

引用格式: 吴湘, 胡忠贵, 曾齐红, 张文济, 邵燕林, 魏薇, 佟伟桀, 赵春晖, 汪思艺. 基于激光强度建立数字露头模型及其应用——以陕西宁强高家山灯影组剖面为例 [J/OL]. 沉积学报, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.040. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.040. [WU Xiang, HU ZhongGui, ZENG QiHong, ZHANG WenJi, SHAO YanLin, WEI Wei, TONG WeiJie, ZHAO ChunHui, WANG SiYi. Digital outcrop modeling based on laser intensity and its application: A case study of the Dengying Formation at Gaojiashan, Ningqiang, Shaanxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.040. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.040.]

基于激光强度建立数字露头模型及其应用

——以陕西宁强高家山灯影组剖面为例

吴湘^{1,2}, 胡忠贵^{1,2}, 曾齐红³, 张文济⁴, 邵燕林¹, 魏薇¹, 佟伟桀¹,
赵春晖¹, 汪思艺¹

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 南方复杂页岩油气地质与开发湖北省重点实验室, 武汉 430100

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国石油西南油气田公司重庆气矿, 重庆 402160

摘要 【目的】碳酸盐岩露头普遍受构造破碎、风化剥蚀和植被覆盖影响, 传统调查方式难以完整、精确获取其沉积与储层特征。为此引入激光扫描技术, 旨在解决碳酸盐岩露头表征难度大、岩相识别精度不足的问题, 并探索其在沉积学与储层研究中的适用性。【方法】以陕西宁强高家山灯影组剖面为研究对象, 利用地面激光扫描获取高精度点云数据, 结合激光强度信息开展岩性定量与定性分析。通过三维建模与纹理映射建立数字露头模型, 并辅以薄片鉴定、岩石物性测试和野外沉积学调查, 开展岩相识别、沉积相划分及沉积模式重建。

【结果】(1) 建立的高精度数字露头模型, 可实现剖面全覆盖的三维可视化交互性分析与地质露头保存; (2) 建立的岩性识别图版, 明确了不同岩性在剖面中的激光强度特征及厚度占比; 藻白云岩与晶粒白云岩表现为激光强度值较高, 孔隙度、渗透率相对较好, 而泥晶白云岩和泥质白云岩反之, 激光强度值较低, 孔隙度、渗透率相对较差; (3) 以灯二段上亚段数字露头模型为例, 阐述基于激光强度重新厘定小层的原理, 深度刻画 14 小层地层几何特征; 通过对沉积模式进行解析, 发现激光强度变化趋势与海平面升降过程密切相关, 并揭示沉积旋回演化特征。【结论】激光扫描技术与传统地质研究方法结合所建立的数字露头模型不仅为碳酸盐岩露头的沉积特征提供了更加直观的表现, 还有效保存了原始野外露头数据, 为后续油气勘探及储层评估提供了数据支持, 展示了激光扫描技术在地质研究中的广阔应用前景和巨大潜力。

关键词 数字露头; 激光扫描; 高家山; 灯影组

第一作者简介 吴湘, 男, 2001 年出生, 硕士研究生, 储层沉积学, E-mail: 1643082284@qq.com

通信作者 胡忠贵, 男, 1979 年生, 教授, E-mail: hzg1978@yangtzeu.edu.cn

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

目前主流的油气勘探方式主要包括钻井、地震及野外剖面观测等。其中野外露头剖面能直观、精确地反映储集层的岩相组合及成因机制, 因此在油气勘探中野外露头的研究是不可或缺的一环。传统的野外露头研究手段多为野外实测、采集岩样、人工描述、手工绘图等方式, 虽然可以直观获取剖面的地质数据, 但悬崖峭壁等危险地段无法实测, 导致获取的数据完整性

收稿日期: 2025-03-20; 收修改稿日: 2025-09-07

基金项目: 中国石油勘探开发研究院研究项目 (R2PED-2025-JS-566); 新型油气勘探开发国家科技重大专项 (2025ZD1400400)

不佳,并且大多是基于二维层面来建立地质模型,难以满足当今油气勘探的精细化研究(刘帅等,2022)。同时,露头容易受人为因素及自然灾害等影响而遭到破坏。如何建立有效的地质模型以指导油气地质勘探和保存原始野外露头信息成了地质工作者亟须解决的问题(王一鸣等,2023)。三维数字露头建模时可对露头剖面进行直接映射,从三维层面直接对野外剖面进行模型建立,相较于传统的地质模型可以直观地观察到露头剖面走向及表面岩石学特征等地质要素(陈建华等,2024),并且能够完整地观测与保存露头。

目前,露头数字化采集数据方式常为地面激光扫描与无人机倾斜摄影两种方式,二者在数据获取方式和适用场景上具有互补性。激光扫描仪具有高精度、庞大的激光点云数据支撑等特点,适用于中低陡度露头的高精度建模;而无人机可采集高陡崖壁等区域的影像数据,提升整体覆盖范围(王一鸣等,2023)。二者所获取的数据在表达形式和属性信息上亦具有多样性:三角网模型(将点云向各个方向进行投影,选择投影面积最大方向的平面作为最佳趋势面,在该平面上建立不规则三角网的模型)主要用于反映露头的几何结构,而颜色、纹理等属性信息通过高分辨率影像的纹理映射等方式附加。二者根据应用场景与需求联合使用,为地质研究提供全面的数据支撑。近年来深度学习在岩性识别中取得一定进展,但在一些非均质性强、环境复杂、样本受限的露头条件下,仍具有一定的挑战性。本文基于激光强度的识别方法结合物理响应与地质验证,具备可解释性强、操作简便、适用性广等优势,适用于碳酸盐岩露头的精细表征与沉积分析。激光扫描技术在沉积岩露头研究中的应用,主要基于激光点云数据在一定条件下与不同岩性在激光束特定波长下的反射率成正比这一原理。沉积岩因其成分、结构、层理及成因环境的差异,在激光扫描中表现出不同的几何特征和反射强度响应。激光反射强度则受岩性种类、表面粗糙度、孔隙度及含水状况等因素影响,不同岩石类型在激光强度值上存在统计规律,可用于辅助岩性分类和岩相识别。

早在21世纪初,就有学者对激光扫描技术应用到地质行业的前景进行详细阐述(Bellian *et al.*, 2005; Verwer *et al.*, 2007)。国内虽然起步较晚,起初在碎屑岩沉积中应用广泛(刘学锋等,2015; 魏文强等,2024),并在层序界面、沉积旋回识别与划分和砂体精细刻画方面取得较好成果。经过不停的发展,该技术逐渐趋于成熟,国内学者将激光扫描应用在非均质性强的碳酸盐岩沉积中,并以此建立了三维地层结构、沉积微相以及三维孔渗模型,推动了激光扫描技术在地质行业的发展(郑剑锋等,2014; 乔占峰等,2015, 2019; 刘帅等,2022)。然而,针对不同岩性在激光强度响应特征的相关研究仍未能全面阐述。目前,激光扫描技术在碳酸盐岩领域实际运用过程中还存在剖面内部构造刻画精细度不足,以及受光、干湿度、植被等环境影响较大等问题,特别是在表征岩溶地貌环境中尤为明显。

因此,本文以陕西宁强高家山灯影组剖面为例,基于激光扫描技术获取高精度点云数据和激光强度信息,结合薄片鉴定、岩石物性测试和野外沉积学调查,对不同岩相进行激光强度定量分析,建立基于激光强度特征的岩性识别图版,并通过构建高家山灯影组剖面的数字露头地质沉积模型,选取重要层段系统阐述基于激光强度特征的地层单元厘定原理,分析激光强度模

型在不同岩性—岩相及地层丘状、楔状、块状等几何结构特征表达中的适用性，探讨剖面激光强度曲线与海平面变化之间的响应关系。最终，基于数字露头模型识别储层发育的有利层段，为地下储层分布规律的刻画与预测提供科学参考。

1 地质概况

在罗迪尼亚超大陆裂解时期，扬子板块发生兴凯地裂运动，受该运动的影响，中上扬子地台发生内裂陷作用，奠定了四川盆地震旦纪“槽台相间，西高东低”的古地理格局（文龙等，2021）。后续经加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜山运动等多期地质运动造就了现今四川盆地的构造格局（姜磊等，2018）。四川盆地被东北部的大巴山逆冲推覆带、西北部的龙门逆冲推覆带以及西南、东南川鄂台褶带所控制（李智武等，2011）。高家山剖面在大地构造位置上处于扬子地台的西北缘，以胡家坝镇高家山村为中心，西至宽川铺一带，东至石板沟，东西长约 40 km（图 1a）。

本次所采集的露头区具体位于陕西省宁强县境内胡家坝镇高家山村北面约 0.5 km 处（图 1b），县城境内至剖面所在地约 25 km，有多条公路可到达，交通便利，沿新建公路剖面出露完整，经纬度坐标为：106°28'6" E，32°57'24" N。作为陕南地区震旦系（埃迪卡拉系）的重要剖面之一，该露头具有出露情况好、变质程度低等优点，岩性以碳酸盐岩为主，主要为白云岩、微生物白云岩，部分层段含少量碎屑岩（李毕松等，2023），总体处于台地边缘相带（图 1c）。

宁强地区位于四川盆地西北缘与秦岭造山带的过渡带，构造上属于上扬子地块西北缘的残留构造单元。区内灯影组出露连续，岩性类型发育齐全，是四川盆地震旦系的重要组成部分。该区在层序结构、岩性组合及沉积演化特征上与四川盆地内部剖面具有良好的可比性，反映出相似的碳酸盐台地沉积体系。虽然受后期构造变形影响，该区已不处于现代盆地范围内，但仍保留了灯影组典型的台地边缘相带沉积特征，反映出其在沉积体系演化中的典型性与继承性。因而，宁强地区灯影组露头不仅在剖面完整性与岩性发育上具有显著优势，同时在区域地质与沉积体系分析中具有代表性指示意义。

震旦系灯影组是本次研究的主要目的层位，受震旦纪晚期三幕桐湾运动导致的地层抬升剥蚀影响，形成了多期风化壳与不整合面。学者依据沉积差异将灯影组自下而上划分为四段，即灯一段、灯二段、灯三段和灯四段（黎荣等，2023）。依据前人观点及露头区岩相变化与古生物特征，并结合激光强度曲线，将目的层划分为两个完整的三级层序（SQ1 和 SQ2），其中 SQ1 对应灯一段及灯二段，SQ2 对应灯三段及灯四段。其中，灯一段、灯三段为晶粒白云岩、碎屑岩的海侵体系域（TST），代表相对海平面上升阶段，沉积物中藻类含量较低；灯二段、灯四段为微生物白云岩与晶粒白云岩的高位体系域（HST），反映相对海平面下降阶段，藻类繁盛。灯二段、灯四段厚度明显高于灯一段、灯三段，同样也是优质储层发育的有利层段（图 1d）。

灯一段以晶粒白云岩为主，多发育泥晶白云岩，局部夹硅质条带和燧石团块，与下伏陡山沱组呈不整合接触；灯二段多发育泥晶—亮晶藻白云岩，夹凝块石、藻纹层、藻砂屑白云岩，中部发育的葡萄花边状白云岩为灯二段的典型标志，岩相整体比较稳定，与下伏灯一段呈整合接触；灯三段受沉积环境变化影响，岩相变化较大，深水陆棚相泥页岩、河流相砂岩、台地相碳酸盐岩均有发育，与下伏灯二段呈不整合接触；灯四段岩相及厚度变化较大，以藻叠层白云岩、凝块石白云岩、藻砂屑白云岩为代表的微生物岩为主，夹泥晶—粉晶白云岩互层，与下伏灯三段呈整合接触。

