

塔里木盆地阳霞露头侏罗系阿合组致密砂岩甜点储层 表征与建模

——以传统野外露头数据与无人机倾斜摄影模型结合为例

印森林^{1,2}, 胡张明³, 赵军⁴, 唐文军⁴, 曾杰⁵, 陈恭洋^{1,2}, 程乐利^{1,2}, 唐攀¹

(1. 长江大学 录井技术与工程研究院, 湖北 荆州 430023; 2. 南方复杂页岩油气地质开发湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100;
3. 中国石油 西部钻探有限公司, 新疆 乌鲁木齐 834000; 4. 中国石油 新疆油田公司, 新疆 克拉玛依, 834001; 5. 中国石油 昆仑数
智科技有限责任公司, 北京 100043)

摘要:针对致密砂岩基质型甜点储层成因与分布模式的研究不足,创新性地构建了传统野外考察与现代无人机倾斜摄影技术相结合的研究体系。通过系统整合层次约束构型表征方法、现代分析测试技术(包括常规孔-渗分析、薄片鉴定、扫描电镜观察、核磁共振测试、XRF-XRD元素分析及CT扫描)以及三维地质建模技术,系统开展了岩相识别、典型露头剖面解剖、储层质量差异模式分析、三维地质工程建模及甜点分布沉积模式研究。研究结果表明:①传统野外露头表征与无人机倾斜摄影技术的有机结合,显著拓展了沉积学研究的维度和精度。在露头区辫状河三角洲中识别出12种岩相类型,其中分流河道和分流砂坝构成主要骨架砂体,而分流间湾和废弃河道中的泥岩则形成关键的隔夹层。②创新性提出致密砂岩储层质量差异的3种模式。充填型正韵律模式表现为单一辫状水道内部孔隙度自底部向上逐渐降低的典型特征;侧积迁移叠置模式则显示出沿河道侧向加积方向孔隙度递减的显著规律,并呈现多期正韵律叠置的复杂结构;此外还识别出上述两种模式的复合型。③基于储层构型界面方法,建立了研究区储层地质与工程参数的三维模型。以无人机倾斜摄影获取的高精度数字露头数据为基础,成功构建了相控孔隙度、泊松比、杨氏模量和脆性指数等关键参数的三维模型,全面揭示了致密砂岩露头在多个尺度上的非均质性特征。依据地质与工程参数标准,系统确定了致密砂岩甜点的分布模式,并深入分析了不同类型甜点在空间分布上的差异性特征。这些研究成果为后续致密砂岩油气资源的勘探开发提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词:无人机倾斜摄影;甜点;储层非均质性;致密砂岩;阿合组露头;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characterization and modeling of sweet spots in tight sandstone reservoirs of the Jurassic Ahe Formation, Yangxia outcrop, Tarim Basin: A case study using conventional outcrop data and UAV oblique photogrammetry model

YIN Senlin^{1,2}, HU Zhangming³, ZHAO Jun⁴, TANG Wenjun⁴, ZENG Jie⁵, CHEN Gongyang^{1,2}, Cheng Leli^{1,2}, Tang Pan¹

(1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;
2. Hubei Key Laboratory of Complex Shale Oil and Gas Geology and Development in Southern China, Wuhan, Hubei 430100, China;
3. Xibu Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Urumqi, Xinjiang 834000, China; 4. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834001, China; 5. Kunlun Digital Technology Co., Ltd., CNPC, Beijing 100043, China)

Abstract: Given limited studies on the origin and spatial distribution patterns of matrix-type reservoir sweet spots in tight sandstones, we innovatively develop a methodology that combines conventional outcrop surveys with modern unmanned aerial vehicle (UAV)-based oblique photogrammetry. Specifically, hierarchical constraint-based architectural characterization approach is integrated with three-dimensional (3D) geological modeling and a range of modern analytical and testing techniques, including conventional porosity and permeability measurements, thin section observations, scanning electron microscopy (SEM), nuclear magnetic resonance (NMR), elemental analysis based on

收稿日期:2025-06-03;修回日期:2025-10-19。

第一作者简介:印森林(1983—),男,教授、博士研究生导师,无人机数字露头表征与建模。E-mail:yinxianlove@qq.com。

基金项目:国家重点研发计划项目(2024GX06);国家自然科学基金项目(42402158)。

X-ray fluorescence (XRF)/X-ray diffraction (XRD), and computed tomography (CT) scanning. Using these methods, we systematically perform lithofacies identification, interpret representative outcrop sections, and analyze the differential patterns of reservoir quality. Furthermore, we conduct 3D geological-engineering modeling and examine the spatial distribution pattern of sweet spots. The research results indicate that the integrated application of traditional outcrop characterization and UAV-based oblique photogrammetry significantly enhances both the dimension and precision of sedimentological investigation. A total of 12 lithofacies types are identified within the braided river delta in the outcrop area. Among these, distributary channels and distributary sandbars constitute the primary sand body frameworks, while mudstones deposited in interdistributary bays and abandoned channels act as key baffles and barriers. Three patterns for the quality difference of tight sand reservoirs are identified: (1) a filled, positive-rhythm pattern, typically characterized by upward-decreasing porosity within individual braided channels; (2) a lateral-aggradation-controlled migrating and stacking pattern, which exhibits a distinct progressive decrease in porosity along the lateral aggradation direction of channels and, accordingly, forms a complex, multi-stage, superimposed positive-rhythm structure; (3) a composite pattern that integrates the characteristics of the preceding two patterns. What's more, 3D geological and engineering parameter models are constructed based on the reservoir architecture bounding surface algorithm. Using high-precision digital outcrop data acquired by UAV-based oblique photogrammetry, we successfully develop the 3D models of key lithofacies-controlled parameters, including porosity, Poisson's ratio, Young's modulus, and the brittleness index. These models comprehensively reveal the heterogeneity of tight sandstone outcrops at multiple scales. Based on the evaluation criteria covering geological and engineering parameters, the spatial distribution patterns of reservoir sweet spots in tight sandstones are identified, and the differential spatial distribution characteristics of various sweet spot types are further examined. The results of this study provide an important theoretical basis and practical guidance for future exploration and exploitation of tight-sand hydrocarbon resources.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV)-based oblique photogrammetry, sweet spot, reservoir heterogeneity, tight sandstone, outcrop of the Ahe Formation, Tarim Basin

引用格式: 印森林, 胡张明, 赵军, 等. 塔里木盆地阳霞露头侏罗系阿合组致密砂岩甜点储层表征与建模——以传统野外露头数据与无人机倾斜摄影模型结合为例[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(2): 591–608. DOI: 10. 11743/ogg20260215.

YIN Senlin, HU Zhangming, ZHAO Jun, et al. Characterization and modeling of sweet spots in tight sandstone reservoirs of the Jurassic Ahe Formation, Yangxia outcrop, Tarim Basin: A case study using conventional outcrop data and UAV oblique photogrammetry model[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 591–608. DOI: 10. 11743/ogg20260215.

作为典型的非常规天然气资源,致密砂岩储层具有显著的“双低”特征,即基质渗透率普遍低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度多小于10%。这类储层的勘探开发面临严峻技术挑战,必须通过大规模水力压裂等储层改造技术才能实现经济有效开发^[1-5]。中国已在陆上和海域多个含油气盆地中发现丰富的致密砂岩气资源,目前已形成“3+5”开发格局,即3大主力产区(鄂尔多斯盆地上古生界、四川盆地中生界和塔里木盆地新生界)和5大潜力区带(塔里木盆地中生界、准噶尔盆地南缘二叠系—侏罗系、吐哈盆地侏罗系、松辽盆地白垩统登娄库组以及渤海湾盆地古近系沙河街组)。2023年中国致密砂岩气年产量突破 $650 \times 10^8 \text{ m}^3$,占中国天然气总产量的28%以上^[6-9],充分证明了其在国家能源安全战略中的重要地位。随着勘探开发技术的持

续创新,致密砂岩气资源将成为中国天然气产量增长的重要支撑。

四川盆地三叠系须家河组^[9-14]、鄂尔多斯盆地二叠系石盒子组^[15-17]和塔里木盆地侏罗系阿合组^[18-22]广泛发育以辫状河及辫状河三角洲沉积体系为主的致密砂岩储层,其显著特征表现为砂体垂向厚度大、区域展布广且叠置明显,所形成的致密砂岩气藏分布范围广、储量丰富、气-水关系复杂多样^[6,9];此外,湖相重力流和三角洲前缘浊流等沉积体系中同样发育优质致密砂岩储层^[23-24]。现有成藏和甜点成果主要包括:①建立了克拉通、前陆背斜构造和断陷深层3类成藏模式^[9];②系统识别了断缝体、褶皱体和断褶体等裂缝型甜点类型,构建了相应的地质分布模式^[10,25],并证实低角度裂缝主要受控于岩相特征,与沉积环境

及储层构型密切相关^[12];③揭示了“烃-水-岩”有机-无机耦合作用对储层质量的影响机制及其在孔隙结构致密化过程中的关键作用^[26-27]。然而,广覆式砂体基质型甜点的分布规律及其与储层构型的关联机制仍是当前研究的重点和难点,特别是在地质-工程一体化背景下,亟需建立地质-工程参数耦合的甜点预测模型以指导实际生产^[28]。

塔里木盆地库车坳陷阿合组作为重要的深层致密气产层,虽已取得显著勘探突破^[18],但仍面临储层物性差(渗透率 $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度 $<8\%$)、孔隙结构复杂和单井产量低等开发瓶颈,严重制约了经济效益的提升^[19-22]。为此,本研究创新性地融合无人机倾斜摄影高精度数字露头建模(空间分辨率达厘米级)与传统露头解剖方法,结合系统的岩心样品测试分析(涵盖孔-渗参数、薄片观察、CT扫描等多尺度数据),重点开展露头尺度致密砂岩储层非均质性定量表征研究,旨在建立更精确的甜点预测模型,为该区致密气资源的经济高效开发提供理论依据和技术支撑。

1 区域地质概况与研究方法

1.1 区域地质背景与露头概况

塔里木盆地库车坳陷北部构造带阿合组作为重要勘探目的层(图1),主要发育辫状河三角洲沉积体系^[29],其岩性组合表现为以灰白色含砾中-粗砂岩和细砂岩为主,夹薄层砂岩、砂砾岩及泥岩互层,含丰富的植物、孢粉及大孢子。该套地层埋深变化显著(2 950~5 100 m),平均厚度为260~300 m,自下而上可划分为3个岩性段。储层具有典型的叠覆连片分布特征,物性表现为低孔、低渗特性(平均孔隙度为6.5%,平均渗透率为 $0.93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),孔-渗相关性良好,储集空间以粒内溶孔和微孔隙为主,其次为粒间溶蚀扩大孔,局部发育微裂缝,形成以孔隙型为主、裂缝-孔隙型为辅的复合储集体系。值得注意的是,甜点储层的发育模式与形成机理仍有待深入解析。该套储层独特的“三明治”结构(夹持于下侏罗统阳霞组和

