleum Science Bulletin, 7(1): 34-49.]
- 孙信尧, 王平, 张宏, 等. 2023. 无人机在沉积学中的应用现状及展望[J]. 地质科技通报, 42(1): 407-419. [Sun Xinyao, Wang Ping, Zhang Hong, et al. 2023. Applications status and prospects for using unmanned aerial vehicle in sedimentology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 42(1): 407-419.]
- 万剑华, 王朝, 刘善伟, 等. 2019. 倾斜摄影测量构建地质数字露头[J]. 地质科技通报, 38(1): 258-264. [Wan Jianhua, Wang Zhao, Liu Shanwei, et al. 2019. Reconsting geological digital outcrops with oblique photogrammetry[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 38(1): 258-264.]

- 新疆石油管理局油田研究所. 1978. 露头注水试验[J]. 石油勘探与开发, (6): 68-79. [Oilfield Research Institute of Xinjiang Petroleum Administration. 1978. Outcrop water injection experiments[J]. Petroleum Exploration and Development, (6): 68-79.]
- 严一鸣. 2019. 库车地区下侏罗统阿合组深层储层结构非均质性及成岩演化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东). [Yan Yiming. 2019. Diagenetic evolution and structural heterogeneity of deep-buried reservoir of Lower Jurassic Ahe Formation in Kuqa Region[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China).]
- 印森林, 陈恭洋, 刘兆良, 等. 2018a. 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, 36(1): 72-80. [Yin Senlin, Chen Gongyang, Liu Zhaoliang, et al. 2018a. 3D digital outcrop characterization technology based on unmanned aerial vehicle oblique photography[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36(1): 72-80.]
- 印森林, 谭媛元, 张磊, 等. 2018b. 基于无人机倾斜摄影的三维露头地质建模: 以山西吕梁市坪头乡剖面为例[J]. 古地理学报, 20(5): 909-924. [Yin Senlin, Tan Yuanyuan, Zhang Lei, et al. 2018b. 3D outcrop geological modeling based on UAV oblique photography data: A case study of Pingtouxian section in Lüliang City, Shanxi province[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20(5): 909-924.]
- 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. [Yin Senlin, Gao Yang, Hu Zhangming, et al. 2021. Multiple-point geostatistical simulation of outcrop based on UAV oblique photographic data: A case study of Shihezi Formation in Pingtou township, Lüliang city, Shanxi[J]. Acta Petrolei Sinica, 42(2): 198-216.]
- 印森林, 陈强路, 袁坤, 等. 2022a. 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. [Yin Senlin, Chen Qianglu, Yuan Kun, et al. 2022a. Characterization of multi-scale 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.]
- 印森林, 陈恭洋, 许长福, 等. 2022b. 陆相混积细粒储层岩岩相构型及其对甜点的控制作用: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为例[J]. 石油与天然气地质, 43(5): 1180-1193. [Yin Senlin, Chen Gongyang, Xu Changfu, et al. 2022b. Lithofacies architecture of lacustrine fine-grained mixed reservoirs and its control over sweet spot: A case study of Permian Lucaogou Formation shale oil reservoir in the Jimsar Sag, Juggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 43(5): 1180-1193.]
- 印森林, 杨妍, 万远, 等. 2023. 野外露头数字孪生系统呈现与应用: 以陕西府谷县辫状河露头为例[C]//第十七届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集: 其它摘要. 青岛: 中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会, International Society of Palaeogeography (ISP, 国际古地理学会), 中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会、中国地质学会沉积地质专业委员会, 中国地质学会地层古生物专业委员会, 中国石油学会石油地质专业委员会, SEPM (Society for Sedimentary Geology). [Yin Senlin, Yang Yan, Wan Yuan, et al. 2023. Presentation and application of the field outcrop digital twin system: A case study of the braided river outcrop in Fugu county, Shaanxi[C]//Proceedings of the 17th national conference on palaeogeography and sedimentology. Qingdao: The Lithofacies Palaeogeography Professional Committee of the Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, International Society of Palaeogeography(ISP).]
- 印森林, 林少玲, 胡张明, 等. 2025. 致密砂岩储层内部矿物三维建模与裂缝型甜点分布: 以川西工农镇野外露头剖面须二段为例[J]. 地学前缘, 32(5): 404-416. [Yin Senlin, Lin Shaoling, Hu Zhangming, et al. 2025. 3D model of mineral interior tight sandstone reservoir and distribution of fracture dessert: Take 2nd Xujiache Formation outcrop section in western Sichuan Basin as an example[J]. Earth Science Frontiers, 32(5): 404-416.]
- 詹容若, 段亮, 罗晓容, 等. 2021. 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, 41(6): 1050-1058. [Zhan Rongruo, Duan Liang, Luo Xiaorong, et al. 2021. 3D digital outcrop modeling with high resolution using drone-based multi-point photography[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 41(6): 1050-1058.]
- 张国栋. 2024. 无人机摄影测量和地面三维激光扫描在峨边县某公路崩塌地质灾害调查中的应用[J]. 四川地质学报, 44(1): 158-161. [Zhang Guodong. 2024. Application of UAV photogrammetry and ground 3D laser scanning in Geohazard investigation of a highway collapse in Ebian County[J]. Acta Geologica Sichuan, 44(1): 158-161.]