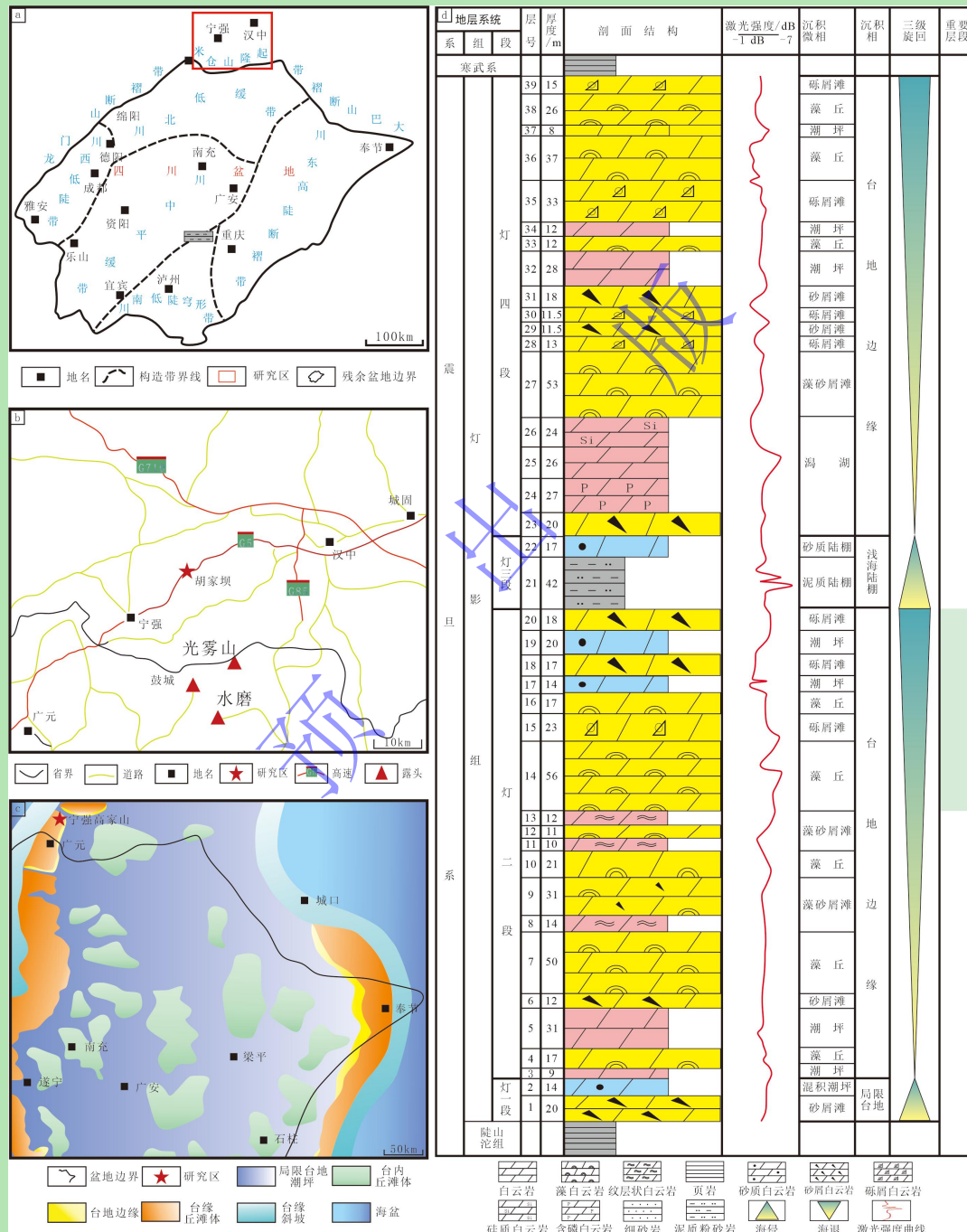


图1 高家山灯影组剖面地质背景与地理位置

(a) 露头区灯影组构造位置图；(b) 露头区地理位置图(柴妹, 2021; 黎荣等, 2023)；(c) 露头区灯影组沉积平面图(李毕松等, 2023)；(d) 露头区灯影组综合柱状图

Fig.1 Geological background and geographical location of the Gaoyashan Dengying Formation profile
(a) tectonic location map of the Dengying Formation in the outcrop area; (b) geographic location map of the outcrop area (Chai, 2021; Li *et al.*, 2023); (c) sedimentary facies map of the Dengying Formation in the outcrop area (Li *et al.*, 2023); (d) comprehensive stratigraphic column of the Dengying Formation in the outcrop area

2 露头区沉积学特征

据前人研究，四川盆地灯影组油气主要富集于灯二段、灯四段（刘可禹和刘建良，2023；闫海军等，2024）。在明确区域地质背景的基础上，对研究区灯影组岩石类型、沉积相特征及其组合关系进行系统剖析，以期为后续基于激光强度重新厘定储层段提供依据。

2.1 主要岩石类型

激光强度的精细化扫描与野外实地考察和薄片鉴定表明高家山灯影组剖面出露的岩性分为藻白云岩、颗粒白云岩、晶粒白云岩以及砂泥岩四大类（图2）。

（1）藻白云岩：根据其组构进一步将露头区微生物白云岩细化为纹层状藻白云岩、叠层状藻白云岩、凝块状藻白云岩、葡萄花边状藻白云岩（图2g）等（张荫本等，1996；徐哲航，2023；罗青云等，2024）。纹层状藻白云岩（图2a、h）与叠层状藻白云岩（图2d、i）均以明暗交替的毫米—厘米尺度的纹层为特征，暗层为富藻白云岩，亮层为亮晶白云岩，相异的是宏观尺度上，平直产出的为纹层状藻白云岩，弯曲形成卷心菜状、穹隆状等多种形态的为叠层状藻白云岩，露头区主要以波状、丘状为主。凝块状藻白云岩多发育在露头区灯二段、灯四段，是由暗色微生物粘结而成的块状结构的微生物白云岩，宏观上表现为厚层一块状或丘状等形态，可见以透镜状形态伴生于叠层状白云岩中。葡萄花边状藻白云岩因正面酷似“葡萄”，侧面又似“花边”的奇特外形得名，从组分上可分为围岩、“葡萄花边”纹层、亮晶胶结物。其中围岩组分为剖面出现过的各类白云岩、纹层镜下呈纤柱状的等厚环变胶结物。亮晶胶结物沿花边逐渐生长，是露头区灯二段的重要识别标志（郝毅等，2015）。

（2）颗粒白云岩：露头区颗粒白云岩可细化为砾屑白云岩、砂屑白云岩、鲕粒白云岩等（图2b），单层厚度大，颜色较暗，多为厚层一块状，内部颗粒大小不一，分选一般。露头区灯一段底部主要岩性为砂屑白云岩。

（3）晶粒白云岩：露头区晶粒白云岩可见泥晶白云岩（图2f）、粉晶白云岩（图2e），该区泥晶白云岩单层厚度变化大，通常为薄层—厚层状产出，在局部发生硅化，如灯四段底部可见厚度较大的硅质白云岩。

（4）砂泥岩：露头区主要分布于灯三段（图2c），岩性可细化为含粉砂泥岩、泥质粉砂岩、砂质泥页岩、粗粒砂岩。该段沉积期受相对海平面下降与汉南古陆持续抬升共同影响，盆地水体变浅，陆源物质供给增强，导致大量碎屑物输入沉积区，形成以陆源碎屑为主的砂泥岩沉积。

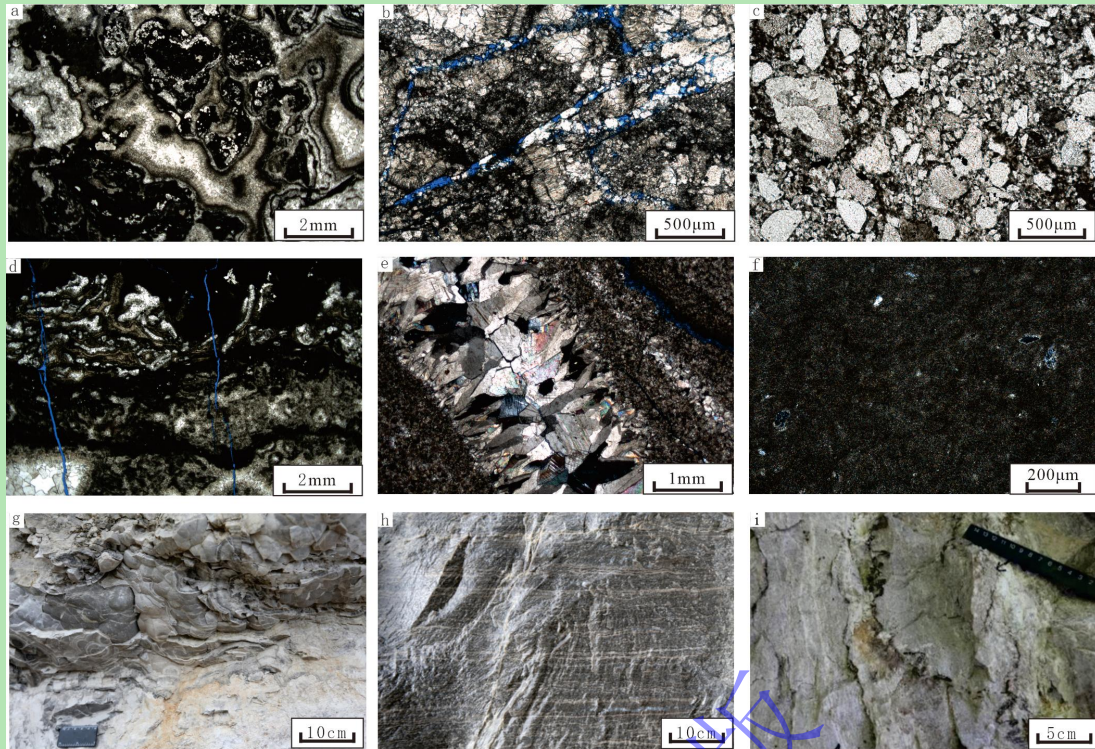


图2 高家山灯影组剖面典型岩石类型

(a) 亮晶藻白云岩, 期次性明显, 灯二段; (b) 岩石角砾白云岩, 构造缝发育, 灯二段; (c) 含云粉砂岩, 粉砂质间充填泥晶级白云岩, 灯三段; (d) 叠层状藻白云岩, 构造缝发育, 未被充填, 灯二段; (e) 粉晶白云岩, 局部见晶间微孔, 灯二段; (f) 泥晶白云岩, 偶见陆源粉砂及溶蚀孔, 灯四段; (g) 葡萄花边状藻白云岩, 窗格构造, 灯二段; (h) 纹层状藻白云岩, 微生物纹层, 富菌纹层发育, 灯二段; (i) 叠层状藻白云岩, 窗格孔发育, 灯四段

Fig.2 Typical rock types of the Gaoyashan Dengying Formation profile

(a) crystalline algae dolomite, with distinct cyclicity, Deng 2 Member; (b) lithoclastic dolomite, exhibiting developed tectonic fractures, Deng 2 Member; (c) dolomitic sandstone, interbedded with sandy microcrystalline dolomite, Deng 3 Member; (d) laminated algae dolomite, with developed tectonic fractures, unfilled, Deng 2 Member; (e) microcrystalline dolomite, locally exhibiting intercrystalline microporosity, Deng 2 Member; (f) mudstone-dominated dolomite, occasionally containing terrigenous sandstone and dissolution pores, Deng 4 Member; (g) grapestone algae dolomite, with a window-like structure, Deng 2 Member; (h) stratified algae dolomite, with microbial laminae and well-developed bacterial laminae, Deng 2 Member; (i) laminated algae dolomite, characterized by well-developed window porosity, Deng 4 Member

2.2 沉积相特征

在前人的研究基础上, 通过对露头区灯影组精细化扫描, 结合野外实地考察分析, 可将露头区灯影组分为局限台地相、台地边缘相、浅海陆棚相(兰才俊等, 2019)。局限台地相主要发育于灯一段(图 1d), 台地边缘相主要发育于灯二段、灯四段, 浅海陆棚相主要发育于灯三段。

