



引文格式: 王韬, 李婷, 郑孟林, 等. 准噶尔盆地西北缘吐孜阿克内沟数字露头构建及其地质信息提取与分析[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 162–170. DOI: 10.12401/j.nwg.2025031

Citation: WANG Tao, LI Ting, ZHENG Menglin, et al. Construction of Digital Outcrop and Extraction, Analysis of Geological Information of Tuziakeneigou, in the Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 162–170. DOI: 10.12401/j.nwg.2025031

准噶尔盆地西北缘吐孜阿克内沟数字露头构建及其地质信息提取与分析

王韬¹, 李婷¹, 郑孟林¹, 吴海生¹, 许媛媛², 巴黑扎提·努尔塔依², 徐森³

(1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 中国石油新疆油田分公司数据公司, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 河北省煤田地质局第二地质队, 河北 邢台 054500)

摘要: 野外地质露头是地学研究的重要对象, 随着研究目的日趋精细化、复杂化, 传统研究中露头资料保存不便、细节记录有限、视野呈现受限等局限性日渐凸显。为此将无人机摄影、三维建模技术与传统研究方式融合并构建三维数字露头, 为解决传统研究中存在的效率低、数据复用性差等问题提供全新的思路。实践表明: 数字露头将露头相关的描述、图片、视频、全景、文献、观察点等信息与露头三维模型有效结合, 可以更客观、全面地认识地质信息, 易于观察宏观面貌, 尤其对于人力不易到达处判断岩层走向和叠覆情况、开展岩性判别和地质界线识别十分有利, 相较于传统方式该方法能够帮助研究人员更加直观地理解露头地质现象的时空展布和地质特征, 后续地质分析与露头资源的共建、共享高效便捷, 可成为野外地质剖面观测与地质特征分析的新范式。

关键词: 数字露头; 三维建模; 无人机航拍; 地质分析; 准噶尔盆地西北缘

中图分类号: P628; TE121.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0162-09

Construction of Digital Outcrop and Extraction, Analysis of Geological Information of Tuziakeneigou, in the Northwestern Margin of Junggar Basin

WANG Tao¹, LI Ting¹, ZHENG Menglin¹, WU Haisheng¹, XU Yuanyuan², BAHEIZHATI ·Nuertayi², XU Miao³

(1. Research Institute of Exploration & Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Keramay 834000, Xinjiang, China; 2. Data Company, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Keramay 834000, Xinjiang, China; 3. The Second Geological Brigade, Hebei Coal Geology Bureau, Xingtai 054500, Hebei, China)

Abstract: Geological outcrop is an important object of geoscience research. It is difficult to save data, record details, observe completely of a geological outcrop by the traditional means, with the research goal becoming

收稿日期: 2024-02-19; 修回日期: 2025-03-07; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国石油股份公司油气勘探重大科技专项“准噶尔盆地全油气系统地质理论与勘探实践”(2022DJ0108), 中国石油股份公司前瞻性基础性技术攻关项目“地层不整合油气藏成藏主控因素与关键要素定量评价技术研究”(2021DJ0405)联合资助。

作者简介: 王韬(1990-), 男, 高级工程师, 主要从事油气资源评价及油气勘探工作。E-mail: wt122263910@126.com。

more and more refined and complicated. To solve these problems, photography, 3D modeling and construction of digital outcrop were applied to the study of outcrop. It provides a new idea for solving the problems such as low efficiency, poor data reusability of traditional methods. The practice shows that a 3D digital outcrop can combines outcrop-related information such as text, pictures, videos, panoramas, documents and observation points with a 3D outcrop model. It enables geologists to research and acquire geological information more objectively and more comprehensively. And then it can be used for a variety of geological analysis such as observe macroscopic landform, judge stratum strike and occurrence, identify lithology and geological boundaries, and so on. Compared with traditional methods, the new method enables geologists to acquire more intuitive understanding of geological features and spatial-temporal characteristics of a outcrop. It also makes geological analysis, co-study and sharing a outcrop efficient and convenient. Overall, it provide a more efficient way to geological analysis, it also provide a new method of geological observation and geological analysis.

Keywords: digital outcrop; 3D modeling; UAV photography; geological analysis; the Northwestern Margin of Junggar Basin

野外地质露头作为呈现古今地质信息最直观、最全面的地质对象,一直是包括油气地质研究在内的各类地学研究倚重的实验场和数据源(王茜等, 2021; 王胜军等, 2022; 李相博等, 2023; Zamzam, 2023)。传统的地质露头研究多采用实地拍照、手绘、人工丈量等方法记录信息,存在花费大、效率低、地质参数获取少、数据精度参差不齐、人身安全有一定隐患等诸多缺陷。无人机(UAV)航拍是近年来发展迅速的一种对地探测手段(毕凯等, 2015; 孙杰等, 2019; 晏磊等, 2019; Luciano et al., 2024),地学工作者将其引入地质露头研究形成了一系列基于无人机航拍的数字露头建模方法和技术,既可准确、高效采集野外地质露头的三维信息,又能客观、全面实现地质信息室内复现与分析(印森林等, 2018; 万剑华等, 2019; 徐琪等, 2023; Menegoni et al., 2023),已广泛应用于地层对比、沉积相分析、储层裂缝预测等多类研究中(曾庆鲁等, 2017; 印森林等, 2018; 杜赫等, 2020; Shahtakhtinskiy, 2022)。本次研究是我司首次基于无人机(UAV)航拍的数字露头构建,因此选择毗邻城区、出露岩石地层单位较多、地质现象相对丰富、地表条件较好的准噶尔盆地西北缘吐孜阿克内沟作为试验场,以检验该方法的实践效果。