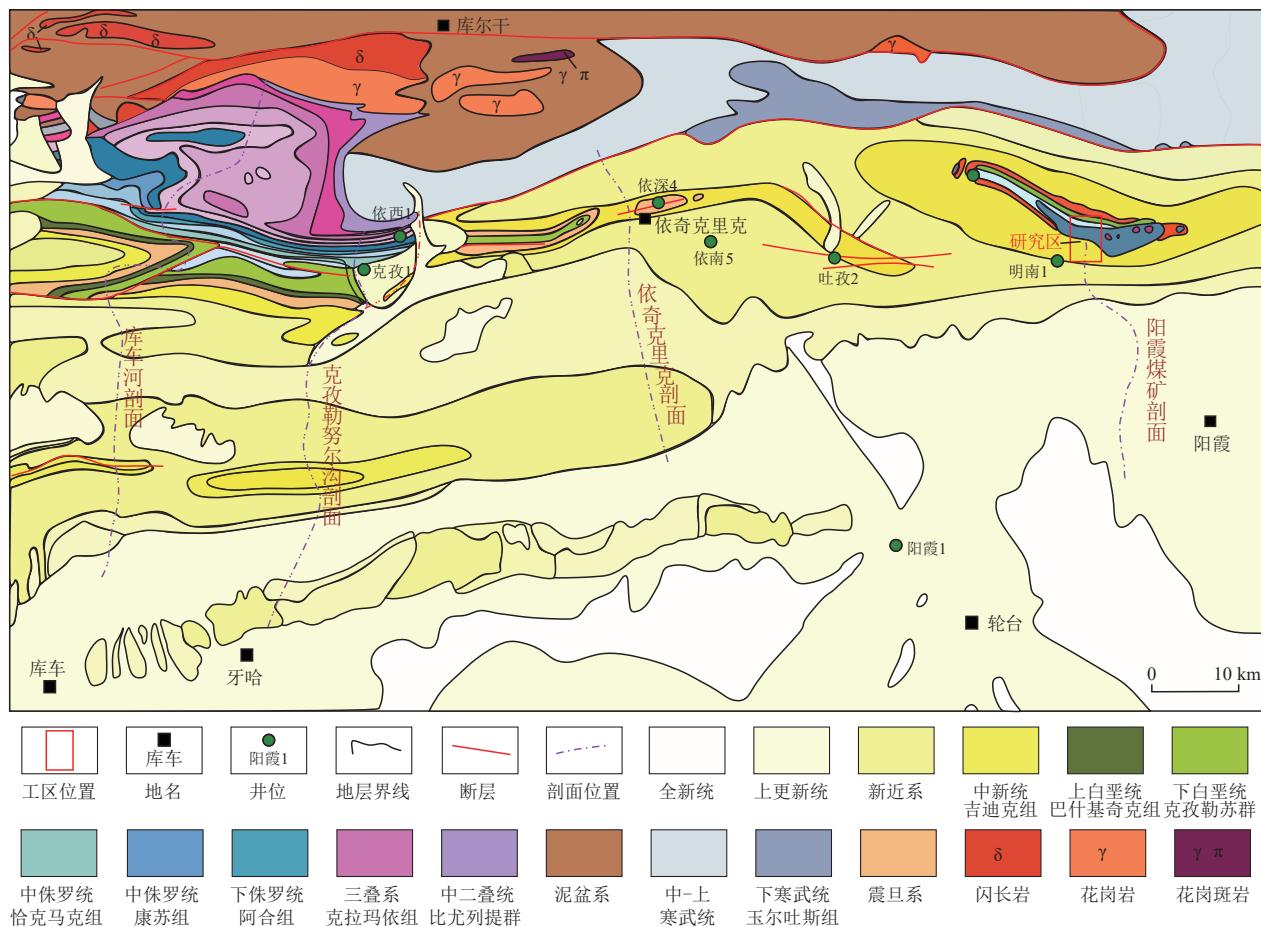


图1 塔里木盆地库车坳陷北部构造带地质图

Fig. 1 Geological map showing the northern structural zone of the Kuqa Depression, Tarim Basin

中-上侏罗统优质烃源岩之间)不仅提供了充足油气来源,厚层泥岩和煤层构成的优质盖层也为油气保存提供了关键条件^[19-22]。

1.2 露头宏观特征

阳霞剖面展示了典型的辫状河沉积特征,表现为多期河道砂体垂向叠置形成的巨厚复合砂体,内部发育多套具冲刷面的滞留沉积。该剖面阿合组自下而上划分为阿(阿合组)三段、阿二段和阿一段(图2)。阿

合组底部为浅灰色细砾岩,发育大型槽状交错层理及冲刷面构造,与下伏三叠系塔里奇克组炭质泥岩和煤系地层接触;上部厚层砂岩则与上覆阳霞组含煤线及煤层的泥岩段相接触。

阿合组展现出典型的辫状河三角洲沉积序列,可划分为3个特征显著的岩性段^[22,30]。阿一段为砂砾岩夹泥岩段,厚度为63~83 m,其顶部发育2套砂岩夹1套泥岩的韵律层。阿二段为上砂砾岩段,厚度为100~160 m,主要由巨厚层砂岩夹砾岩构成(剥蚀地貌表现

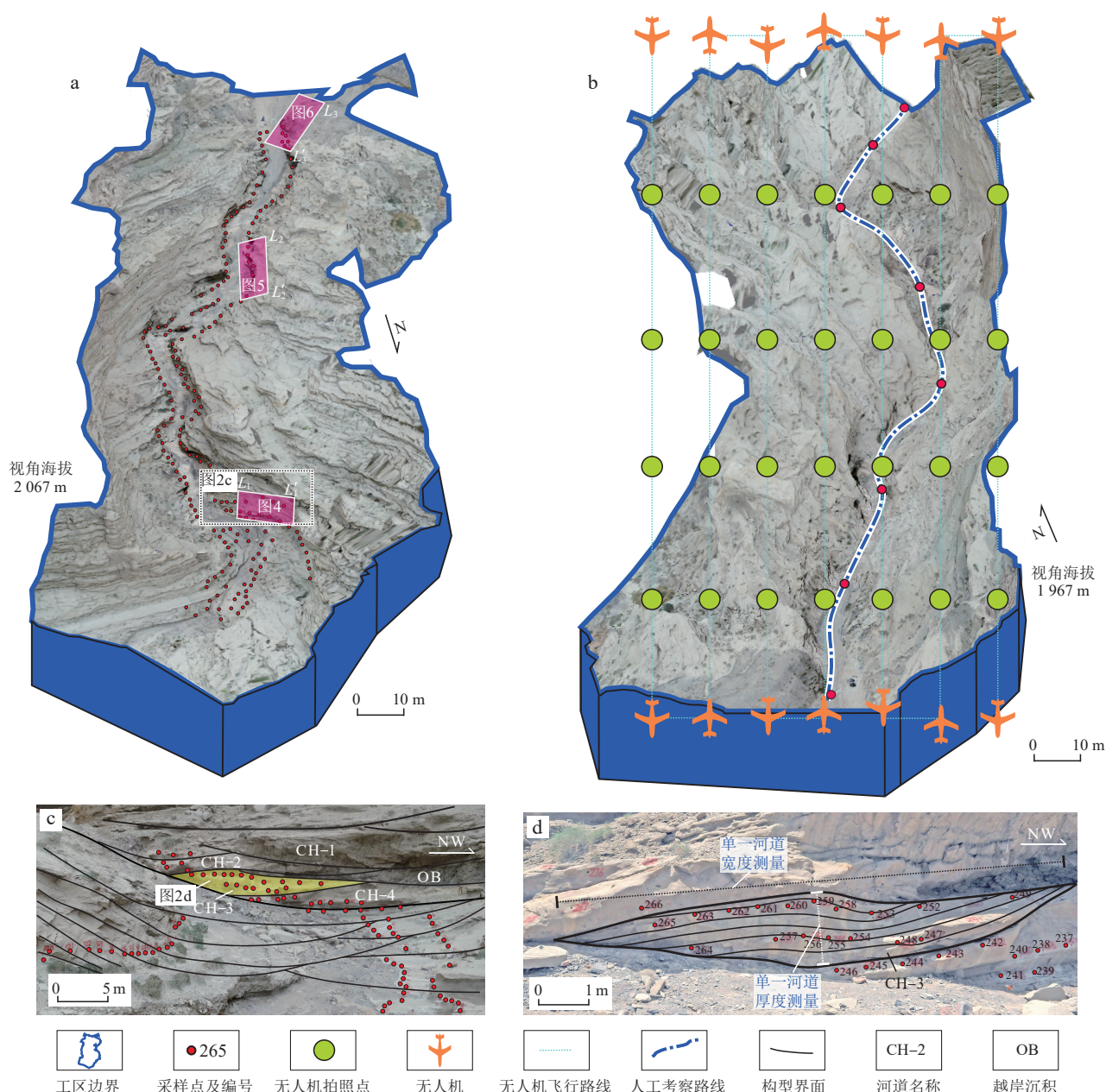


图2 塔里木盆地库车坳陷无人机倾斜摄影模型与露头采样点分布

Fig. 2 Schematic diagrams showing the UAV-based oblique photogrammetry model and the distribution of sampling points within outcrops in the Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 无人机倾斜摄影模型宏观展示;b. 无人机倾斜摄影模型数据采集;c. 剖面储层构型特征;d. 单一河道构型内部特征

为山脊),岩性组合包括巨厚层含砾粗砂岩、中砂岩夹砾岩,以及粗砂岩、中砂岩夹细砂岩和含砾粉砂岩。阿三段为下砂砾岩段,厚度为63~80 m,其底部发育大型砾质河道冲刷面,与下伏三叠系顶部厚层煤层和泥岩呈不整合接触,该段主要由厚层含砾粗砂岩、中砂岩夹砂砾岩和泥岩组成。

1.3 研究方法

本研究创新性地构建了“空-地-井”一体化研究体系,采用传统野外地质调查与现代无人机倾斜摄影技术相结合的技术路线^[31-34],系统开展塔里木盆地库车坳陷阳霞露头致密砂岩储层非均质性表征与建模工作。通过获取2 000张高分辨率无人机倾斜摄影图像(地面分辨率达2 cm),建立了覆盖5 km²的三维数字露头模型,并整合了20个实测剖面 and 1 345个采样点的多尺度测试数据(包括常规孔-渗分析、薄片鉴定、扫描电镜、核磁共振、XRF-XRD元素分析和CT扫描)。基于层次约束的储层构型解剖方法^[35-36]和三维地质建

模技术(图2),系统开展了以下研究工作:①通过多点位野外地质描述,完成岩相识别与构型要素分析;②利用数字露头模型约束,解释不同构型单元的三维展布特征,建立定量知识库;③解剖典型储层构型剖面,分析构型控制下的储层质量和工程参数特征;④以构型单元为约束,整合孔隙度、渗透率、孔隙结构和矿物组成等参数,构建三维地质模型,识别甜点区并揭示其控制因素和空间分布规律,全面表征露头尺度下的储层非均质性^[37-39]。