1) 局限台地相

露头区灯一段继承陡山沱组沉积格局, 海平面上升, 主要发育局限台地的潮坪亚相, 岩性主要为砂屑白云岩、白云质砂岩、含砂中—粗晶白云岩, 砂屑偶见粗砂屑甚至砾屑, 每个相序顶部可见毫米级泥质纹层。根据岩性差异又可分为砂屑滩和混积潮坪, 以白云质砂岩为界, 下部砂屑白云岩为砂屑滩, 上部含砂粗晶白云岩及白云质砂岩为混积潮坪。

2) 台地边缘相

台地边缘相发育于灯二段和灯四段，是露头区沉积相的主体，也是优质储层发育的主力相带，该相位于斜坡相和碳酸盐台地间，水体较浅、营养物质丰富、微生物繁盛。根据其沉积差异可分为滩间、礁丘、浅滩等沉积亚相。滩间亚相岩性多为泥晶白云岩、偶见泥晶灰岩、白云质泥质砂岩；礁丘亚相岩性多为微生物白云岩，经后续岩溶改造容易形成优质储层，也是灯二段沉积主体，厚度较大；浅滩亚相岩性主要为砂屑白云岩，砂屑可见粗砂屑、角砾屑，在灯二段、灯四段广泛分布。

3) 浅海陆棚相

主要分布于灯三段，岩性主要为粗粒砂岩、薄层—中层状灰岩、含粉砂泥岩、砂屑白云岩，发育典型的混积陆棚亚相，根据岩性差异可分为砂质灰质陆棚、泥质陆棚、砂质陆棚三类微相。

2.3 沉积相模式

露头区灯影组整体发育了一套典型的台地边缘沉积体系，为优质储层的发育提供了良好的地质基础。台地边缘丘滩是最有利于优质储层发育的沉积相带，而台地边缘滩间洼地则为次优储层发育带（李勇等，2019；马肖琳，2019）。基于激光扫描技术对露头区灯影组全段进行岩相厘定，结合前人研究成果（郭旭升等，2018；马肖琳，2019；徐哲航，2023），建立了露头区灯影组沉积模式（图3）。

灯一段沉积期，海平面总体呈上升趋势，并经历了多期海平面快速上升与缓慢下降的过程。该段主要发育台坪亚相，岩性以砂屑白云岩为主。灯二段沉积期为典型的台地边缘沉积，处于台地边缘外带，水体能量较强，营养物质丰富，微生物繁盛，形成了厚度较大的台缘丘滩，这为优质储层的形成提供了有利的沉积环境。底部常见具有明显正粒序的藻纹层白云岩，是台地边缘外带的重要标志。台缘丘滩主要分布于灯二段的中部，厚度约占灯二段总体厚度的70%，岩性以藻白云岩为主，发育的葡萄花边状白云岩是识别灯二段的重要标志。随着灯二段晚期水体的逐渐变深，储层的物性逐步变差，岩性以纹层状藻白云岩为主，与上覆的灯三段泥质粉砂岩、泥质灰岩组合仍保持明显的差异。

灯三段沉积期，海平面不断升高，受汉南古陆抬升影响（周慧等，2015），为露头区提供充足的陆源碎屑，沉积物多为砂泥岩，属于陆棚相沉积环境（邓双林等，2020）。与灯三段不同，灯四段的岩性与灯二段相似，主要由藻白云岩构成。灯四段的沉积厚度与灯二段相当，灯三段沉积期结束后，露头区进入中国南方历史上第二次大规模碳酸盐岩台地发育期。受硅质热流体的影响，灯四段底部发育了一套硅质白云岩，灯四段纵向划分为上、下两个亚段。下亚段底部的硅质白云岩与灯三段的粗粒砂岩不整合接触，中上部主要由微生物白云岩、砂屑白云岩组成，与上亚段的泥晶白云岩接触。下亚段沉积期经历了浅滩—滩间—浅滩的沉积演化过程，反映了海进—海退—海进的沉积演化模式。上亚段底部为泥晶白云岩，顶部为微生物白云岩，且与上覆筇竹寺组的深灰色页岩不整合接触，整体沉积演化过程为滩间—浅滩—藻丘，反映了海退—海进—海退的沉积过程。

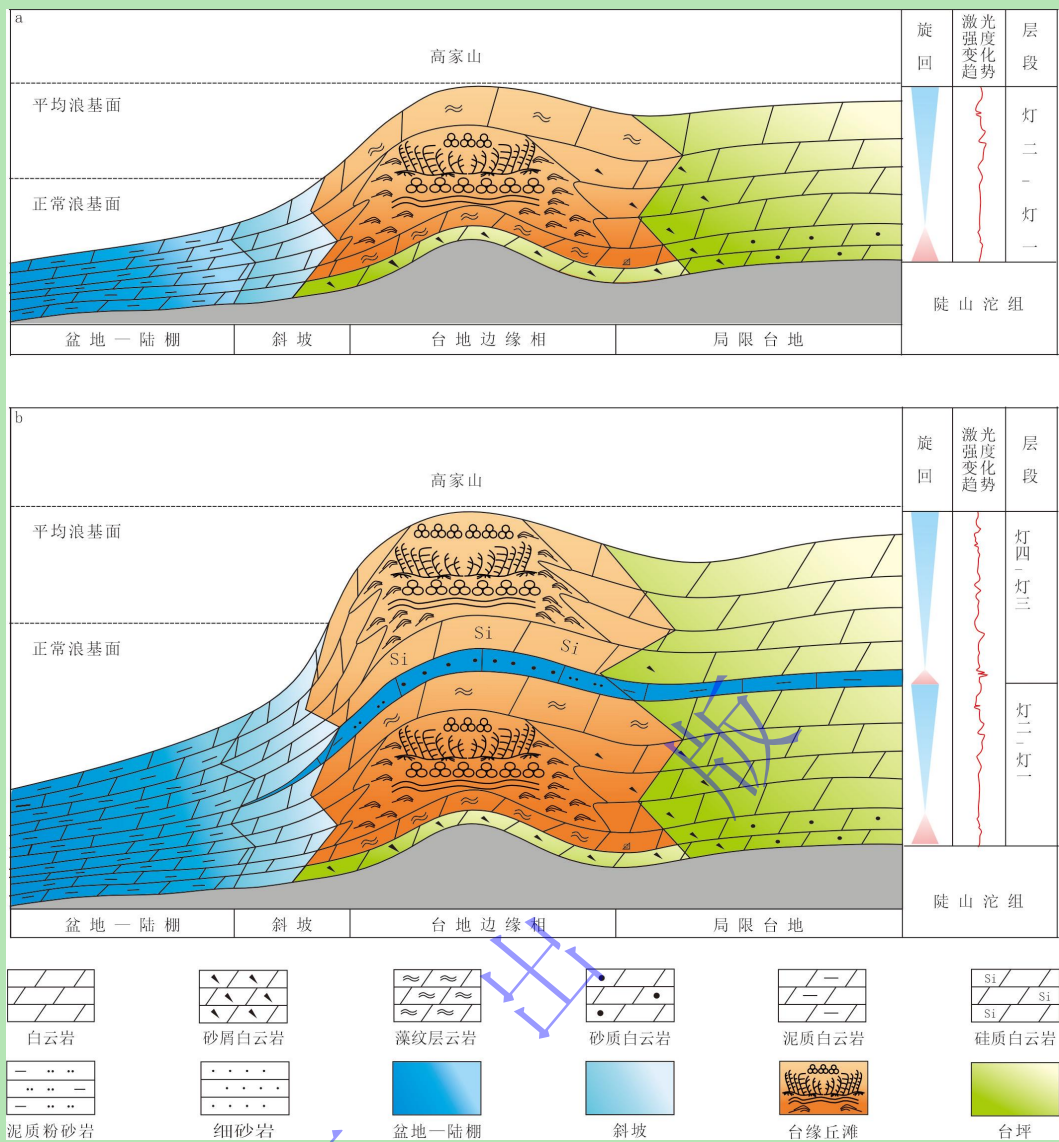


图3 高家山灯影组沉积模式
(a) 灯影组二段; (b) 灯影组四段
Fig.3 Sedimentary model of the Gaojiashan Dengying Formation
(a) second member; (b) fourth member

3 基于激光扫描技术建模方法

在明确了灯影组不同层段的岩石类型与沉积相组合基础上, 为进一步提升地质信息的精度与可视化表达, 本文引入激光扫描技术, 通过高密度点云采集与三维建模, 实现剖面结构的精细重建与地质信息的可视化加载, 为基于激光强度的岩性划分与沉积相解译提供支撑基础。以下将对具体的建模流程进行系统阐述。

3.1 野外数据采集

以激光扫描技术为基础, 结合传统地质手段, 对高家山灯影组剖面进行系统研究。通过地面激光扫描仪 (RIEGL VZ-400) 对该剖面开展全覆盖精细化三维扫描, 自灯影组底部至顶部共设置 90 个扫描站, 每站覆盖长度 15~45 m, 单站点云密度达 800 万~1 200 万个点。与此同

时，开展实地地质分层与测量工作，剖面总长度 1 487 m，地层真厚度 851 m，系统采集样品并制备岩石薄片 63 片，均经镜下鉴定，形成了露头区灯影组的全覆盖数字信息与地质信息数据集。

其中，第 1~2 层为灯一段（真厚度 34 m，对应扫描站 1），为局限台地相；第 3~20 层为灯二段（真厚度 383 m，对应扫描站 2~58），为台地边缘相；第 21~23 层为灯三段（真厚度 59 m，对应扫描站 59~63），为浅海陆棚相；第 24~39 层为灯四段（真厚度 375 m，对应扫描站 64~90），为台地边缘相。

3.2 激光点云数据处理

初始的激光点云数据经软件（Riscan-Pro）进行扫描站之间的粗拼，若拼接效果不好则需重新选择控制点对粗拼进行优化，直到粗拼效果较好，并满足一定条件后，再利用软件进行进一步的精拼。扫描站之间的激光点云拼接完成后，去除无用的体外点和噪点，将剩余点进行封装，并填补由植被覆盖形成的凸起（董之南等，2021；王一鸣等，2023）。

3.3 数字露头模型构建与可视化集成平台

为了提高所建立模型的精确性，在前人研究的基础上（曾齐红等，2015），采用最佳趋势面三角网建模方法精确刻画研究区露头的三维几何形态，利用软件将野外采集的高分辨率露头影像对没有颜色信息的三角网模型进行纹理映射，以真实反映露头表面的构造与岩性特征。利用经处理的激光点云数据，对剖面岩相进行定量分析并划分沉积微相，建立基于激光强度信息的岩性识别图版，实现对不同岩性的定量识别与分类。构建野外露头三维数字模型时，为模型中每个点赋予精确经纬度坐标。将实地照片、镜下薄片图像及绘图资料等多源信息加载至三维模型，实现具备高精度与强互动性的三维可视化展示平台，为后续储层预测与定量评价提供可靠的技术支撑。

3.4 数字露头平台介绍

本文通过数字露头仿真平台，实现扫描数据、岩性分类结果与多源地质资料的可视化集成与交互分析。该平台为桌面端程序，采用本地 .exe 文件运行，无需联网，可在野外或实验室环境中独立使用。系统采用 LOD 多层次细节结构组织数字模型，在保证模型细节完整性的同时兼顾运行效率。平台支持多种通用影像格式（.JPG、.PNG、.TIF 等），以地层柱状图、剖面图和样本图为主要展示形式，主界面右侧显示与露头对应的地层柱状信息，用于比对层序特征与岩性变化，底部区域加载地层剖面图以辅助沉积层理的空间追踪与理解。系统具备“新建矢量”功能，支持用户在三维模型中绘制点、线、面等空间对象，用于标注岩性样点、地层界线或剖面轨迹等关键要素。采样点以特定符号标示于露头模型中，点击后可弹出属性对话框，