1 研究区概况

本次选取准噶尔盆地西北缘毗邻克拉玛依市区的吐孜阿克内沟构建三维数字露头(图1)。准噶尔盆地位于新疆北部,是中国重要的大型含油气盆地(何

登发等, 2004),西北缘是克拉玛依油田的诞生地也是盆地油气最富集的区带(陈建平等, 2016; 何文军等, 2023),吐孜阿克内沟位于克拉玛依市区西北郊,交通便利,以戈壁、丘陵地貌为主,四季干燥少雨、地表植被稀疏,可观察到风化壳、河道充填、油苗等多种地质现象,是开展地层划分、沉积相带、储层结构等研究的良好实验场与理想观测站(顾兴明等, 2011; 罗正江等, 2015; 曹天儒等, 2021)。沟内出露石炭系、三叠系、侏罗系等(表1),层序自下而上分别为包古图组(C_1b)、小泉沟组(T_3x)、八道湾组(J_1b)、三工河组(J_2s)、西山窑组(J_2x)、齐古组(J_3q)、第四系(Q)(蔡土赐等, 1999; 李永军等, 2010)。

2 数字露头构建

露头二维图像的质量决定了后续三维模型的质量,拍摄器材的性能参数与无人机的飞行参数则是控制二维图像质量的关键,飞行高度和相机像素共同决定了图像的分辨率,飞行速度、航线方向则决定了图像光影的稳定性和图像间的叠置率。

为了高效、准确采集基础数据实现高精度数字露头构建,地质研究人员与信息技术人员需先对拟建数字露头区进行踏勘,共同确定地质露头产状、干扰物分布、地貌、天气、光照等条件并优选航拍设备、航线等。本次研究拟建数字露头区约为 13 km^2 (图1),综合考虑,采用垂直起降无人机搭载五拼相机进行倾斜摄影,数据采集设备参数见表2,图像地面分辨率为 0.01 m 、垂直相对航高为 75 m ,航线尽可能垂直主体

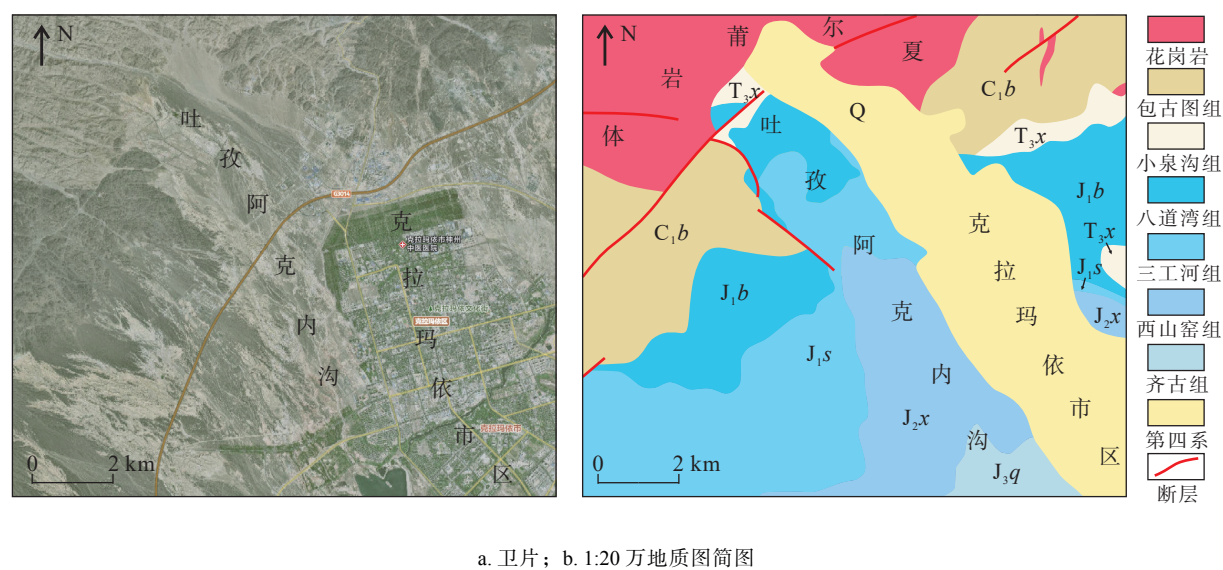


图1 吐孜阿克内沟位置与地质简图(据“天地图”公共服务平台, 2024;新疆地质局区测队 5 分队, 1965 修改)

Fig. 1 Location and geological map of Tuziakeneigou

表 1 吐孜阿克内沟出露地层岩性特征

Tab. 1 Lithologic features of stratums in Tuziakeneigou

系	组	符号	厚度(m)	岩性描述
第四系		Q	23~58	杂色砾岩、砾石、砂、粉砂、砂土
	齐古组	J ₃ q	20~119	灰、灰黄、灰绿、褐、红色砾岩、砂岩、泥岩不均匀互层, 夹砂质泥岩、粉砂岩
	西山窑组	J ₂ x	30~450	灰、灰白、灰黄、灰绿、红色细~粗粒砂岩与泥岩互层, 夹粉砂岩、碳质页岩
侏罗系	三工河组	J ₁ s	150~300	灰黄色为主的杂色砂岩与泥岩不均匀互层, 夹细砾岩、粉砂岩、泥灰岩, 局部还可见到薄层菱铁矿
	八道湾组	J ₁ b	50~155	灰、灰白、灰黄、灰绿、褐色砾岩、砂岩、泥岩不均匀互层, 夹数套煤线, 底部有 10~20 m厚的底砾岩
三叠系	小泉沟组	T ₃ x	23~103	下部为灰色砂质泥岩夹油砂, 中部以灰黄、灰绿色砾岩为主, 上部为灰色、灰黄色砂质泥岩与砂岩互层夹砾岩透镜体
石炭系	包古图组	C ₁ b	10~25	总体为一套深海相暗色细碎屑岩, 夹有火山岩、灰岩夹层或条带