2 露头区岩石相与构型要素

2.1 露头岩石相特征

基于对阿合组露头剖面的系统解析,研究识别出12类具有典型沉积学特征的岩相组合:块状层理砾岩相(Gm)(图3a)与板状交错层理砾岩相(Gt)(图3b)代表高能河道底部沉积;楔状交错层理含砾砂岩相(Gp)楔状交错层理含砾砂岩相(Gp)

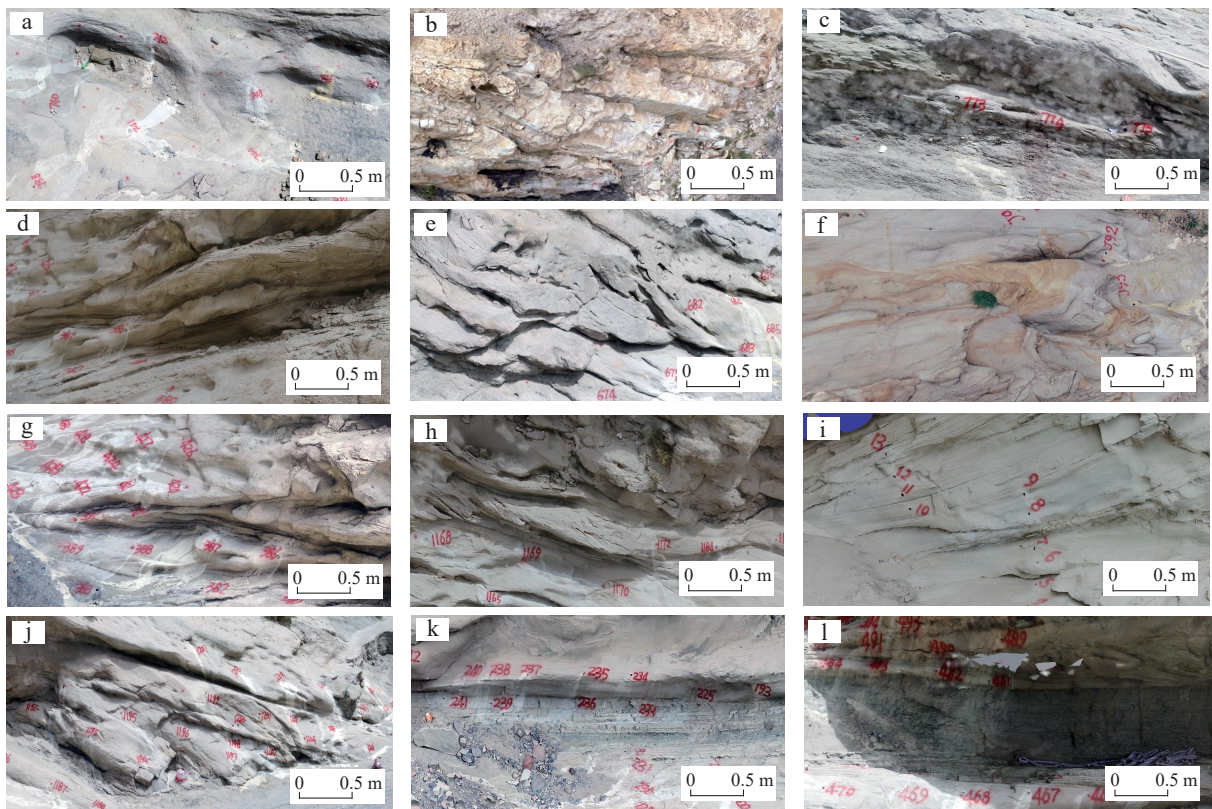


图3 塔里木盆地库车坳陷阿合组露头典型岩相特征野外照片

Fig. 3 Typical lithofacies characteristics of the outcrops of the Ahe Formation, Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 块状层理砾岩相(Gm);b. 板状交错层理砾岩相(Gt);c. 楔状交错层理含砾砂岩相(Gp);d. 楔状交错层理砂岩相(CSt);e. 槽状交错层理中-粗砂岩相(CSp);f. 块状层理细砂岩相(Sm);g. 楔状交错层理砂岩相(Sp);h. 槽状交错层理中-细砂岩相(St);i. 水平层理粉-细砂岩相(Sh);j. 楔状交错层理细-粉砂岩相(Fp);k. 水平层理粉砂岩相(Fl);l. 水平层理泥岩相(Fm)

(图中红色数字为样品编号。)

(图3c)、楔状交错层理含砾砂岩相(CSt)(图3d)及槽状交错层理含砾砂岩相(CSp)(图3e)反映河道迁移过程中的沉积特征;块状层理细砂岩相(Sm)(图3f)、楔状交错层理中-粗砂岩相(Sp)(图3g)和槽状交错层理中-粗砂岩相(St)(图3h)记录了河道中部沉积环境;而板状交错层理细-粉砂岩相(Sh)(图3i)、楔状交错层理细-粉砂岩相(Fp)(图3j)、水平层理粉砂岩相(FI)(图3k)与水平层理泥岩相(Fm)(图3l)则表征了河道边缘及泛滥平原的低能沉积环境。

1) 块状层理砾岩相(Gm)

粒径大于2 mm,灰黄-灰白色,以缺乏明显层理结构、呈块状构造为特征,常见于高能分流河道底部的滞留沉积。

2) 板状交错层理砾岩相(Gt)

以中等分选的砾岩为主,发育斜向切割的板状交错层理,反映高能斜坡沉积环境,代表粗粒物源的快速搬运与堆积。

3) 楔状交错层理含砾砂岩相(Gp)

由中-粗砂岩夹砾岩构成,具明显的楔状交错层理,且定向性强,指示河道的迁移与侧向加积作用。

4) 楔状交错层理含砾砂岩相(CSt)

组分主要为粗砂夹砾,粒度分选较差,常形成于高能水流主河道或次级分流区的快速沉积环境。

5) 槽状交错层理含砾砂岩相(CSp)

具有砾石与粗砂交互沉积的特征,槽状切割面明显可见,指示强水动力条件下的冲刷与再沉积,是分流河道主干迁移的典型产物。

6) 块状层理细砂岩相(Sm)

以细砂为主,颜色浅黄-灰白色,块状构造,结构致密,缺乏明显层理。

7) 楔状交错层理中-粗砂岩相(Sp)

组分为中-粗砂,发育楔状交错层理,层厚变化显著,为侧向迁移河道的典型沉积,常形成砂体中的优质储层。

8) 槽状交错层理中-粗砂岩相(St)

以粗砂为主,具有清晰的槽状构造和明显的层理切割面,反映了河道主流区高能量水流的强烈冲刷与堆积过程。

9) 板状交错层理细-粉砂岩相(Sh)

由细砂与粉砂交互沉积构成,呈板状斜交互结构,层理平直,粒度较细。此岩相可能代表分流间湾或末端分流河道的沉积环境。

10) 楔状交错层理细-粉砂岩相(Fp)

粒度较岩相Sh更细,垂向分布特征明显,指示水

流强度减弱的环境,如河道边缘沉积带。

11) 水平层理粉砂岩相(FI)

以粉砂为主,发育水平层理,颜色灰黄,层厚一般较薄。常见于漫滩或沉积体系末端,表明低能量沉积条件。

12) 水平层理泥岩相(Fm)

成分以泥质为主,结构致密,层理模糊或仅发育微细层理,颜色深灰,孔隙度普遍极低。

2.2 典型露头剖面储层构型解剖

通过对研究区辫状河三角洲露头剖面的系统解剖,识别出分流河道、分流砂坝和废弃河道3类典型4级构型要素,其侧向与垂向叠置关系形成了多级构型单元。

选取的3个典型剖面中,剖面I砂体发育程度最高,呈现多期叠置特征:底部为灰色泥岩夹薄层粉砂岩,中部以块状层理砂砾岩和侧积交错层理砂砾岩为主,形成无明显变细的正旋回,剖面呈典型透镜状形态,为大型辫状分流河道砂体;偶见厚层泥岩且韵律不明显,属充填式废弃河道成因砂体。从垂向看,底部以块状层理砂砾岩叠置为主(岩相Gm),构成5级界面控制的小型分流河道叠置;中部发育板状交错层理辫状分流河道中-粗砂岩(岩相自下而上St—Sm—Sh),5级构型单元为分流河道边界,4级为双水道叠置;顶部为中-细砂岩互层(岩相Sm与SI交互),表现为分流砂坝与河道构型单元叠置;整体构成快速下降的基准面沉积旋回特征(图4)。

露头剖面II展现出典型的多期河道叠置特征,宏观上可划分为4个沉积期次。该剖面砂体极为发育,泥岩夹层几乎缺失。从垂向结构看,底部为厚层大型板状交错层理含砾粗砂岩(岩相CSp)的侧向叠置,砂体岩性以粗砂岩为主,受4级构型界面控制,呈现多个分流河道砂体的垂向叠置特征;中部发育层次分明的大型板状交错层理分流河道含砾粗砂岩叠置,4级构型单元表现为分流河道砂体边界的叠置(岩相组合以CSp或Gt—CSp为主),其内部则由多个侧向迁移的3级构型单元增生体叠置而成(岩相以CSp为主);顶部为砂砾岩叠置互层(岩相Gp交替),4级构型单元界线模糊,呈现典型的分流河道砂体叠置特征(图5)。

露头剖面III展现出典型的多期河道叠置特征,宏观上可划分为4个沉积期次。剖面砂体发育程度非常高。底部和中间为两期大型侧向迁移分流河道砂体叠置,顶部为中-细砂岩砂体互层叠置。底部为厚层大