展示其激光强度值、岩性类型及对应薄片图像等多源信息。用户可根据需求自定义加载或隐藏矢量层，实现模型与数据的灵活联动与管理（图 4）。

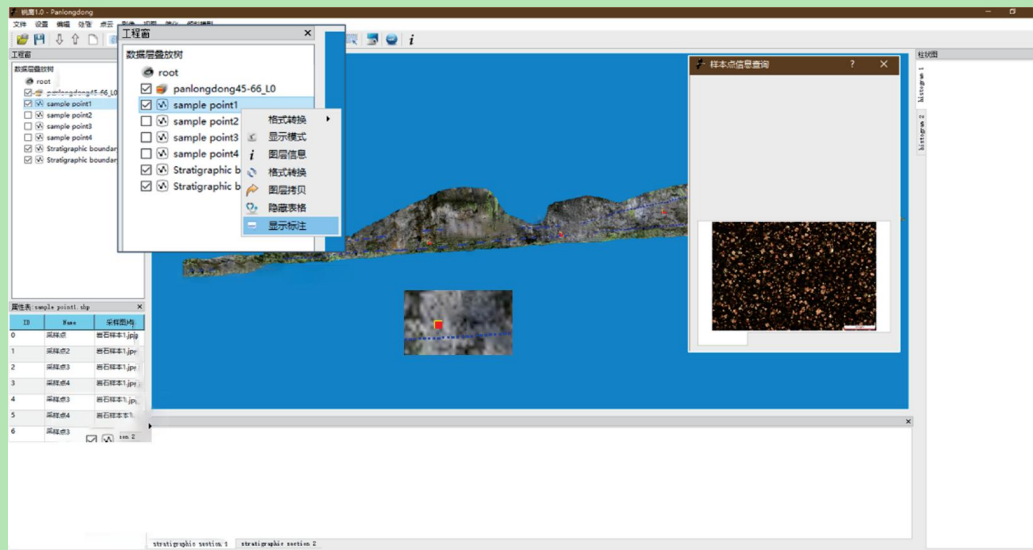


图 4 数字露头仿生程序用户页面

Fig.4 User interface of the digital outcrop simulation program

为进一步验证激光强度模型的适用性与地质指示意义，本文在模型构建基础上，选取典型岩性层段开展岩性分析与沉积环境解译工作。相关分析不仅体现了激光强度反射特征与地质属性之间的耦合关系，也为激光扫描在沉积学研究中的实际应用提供了支撑。

4 基于激光强度特征的岩相厘定

通过上述建模方法，实现了对高家山灯影组剖面的高精度数字表征，为开展基于激光强度的岩相识别划分提供了关键数据支撑。优先选取出露完整、未受风化及植被干扰的典型层段作为样本区域，并结合野外描述和薄片鉴定结果，对每类岩性代表段的激光强度进行统计分析。数据处理时避开岩性过渡段、构造干扰区和风化覆盖区，确保样本的代表性和可靠性。通过对不同岩性强度值的均值、极差及厚度占比等进行归类总结，进一步明确了岩性与激光强度之间的对应关系，为后续岩相划分和建模分析奠定了基础。

4.1 基于激光强度特征识别岩性

4.1.1 激光强度定量表征岩性

基于激光扫描技术，对剖面灯影组进行全段式精细化扫描，得到各岩性激光强度特征及在剖面厚度占比（表 1），微生物白云岩厚度占比最大，激光强度值分布范围为-1.37~6.00 dB，激光强度均值为-4.10 dB，约占露头区灯影组整体厚度的 43.13%；其次是晶粒白云岩，激光强度均值分布范围为-1.58~7.35 dB，激光强度均值为-4.30 dB，厚度占比 27.03%；颗粒白云岩激光强度范围值为-2.43~8.63 dB，激光强度均值为-4.80 dB，累计厚度占比 24.91%；砂泥岩激光强度范围-1.80~11.32 dB，激光强度均值为-5.10 dB，累计厚度占比 4.93%。

露头剖面的重要层段主要以白云岩为主，灰岩几乎不发育，以激光点云数据为基础，结合薄片鉴定对重要层段的白云岩进行细化研究，发现藻白云岩、晶粒白云岩、颗粒白云岩、泥质白云岩的激光强度均值依次降低。

其中，藻白云岩因含有大量藻体结构与原生孔隙，表面粗糙程度适中，反射界面复杂，激光强度通常呈现高值。晶粒白云岩粒度相对均一，晶粒间排列致密，界面规整性较强，激光反射相对稳定，整体强度略低于藻白云岩。颗粒白云岩则由于常夹杂砂屑、砾屑等粗粒成分，表面不规则性较高，在激光入射时易产生多方向漫反射，导致反射率波动大，整体激光强度偏低。泥晶白云岩及泥质白云岩则结构致密，晶粒微细，孔隙度较低，反射界面光滑，整体激光强度值处于中低水平。砂泥岩因其组分复杂、光滑度高，激光吸收率更大，反射率最弱，为最低激光强度响应单元。

为进一步解释不同岩性激光响应特征背后的物理属性，本文引入部分物性测试结果作为辅助参考。结果表明，激光强度高值区的岩性样品孔隙度主要集中在 4%~8%，局部可达 20%以上，渗透率相对较高，代表岩性为藻白云岩、部分晶粒白云岩等；而激光强度低值区所对应的泥晶白云岩、泥质白云岩等，其孔隙度集中分布在 0~4%，渗透率普遍低于 $1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。这种激光强度与岩性及其物性特征之间的相关性，表明激光反射强度不仅反映了岩体表面结构特征，还在一定程度上能够指示其内部储集能力，为岩性划分提供了可靠的量化支撑。

表 1 不同岩性激光强度响应及其厚度占比

Table 1 Analysis of laser intensity response and thickness proportions in different lithologies

岩性	激光强度范围/dB	激光强度均值/dB	厚度占比/%
藻白云岩	-1.37~-6.26	-4.10	43.13%
晶粒白云岩	-1.58~-7.35	-4.30	27.03%
颗粒白云岩	-2.43~-8.63	-4.80	24.91%
砂泥岩	-1.80~-11.32	-5.10	4.93%

4.1.2 激光强度定性表征岩性

选取剖面出露显示较好的部位进行岩性的定性表征，从而针对整体剖面的表面激光强度特征建立岩性识别图版（图 5）。图版中通过对比激光反射强度图像与对应岩石类型，实现表面纹理特征与岩性信息的对应关系识别。

藻白云岩通常表现为高反射率夹杂中低反射率的混合模式，整体反射图像相对混杂，不具明显层理；颗粒白云岩则呈现出相对规则的纹层状反射特征，反射率变化幅度较大，具有一定的节律性；泥晶白云岩的表面反射特征与颗粒白云岩相对区别明显，主要表现为中—低反射率为主夹杂高反射率条带，反射结构亦具层理性但节律性较弱；砂泥岩则以低反射率为主，多呈条带状赋存于白云岩中，反射图像均质性较高，在三角网格构建后面数较少、形态规整，易于与白云岩进行区分。

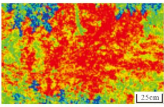
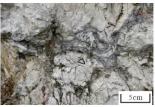
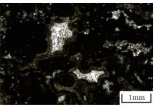
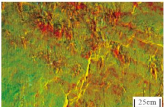
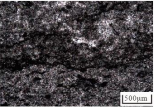
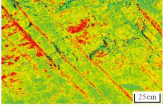
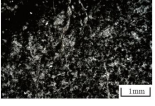
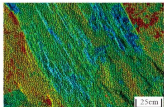
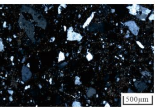
岩性	激光反射强度剖面	露头影像	镜下影像	反射特征	特征分布位置
藻白云岩				整体高反射率，夹中低反射率，整体呈杂乱反射，三角形化单元内面数较多	高家山灯影组7层、10层
晶粒白云岩				纹层状高反射率夹杂纹层状低反射率，整体反射率变化大但具有规律性，三角形化分布规则	高家山灯影组5层
颗粒白云岩				与晶粒白云岩相反，中-低反射率夹杂高反射率，整体具有一般规律性	高家山灯影组31层
砂泥岩				整体呈低反射率，三角形化后面数较少，整体连通性好	高家山灯影组21层

图 5 不同岩性激光反射特征识别图版

Fig.5 Lithology identification chart based on laser reflectance characteristics

上述分析表明，激光扫描反射图像在一定程度上能够反映岩石表面的构造特征与纹理差异，不同类型岩性的激光反射特征具有可识别性，为岩性划分提供了可靠的图像依据，并为三维数字露头模型中岩性的可视化表达奠定了基础。

高家山灯影组剖面第 14 小层反射强度由中部高反射率（-1.00 dB~-2.00 dB）向四周逐渐降低（-5.50 dB 左右），激光反射特征为高反射率夹中低反射率，整体杂乱无章，规律性较差（图 6a，b），与上述岩性识别图版中藻白云岩激光特征相符。露头影像和薄片鉴定结果（图 6c，d）也符合基于激光强度识别岩性的结果。

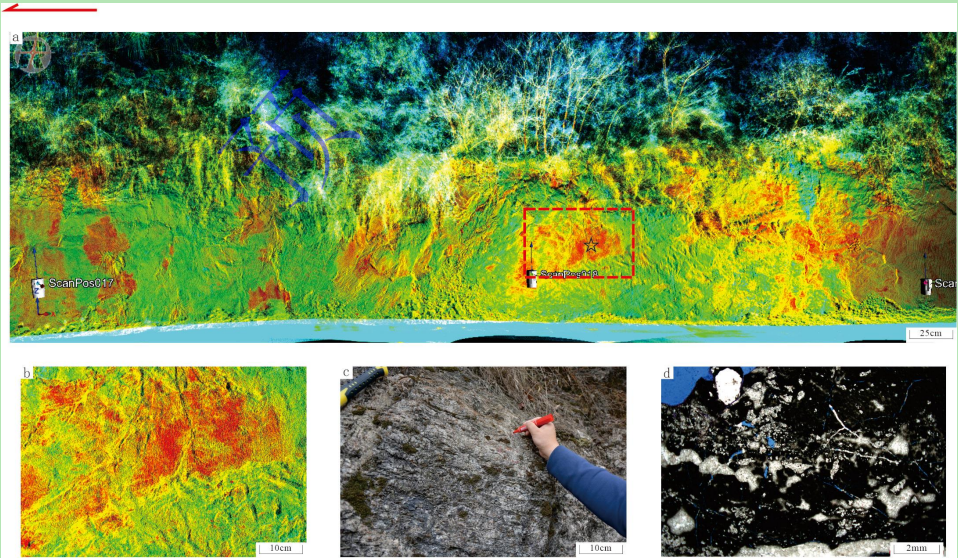


图 6 高家山灯影组剖面第 14 层特征

(a) 第 14 小层激光强度图；(b) 藻白云岩激光强度特征；(c) 藻白云岩露头特征；(d) 藻白云岩镜下特征

Fig.6 Characteristics of the 14th layer of the Gaojiashan Dengying Formation profile

(a) laser intensity map of the 26th sublayer; (b) laser intensity characteristics of algal dolomite; (c) outcrop features of algal dolomite; (d) microscopic features of algal dolomite

高家山第 23~24 小层激光强度为（-3.70 dB~-2.30 dB），整体呈高反射率，表面反射特征为纹层状高反射率夹杂纹层状中低反射率（图 7a，b），与上述岩性识别图版中晶粒白云岩反