- 张金荣. 2024. 机载激光雷达技术在矿山大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 世界有色金属, (20): 153-155. [Zhang Jinrong. 2024. Application of airborne LiDAR technology in large-scale topographic mapping of mines[J]. World Nonferrous Metals, (20): 153-155.]
- 张文彪, 段太忠, 刘彦锋, 等. 2019. 定量地质建模技术应用现状与发展趋势[J]. 地质科技情报, 38(3): 264-275. [Zhang Wenbiao, Duan Taizhong, Liu Yanfeng, et al. 2019. Application status and development trend of quantitative geological modeling[J]. Geological Science and Technology Information, 38(3): 264-275.]
- 张永刚, 周朝荣, 沈锋. 2024. 面向地质灾害勘测应用的无人机 GNSS 抗干扰技术[J]. 哈尔滨理工大学学报, 29(3): 45-50. [Zhang Yonggang, Zhou Chaorong, Shen Feng. 2024. A GNSS anti-jamming technology of UAV for geological hazard monitoring[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 29(3): 45-50.]
- 郑红霞, 李凌昊, 盛辉, 等. 2023. 基于无人机贴近摄影测量的剖面数字露头系统研发及岩层面重构方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 47(2): 53-63. [Zheng Hongxia, Li Linghao, Sheng Hui, et al. 2023. Research of digital outcrop profile system and reconstruction method of rock surface based on unmanned aerial vehicle close photogrammetry[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 47(2): 53-63.]
- 郑明, 宋扬, 唐菊兴, 等. 2022. 青藏高原高海拔: 难进入地区无人机地质调查试验研究与应用展望[J]. 地质论评, 68(4): 1423-1438. [Zheng Ming, Song Yang, Tang Juxing, et al. 2022. Groundbreaking flying test of the UAV-based geological survey in high-elevation and hard-to-reach areas of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau and its application prospect[J]. Geological Review, 68(4): 1423-1438.]
- 周红, 倪锐, 卢建民, 等. 2025. 无线通信的历史、现状、挑战与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 55(4): 766-795. [Zhou Hong, Ni Rui, Lu Jianmin, et al. 2025. History, current status, challenges and prospects of wireless communication[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 55(4): 766-795.]
- Abels H A, Kraus M J, Gingerich P D. 2013. Precession-scale cyclicity in the fluvial Lower Eocene Willwood Formation of the Bighorn Basin, Wyoming (USA)[J]. Sedimentology, 60(6): 1467-1483.
- Abels H A, Lauretano V, van Yperen A E, et al. 2016. Environmental impact and magnitude of paleosol carbonate carbon isotope excursions marking five Early Eocene hyperthermals in the Bighorn Basin, Wyoming[J]. Climate of the Past, 12(5): 1151-1163.
- Atkinson K B. 1996. Close range photogrammetry and machine vision[M]. Caithness: Whittles Publishing.
- Barrientos A, Colorado J, del Cerro J, et al. 2011. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots[J]. Journal of Field Robotics, 28(5): 667-689.
- Bemis S P, Mickethwaite S, Turner D, et al. 2014. Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology[J]. Journal of Structural Geology, 69: 163-178.
- Buckley S J, Howell J A, Enge H D, et al. 2008. Terrestrial laser scanning in geology: Data acquisition, processing and accuracy considerations[J]. Journal of the Geological Society, 165(3): 625-638.
- Buckley S J, Howell J A, Naumann N, et al. 2022. V3Geo: A cloud-based repository for virtual 3D models in geoscience[J]. Geoscience Communication, 5(1): 67-82.
- 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)[J]. Marine and Petroleum Geology, 94: 19-42.
- Carrivick J L, Smith M W, Quincey D J. 2016. Structure from motion in the geosciences[M]. Chichester: John Wiley & Sons.
- Catuneanu O. 2006. Principles of Sequence Stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Chen J H, Wang B Q, Wang F, et al. 2021. Identification of outcropping strata from UAV oblique photogrammetric data using a spatial case-based reasoning model[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 103: 102450.
- Colomina I, Molina P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92: 79-97.
- Eisenbeiss H. 2009. UAV photogrammetry[D]. Zurich: ETH Zurich.
- Enge H D, Buckley S J, Rotevatn A, et al. 2007. From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures[J]. Geosphere, 3(6): 469-490.