表 2 吐孜阿克内沟地质露头数据采集设备参数

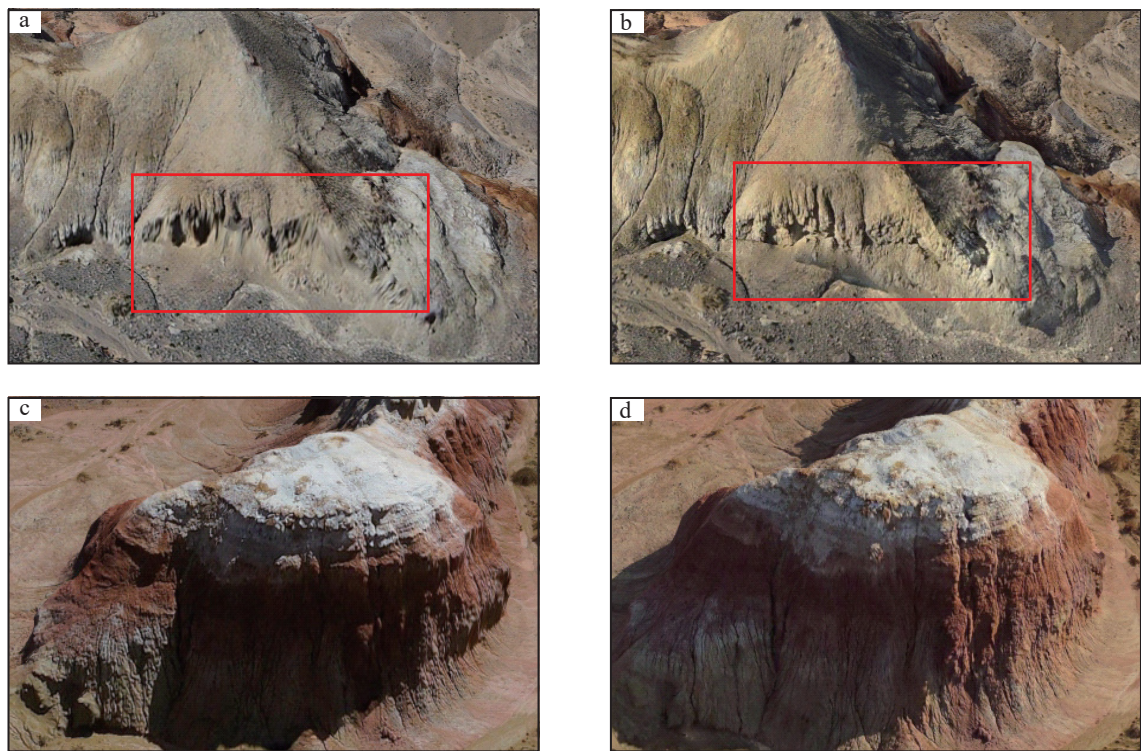
Tab. 2 Calibration parameters of data acquisition equipment for geological outcrop of Tuziakeneigou

无人机	数量 (个)	参数						
		最大有效载荷(kg)		抗风能力(级)		实用升限(m)		最大控制半径(km)
飞马D2000	2	1		6		8 000		30
大疆M210	2	1		6		8 000		30
相机	数量	总像素 (10 ⁴)	CMOS数量	像元尺寸 (μm)	曝光间隔(s)	焦距(mm)	倾斜角度(°)	工作温度 (℃)
赛尔PSDK101S	4	> 12 000	5 pcs	3.9	0.8	35	45	-10~50

构造走向布设,地面均匀布设像控点并以所在行政区域高精度GPS网C级网作为检核标准进行像控。

实践中,为获取高质量基础数据,共开展两轮航拍。第一轮:投入1套无人机+五拼相机、飞行12架

次、时长20.5 h、历程4天、拍摄12.2万张相片约1 TB,生成数字露头初始模型后检查质量时发现了由于参与建模的图像不够饱满导致模型“图像拉花”(图2a)、由于“逆光”拍摄导致模型“阴影强烈”等



a. “图像拉花”问题; b. “阴影强烈”问题; c. “图像拉花”解决效果; d. “阴影强烈”解决效果

图2 三维数字露头构建过程中遇到的问题与解决后的效果对比

Fig. 2 The contrast between problems and solved results during 3D digital outcrop constructing

问题(图2c)。分析原因认为主要有两点:①拍摄速度过快、同一点位相片重叠度不足。②连续飞行下,未根据露头产状与日照方向作出调整拍摄角度,进而出现较严重阴影。为此开展第二轮航拍:投入4套无人机+五拼相机、飞行51架次、选择晴有微云天气、每日飞行时段为11:00~17:00、上午自东向西拍摄、下午自西向东拍摄、时长96h、历程25天、拍摄23.3万张相片约2TB,再次得到的模型质量得到明显改善:降速拍摄使同一点位有更多照片参与建模,特别对于非正射面图像得到更多补充,模型清晰度有效提高(图2b),分时段、分航线拍摄降低了“逆光”程度加之降速条件下更多照片得以参与“匀光匀色”,模型阴影显著弱化(图2d)。

由于涉及TB级海量数据参与三维数字露头构建,为提升数据解算成功率与模型生产效率,本次在硬件方面调用300台阿里云服务器,进行多线程数据并行处理,软件方面以Smart3D进行空中三角计算(为影像进行XYZ坐标体系定向)、DOM(数字正射影像图, Digital Orthophoto Map)、DEM(数字高程模型, Digital Elevation Model)生成,并利用其进行影像匹配与纹理贴图,融合图像信息与位置信息,实现二维数据的三