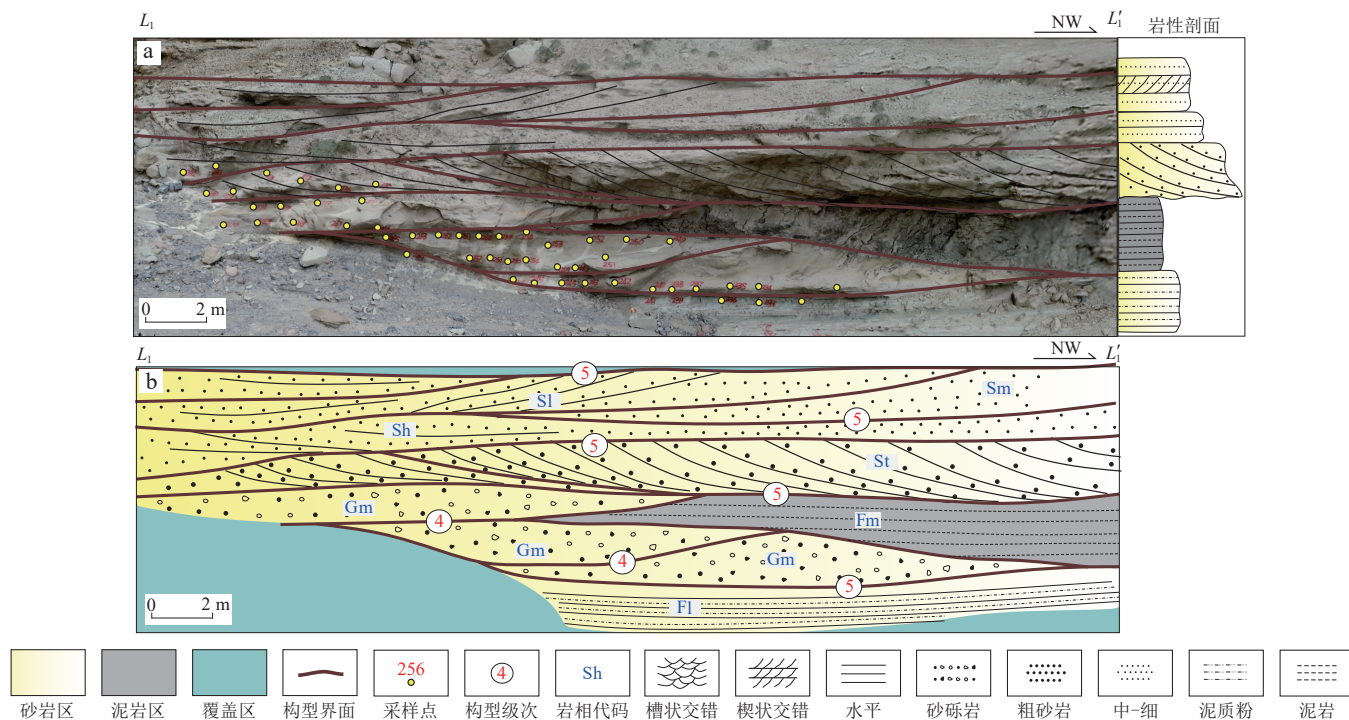


图4 塔里木盆地库车坳陷露头剖面 I 储层构型单元解释(剖面位置见图 2a)

Fig. 4 Interpretation of the reservoir architectural units of outcrop section I in the Kuqa Depression, Tarim Basin (see Fig. 2 for the section location)

a. 露头剖面 I 野外照片; b. 储层构型单元解释剖面, 岩相代码解释见图 3 标注

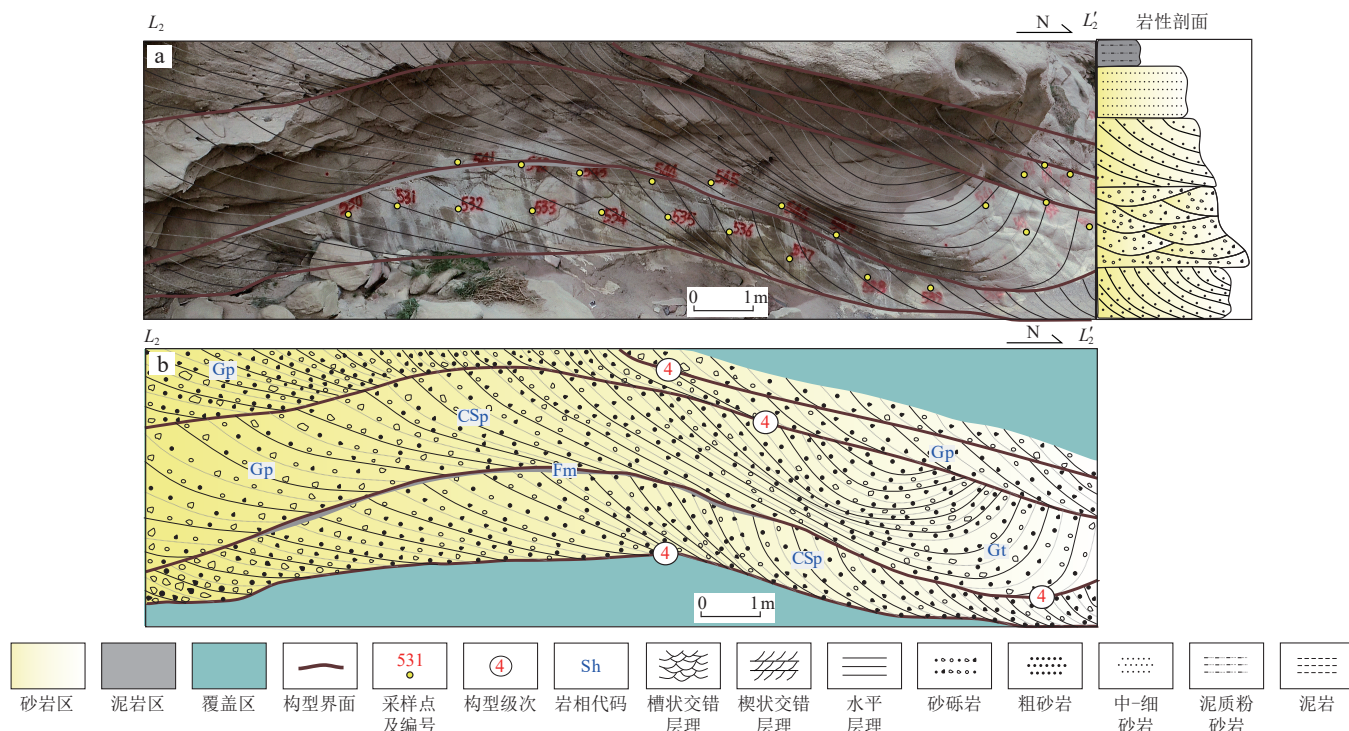


图5 塔里木盆地库车坳陷露头剖面 II 储层构型单元解释(剖面位置见图 2a)

Fig. 5 Interpretation of the reservoir architectural units of outcrop section II in the Kuqa Depression, Tarim Basin (see Fig. 2 for the section location)

a. 露头剖面 II 野外照片; b. 储层构型单元解释剖面, 岩相代码解释见图 3 标注

型槽状交错层理厚层砂砾岩侧向叠置(岩相以Gt, CSt和Sp交互为主),砂体岩性以砂砾岩、含砾粗砂岩和中-细砂岩为主,受4级构型界面控制,呈现分流河道砂体叠置特征,其中4级构型单元表现为单一水道的叠置(岩相序列自下而上为Gt—CSt—St或Sp),其内部则由多个下切的3级构型单元增生体叠置而成(岩相以CSt为主);中部发育层次分明的板状交错层理河道中-细砂岩叠置,5级构型单元构成分流河道砂体边界,4级构型单元仍为单一水道叠置,其内部由多个侧向迁移的3级构型单元增生体叠置而成(岩相以Sp为

主);顶部为多期中-细砂岩叠置,呈现典型分流水道叠置特征。该剖面自下而上构成了快速下降的基准面沉积旋回特征(图6)。

2.3 典型构型单元定量关系

储层构型要素的定量关系研究对储层预测具有重要指导意义。借助于无人机倾斜摄影数字露头模型的量化优势,结合构型要素识别,对研究区发育的3种典型分流河道类型进行了系统统计:砂砾岩型辫状河道(岩相Gm和Gp)、粗砂岩型辫状河道(岩相CSt和

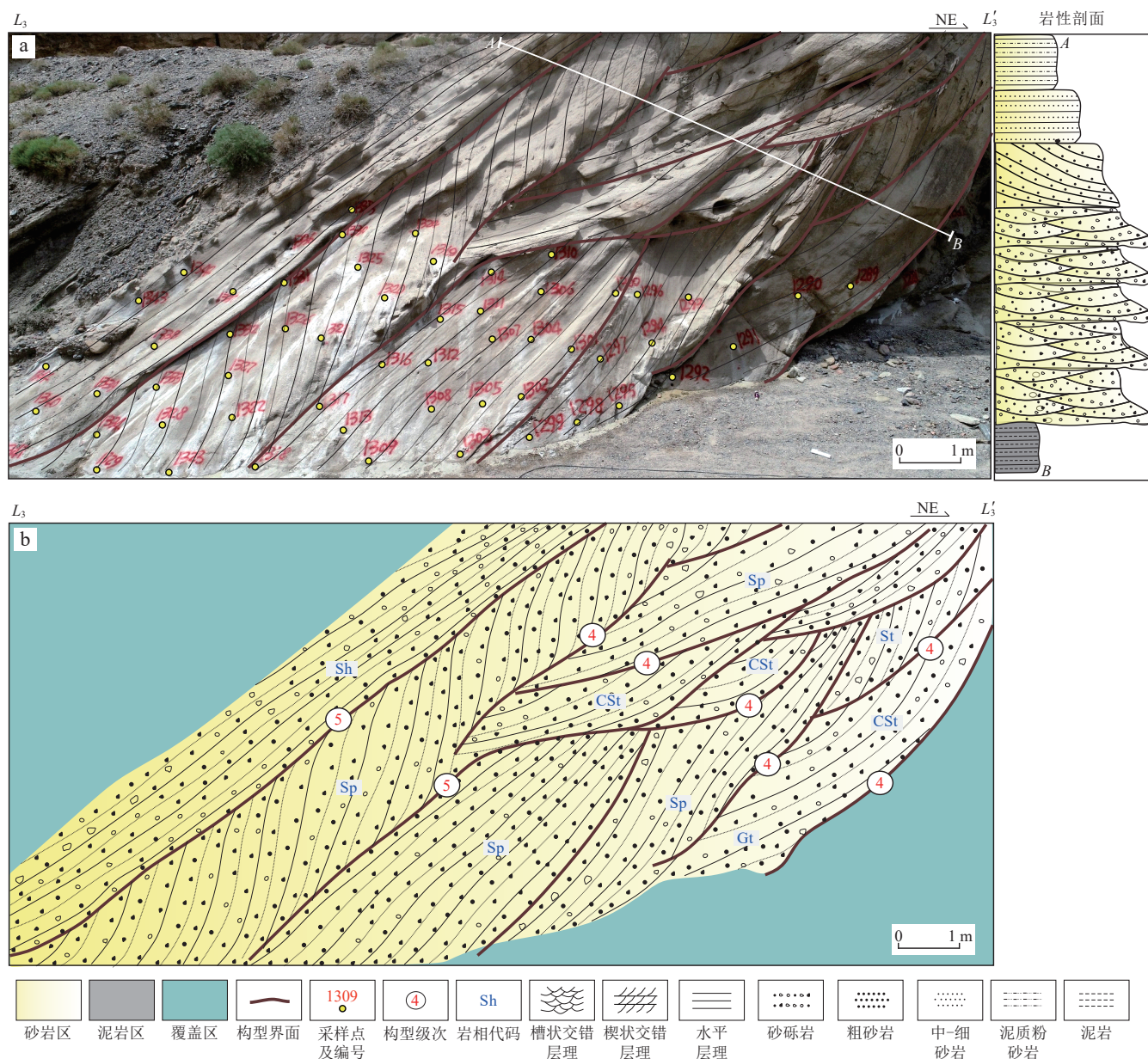


图6 塔里木盆地库车坳陷露头剖面Ⅲ储层构型单元解释(剖面位置见图2a)