- Fabuel-Perez I, Hodgetts D, Redfern J. 2010. Integration of digital outcrop models (DOMs) and high resolution sedimentology-workflow and implications for geological modelling: Oukaimeden Sandstone Formation, High Atlas (Morocco)[J]. *Petroleum Geoscience*, 16(2): 133-154.
- Floreano D, Wood R J. 2015. Science, technology and the future of small autonomous drones[J]. *Nature*, 521(7553): 460-466.
- Franceschi M, Teza G, Preto N, et al. 2009. Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6): 522-528.
- Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. 2016. *Deep learning*[M]. London: MIT Press.
- Guo W, Dong C M, Lin C Y, et al. 2022. 3D sedimentary architecture of sandy braided river, based on outcrop, unmanned aerial vehicle and ground penetrating radar data[J]. *Minerals*, 12(6): 739.
- Harwin S, Lucieer A. 2012. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery[J]. *Remote Sensing*, 4(6): 1573-1599.
- James M R, Robson S. 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3): F03017.
- Kersten T P, Lindstaedt M. 2012. Image-based low-cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects[C]//*Proceedings of the 4th international conference on progress in cultural heritage preservation*. Lemessos: Springer, 1-10.
- Kraus K. 2007. *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans*[M]. Berlin: Walter de Gruyter.
- Luhmann T, Robson S, Kyle S, et al. 2014. *Close-range photogrammetry and 3D imaging*[M]. Berlin: Walter de Gruyter.
- Luo S Y, Yin S L, Chen J, et al. 2024. Lithology identification of UAV oblique photography images based on semantic segmentation neural network algorithm[J]. *Mathematical Geosciences*, 56(5): 1053-1072.
- Madjid M Y A, Vandeginste V, Hampson G, et al. 2018. Drones in carbonate geology: Opportunities and challenges, and application in diagenetic dolomite geobody mapping[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 91: 723-734.
- McGlone J C. 2013. *Manual of photogrammetry*[M]. 6th ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Meyers S R. 2019. Cyclostratigraphy and the problem of astrochronologic testing[J]. *Earth-Science Reviews*, 190: 190-223.
- Nex F, Remondino F. 2014. UAV for 3D mapping applications: A review[J]. *Applied Geomatics*, 6(1): 1-15.
- Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. 2012. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results[J]. *Engineering Geology*, 128: 2-11.
- Nováková M, Gallay M, Šupinský J, et al. 2022. Correcting laser scanning intensity recorded in a cave environment for high-resolution lithological mapping: A case study of the Gouffre Georges, France[J]. *Remote Sensing of Environment*, 280: 113210.
- Posamentier H W, Vail P R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition II-sequence and systems tract models[M]// Wilgus C K, Hastings B S, Posamentier H, et al. *Sea-level changes: An integrated approach*. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 125-154.
- Remondino F, El-Hakim S. 2006. Image-based 3D modelling: A review[J]. *The Photogrammetric Record*, 21(115): 269-291.
- Remondino F, Rizzi A. 2010. Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites-techniques, problems, and examples[J]. *Applied Geomatics*, 2(3): 85-100.
- Sanz-Ablanedo E, Chandler J H, Rodríguez-Pérez J R, et al. 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used[J]. *Remote Sensing*, 10(10): 1606.
- Song S H, Mukerji T, Hou J G. 2021. Geological Facies modeling based on progressive growing of generative adversarial networks (GANs)[J]. *Computational Geosciences*, 25(3): 1251-1273.
- Stumpf A, Kerle N. 2011. Object-oriented mapping of landslides using Random Forests[J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2564-2577.
- Szeliski R. 2011. *Computer vision: Algorithms and applications*[M]. London: Springer.
- Turner D, Lucieer A, Watson C. 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds[J]. *Remote Sensing*, 4(5): 1392-1410.