维重建,形成三维数字露头,最后基于Cesium引擎实现3D Tile格式输出与浏览(图3)。

3 地质信息获取与分析

区别于传统野外地质研究,利用三维数字露头研究人员得以十分便利地观察难以实地接近的陡坎、山顶等地貌地物;还可在观察中自如地选择不同视角、不同尺度;利用数字露头包含的空间坐标属性还可测量长度、方向等;以高质量图像数据为基础,数字露头对野外岩层的宏观展布、岩性特征也有较好的呈现。同时,数字露头可载入各类能源矿山企业以及各大地学研究所构建的地表信息系统,实现多元信息的交互应用。总而言之,利用数字露头可以选择合适视角观察和分析地质露头的宏观面貌,特别对于人力不易到达处开展岩石学、地层学、沉积学等地质分析十分方便。

3.1 地层对比与界线追踪

地层是在一定地质时期内形成的并成层产出的岩石总和,是探讨构造、沉积等各类地学问题的基本框架(杜森官, 1993),遵循地层对比原则一套实际可用的基于数字露头的地层对比与界线追踪方法应包

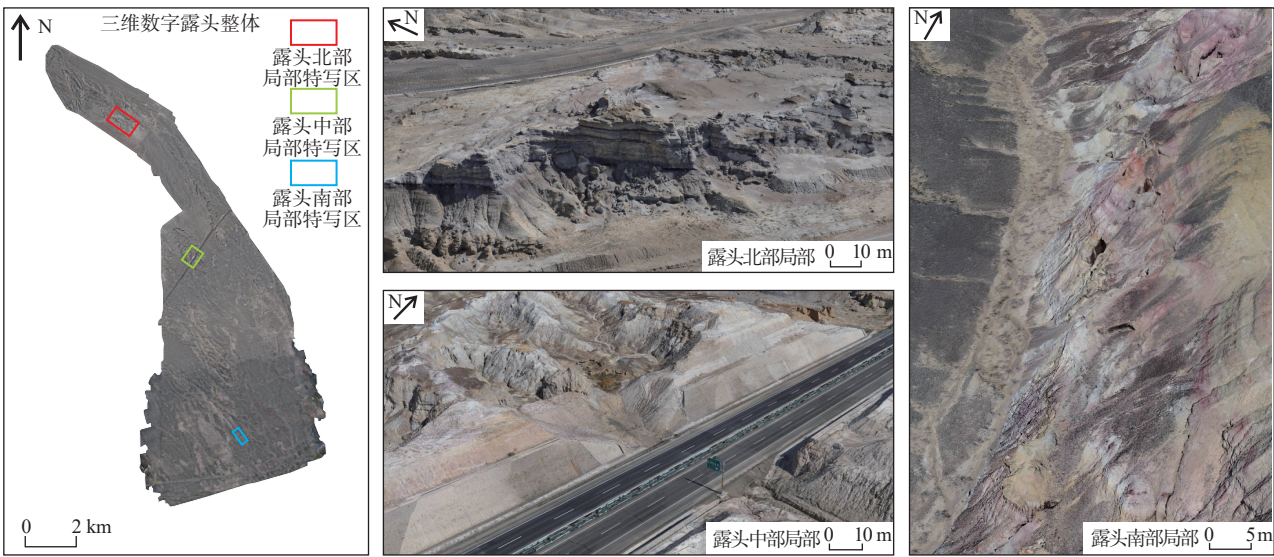


图3 吐孜阿克内沟三维数字露头
Fig. 3 3D digital outcrop of Tuziakeneigou

括以下步骤: ①通过必要的资料调研与野外踏勘, 了解与确定待识别地层的地质与视觉特征, 并结合数字露头实际显示效果建立适于研究区的地层与界面识别标志。②借助数字露头浏览与编辑平台, 根据建立的识别标志进行区域地层对比与界线追踪。③返回野外进行现场抽样复核, 进一步修正和完善数字露头上的地层解译结果。本次在吐孜阿克内沟数字露头上可清晰区分石炭系、三叠系、侏罗系、第四系等层系, 对于地层特征区分度较强的三叠系、侏罗系可区分组级地层单元, 对于出露单元较全的侏罗系八道湾

组甚至可细分至段(表 3, 图 4a~图 4j)。较传统方法, 基于数字露头的地层解译结果兼顾宏观整体性与对比精度, 基于地层不同的影像特征可以在较大范围连续追踪地层界线(图 4k、图 4l), 对于后续开展盆-山对比、确定露头区参照物具有促进作用。