射率特征相符（图 5），结合薄片鉴定及野外考察（图 7c，d），确定该点位岩性为晶粒白云岩。

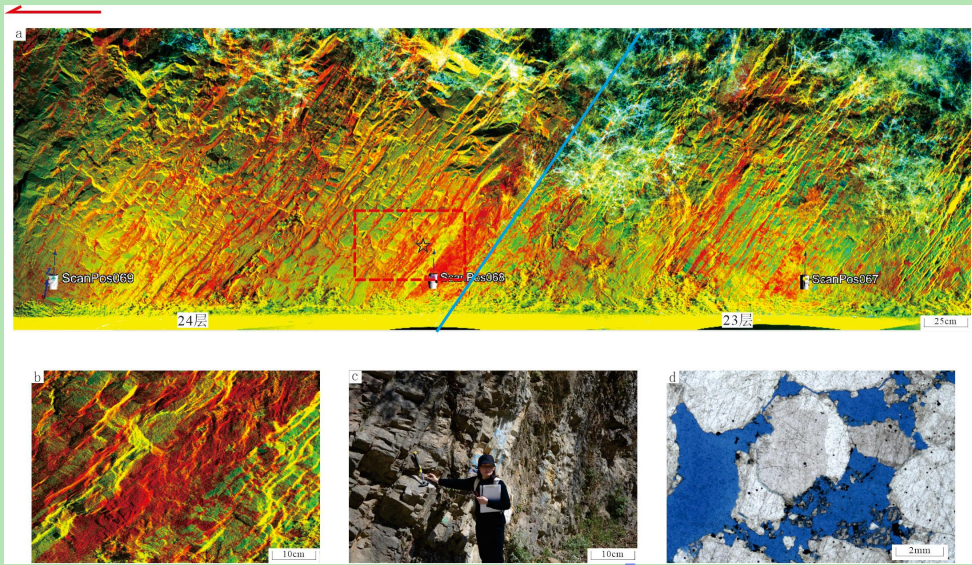


图 7 高家山灯影组剖面第 23~24 层特征

（a）第 23-24 小层激光强度图；（b）晶粒白云岩激光强度特征；（c）晶粒露头特征；（d）晶粒白云岩镜下特征

Fig.7 Characteristics of the 23th to 24th sublayers of the Gaojiashan Dengying Formation profile

(a) laser intensity map; (b) laser intensity characteristics of granular dolomite; (c) outcrop characteristics of granular dolomite; (d) microscopic features of granular dolomite

4.2 基于激光扫描分析沉积类型

结合区域沉积背景，对露头区进行沉积微相划分并统计各沉积微相激光强度均值（表 2），对 1~39 小层进行沉积微相激光强度均值的定量表征（图 8）。可以看出，灯三段的浅海陆棚相激光强度均值最低，其原因是岩性以砂泥岩（低值）为主；其次是台地边缘滩间潟湖微相，该沉积相的岩性含少量粉屑、泥质等，导致其激光强度值偏低，随后是台地边缘滩间潮坪微相，该沉积相激光强度均值偏低的原因是岩性含少量砂屑，砂屑会导致激光强度值变低，其余白云岩组分相对而言相似，因此激光强度均值变化幅度不大。

表 2 高家山不同沉积相类型激光强度统计一览表

Table 2 Summary of laser intensity statistics for different sedimentary facies in the Gaojiashan section

沉积相类型	激光强度范围/dB	激光强度均值/dB
陆棚	-11.37~-5.13	-7.61
局限台地	-8.03~-4.84	-6.41
浅滩	-4.75~-3.64	-4.26
藻丘	-4.51~-1.26	-3.94
潮坪	-6.03~-4.21	-4.38
潟湖	-9.64~-5.06	-6.97

野外所采集的激光点云数据经降噪等处理后，构建最佳趋势面三角网模型（曾齐红等，2015），对建立的三角网模型进行纹理映射建立数字露头模型。基于激光强度识别岩性及沉积相类型分类图版，对整个剖面的激光强度进行划分，并结合所采集的高清露头影像信息，对激光强度有变化的小层进行强度面积均值计算。根据前人所提出的灯二段表生期岩溶模式，露头

区灯二段的优质储层主要发育在上亚段的水平潜流带中，物性最佳的储层位于该段的滩丘叠合部位（蒋航等，2019），且该段露头出露情况好，显示清晰，地表植被覆盖少，干扰因素相对较少。因此，选取灯二段上部储层段为例，阐述基于激光强度进行的岩相定量分析。

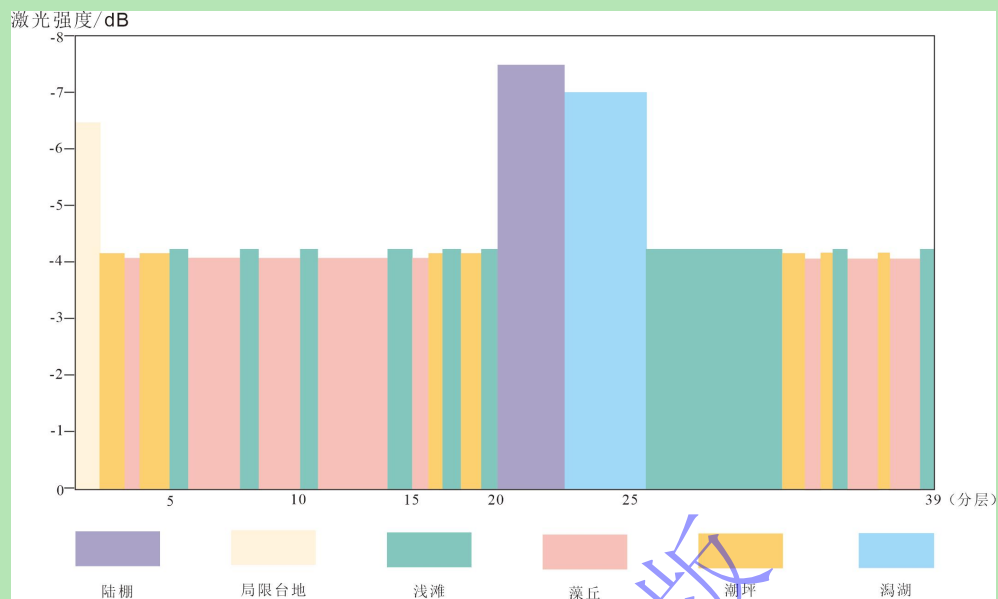


图8 高家山灯影组剖面沉积相激光强度分布

Fig.8 Distribution of sedimentary facies laser intensity in the Gaojiashan Dengying Formation profile

露头区剖面灯二段主要发育台地边缘相（任佳鑫等，2023），灯二段上亚段（第26~46层）总体厚度约为161 m，发育一套藻丘—浅滩—滩间等多个沉积相类型构成的旋回。上部潮坪沉积厚度较大，内部可细化成多个云坪—藻云坪的次级旋回。灯二段总体上表现为水体不断变浅的三级旋回，下部藻丘主要岩性为藻白云岩，滩间主要岩性为藻砂屑白云岩，潮坪沉积主要岩性为泥晶白云岩。

建立了露头区灯影组全段三维数字模型，选取灯二段上部展示基于激光强度进行的岩相厘定。如图9所示，第14层发育藻丘微相，主要岩性为藻白云岩，激光强度发射特征呈现为杂乱无章的高反射率夹杂无规律性的低反射率，与岩性识别图版相符（图5）；第15层主要发育砂屑滩微相，其激光强度为-7.6 0dB，受砾屑影响导致激光强度偏低，与表1中颗粒白云岩激光强度相符；第18~20层所表现的激光强度均符合所对应沉积相的激光强度值（图8）。第14层受植被影响较大，导致其整体的激光强度均值偏低，第14-2小层、第14-3小层和第14-4小层岩性中的砂屑或砾屑对激光强度均值影响较大，导致其激光强度均值偏低，与前述表1中颗粒白云岩激光强度相符。因此，基于激光强度对岩相进行定量分析具有一定可行性，但也需要结合实地野外考察等地质资料进行佐证。同时，所建立的数字露头模型经纹理映射后能够很好的反映露头形态特征，在数字露头仿生程序中，将采集点位、镜下薄片、露头影像、后期编绘地质信息图件等信息加载到模型中（图9c），在进行地质研究时，可通过点击所建立的点位，随时获取所需的信息，具有良好的交互性。

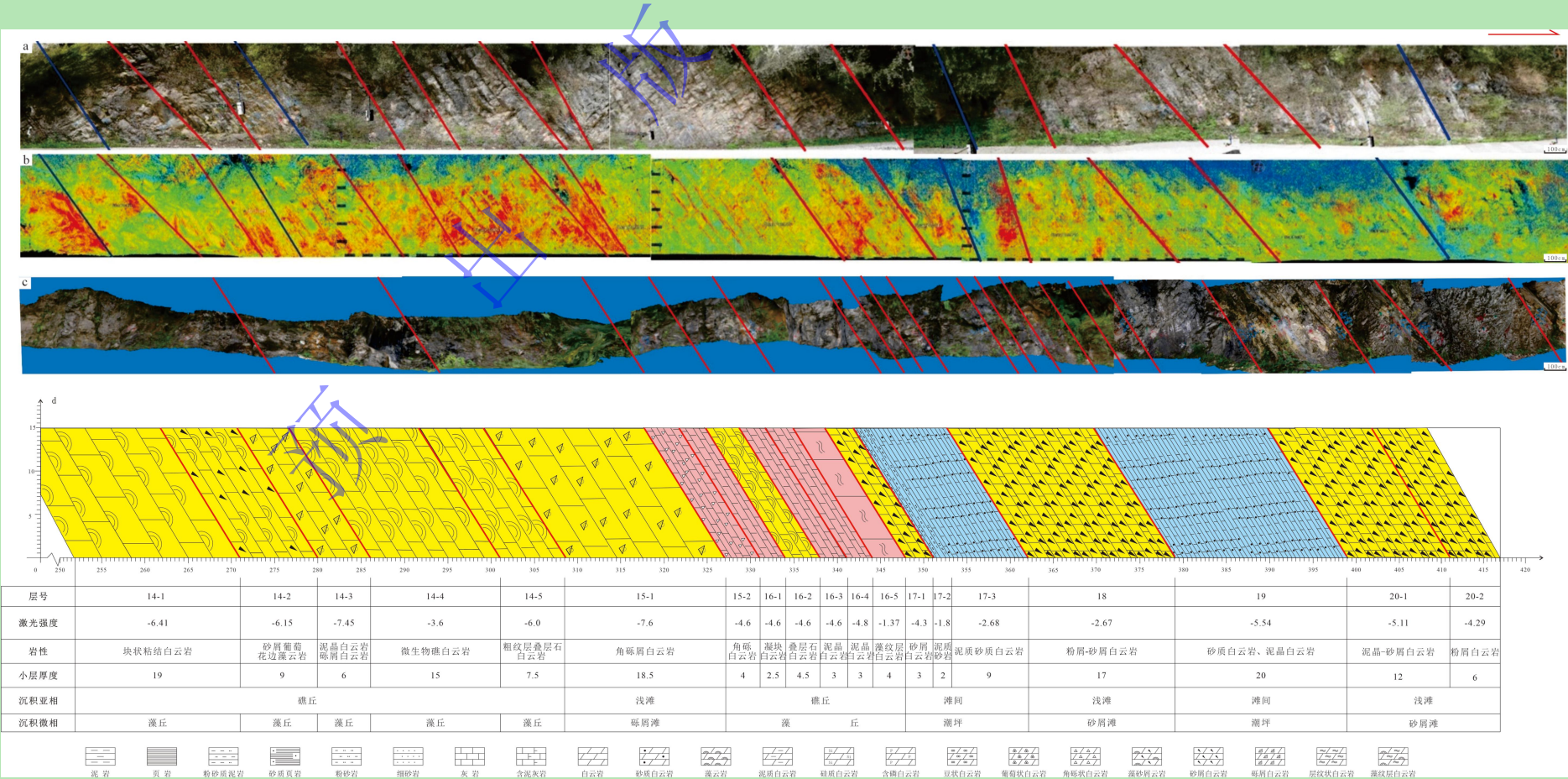


图9 高家山灯影组剖面第14~20层数字模型与地质剖面精细划分

(a) 小层露头拼接; (b) 激光强度模型; (c) 数字露头模型; (d) 数字—地质信息图

Fig.9 Digital model and geological profile of layers 14–20 in the Gaojiashan Dengying Formation
(a) outcrop stitching; (b) laser intensity model; (c) digital outcrop model; (d) digital-geological information map