- Turner D, Lucieer A, De Jong S M. 2015. Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. *Remote Sensing*, 7(2): 1736-1757.
- Vasuki Y, Holden E J, Kovesi P, et al. 2014. Semi-automatic mapping of geological structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach[J]. *Computers & Geosciences*, 69: 22-32.
- Vázquez-Tarrio D, Borgniet L, Liébault F, et al. 2017. Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps)[J]. *Geomorphology*, 285: 94-105.
- Vollgger S A, Cruden A R. 2016. Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia[J]. *Journal of Structural Geology*, 85: 168-187.
- Wan J, Wei Z. 2024. Unveiling chromaticity and Milankovitch cycles in sedimentary rocks via unmanned aerial vehicle photogrammetry[J]. *Newsletters on Stratigraphy*, 57(2): 235-256.
- Wang Y W, Storms J E A, Martinius A W, et al. 2021. Evaluating alluvial stratigraphic response to cyclic and non-cyclic upstream forcing through process-based alluvial architecture modelling[J]. *Basin Research*, 33(1): 48-65.
- Wang Y W, Baars T F, Sahoo H, et al. 2022. Sandstone body character and river planform styles of the Lower Eocene Willwood Formation, Bighorn Basin, Wyoming, USA[J]. *Sedimentology*, 69(7): 2897-2924.
- Wang Y W, Baars T F, Storms J E A, et al. 2023. Lateral and vertical characteristics of floodplain aggradation cycles in the Lower Eocene Willwood Formation, Bighorn Basin, Wyoming, USA[J]. *GSA Bulletin*, 136(5/6): 2568-2581.
- Wang Y W, Baars T F, Storms J E A, et al. 2024. Long-eccentricity pacing of alluvial stratigraphic architecture in the Eocene Bighorn Basin, Wyoming, USA[J]. *Geology*, 52(8): 588-593.
- Watts A C, Ambrosia V G, Hinkley E A. 2012. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use[J]. *Remote Sensing*, 4(6): 1671-1692.
- Wehr A, Lohr U. 1999. Airborne laser scanning-an introduction and overview[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2/3): 68-82.
- Westoby M J, Brasington J, Glasser N F, et al. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications[J]. *Geomorphology*, 179: 300-314.
- Yang Q Z, Li A, Liu Y P, et al. 2024. Machine learning-based optimization of photogrammetric JRC accuracy[J]. *Scientific Reports*, 14(1): 26608.
- Yin S L, Zhu B Y, Guo H P, et al. 2023a. Architectural model of a dryland gravel braided river, based on 3D UAV oblique photogrammetric data: A case study of West Dalongkou River in eastern Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 97(1): 269-285.
- Yin S L, Wu Y X, Zhu B Y, et al. 2023b. 3-D tight sandstone gas outcrop simulation based on unmanned aerial vehicle oblique photography data-a case study from the Pingtouxian outcrop in North Shanxi, China[J]. *Unconventional Resources*, 3: 93-102.
- Yuan X X, Zhang X P. 2008. Theoretical accuracy of direct georeferencing with position and orientation system in aerial photogrammetry[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences*, 37(B1): 617-622.
- Zachos J C, McCarren H, Murphy B, et al. 2010. Tempo and scale of Late Paleocene and Early Eocene carbon isotope cycles: Implications for the origin of hyperthermals[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 299(1/2): 242-249.
- Zeebe R E, Lourens L J. 2019. Solar System chaos and the Paleocene-Eocene boundary age constrained by geology and astronomy[J]. *Science*, 365(6456): 926-929.
- Zhang C H, Kovacs J M. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review[J]. *Precision Agriculture*, 13(6): 693-712.
- Zhang X G, Lin C Y, Zhang T, et al. 2021. New understanding of bar top hollows in dryland sandy braided rivers from outcrops with unmanned aerial vehicle and ground penetrating radar surveys[J]. *Remote Sensing*, 13(4): 560.
- Živec T, Anžur A, Verbovšek T. 2019. Determination of rock type and moisture content in flysch using TLS intensity in the Elerji quarry (south-west Slovenia)[J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 78(3): 1631-1643.

Recent Advances in UAV-Based Oblique Photogrammetry Applications for Sedimentology, Stratigraphy and Reservoir Geology

YIN SenLin¹, WANG YouWei^{2*}, YIN YanShu³, ZHANG XiaoHong⁴, BAI Kai⁵,

TANG YouJun⁶, CHENG LeLi¹, TANG Pan¹

1. Research Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

2. State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 430100, China

4. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China

5. School of Computer Science, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

6. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: [Significance] Rapid advances in information, intelligence and automation technologies have significantly expanded the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based oblique photogrammetry in geology, and its application in field geology has advanced rapidly in recent years. [Progress] This study reviews the principles and developments of UAV-based photogrammetry, its associated primary products and modeling technologies, and its application in sedimentology, stratigraphy and reservoir geology. [Conclusions and Prospects] Key advances include digital outcrop dataset collection paradigms, visual representation and digital twin technologies, sequence stratigraphy and modern sedimentary source-sink analyses, quantitative reservoir sedimentology, and 3D geological modeling. A comprehensive literature review and current technological trends indicate that future developments will be expected to focus on intelligent identification and modeling of sedimentary geological features, enhancements to digital twin systems and visualization, deeper exploration of reservoir genesis and prototype modeling, multi-scale data calibration and integration, and the expansion of geological teaching and research directions.

Key words: UAV; oblique photography technology; outcrop modeling; reservoir architecture; modern deposition; digital twin