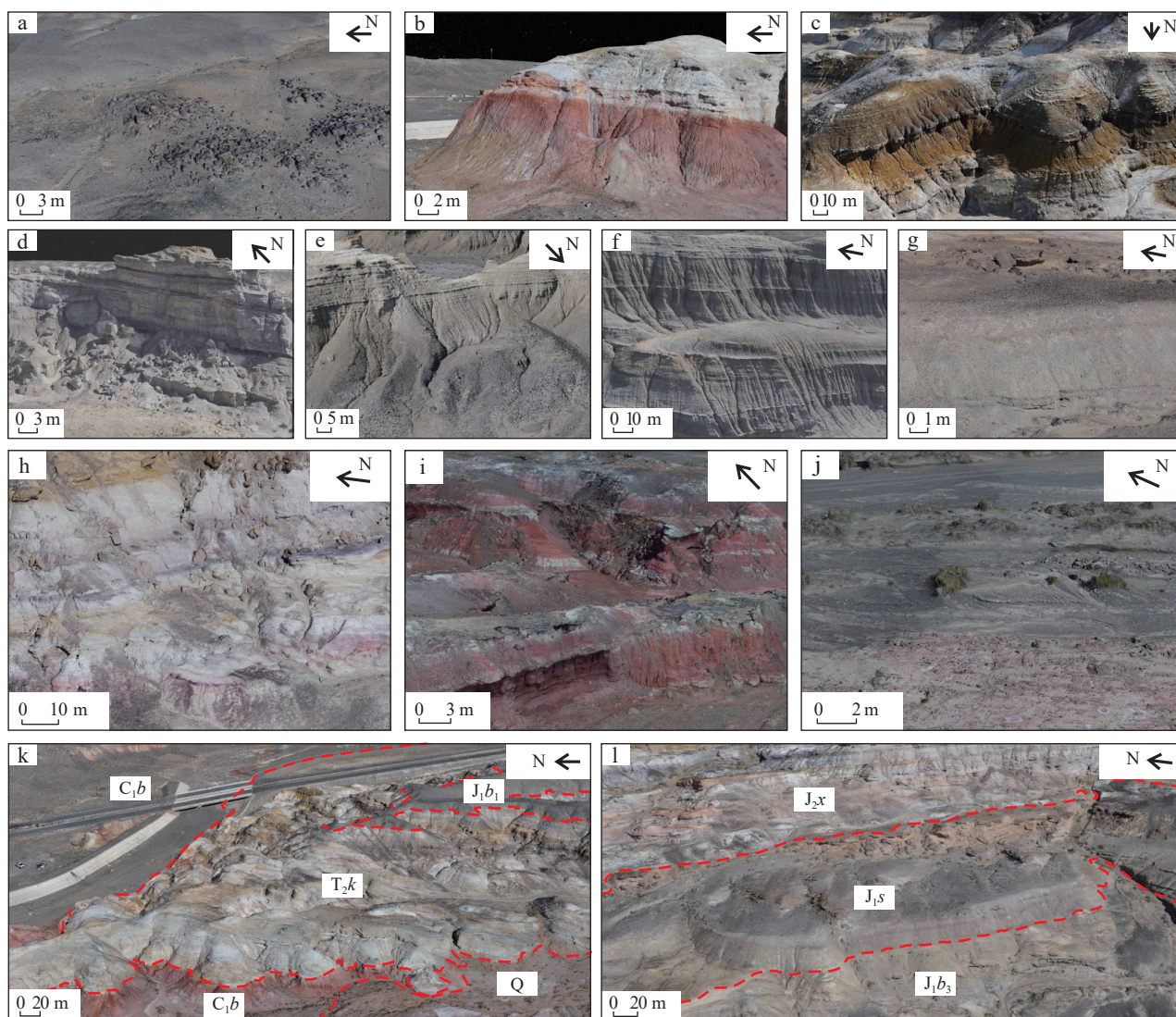
3.2 砂体识别与精细描述

研究砂体特征是解析油气富集规律的一项重要基础工作(张瑶瑶等, 2023), 较井下实钻资料通过露头开展砂体研究在空间连续性与结构完整性方面更具优势。利用数字露头高精度、可缩放特点, 可较好

表 3 吐孜阿克内沟三维数字露头地层识别特征

Tab. 3 Identifying features of stratigraphic correlation based on 3D digital outcrop of Tuziakeneigou

系	组	段	主要岩性	主要色调	特殊标志
第四系			浮土、碎石	无典型主色	地表植被相对发育(图4j)
	齐古组		砂岩、泥岩	暗红色、灰白色、鲜红色	暗红色为背景色, 灰白色、鲜红色条带点缀(图4i)
	西山窑组		砂岩、泥岩、煤	灰白色、灰黄色、淡黄色、淡红色	灰白色、灰黄色为背景色, 淡黄色、淡红色条带明显, 还可见黑色煤层(图4h)
侏罗系	三工河组		砂岩、泥岩	下部: 深黄色; 上部: 暗灰色	颜色呈“二元”分布, 深黄色部分有条带特征, 暗灰色部分有颗粒感(图4g)
		三段	砂岩、泥岩	土黄色、暗灰色	条带特征更明显, 顶部多为浑圆的山包(图4f)
	八道湾组	二段	砾岩、砂岩、泥岩	土黄色、暗灰色	中下部呈块状, 上部为条带状(图4e)
		一段	砾岩、砂岩、煤	深灰色	有多套煤层发育(图4d)
三叠系	小泉沟组		砾岩、砂岩	灰白色、黄色、和深灰色	不同颜色呈条带状, 地表冲沟明显(图4c)
石炭系	包古图组		以细碎屑沉积为主	平缓区: 灰色、灰黄色、黑色山丘区: 鲜红色	平缓区外来暗色岩块散落地面呈麻点状(图4a); 山丘区由于长期风化淋滤, 风化壳浸染状的鲜红色在研究区很有特色(图4b)



a. 平缓区包古图组; b. 山丘区包古图组; c. 小泉沟组; d. 八道湾组一段; e. 八道湾组二段; f. 八道湾组三段; g. 三工河组; h. 西山窑组; i. 齐古组; j. 第四系; k. 包古图组/小泉沟组/八道湾组对比; l. 八道湾组三段/三工河组/西山窑组对比

图4 吐孜阿克内沟三维数字露头地层解译标志与对比示例

Fig. 4 The marks and example of stratigraphic correlation based on 3D digital outcrop of Tuziakeneigou

地分析单砂体砂层及砂体间的空间展布特征。

剖面主体灰白色、灰黄色岩层交互,为典型的克拉玛依组,顶部为一套深灰色岩层,从层序关系与特征看符合八道湾组一段特征(图5)。研究区中三叠统至下侏罗统以河流、湖泊沉积为主(顾兴明等, 2011; 曹天儒等, 2021),分流河道、河口坝以及山口以冲积扇形式堆积的各类砂砾岩层是形成储层的重要类型。通过数字露头缩放观察对比,该剖面顶部深灰色岩层为八道湾组一段底部冲积扇相砾岩;之下克拉玛依组受差异风化影响,不同岩层凹凸相间,偏灰白色调为粒度较粗的砂岩、含砾砂岩,偏灰黄色调为粒度较细的粉砂岩、泥质粉砂岩、泥岩。