Fig. 6 Interpretation of the reservoir architectural units of outcrop section III in the Kuqa Depression, Tarim Basin (see Fig. 2 for the section location)

a. 露头剖面Ⅲ野外照片;b. 储层构型单元解释剖面,岩相代码解释见图3标注

CSp)和粉砂岩型河道(岩相St,Sp和Sh)(表1)。定量分析表明,这些河道类型的宽度与厚度之间呈显著的线性相关关系,其宽/厚比特征具有明显的分异性。统计结果显示,研究区单一河道宽度主要分布在10~50 m范围内。

3 露头储层质量差异样式

本研究聚焦辫状河三角洲不同河道类型的储层质量变化规律,以孔隙度为核心评价指标,系统选取了砂砾岩型(岩相Gm和Gp)、粗砂岩型(岩相CSt和CSp)及粉砂岩型(岩相St,Sp和Sh)3类典型辫状水道作为研究对象。通过薄片显微分析与室内物性测试(孔隙度3.5%~12.8%)相结合,精确获取了各构型单元的孔隙度及其对应岩性特征。在此基础上,依据河道构型叠置模式,建立了孔隙度空间分布模式,进而分析其形成机制与主控因素。

研究区露头发育3类典型河道构型:充填型辫状水道(以垂向加积为主)、侧积迁移型辫状水道(以侧向迁移为主)和复合型辫状水道(多期叠置)。由于沉积过程中岩性粒度、沉积构造及叠置样式存在显著差异,3类河道形成了截然不同的储层质量特征。本研究以

孔隙度为核心评价参数,系统揭示了不同类型辫状水道储层质量的变化规律。

3.1 充填型辫状水道

充填型辫状水道砂体以岩相Gm为主要充填沉积,内部发育典型块状层理,岩性均质性强,组分差异不明显,反映了稳定持续的水动力充填过程。岩石薄片分析表明,碎屑组分具有相对稳定的组成特征:石英含量为38%~45%(±5%)、长石含量为10%~16%(±4%)、岩屑含量为41%~51%(±6%),整体随岩性的变化不显著(表2)。孔隙度测试数据显示,砂体内部孔隙度呈规律性垂向分异,自底部最高达18%向上逐渐降低至12%,表现出明显的正韵律分层渐变特征(图7a)。这种变化揭示了单一辫状水道内部粒度自下而上由粗砂向中-细砂逐渐变细所导致的孔隙度递减规律,阐明了粒度控制下的储层非均质性形成机制。

3.2 侧积迁移型辫状水道

侧积迁移型辫状水道以岩相Gp和CSp为主要充填沉积,发育典型的侧向加积层理,岩性组合以砂砾岩和粗砂岩为主,反映了河道侧向迁移的沉积过程。该

表1 塔里木盆地库车坳陷阳霞剖面单一河道定量关系

Table 1 Quantitative relationships of individual channels in the Yangxia outcrop, Kuqa Depression, Tarim Basin

河道序号	砂砾岩型辫状河道			粗砂岩型辫状河道			粉砂岩型河道		
	宽度/m	厚度/m	宽/厚比	宽度/m	厚度/m	宽/厚比	宽度/m	厚度/m	宽/厚比
1	44.38	47.82	0.93	16.85	20.17	0.84	61.82	52.90	1.17
2	54.95	51.02	1.08	10.07	18.62	0.54	64.69	67.44	0.96
3	58.80	59.24	0.99	53.37	49.99	1.07	32.85	47.95	0.69
4	51.04	42.91	1.19	52.28	38.14	1.37	31.98	44.26	0.72
5	14.33	57.01	0.25	25.90	27.97	0.93	42.75	36.56	1.17
6	8.12	19.29	0.42	13.28	37.18	0.36	20.13	12.48	1.61
7	37.48	49.65	0.75	17.25	19.51	0.88	9.19	22.73	0.40
8	32.81	59.92	0.55	19.47	23.02	0.85	16.86	34.91	0.48
9	12.42	20.45	0.61	34.30	35.55	0.96	16.19	50.71	0.32
10	28.96	29.38	0.99	10.37	11.72	0.88	13.05	28.84	0.45
11	31.87	23.43	1.36	32.69	35.65	0.92	22.47	26.35	0.85
12	31.22	33.88	0.92	10.46	23.11	0.45	46.42	40.20	1.15
13	26.30	24.12	1.09	27.38	36.03	0.76	20.71	13.98	1.48
14	10.10	16.63	0.61	21.73	17.42	1.25	22.90	23.10	0.99
15	24.88	16.72	1.49	11.05	31.23	0.35	13.77	43.38	0.32
16	48.66	30.38	1.60	29.05	32.99	0.88	19.70	17.14	1.15
17	11.79	38.99	0.30	52.82	36.93	1.43	54.48	29.72	1.83
18	33.46	33.28	1.01	48.33	45.79	1.06	12.47	26.05	0.48
19	10.47	28.06	0.37	—	—	—	27.65	25.43	1.09
20	—	—	—	—	—	—	46.51	36.70	1.27

注:“—”代表无统计数据。河道宽度为基于无人机倾斜摄影模型的近似真实宽度和厚度的测量值(图3d)。

表 2 塔里木盆地库车坳陷充填型辫状水道样品点的岩矿与孔-渗特征

Table 2 Lithology, porosity, permeability, and mineral composition of samples from filled braided channels in the Kuqa Depression, Tarim Basin

取样点编号	岩性	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	矿物组分含量/%		
				石英	长石	岩屑
248	细-中粒岩屑砂岩	17.01	12.20	45	12	43
249	细-中粒岩屑砂岩	15.92	4.01	45	13	42
250	细-中粒长石岩屑砂岩	—	2.37	44	15	41
251	中粒岩屑砂岩	—	4.40	44	12	44
252	中粒岩屑砂岩	14.07	1.78	43	13	44
253	中-细粒长石岩屑砂岩	12.68	0.75	41	16	43
254	中粒岩屑砂岩	15.85	5.89	45	13	42
255	细-中粒岩屑砂岩	15.63	4.32	44	11	45
256	中粒长石岩屑砂岩	16.55	10.40	43	15	42
257	细-中粒岩屑砂岩	—	13.60	45	11	44
258	细-中粒长石岩屑砂岩	—	1.79	40	16	44
259	细-中粒岩屑砂岩	13.88	1.62	39	10	51
260	中粒长石岩屑砂岩	13.34	1.33	42	14	44
261	细-中粒长石岩屑砂岩	12.75	1.39	38	16	46
262	细-中粒岩屑砂岩	13.26	1.41	42	11	47
263	细-中粒长石岩屑砂岩	13.01	1.60	41	15	44
264	中粒长石岩屑砂岩	—	—	41	15	44
265	中粒岩屑砂岩	13.32	—	40	11	49

注：“—”代表无统计数据。

类水道储层视密度与孔隙度呈显著负相关关系(复相关系数 $R^2 > 0.85$),孔隙度随视密度增加而系统性降低。通过储层构型解析与孔隙度标定发现,其内部孔隙度空间变化具有独特规律:沿侧向加积方向孔隙度呈韵律性递减特征(由底部砂砾岩的 18% 向侧向变化为粗砂岩的 12%),且多期侧积体叠置形成复合韵律结构(图 7b)。这一发现突破了传统致密砂岩储层认知,首次揭示了侧积迁移型河道特有的储层质量分异模式,为致密砂岩甜点预测提供了新的理论依据与方法支撑(表 3)。

3.3 复合型辫状水道

复合型辫状水道砂体以岩相 Gm 和 CSt 为主,展现了典型的侧向加积与快速充填复合沉积特征。其内部岩性非均质性显著,是典型的河道迁移型沉积特征。孔隙度分析揭示出独特的空间分布规律:沿侧向加积方向孔隙度呈递增趋势(由底部 19% 至上部 12%),且多期侧向迁移形成明显的正韵律叠置结构(图 7c)。这种复杂的孔隙度分布模式反映了复合型辫状水道特有的"侧向迁移-垂向充填"交互沉积

过程,其储层质量分异程度明显高于单一类型水道(表 4)。

4 露头三维建模与甜点分布

本研究通过整合露头取样分析测试数据与数字露头建模技术,建立了高精度储层参数三维模型。基于研究区甜点储层(孔隙度 $> 8\%$,渗透率 $> 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的分布规律分析,构建了露头尺度甜点空间分布预测模型,该模型预测准确率达 85% 以上,为地下致密砂岩储层甜点评价与开发方案优化提供了可靠的地质依据。

4.1 工区岩石矿物与储层参数特征

4.1.1 岩石矿物组成

研究区储层岩性可划分为砾岩、粗砂岩、中砂岩和细砂岩 4 类,其矿物组成特征显著(图 8)。Rockscanner 测试数据显示:砾岩以石英为主(含量 86%),含少量钾长石(10%)及其他矿物(4%);粗砂岩中石英含量为