为进一步拓展沉积类型分析的空间结构表达, 基于激光扫描点云强度数据与高分辨率影像, 对灯影组第 14 小层的地层几何形态开展综合识别分析。依托数字露头模型, 对 14 层进行地层几何结构深度刻画(图 10), 该图分别基于高分辨率露头影像(图 10a)与激光点云强度模型(图 10b)开展岩性—结构综合解译(图 10c), 对丘状、楔状几何单元进行精细划分与对比。从解译结果看, 激光强度的高反射区能揭示部分构造边界, 而实景影像则在揭示楔状体边缘过渡、丘状体顶部起伏等细尺度几何形态方面提供了重要补充。图中综合表达了激光数据与影像在几何结构识别中的互补优势, 进一步丰富了露头地层结构的三维解译内容, 为后续多尺度建模与岩相分析奠定了基础。

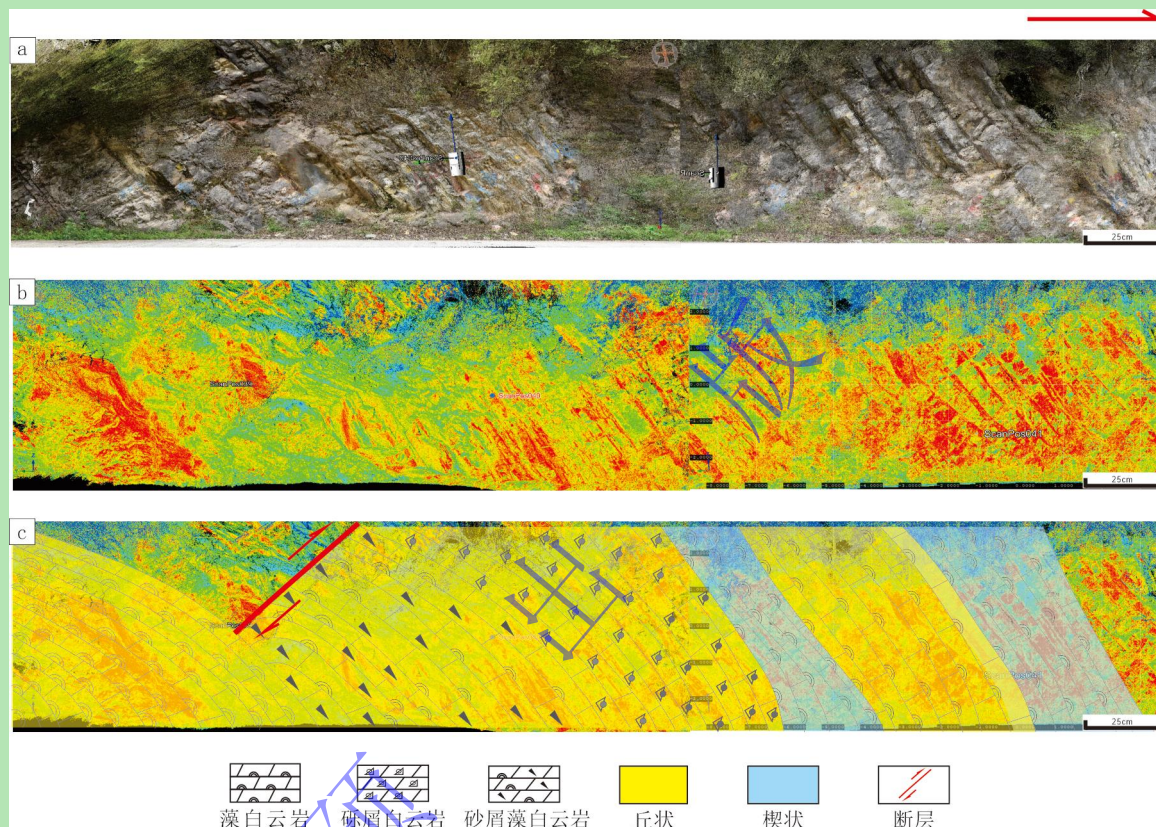


图 10 高家山灯影组 14 小层数字露头模型岩性—结构综合识别图

(a) 露头影像图; (b) 数字露头模型; (c) 数字露头模型岩性—结构综合识别图

Fig.10 Lithology-structure integrated interpretation of the digital outcrop model of the 14th sublayer of the Dengying Formation at Gaojiashan

(a) outcrop image; (b) digital outcrop model; (c) lithofacies-structure interpretation map for (b)

4.3 海平面变化与激光强度均值相关性

不同岩相所指示的沉积环境存在明显差异, 而激光强度变化趋势在一定程度上可反映岩相变化规律, 进而指示沉积环境演化过程。整体来看(图 3), 高家山灯影组剖面激光强度变化趋势与海平面升降过程密切相关。灯一段沉积期, 海平面总体上升, 经历多期快速上升与缓慢下降过程, 沉积以台坪相为主, 主要岩性为砂屑白云岩, 激光强度均值由中高值(-4.51 dB)过渡到低值(-6.31 dB)。进入灯二段, 台地边缘环境下, 水体能量增强, 微生物旺盛, 藻白云岩广泛发育, 激光强度均值整体由低值(-5.94 dB)向高值(-3.70 dB)变化, 中部发育厚度最大的台缘丘滩, 为储层发育提供了有利条件。晚期随着水体加深, 能量变弱, 岩性过渡为纹层状藻白云岩, 激光强度均值逐渐

下降，由中高值（-4.07 dB）向中低值（-5.54 dB）变化。灯三段为陆棚环境，受汉南古陆物源供给影响，砂泥岩占据主导，其激光强度均值由中低值（-5.11 dB）向低值（-11.43 dB）变化，反映沉积能量下降及陆源碎屑输入增强。灯四段则再次进入碳酸盐台地广泛发育期，岩性及激光强度均值变化趋势与灯二段相似，整体由低值（-7.46dB）向高值（-3.38dB）变化。该段底部发育硅质白云岩，与上覆微生物白云岩、泥晶白云岩依次过渡，表现出下亚段的海进—海退—海进与上亚段的海退—海进—海退演化序列，激光强度亦呈现出与之匹配的分段式升降趋势，进一步验证了激光强度在揭示沉积环境变化中的有效性。

5 基于激光强度储层识别与适用性探析

优势相带是储层发育的基础，露头区的储集层主要发育在灯二段和灯四段的台地边缘沉积中，储集岩性主要分为晶粒白云岩和微生物白云岩两大类。下述将详细分析基于激光强度识别储层的方法，并探析基于激光扫描技术精细刻画碳酸盐岩剖面的适用性与局限性。

5.1 基于激光强度储层识别

据前人研究表明，台缘丘滩沉积环境具有较强的水动力条件、丰富的营养物质组分，利于微生物的繁衍及沉积物堆积特征，且后期所形成的各类颗粒白云岩、微生物白云岩的原生孔洞发育，利于后期岩溶改造，是露头区发育储层的最优相带（蒋航等，2019）。基于激光扫描结合野外实地考察，台缘丘滩发育于灯二段和灯四段，发育的厚度较大，储层类型可分为晶粒白云岩储层和藻白云岩储层两大类。晶粒白云岩储层（图 11a, b, c）多呈层状发育，反射率特征为纹层状高反射率夹纹层状中低反射率，且储层与隔层具有明显激光强度变化，结合薄片影像（图 d），镜下特征与晶粒白云岩相符；藻云岩储层（图 6a, b）宏观上为杂乱无章高反射率夹中高反射率经精细化扫描可发现其内部激光强度呈层状，且整体向四周激光强度逐渐降低，通常降低至中低反射率。

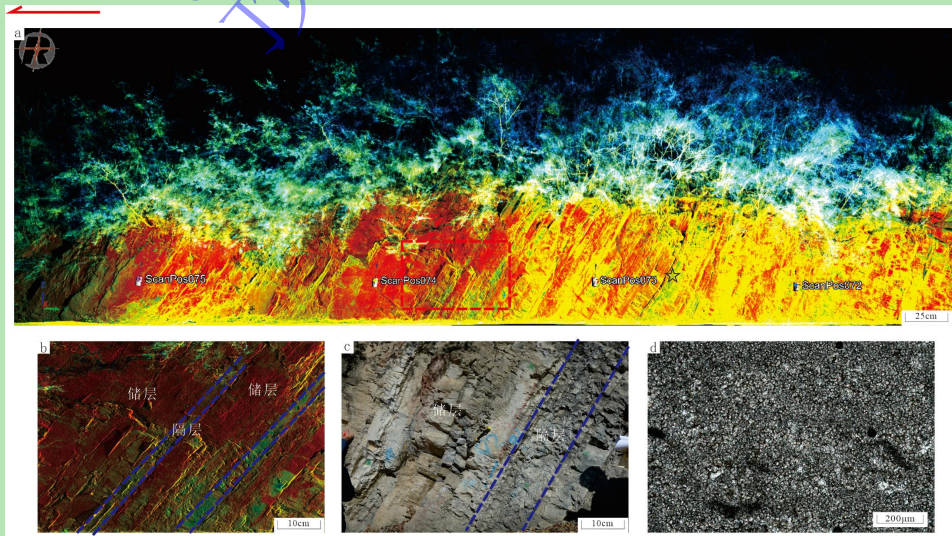


图 11 高家山灯影组剖面第 27 小层储层段特征

(a) 第 27 小层激光强度剖面；(b) 储层和隔层激光强度特征；(c) 储层和隔层露头特征；(d) 隔层镜下特征

Fig.11 Characteristics of the reservoir interval in the 60th sublayer of the Gaojiashan Dengying Formation profile

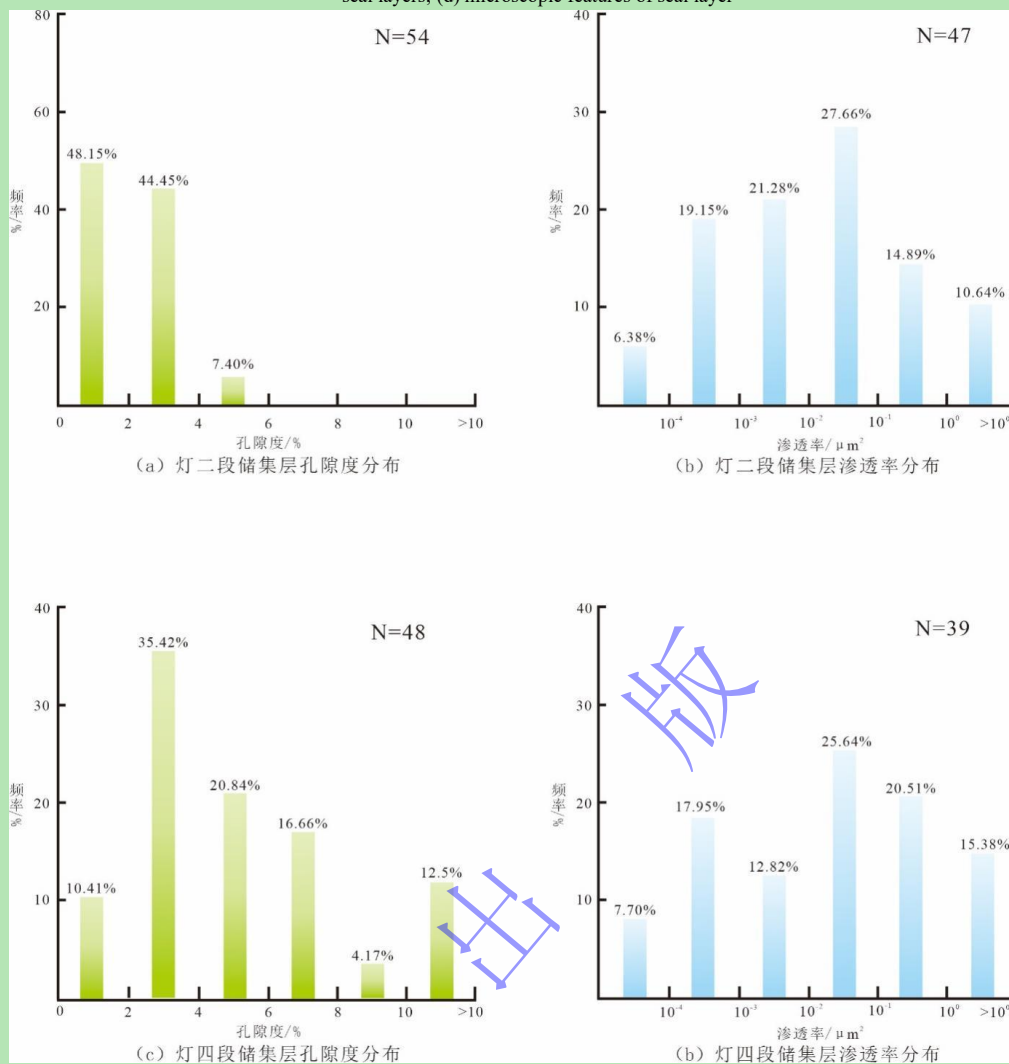
(a) laser intensity profile of the 27th sublayer; (b) laser intensity characteristics of reservoir and seal layers; (c) outcrop features of reservoir and seal layers; (d) microscopic features of seal layer