结合数字露头测量功能绘制单剖面岩性柱状图,以此为基础,结合影像特征在整个视域开展砂体刻画,分析砂体间接接触关系和分布特征。结果表明,该剖面下部粒度较细,主要为含泥粉砂岩和泥岩,上部砂体较发育、整体砂泥比为1.5~2.5,以八道湾组底部洪积扇相砾岩和克拉玛依组上部水下分流河道相含砾砂岩为主,砾岩空间分布较稳定、厚度为0.7~3.2 m,含砾砂岩垂向上多期叠置、砂体间夹分流间湾相泥岩,单体厚度为0.2~1.6 m、宽度为6.5~20 m以上、宽厚比普遍>10。

3.3 地表信息综合应用

笔者讨论的数字露头由中国石油新疆油田公司筹建,因此相关成果也顺利接入油田信息化平台。油

田用户通过 PC 端登录平台针对露头模型、露头所属的图片、视频、全景、文献、观察点、地质标绘等进行信息分享、互动。此外,用户还可将数字露头相关信息

息与平台内已有的城区、场站、井点、路网、山川水系等多种信息融合,并在不同的业务场景中提供导航、选址、基建规划等不同功能的参考(图 6)。

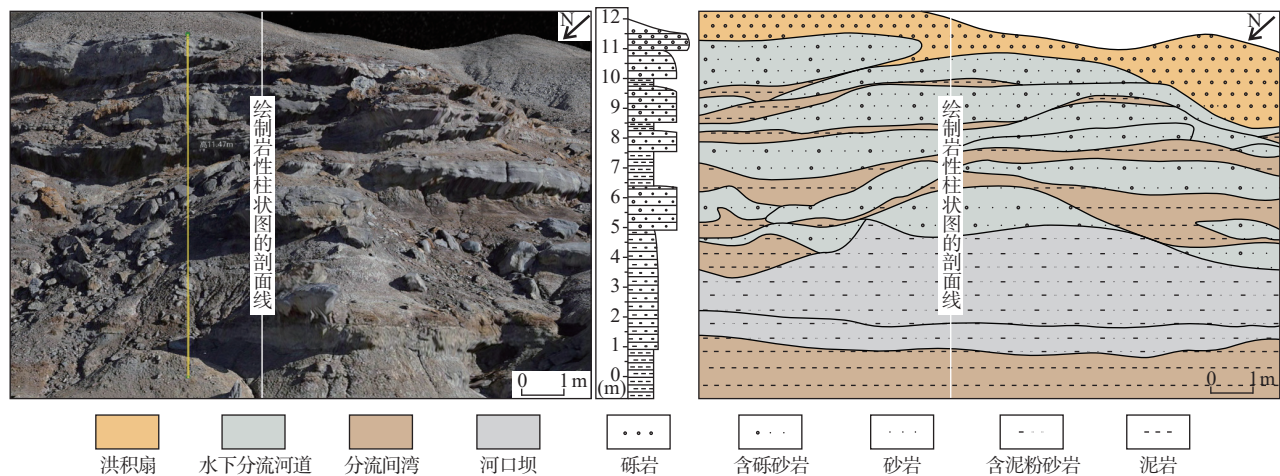
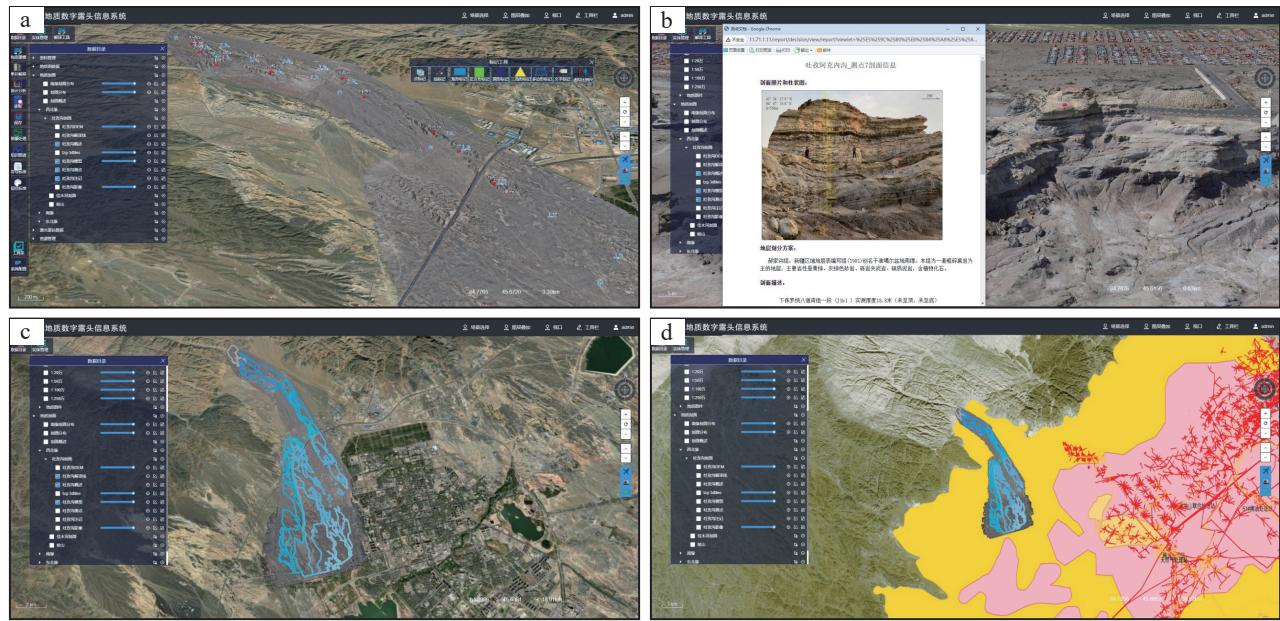