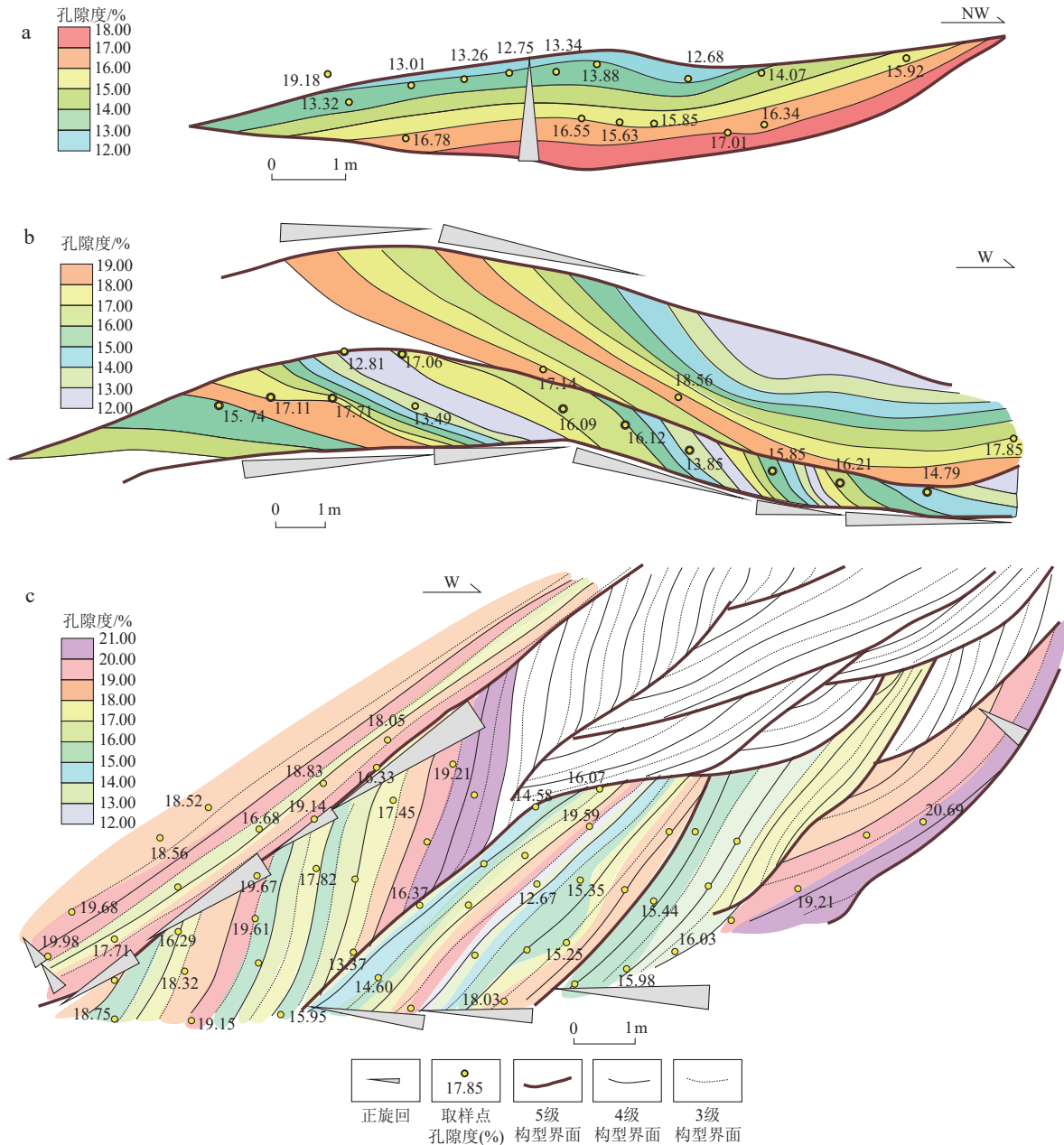


图7 塔里木盆地库车坳陷露头辫状水道内部孔隙度分布模式示意图

Fig. 7 Porosity distribution pattern of braided channels observed within outcrops in the Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 充填型辫状水道砂体孔隙度; b. 侧积迁移型辫状水道砂体孔隙度; c. 复合型辫状水道砂体孔隙度

78%, 钾长石为11%、高岭石为6%; 中砂岩中石英含量为75%, 钾长石为14%、高岭石为4%; 细砂岩中石英含量降至62%, 伴生钾长石13%、伊利石9%及高岭石6%。整体表现为石英主导(含量62%~86%)的矿物组合特征, 钾长石次之(10%~14%), 黏土矿物(高岭石4%~6%、伊利石9%)及其他组分(4%~10%)含量较低, 反映出沉积物源及成岩作用的区域一致性。

4.1.2 储层孔隙结构特征

本研究采用岩心CT扫描技术, 结合图像滤波法、

阈值分割法、代表性体积元和最大球等效法等数字岩心分析方法, 对砾岩、粗砂岩和中砂岩(细砂岩未测试)的孔隙结构进行了系统表征。测试结果显示: 研究区储层孔隙等效直径主要分布在0~200 μm 范围内。其中, 砾岩孔隙度最低(1.69%), 储层孔隙等效直径分布范围在1~12 001 μm , 主峰位于6 500~8 000 μm 区间, 以小孔为主, 大孔罕见; 粗砂岩孔隙度中等(4.30%), 储层孔隙等效直径分布与砾岩相似(1~12 001 μm), 主峰区间在7 500~8 000 μm , 以小孔为主, 局部发育大孔; 中砂岩孔隙度为3.50%, 储层孔隙等效直径分布较

表 3 塔里木盆地库车坳陷侧积迁移型辫状水道样品点的岩性与孔-渗特征

Table 3 Lithology, apparent density, porosity, and permeability of samples from the lateral-aggradation-controlled migrating braided channels in the Kuqa Depression, Tarim Basin

取样点 编号	岩性	视密度/ (g/cm ³)	孔隙度/%	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)
530	中砂岩	2.33	15.74	8.44
531	含砾粗砂岩	2.23	17.11	38.70
532	含砾粗砂岩	2.21	17.71	55.30
533	含砾粗砂岩	2.32	13.49	1.83
534	含砾粗砂岩	—	—	—
535	含砾粗砂岩	2.32	16.09	8.10
536	含砾粗砂岩	2.30	16.12	6.68
537	含砾粗砂岩	2.33	13.85	0.85
538	中砂岩	2.32	15.85	8.02
539	粗砂岩	2.26	16.21	4.06
540	砂砾岩	2.29	14.79	2.75
541	粗砂岩	2.38	12.81	4.58
542	粗砂岩	2.24	17.06	47.00
543	粗砂岩	2.20	17.84	—
544	中砂岩	2.23	17.14	13.60
545	中砾岩	2.22	17.445	31.30
546	含砾粗砂岩	2.17	18.56	68.60
547	含砾粗砂岩	—	—	—
551	粗砂岩	2.20	17.85	186.00
552	粗砂岩	2.18	18.68	205.00

注：“—”代表无统计数据。

窄(1~5 000 μm),在1 000,3 000和5 000 μm处呈现多峰特征,以小孔为主,中孔较发育,整体孔隙度值偏小(图9)。

4.1.3 储层工程参数特征

研究表明,针对致密砂岩甜点识别难题,仅依靠传统地质参数(粒度、沉积构造、构型及孔隙结构等)难以全面表征甜点分布特征。为此,本研究创新性地引入岩石力学参数体系,包括泊松比(横向与轴向应变比值)、杨氏模量(抗变形能力指标)及脆性指数(破裂难易程度指标)。实验数据显示,研究区岩石力学性质与粒度呈显著相关性,随粒度变细,样品泊松比呈现系统性增大趋势。

4.2 露头区三维地质-工程参数建模

以前述高精度无人机数字露头数据为基础,以露头解释的单一河道边界为约束条件,采用确定性

表 4 塔里木盆地库车坳陷复合型辫状水道样品点的岩矿与孔-渗特征

Table 4 Lithology, porosity, and mineral composition of samples from composite braided channels in the Kuqa Depression, Tarim Basin

取样点 编号	岩性	孔隙度/%	矿物组分含量/%		
			石英	长石	岩屑
1291	中-粗粒长石岩屑砂岩	19.21	39	19	42
1295	含灰细中粒长石岩屑砂岩	16.03	41	21	37
1297	细中粒长石岩屑砂岩	15.44	40	20	39
1298	中粒长石岩屑砂岩	15.98	39	20	40
1302	中-粗粒长石岩屑砂岩	15.25	38	20	42
1303	中-粗粒长石岩屑砂岩	18.08	40	21	39
1306	中-粗粒长石岩屑砂岩	19.59	37	19	42
1310	粗-中粒长石岩屑砂岩	16.07	39	20	41
1313	不等粒长石岩屑砂岩	14.60	38	20	42
1314	中粒长石岩屑砂岩	14.58	40	20	39
1315	中粒长石岩屑砂岩	16.37	39	21	40
1316	中粒长石岩屑砂岩	16.15	37	21	42
1317	不等粒长石岩屑砂岩	13.37	38	21	41
1318	中-粗粒长石岩屑砂岩	15.95	38	21	41
1323	粗粒长石岩屑砂岩	19.15	41	20	39
1324	粗粒长石岩屑砂岩	19.21	40	20	40
1325	粗粒长石岩屑砂岩	17.45	40	20	40
1326	粗粒长石岩屑砂岩	17.82	41	18	41
1327	粗粒长石岩屑砂岩	19.61	40	18	42
1328	中-粗粒长石岩屑砂岩	18.32	39	19	42
1330	中-粗粒长石岩屑砂岩	18.75	39	20	41
1333	粗-中粒长石岩屑砂岩	16.33	41	19	40
1334	粗-中粒长石岩屑砂岩	19.14	40	19	41
1335	含砾粗粒长石岩屑砂岩	19.67	38	21	41
1336	中-粗粒长石岩屑砂岩	16.29	35	20	45
1337	含砾粗粒长石岩屑砂岩	15.66	37	21	42

建模方法,基于储层构型界面分层次开展精细的露头三维建模(图10)。通过系统整合剖面采样测试数据(缺失点采用科学赋值方法),结合充填式、侧向迁移式和复合叠加式3类孔隙度分布模式,建立了相控约束下的三维参数模型体系,包括孔隙度模型(图10a)、泊松比模型(图10b)、杨氏模量模型(图10c)和脆性指数模型(图10d)。该建模方法实现了储层构型空间分布、几何形态与内部结构的精准表征。

阳霞剖面研究揭示了显著的岩相控储特征,其中岩相CSt和CSp表现出最优的孔隙度(4%~18%),其空间分布呈现3类典型模式:充填式正韵律分布、侧向迁移式渐变分布以及复合叠置式多期组合分布,三维模型清晰刻画了孔隙度的非均质特征(孔隙

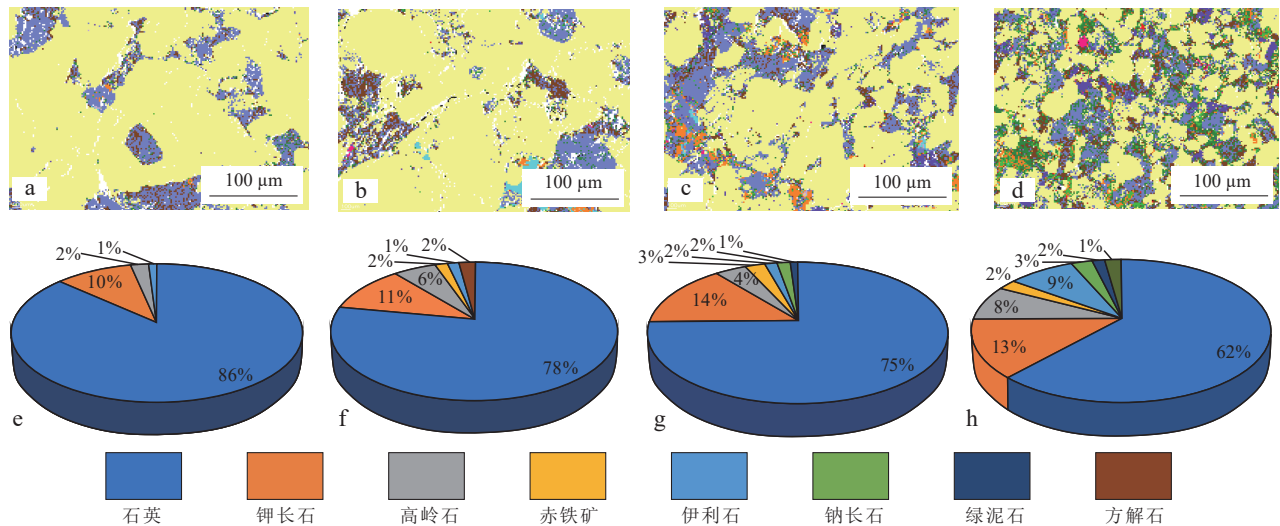


图8 塔里木盆地库车坳陷阳霞剖面不同岩性镜下照片(a—d)与矿物组分占比饼状图(e—h)