图 12 高家山灯二段、灯四段孔隙度—渗透率直方图

Fig.12 Porosity-permeability histogram for reservoir sections of Dengying Formation, Gaojiashan, sections 2 and 4

在对高家山剖面灯影组二段与四段的野外调查中，观察到其顶部普遍发育局部不整合界面，在灯二段、灯四段顶部可见次生溶蚀孔洞，形态不一，沿层分布明显（图 2、图 6d、图 7d）。这类孔洞常与层面构造或微裂缝组合出现，反映出一定的构造背景控制作用。结合三维可视化模型及扫描影像，发现该类溶孔区在激光强度图中表现为反射值略高但边界模糊的斑块状特征，尚不足以独立识别其形态细节。

在此基础上，进一步开展常规物性实验作为剖析露头区储集物性特征的补充手段（图 12）。露头区灯二段的孔隙度分布范围为 0.21%~5.06%，其中 92.6% 的样品孔隙度集中在 0%~4% 之间，剩余部分位于 4%~6%，平均孔隙度为 2.03%；渗透率分布范围为 $(0.0001 \sim 5.9538) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均渗透率为 $0.318 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。灯二段总体呈中—低孔隙度、低渗透储集特征。灯四段孔隙度分布范围为 0.28%~22.83%，孔隙度主要集中分布在 2%~8%，占总样品的 83.34%，平均孔隙度为 5.53%；渗透率分布范围为 $(0.0001 \sim 20.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均渗透率为 $1.135 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。灯四段总体呈中—低孔隙度、低渗透储集特征。通过对比，灯四段储集物性优于灯二段。

基于激光强度特征的岩相厘定研究表明，激光强度在不同岩性单元中具有稳定的响应差异，能够反映岩石的内部结构和孔隙特征。激光强度高值区储集物性相对较高，而激光强度低值区，储集物性相对较低。基于这一对应关系，可将激光强度图像叠加至三维数字露头模型中，结合岩性识别图版和薄片验证，实现对高孔渗有利层段的快速识别，并在此基础上辅助判定溶孔、裂缝等异常构造的发育部位，从而为碳酸盐岩储层建模与目标段优选提供可行路径。需要指出的是，激光强度受岩性组合、粒度粗细、构造扰动、地表风化及植被干扰等因素影响，识别结果需结合实地调查、镜下分析及物性测试综合判别，以提高精度与适用性。

5.2 基于激光扫描精细表征碳酸盐岩剖面的局限性

激光扫描技术凭借其每秒能够采集十万至百万级点云数据的优势，展现出卓越的高精度和高分辨率特性。其激光点云数据的属性和几何特征能够有效表征非均质性较强的碳酸盐岩剖面，并能够精确提取碳酸盐岩中常见的孔洞、裂缝等结构特征（吴思琪，2023）。尽管激光扫描技术在碳酸盐岩剖面的表征中具有显著优势，但也存在一些局限性。首先，激光扫描的精度受到设备分辨率和采样密度的制约，尤其在面对微观结构复杂或孔隙度较高的碳酸盐岩时，扫描数据可能无法完全反映其细微变化。其次，激光扫描对于表面反射特性非常敏感，表面光滑或反射强烈的区域（植被覆盖严重的区域）可能导致点云数据的不均匀分布，从而影响结果的准确性。此外，碳酸盐岩中的溶蚀孔隙、微裂缝等细小结构在扫描过程中可能被忽略，无法完整捕捉其细节。最后，在一些复杂地质环境中，激光扫描技术可能无法全面揭示碳酸盐岩的层理、构造及其内部的物理属性，这需要与其他技术如地质钻探、声波成像等相结合，进行综合分析和验证。因此，尽管激光扫描在碳酸盐岩表征中发挥了重要作用，但其局限性仍需在实际应用中加以克服。

在野外露头环境中，受植被、行人、交通工具及浮尘等干扰因素影响，激光扫描获得的点云数据中不可避免地夹杂有大量噪点与异常点。为提升数据精度，本文在数据处理阶段引入了点云去噪流程：将原始扫描数据导入 Riscan-Pro 软件，构建初步三维模型后，在不影响露头主体几何结构的基础上，手动剔除异常反射点，包括空中悬浮物、树木遮挡、远处建筑轮廓及地面杂散反射等。这一过程虽具有一定主观性，但可显著提升模型的真实感和可用性。该流程在前人工作的基础上加以优化，确保保留露头主体几何特征的同时，尽可能消除非目标信息干扰，提高后续建模精度与数据解释的准确性（赵坤鹏，2024）。

针对构造与纹理特征对激光强度统计可能造成的干扰，本文在数据预处理阶段引入了基于深度学习的结构自动提取方法。构建的碳酸盐岩缝洞分割模型，采用改进的多尺度 Mask R-CNN 对扫描影像进行识别与分割，将节理、裂缝及溶蚀孔洞等结构显著区别出激光强度计算窗口，尽可能降低非岩性因素对强度分布的干扰。经过筛分，显著降低了非岩性因素对激光强度—岩性耦合结果的影响，保证前文岩性划分结果的可靠性与物理依据的一致性，从而作为对基于激光强度识别岩性工作的补充支撑（吴思琪，2023）。

已有研究表明, 激光扫描技术在碎屑岩沉积体系中同样展现出良好的适应性与表现力。以鄂尔多斯盆地杨家沟地区的三角洲平原砂体为例, 学者通过数字露头模型有效识别了分流河道砂体的空间形态与几何结构, 清晰刻画出块状、透镜状砂体的横向展布特征及垂向叠置关系。结合数字露头可缩放、可量测的优势, 不仅实现了对四级层序界面及短期旋回的划分, 还提升了砂体识别的精度与连通性判断的效率。该案例表明, 在碎屑岩等非碳酸盐岩类型中, 激光点云数据与数字建模手段同样可有效服务于沉积构型解析与储层表征, 具备较强的推广潜力。因此激光扫描技术在碎屑岩类地层的应用同样具备可行性, 尤其在识别砂体几何形态与构造边界方面, 具有重要补充意义(刘学锋等, 2015)。

6 结论

(1) 尽管植被、砂屑等因素可能带来一定误差, 但通过对灯影组全段激光强度的研究, 建立了岩性识别图版, 明确了不同岩性在露头区的厚度占比。将镜下影像加载到数字露头模型中进行验证, 既提高了模型的可靠性, 又增强了其交互性, 用户可随时查看和分析加载的地质信息, 便于深入研究。

(2) 以灯二段上部的数字模型与地质剖面为例, 阐明了基于激光强度进行岩相厘定的原理, 并揭示了激光强度变化与沉积环境之间的关系。分析结果成功建立了露头区灯影组储层段的沉积模式, 表明灯一段至灯四段分别对应局限台地、台地边缘、浅海陆棚和台地边缘沉积相, 反映了海退—海进—海退的沉积演化过程, 激光强度呈现由大到小再到大的变化趋势。

(3) 通过激光反射特征, 可以对储层进行宏观识别, 结合常规物性分析显示, 储层由于沥青、石英等物质的充填, 整体呈现中低孔隙度和低渗透率的储集特征。激光扫描技术在碳酸盐岩剖面表征中展现了高精度和高分辨率的优势, 能够有效识别孔洞、裂缝等结构特征, 提供储层评估的重要依据。但其局限性在于精度受设备分辨率和采样密度限制, 对表面反射敏感, 且难以捕捉细微结构。因此, 激光扫描技术应与其他技术结合, 以提高评估的准确性。

致谢 感谢长江大学地球科学学院胡忠贵教授、邵燕林副教授科研团队及中国石油勘探开发研究院的曾齐红老师, 在宁强高家山剖面的野外踏勘、激光扫描与样品采集中的支持, 感谢南方复杂页岩油气地质与开发湖北省重点实验室在薄片鉴定与物性测试方面提供的实验条件与技术协助。感谢中国石油西南油气田公司重庆气矿张文济老师在资料对比与学术讨论中的帮助。

参考文献 (References)

- 柴妹. 2021. 华南埃迪卡拉系末阶推荐界线层型剖面-高家山剖面再研究[D]. 西安: 西北大学. [Chai Shu. 2021. Re-study of the recommended stratotype section of the terminal stage of the Ediacaran system in South China-the Gaojiashan section[D]. Xi'an: Northwest University.]
- 陈建华, 钟瀚霆, 侯明才, 等. 2024. 数字露头实景三维 Web 平台研究与云端地质考察应用[J]. 地球学报, 45 (2): 232-242. [Chen Jianhua, Zhong Hanting, Hou Mingcai, et al. 2024. Online field trip applications of the web platform for real-scene 3D digital outcrops[J]. Acta Geoscientica Sinica, 45(2): 232-242.]