图5 吐孜阿克内沟三维数字露头沉积研究示例

Fig. 5 The example of sedimentological research based on 3D digital outcrop of Tuziakeneigou



a. 踏勘点位标识; b. 典型特征标记; c. 与城区路网融合; d. 与油田管网融合

图6 吐孜阿克内沟三维数字露头与周边地表信息综合应用示例

Fig. 6 The example of integrated application with surrounding surface information on 3D digital outcrop of Tuziakeneigou

4 讨论

传统野外地质研究,通常点多线长、高度流动、分散作业,并受交通、地形等因素的限制,经常遭遇各种困难并多局限于从地面进行观察和量测,很难观察露头全貌并获取完整的露头信息。三维数字露头有

效解决上述问题并增强了地质露头的可视化和知识化,为野外地质研究提供了全新的途径。

由于三维数字露头本质上是信息化的数据,因此随着时间的推移不仅其地质特点不受“沧海桑田”的改变,并且随着学者们针对露头研究的成果积累与丰富,以及更多其他三维数字露头的补充,能够实现数字露头研究的共建、共享。后来的研究人员可以通

过前人工作对露头地质情况进行快速了解,从而使相关研究在成本、效率、准确性、认知深度等多方面显著优于传统野外地质方式。

当然笔者讨论的数字露头也存在一些问题,将作为后续完善和改进的重点。①局部露头并未达到设计要求的分辨率,影响了各种地质现象的观察,这需要露头数据采集方案与三维建模方案的继续改进。②数字露头由于模型数据量大,其交互应用对于网络环境和后台管理设备要求极高,多数用户在PC端体验后反应其加载速度不尽人意,因此后续如何在保证数据质量不降低的条件下改进数据存储、调用方式成为一项重点内容。③对于数字露头的信息发掘以及和其他信息的融合应用是数字露头价值发挥的关键,将数字露头与盆地地下的钻井、地震等信息进一步融合对接,同时开展跨企业、跨行业同类型数据与应用平台的整合是保持数字露头发展动力的关键。

5 结论

(1)传统地质研究手段与信息化、数字化技术结合是提升研究效率、改善研究质量的有效方式。基于无人机航拍的三维数字露头包含地质露头实景影像及真实三维坐标信息,提供了地质露头多视角、全方位的整体展示,克服了传统数据采集和踏勘方式带来的信息片面化和局部化。

(2)数字露头减少了剖面数据采集和踏勘人工工作量和安全风险,增强了数据复用性和数据保存可靠性。实践中,利用数字露头还可完成剖面丈量、岩性判识、地层对比、砂体描述等多种地质任务,具有良好的实用价值。基于无人机航拍的数字露头为研究人员开展野外地质研究提供了一种有效的、全新的技术方案。

致谢:衷心感谢克拉玛依天地图公司在数字露头构建中,中国石油勘探总院张友炎教授、曾齐红教授,中国石油大学(北京)谢庆宾教授团队在地质分析过程中起到的重要支撑作用,衷心感谢所有匿名审稿专家对本文提出的诸多宝贵建议!

参考文献(References):

毕凯,李英成,丁晓波,等.轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J].测绘通报,2015,3:27-31.

- BI Kai, LI Yingcheng, DING Xiaobo, et al. Aerial Photogrammetric Technology of Light Small UAV: Status and Trend of Development[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015, 3: 27-31.
- 蔡土赐,孙巧缙,缪长泉,等.新疆维吾尔自治区岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.
- CAI Tuci, SUN Qiaoli, MIAO Changquan, et al. Rock strata of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010.
- 曹天儒,姚宗全,德勒恰提·加娜塔依,等.准噶尔盆地西北缘吐孜阿克内沟八道湾组露头沉积特征及模式[J].科学技术与工程,2021,21(14):5695-5709.
- CAO Tianru, YAO Zongquan, JIANATAYI Deleqati, et al. Sedimentary Characteristics and Model of Outcrop the Badaowan Formation in Tuziakeneigou, Northwestern Margin of the Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5695-5709.
- 陈建平,王绪龙,邓春萍,等.准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J].地质学报,2016,90(3):421-450.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Oil and Gas Source, Occurrence and Petroleum System in the Junggar Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(3): 421-450.
- 杜赫,徐守余,冯建伟,等.基于数字露头表征的岩溶缝洞组构特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(5):1-9.
- DU He, XU Shouyu, FENG Jianwei, et al. Digital outcrop representation for karst fracture-cave reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(5): 1-9.
- 顾兴明,柳永清,旷红伟,等.准噶尔盆地西北缘吐孜阿克内沟中三叠统一下侏罗统油砂矿沉积和储层特征[J].岩石矿物学杂志,2011,30(2):215-224.
- GU Xingming, LIU Yongqing, KUANG Hongwei, et al. Sedimentation and reservoir characteristics of Middle Triassic-Lower Jurassic oil sand deposits at Tuziakeneigou of northwestern Junggar Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(2): 215-224.
- 杜森官.确定岩石地层单位原则的初步探讨[J].地层学杂志,1993,17(1):78-79.
- DU Senguan. Preliminary discussion on the principle of Determining rock stratigraphic unit[J]. Journal of Stratigraphy, 1993, 17(1): 78-79.
- 何登发,陈新发,张义杰,等.准噶尔盆地油气富集规律[J].石油学报,2004,25(3):1-10.
- HE Dengfa, CHEN Xinfu, ZHANG Yijie, et al. Enrichment characteristics of oil and gas in Junggar Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 25(3): 1-10.
- 何文军,吴和源,杨森,等.准噶尔盆地玛湖凹陷凤城组页岩油储层岩相划分与类型评价[J].西北地质,2023,56(1):217-231.
- HE Wenjun, WU Heyuan, YANG Sen, et al. Lithofacies Division and Type Evaluation of Shale Oil Reservoir in Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 217-231.