Fig. 8 Microscopic images (a—d) and corresponding mineral compositions (e—h) of reservoir lithologies in the Yangxia outcrop, Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 砾岩,孔隙度2.19%,泊松比0.14;b. 粗砂岩,孔隙度3.51%,泊松比0.16;c. 中砂岩,孔隙度2.41%,泊松比0.17;d. 细砂岩,孔隙度1.34%,泊松比0.19;e. 砾岩;f. 粗砂岩;g. 中砂岩;h. 细砂岩

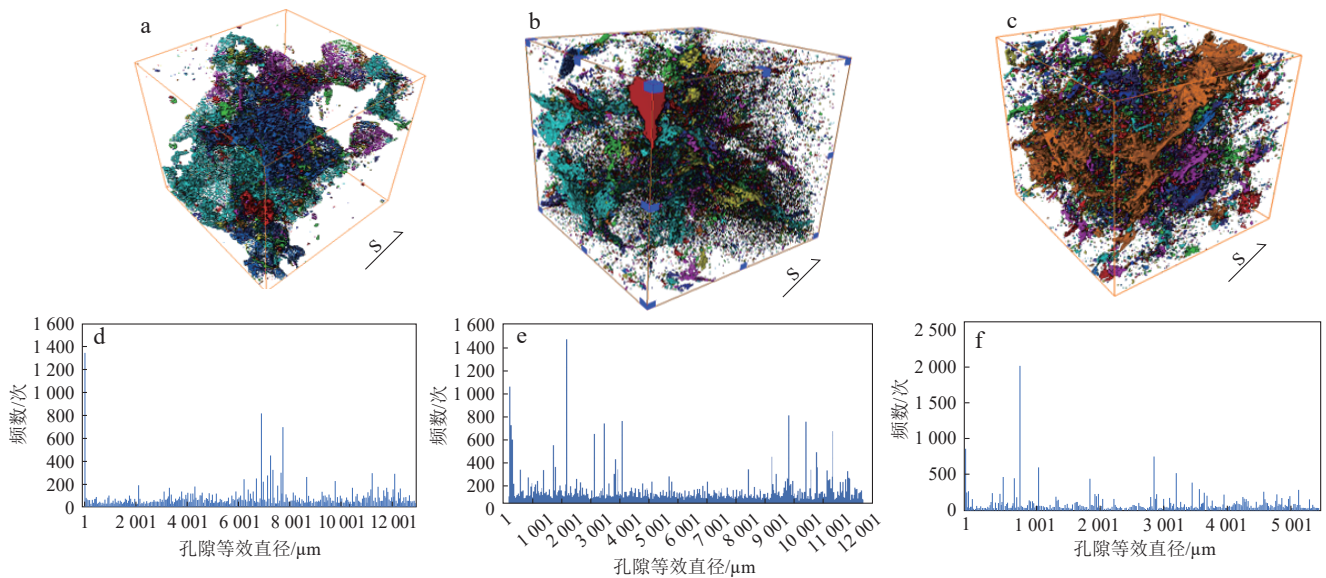


图9 塔里木盆地库车坳陷储层不同岩性孔隙结构特征

Fig. 9 Pore structure characteristics of various reservoir lithologies in the Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 砾岩CT建模,孔隙度1.69%;b. 粗砂岩CT建模,孔隙度4.30%;c. 中砂岩CT建模,孔隙度3.50%;d. 砾岩CT孔隙直径分布;e. 粗砂岩CT孔隙直径分布;f. 中砂岩CT孔隙直径分布

度峰值为24%)(图10a)。突破性地建立了岩相约束的力学参数模型体系:泊松比(2.0~9.0)在含砾粗砂岩中达到极值(图10b),杨氏模量(24~66 GPa)与脆性指数(0.6~0.9)在含砾粗砂岩和砾岩中同步出现峰值(图10c,d)。此外,相控泊松比、杨氏模量和脆性指数在阳霞剖面上的分布规律显示出相似的趋势。

4.3 致密砂岩基质型甜点分布模式

4.3.1 甜点分类

阿合组致密砂岩储层“甜点”分布受控于岩性特征,主要体现在以下3个方面。

1) 碎屑组分特征

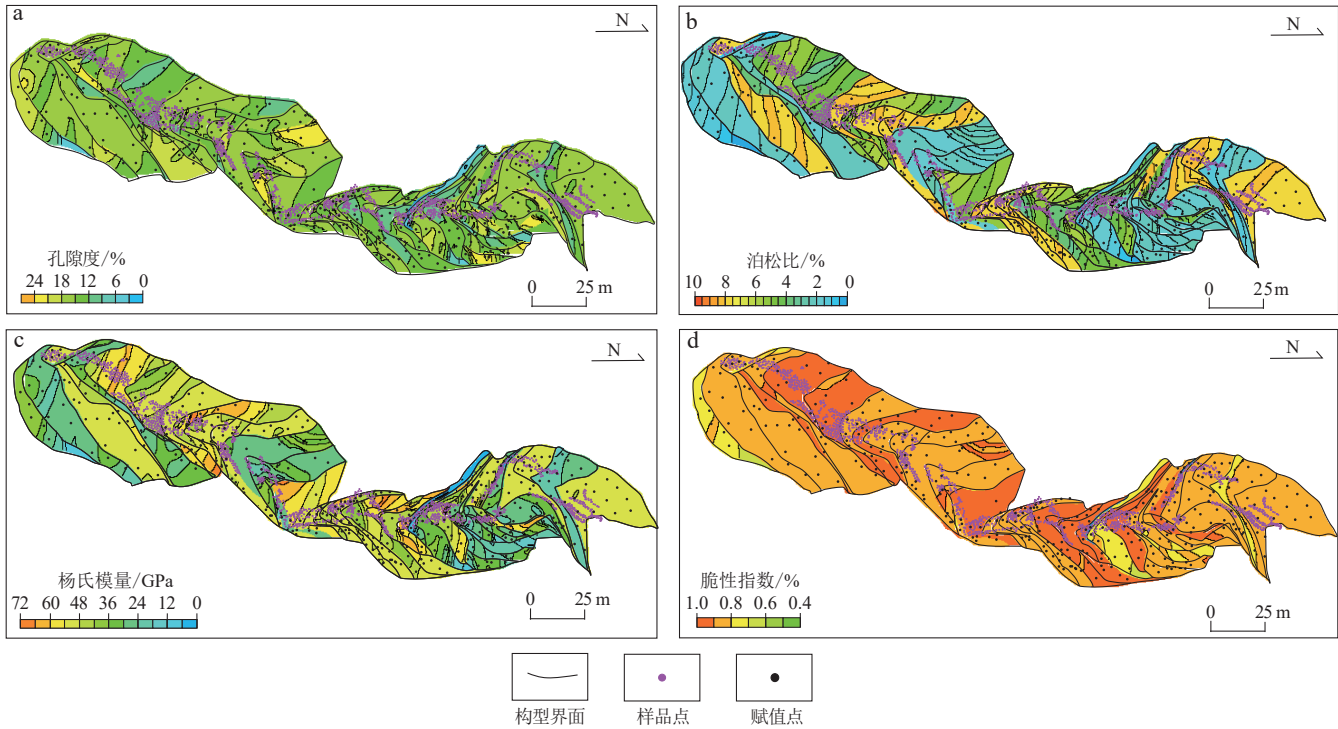


图10 塔里木盆地库车坳陷阳霞剖面三维地质与工程参数建模

Fig. 10 3D geological and engineering parameter modeling of the Yangxia outcrop, Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 孔隙度;b. 泊松比;c. 杨氏模量;d. 脆性指数

高石英含量砂岩(SiO_2 为主)具有优越的硬度和脆性特征,在构造应力作用下更易形成天然裂缝网络,显著改善储层渗透性(石英含量 $>75\%$ 的区域,裂缝密度提升40%)

2) 孔隙结构特征

核磁共振显示阿二段上部发育最优的多模态孔隙系统(大-中-小孔隙协同发育),孔隙度较阿一段和阿三段提升35%。

3) 岩石力学响应特征

阿二段优质储层段同步展现出理想的力学参数组合(泊松比降低15%、杨氏模量提升20%、脆性指数增加25%),证实了“高石英含量-优孔隙结构-佳力学参

数”的甜点形成机制。

基于野外露头地质调查与工程测试数据,构建了涵盖岩性特征、层理构造、孔隙度(4%~18%)、泊松比(2.0~8.0)、杨氏模量(24~60 GPa)及脆性指数(0.6~0.8)六大关键参数的甜点储层综合评价标准(表5)。该标准将储层甜点划分为4类:Ⅰ类(优质储层)、Ⅱ类(良好储层)和Ⅲ类(一般储层)为有效储层,Ⅳ类为非有效储层。

4.3.2 基质型甜点空间分布模式

基于无人机倾斜摄影数字露头建模、岩相特征解析、构型要素表征及储层质量差异模式研究,本研

表5 塔里木盆地库车坳陷露头区致密砂岩甜点分类标准

Table 5 Classification criteria for reservoir sweet spots in tight sandstones in the outcrop area of the Kuqa Depression, Tarim Basin

甜点类型	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类
岩性	中-粗砂岩、砂砾岩	砂砾岩、中-粗砂岩、中-细砂岩	中-细砂岩、粉砂岩	粉砂岩
层理构造	平行层理、槽状交错层理、侧积交错层理	块状、平行层理、槽状交错层理、侧积交错层理	槽状交错层理、侧积交错层理	侧积交错层理、水平层理
孔隙度/%	11~13	9~11	7~9	5~7
泊松比	0.12~0.18	0.14~0.16	0.14~0.21	0.19~0.20
杨氏模量/GPa	30.76~68.51	44.22~68.37	21.78~54.56	37.04~38.45
脆性指数	0.81~0.98	0.90~0.97	0.81~0.94	0.77~0.80