- 邓双林, 宋金民, 刘树根, 等. 2020. 四川盆地灯影组三段混积特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 38 (3): 598-609. [Deng Shuanglin, Song Jinmin, Liu Shugen, et al. 2020. Mixed sedimentary characteristics of the third member of Dengying Formation, Sichuan Basin, and its geological significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 38(3): 598-609.]
- 董之南, 时培好, 高晗. 2021. 基于移动式激光扫描的点云数据处理[J]. 测绘通报, (8): 97-101. [Dong Zhinan, Shi Peihao, Gao Han. 2021. Point cloud data processing based on helical laser scanning system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (8): 97-101.]
- 郭旭升, 胡东风, 段金宝, 等. 2018. 四川盆地北部宁强胡家坝灯影组四段岩石特征及沉积环境分析[J]. 石油实验地质, 40 (6): 749-756. [Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Duan Jinbao, et al. 2018. Rock features and sedimentary environment of the fourth member of Dengying Formation in Hujiaba section of Ningqiang, northern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 40(6): 749-756.]
- 郝毅, 周进高, 陈旭, 等. 2015. 四川盆地灯影组“葡萄花边”状白云岩成因及地质意义[J]. 海相油气地质, 20 (4): 57-64. [Hao Yi, Zhou Jingao, Chen Xu, et al. 2015. Genesis and geological significance of Upper Sinian Dengying dolostone with grape-lace shaped cement, Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 20(4): 57-64.]
- 蒋航, 曾德铭, 王兴志, 等. 2019. 川北地区震旦系灯影组储层特征与主控因素[J]. 海相油气地质, 24 (1): 9-19. [Jiang Hang, Zeng Deming, Wang Xingzhi, et al. 2019. Characteristics and controlling factors of the reservoir of Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 24(1): 9-19.]
- 姜磊, 邓宾, 刘树根, 等. 2018. 上扬子盆地新生代差异抬升剥蚀与分异过程[J]. 地球科学, 43 (6): 1872-1886. [Jiang Lei, Deng Bin, Liu Shugen, et al. 2018. Differential uplift and fragmentation of Upper Yangtze Basin in Cenozoic[J]. Earth Science, 43(6): 1872-1886.]
- 兰才俊, 徐哲航, 马肖琳, 等. 2019. 四川盆地震旦系灯影组丘滩体发育分布及对储层的控制[J]. 石油学报, 40 (9): 1069-1084. [Lan Caijun, Xu Zhehang, Ma Xiaolin, et al. 2019. Development and distribution of mound-shoal complex in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin and its control on reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 40(9): 1069-1084.]
- 李毕松, 代林呈, 朱祥, 等. 2023. 四川盆地震旦系灯影组沉积储层特征与勘探前景[J]. 地球科学, 48 (8): 2915-2932. [Li Bisong, Dai Lincheng, Zhu Xiang, et al. 2023. Sedimentary and characteristics of the Dengying Formation and its exploration prospect in Sichuan Basin[J]. Earth Science, 48(8): 2915-2932.]
- 黎荣, 王永骁, 汪泽成, 等. 2023. 四川盆地晚震旦世一早寒武世德阳—安岳裂陷槽南段地质特征[J]. 石油勘探与开发, 50 (2): 285-296. [Li Rong, Wang Yongxiao, Wang Zecheng, et al. 2023. Geological characteristics of the southern segment of the Late Sinian-Early Cambrian Deyang-Anyue rift trough in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 50(2): 285-296.]
- 李勇, 王兴志, 冯明友, 等. 2019. 四川盆地北部及周缘地区震旦系灯影组二段、四段储集层特征及成因差异[J]. 石油勘探与开发, 46 (1): 52-64. [Li Yong, Wang Xingzhi, Feng Mingyou, et al. 2019. Reservoir characteristics and genetic differences between the second and fourth members of Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin and its surrounding areas[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(1): 52-64.]
- 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 2011. 川西坳陷复合-联合构造及其对油气的控制[J]. 石油勘探与开发, 38 (5): 538-551. [Li Zhiwu, Liu Shugen, Chen Hongde, et al. 2011. Structural superimposition and conjunction and its effects on hydrocarbon accumulation in the western Sichuan Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 38(5): 538-551.]
- 刘可禹, 刘建良. 2023. 盆地沉积充填演化与含油气系统耦合模拟方法在超深层油气成藏模拟中的应用: 以四川盆地中部震旦系灯影组为例[J]. 石油学报, 44 (9): 1445-1458. [Liu Keyu, Liu Jianliang. 2023. Application of Basin modeling method coupling sedimentary filling evolution with petroleum system in simulating ultra-deep oil-gas accumulations:a case study of Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(9): 1445-1458.]
- 刘帅, 陈建华, 王峰, 等. 2022. 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, 57 (3): 945-957. [Liu Shuai, Chen Jianhua, Wang Feng, et al. 2022. Construction of a 3D model of digital outcrop real scene based on UAV oblique photography[J]. Chinese Journal of Geology, 57(3): 945-957.]
- 刘学锋, 马乙云, 曾齐红, 等. 2015. 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, 27 (5): 13-18. [Liu Xuefeng, Ma Yiyun, Zeng Qihong, et al. 2015. Geological information extraction and analysis based on digital outcrop: A case of Yangjiagou section of the Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 27(5): 13-18.]
- 罗青云, 王剑, 杜秋定, 等. 2024. 川北地区灯影组四段白云岩成岩演化对优质储层的控制作用[J]. 沉积学报, 42 (6): 2174-2190. [Luo Qingyun, Wang Jian, Du Qiuding, et al. 2024. Controls on the high-quality dolomite reservoir of the 4th member of Dengying Formation related to the diagenetic evolution, northern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(6): 2174-2190.]

- 马肖琳. 2019. 川北地区震旦系灯影组储层特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京). [Ma Xiaolin. 2019. Research on reservoir characteristics of the Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing).]
- 乔占峰, 沈安江, 郑剑锋, 等. 2015. 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, 42(3): 328-337. [Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. 2015. Three-dimensional carbonate reservoir geomodeling based on the digital outcrop model[J]. Petroleum Exploration and Development, 42(3): 328-337.]
- 乔占峰, 郑剑锋, 张杰, 等. 2019. 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, 24(4): 15-26. [Qiao Zhanfeng, Zheng Jianfeng, Zhang Jie, et al. 2019. The latest progress on reservoir characterization for marine carbonate and its significance[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 24(4): 15-26.]
- 任佳鑫, 宋金民, 刘树根, 等. 2023. 四川盆地灯影组二段微生物丘滩体结构类型与沉积模式[J]. 石油学报, 44(2): 312-328. [Ren Jiaxin, Song Jinmin, Liu Shugen, et al. 2023. Framework and sedimentary model of microbial mound-bank complex in member 2 of Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 44(2): 312-328.]
- 王一鸣, 邵燕林, 曾齐红. 2023. 激光扫描技术在建立数字露头模型中的应用综述[J]. 激光杂志, 44(4): 19-24. [Wang Yiming, Shao Yanlin, Zeng Qihong. 2023. Application of laser scanning technology in establishing digital outcrop[J]. Laser Journal, 44(4): 19-24.]
- 魏文强, 陈建华, 王峰, 等. 2024. 基于无人机倾斜摄影三维建模的数字露头及其在剖面实测和研究中的应用: 以宁夏中卫下河沿剖面为例[J]. 物探化探计算技术, 46(4): 490-498. [Wei Wenqiang, Chen Jianhua, Wang Feng, et al. 2024. Digital outcrop based on 3D modeling of UAV oblique photography and its application in profile measurement and research: A case study of Xiaheyan profile in Zhongwei, Ningxia[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 46(4): 490-498.]
- 文龙, 罗冰, 钟原, 等. 2021. 四川盆地灯影期沉积特征及槽—台体系成因模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(5): 513-524, 590. [Wen Long, Luo Bing, Zhong Yuan, et al. 2021. Sedimentary characteristics and genetic model of trough-platform system during the Dengying Period in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 48(5): 513-524, 590.]
- 吴思琪. 2023. 基于深度学习的碳酸盐岩露头缝洞自动提取与表征方法研究[D]. 武汉: 长江大学. [Wu Siqi. 2023. Automatic extraction and characterization of carbonate outcrop fracture-cavity based on deep learning[D]. Wuhan: Yangtze University.]
- 徐哲航. 2023. 四川盆地震旦系灯影组微生物岩储层形成机理与主控因素[D]. 北京: 中国石油大学(北京). [Xu Zhehang. 2023. Formation-mechanism and controlling factors of the microbialite-dominated reservoir in the Ediacaran Dengying Formation of the Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing).]
- 闫海军, 杨长城, 郭建林, 等. 2024. 四川盆地中部地区震旦系大型碳酸盐岩气藏开发技术新进展[J]. 天然气工业, 44(5): 68-79. [Yan Haijun, Yang Changcheng, Guo Jianlin, et al. 2024. New technological progress in the development of Sinian large carbonate gas reservoirs in central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 44(5): 68-79.]
- 曾齐红, 马乙云, 谢兴, 等. 2015. 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, 27(5): 25-29. [Zeng Qihong, Ma Yiyun, Xie Xing, et al. 2015. Surface modeling method of digital outcrop of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 27(5): 25-29.]
- 张荫本, 唐泽尧, 陈季高. 1996. 粘结岩分类及应用[J]. 天然气勘探与开发, (4): 24-33. [Zhang Yinben, Tang Zeyao, Chen Jigao. 1996. Classification and application of cemented rocks[J]. Natural Gas Exploration and Development, (4): 24-33.]
- 赵坤鹏. 2024. 基于激光点云数据的碎屑岩岩性快速识别: 以淮南月牙湾露头为例[D]. 武汉: 长江大学. [Zhao Kunpeng. 2024. Intelligent identification of clastic rock lithology based on laser point cloud data: A case study of outcrop in Crescent Bay of southern Junggar Basin[D]. Wuhan: Yangtze University.]
- 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰, 等. 2014. 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, 19(3): 72-78. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, et al. 2014. LIDAR-based 3D digital outcrop modeling and application in geologic modeling: A case of modeling of Middle Ordovician reef-beach carbonate body at Dabantage outcrop in Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 19(3): 72-78.]
- 周慧, 李伟, 张宝民, 等. 2015. 四川盆地震旦纪末期—寒武纪早期台盆的形成与演化[J]. 石油学报, 36(3): 310-323. [Zhou Hui, Li Wei, Zhang Baomin, et al. 2015. Formation and evolution of Upper Sinian to Lower Cambrian intraplatformal Basin in Sichuan Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 36(3): 310-323.]

- Bellian J A, Kerans C, Jennette D C. 2005. Digital outcrop models: Applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 75(2): 166-176.
- Verwer K, Adams E W, Kenter J A M. 2007. Digital outcrop models: Technology and applications[J]. *First Break*, 25(8): 57-63.

Digital Outcrop Modeling Based on Laser Intensity and its Application: A case study of the Dengying Formation at Gaojiashan, Ningqiang, Shaanxi

WU Xiang^{1,2}, HU ZhongGui^{1,2}, ZENG QiHong³, ZHANG WenJi⁴, SHAO YanLin¹, WEI Wei¹, TONG WeiJie¹, ZHAO ChunHui¹, WANG SiYi¹

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Hubei Key Laboratory of Shale Gas and Oil Geology and Development in Southern Complex Tectonic Areas, Wuhan 430100, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

4. Chongqing Gas Mine, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chongqing 402160, China

Abstract: [Objective] Carbonate outcrops are often affected by tectonic fragmentation, weathering and vegetation cover, making it difficult to obtain complete and precise sedimentary and reservoir characteristics by traditional field survey methods. This study introduces terrestrial laser scanning (TLS) to address the challenges in high-resolution characterization of carbonate outcrops, improve lithofacies recognition accuracy and explore the applicability of the method in sedimentological and reservoir studies. [Methods] Taking the Gaojiashan section of the Dengying Formation in Ningqiang, Shaanxi as an example, high-precision point cloud data were acquired using TLS, and laser intensity information was analyzed quantitatively and qualitatively. Three-dimensional digital outcrop models were constructed using point cloud modeling and texture mapping. Combined with thin-section petrography, rock property physical tests and field sedimentological investigations, lithofacies recognition, sedimentary facies classification and depositional model reconstruction were carried out. [Results and Discussion] (1) A high-resolution digital outcrop model was established, which enables full-coverage 3D visualization and interactive analysis of the outcrop, allowing geological features such as lithology and stratigraphic geometry to be accurately preserved and studied. (2) A lithology-identification chart was established to constrain the laser-intensity signatures and thickness proportions of each lithological type. Algal dolostone and crystalline dolostone generally occupy the high-intensity domain and are associated with relatively higher porosity and permeability, whereas micritic and argillaceous dolostones correspond to low-intensity values and exhibit poorer petrophysical properties. (3) Using the upper submember of the second member of the Dengying Formation as an example, sublayer division was refined based on laser intensity, and the geometric characteristics of the 14th sublayer were intensively characterized. Analysis of depositional patterns indicated that variations in laser intensity are closely related to sea-level fluctuations, revealing cyclic depositional evolution. [Conclusions] The integration of TLS with traditional geological methods provides an intuitive representation of carbonate outcrop features and effectively preserves primary field data. The digital outcrop

Foundation: Research Project of the Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina (R2PED-2025-JS-566); National Science and Technology Major Project for Innovative Oil and Gas Exploration and Development (2025ZD1400400)

Corresponding author: HU ZhongGui, hzg1978@yangtzeu.edu.cn

model established in this study offers valuable data support for hydrocarbon exploration and reservoir evaluation, demonstrating the broad prospects and significant potential of TLS applications in geological research.

Keywords: digital outcrop; laser scanning; Gaojia Mountain; Dengying Formation