- 2023, 56(1): 217–231.
- 李相博, 刘华清, 杨伟伟, 等. 一个由干湿交替极端气候事件主导的内陆湖盆: 来自鄂尔多斯盆地上三叠统延长组露头剖面的沉积学证据[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 293–316.
- LI Xiangbo, LIU Huaqing, YANG Weiwei, et al. A Lacustrine Basin Driven by Extreme Events of Alternate Dry-Wet Climatic Cycles: Evidence from Outcrops of Yanchang Formation in Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 293–316.
- 李永军, 佟丽莉, 张兵, 等. 论西准噶尔石炭系希贝库拉斯组与包古图组的新老关系[J]. 新疆地质, 2010, 28(2): 130–136.
- LI Yongjun, TONG Lili, ZHANG Bing, et al. On the old and new relationship between Xibeikulasi Formation and Baogutu Formation of the carboniferous system, West Jaggar[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(2): 130–136.
- 罗正江, 师天明, 唐鹏, 等. 准噶尔盆地西北缘克拉玛依组地质时代再认识[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 668–681.
- LUO Zhengjiang, SHI Tianming, TANG Peng, et al. Restudy on the Age of Karamay Formation in Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 668–681.
- 孙杰, 谢文寒, 白瑞杰. 无人机倾斜摄影技术研究与应用[J]. 测绘科学, 2019, 44(6): 145–150.
- SUN Jie, XIE Wenhan, BAI Ruijie. UAV oblique photogrammetric system and its application[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(6): 145–150.
- 万剑华, 王朝, 刘善伟, 等. 倾斜摄影测量构建地质数字露头[J]. 地质科技情报, 2019, 38(1): 258–264.
- WAN Jianhua, WANG Chao, LIU Shanwei, et al. Reconsting Geological Digital Outcrops with Oblique Photogrammetry[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(1): 258–264.
- 王茜, 黄永建, 张治锋, 等. 上扬子地区双河露头五峰组—龙马溪组下段化学层序地层分析[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 1–14.
- WANG Qian, HUANG Yongjian, ZHANG Zhifeng, et al. Chemical Sequence Stratigraphy of the Wufeng Formation-lower Member of Longmaxi Formation in Shuanghe Outcrop, upper Yangtze[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 1–14.
- 王胜军, 唐永军, 朱松柏. 塔里木盆地库车坳陷北部典型露头剖面白垩系巴什基奇克组三段高分辨率层序地层特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 804–822.
- WANG Shengjun, TANG Yongjun, ZHU Songbai, et al. High-resolution sequence stratigraphy of the third member of Cretaceous Bashijiqike Formation in a typical outcrop section, northern Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 804–822.
- 徐琪, 沈含笑, 董少春, 等. 地质露头与标本的三维数字化现状与展望[J]. 高校地质学报, 2023, 29(3): 403–418.
- XV Qi, SHEN Hanxiao, DONG Shaochun, et al. 3D Digitization of Geological Outcrops and Specimens: Status and Prospects[J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(3): 403–418.
- 晏磊, 廖小罕, 周成虎, 等. 中国无人机遥感技术突破与产业发展综述[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(4): 476–495.
- YAN Lei, LIAO Xiaojun, ZHOU Chenghu, et al. The impact of UAV remote sensing technology on the industrial development of China: A review[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(4): 476–495.
- 印森林, 陈恭洋, 刘兆良, 等. 基于无人机倾斜摄影的三维数字露头表征技术[J]. 沉积学报, 2018, 36(1): 72–80.
- YIN Senlin, CHEN Gongyang, LIU Zhaoliang, et al. 3D digital outcrop characterization technology based on unmanned aerial vehicle oblique photography[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(1): 72–80.
- 印森林, 谭媛元, 张磊, 等. 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, 2018, 20(5): 909–924.
- YIN Senlin, TAN Yuanyuan, ZHANG Lei, et al. 3D outcrop geological modeling based on UAV oblique photography data: A case study of Pingtouxian section in Lvliang City, Shanxi Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(5): 909–924.
- 曾庆鲁, 张荣虎, 卢文忠, 等. 基于数字露头技术的扇三角洲前缘砂体构型特征——以库车坳陷前陆区索罕村剖面为例[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(2): 30–37.
- ZENG Qinglu, ZHANG Ronghu, LU Wenzhong, et al. Analysis on sandbody architecture of fan delta front based on the digital outcrop technology-A case study of Suohan village outcrop in Kuqa foreland area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 30–37.
- 张瑶瑶, 杨水胜, 刘子琪, 等. 鄂尔多斯盆地靖边油田沙洼沟地区延安组延9油藏富集规律[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 213–224.
- ZHANG Yaoyao, YANG Shuisheng, LIU Yuqi, et al. Enrichment Regularity of Y-9 Reservoir of Yan'an Formation in Shawagou Area of Jingbian Oilfield, Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 213–224.
- Luciano Galone, Fabio Villani, Emanuele Colica, et al. Integrating near-surface geophysical methods and remote sensing techniques for reconstructing fault-bounded valleys (Mellieha valley, Malta)[J]. Tectonophysics, 2024, 875: 230–263.
- Menegoni Niccolò, Giordan Daniele, Inama Riccardo, et al. DICE: An open-source MATLAB application for quantification and parametrization of digital outcrop model-based fracture datasets[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(5): 1090–1110.
- Shahtakhtinskiy Aydin, Khan Shuhab. 3D stratigraphic mapping and reservoir architecture of the Balakhany Suite, Upper Productive Series, using UAV photogrammetry: Yasamal Valley, Azerbaijan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 145.
- Zamzam Sara. Geological Controls and Prospectivity Mapping for Manganese Ore Deposits Using Predictive Modeling Comparison: An Integration of Outcrop and Remote Sensing Data, Sinai Microplate, Egypt[J]. Journal of Earth Science, 2023, 34(2): 588–608.