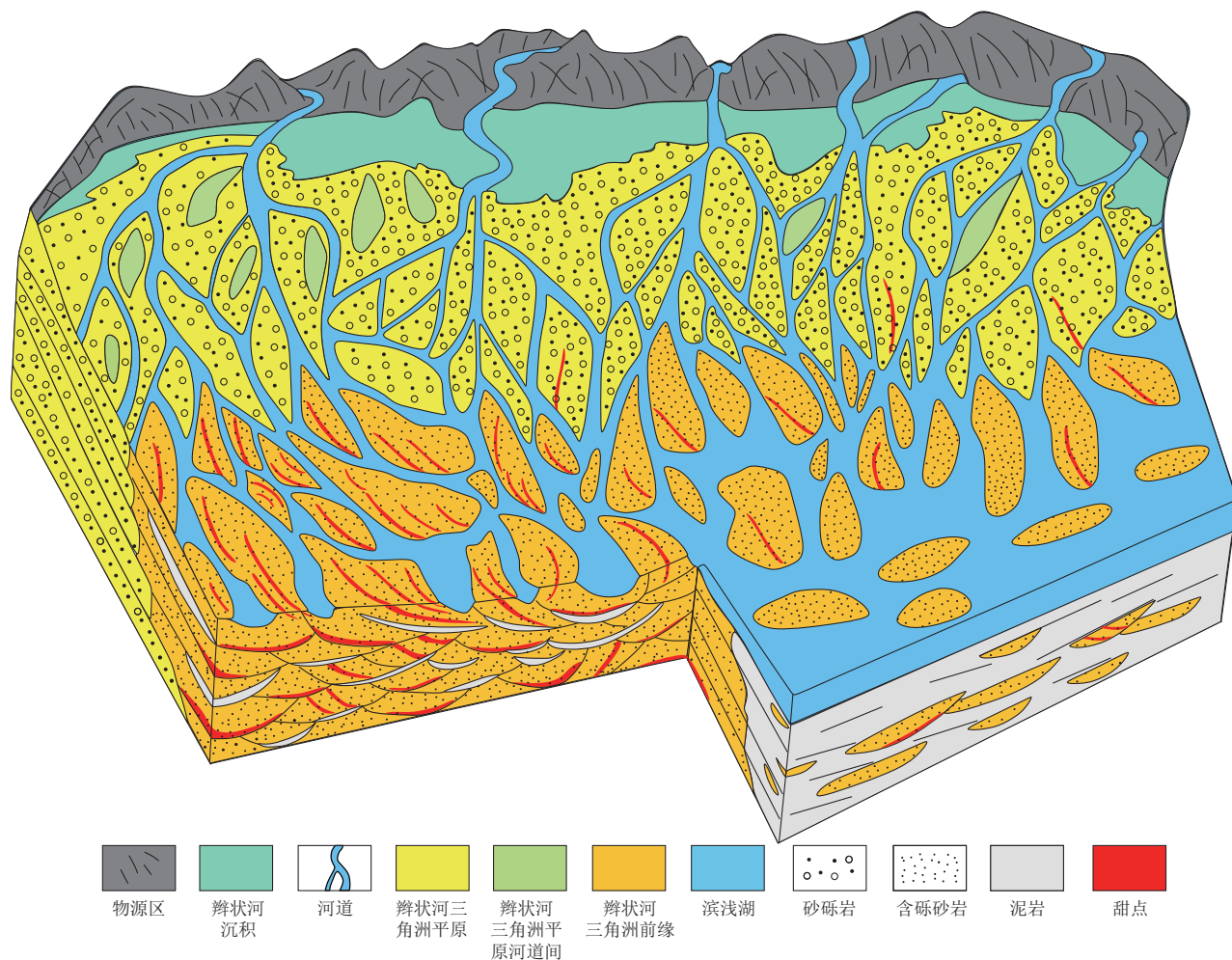


图11 塔里木盆地库车坳陷露头区辫状河三角洲甜点分布模式示意图

Fig. 11 Schematic diagram showing the spatial distribution of reservoir sweet spots within the braided river delta in the outcrop area of the Kuqa Depression, Tarim Basin

究创新提出了叠覆式辫状河三角洲“泛连通砂体”储层构型模式(图11)。研究区发育一套砂砾岩体高度发育(占比>85%)、泥质夹层稀少(<5%)的辫状河三角洲沉积体系,甜点分布呈现显著构型控储特征:①充填型辫状水道底部岩相Gm向上渐变为岩相Sm,沉积构造简单,呈典型正韵律,甜点类型自下而上由Ⅰ类过渡为Ⅱ类和Ⅲ类;②侧积迁移型辫状水道由岩相Gp和Gm侧向渐变为岩相CSp, CSt和Sp, St等,沿侧积方向粒度递减,甜点类型由粗粒部位的Ⅰ类渐变为Ⅱ类和Ⅲ类;③复合型辫状水道则呈现上述两种模式的复杂叠置,主要发育Ⅰ类和Ⅱ类甜点。该“泛连通”砂体模式下,以基质型为主的甜点分布规律更加明确。

5 结论

1) 本研究创新性地传统露头表征方法与高分

辨率无人机倾斜摄影技术(地面分辨率2 cm)相结合,显著提升了沉积学研究的技术水平。研究区发育典型的砾质辫状河三角洲沉积体系,识别出12种特征岩相,其中三角洲前缘分流河道和河口砂坝构成骨架砂体,分流间湾和废弃河道泥岩形成主要隔夹层。三维构型分析表明,砂体呈砾质分流河道填充叠置型、含砾粗砂岩分流河道侧向迁移叠置型与复合叠置型3种叠置样式。

2) 建立了露头区分流河道致密砂岩储层质量差异模式:①充填型正韵律模式表现为单一辫状水道内部孔隙度自底部(18%)向上(12%)逐渐降低的垂向正韵律特征;②侧积迁移叠置型模式孔隙度沿侧向加积方向递减(自18%至12%),并呈现多期正韵律叠置结构;③复合型模式孔隙度沿侧向加积方向递增(自12%至19%),同时发育多期侧向迁移韵律。这3种模式系统揭示了垂向充填-侧向迁移-复合改造的储层质量

分异机制。

3) 构建了基于构型界面的储层三维参数模型体系。以高精度无人机倾斜摄影数字露头(分辨率2 cm)为数据基础,通过露头精细解剖和储层质量差异模式分析,建立了相控约束下的四维参数模型:①孔隙度模型(4%~18%);②泊松比模型(2.0~9.0);③杨氏模量模型(24~66 GPa);④脆性指数模型(0.6~0.9)。该模型实现了地质特征与工程参数的三维可视化表达,精确刻画了不同类型甜点的空间分布特征,为致密砂岩储层开发提供了精准的地质-工程一体化解决方案。

参 考 文 献

- [1] WALLS J D. Tight gas sands-permeability, pore structure, and clay[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, 34(11): 2708-2714.
- [2] SPENCER C W. Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain region[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1985, 37(7): 1308-1314.
- [3] KUUSKRAA V A, HOAK T E, KUUSKRAA J A, et al. Tight sands gain as U. S. gas source[J]. *Oil & Gas Journal*, 1996, 94(12): 102-107.
- [4] HOLDITCH S A. Tight gas sands[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2006, 58(6): 86-93.
- [5] 戴金星,倪云燕,吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 257-264.
DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 257-264.
- [6] 戴金星,董大忠,倪云燕,等. 致密砂岩气藏与页岩气藏展布模式[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(4): 667-678.
DAI Jinxing, DONG Dazhong, NI Yunyan, et al. Distribution patterns of tight sandstone gas and shale gas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 667-678.
- [7] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 173-187.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187.
- [8] 郭旭升,蔡勋育,刘金连,等. 中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 12-22.
GUO Xusheng, CAI Xunyu, LIU Jinlian, et al. Natural gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan and prospect forecast during the 14th Five-Year Plan[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 12-22.
- [9] 魏国齐,张福东,李君,等. 中国致密砂岩气成藏理论进展[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 199-210.
WEI Guoqi, ZHANG Fudong, LI Jun, et al. New progress of tight sand gas accumulation theory and favorable exploration zones in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2): 199-210.
- [10] 刘君龙,刘忠群,刘振峰,等. 四川盆地新场构造带深层须二段致密砂岩断褶裂缝体特征和地质模式[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 530-540.
LIU Junlong, LIU Zhongqun, LIU Zhenfeng, et al. Geological characteristics and models of fault-fold-fracture body in deep tight sandstone of the second member of Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 530-540.
- [11] 刘君龙,胡宗全,刘忠群,等. 四川盆地川西坳陷新场须家河组二段气藏甜点模式及形成机理[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 852-862.
LIU Junlong, HU Zongquan, LIU Zhongqun, et al. Gas pool sweet spot models and their forming mechanism in the Xu 2 Member in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 852-862.
- [12] 刘君龙,刘忠群,肖开华,等. 四川盆地新场地区三叠系须家河组二段致密砂岩有利岩石相表征及油气地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6): 1111-1121.
LIU Junlong, LIU Zhongqun, XIAO Kaihua, et al. Characterization of favorable lithofacies in tight sandstone reservoirs and its significance for gas exploration and exploitation: A case study of the 2nd Member of Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang area, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1111-1121.
- [13] 印森林,陈恭洋,张玲,等. 岩相构型对致密砂岩优质储层的控制作用——以川西坳陷须二段为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(7): 1179-1189.
YIN Senlin, CHEN Gongyang, ZHANG Ling, et al. The controlling effect of lithofacies architecture on high quality tight sandstone reservoirs: A case study of second member of the Upper Triassic of Xujiahe Formation, western Sichuan Depression, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(7): 1179-1189.
- [14] 孙海涛,钟大康,王威,等. 四川盆地马路背地区上三叠统须家河组致密砂岩储层成因分析[J]. *沉积学报*, 2021, 39(5): 1057-1067.
SUN Haitao, ZHONG Dakang, WANG Wei, et al. Origin analysis of a tight sandstone reservoir for the Xujiahe Formation of the Upper Triassic at the Malubei area in the Sichuan Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1057-1067.
- [15] 印森林,高阳,胡张明,等. 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, 2021, 42(2): 198–216.
- YIN Senlin, GAO Yang, HU Zhangming, et al. Multiple-point geostatistical simulation of outcrop based on UAV oblique photographic data: A case study of Shihezi Formation in Pingtuo township, Luliang city, Shanxi [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 198–216.
- [16] 单敬福, 张彬, 赵忠军, 等. 复合辫状河道期次划分方法与沉积演化过程分析——以鄂尔多斯盆地苏里格气田西区苏X区块为例[J]. 沉积学报, 2015, 33(4): 773–785.
- SHAN Jingfu, ZHANG Bin, ZHAO Zhongjun, et al. Single stage and sedimentary evolution process analysis of braided river: A case from Su X Block of western Sulige Gas Field in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 773–785.
- [17] ZENG Lianbo, LI Xiangyang. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(4): 461–477.
- [18] 王清华, 张荣虎, 杨宪彰, 等. 库车坳陷东部迪北地区侏罗系阿合组致密砂岩气勘探重大突破及地质意义[J]. 石油学报, 2022, 43(8): 1049–1064.
- WANG Qinghua, ZHANG Ronghu, YANG Xianzhang, et al. Major breakthrough and geological significance of tight sandstone gas exploration in Jurassic Ahe Formation in Dibe area, eastern Kuqa depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(8): 1049–1064.
- [19] 王珂, 张荣虎, 唐永, 等. 库车坳陷北部构造带侏罗系阿合组构造岩作用与储层预测[J]. 石油学报, 2022, 43(7): 925–940.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, TANG Yong, et al. Structural diagenesis and reservoir prediction of Lower Jurassic Ahe Formation in the northern structural belt of Kuqa Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(7): 925–940.
- [20] 王珂, 张荣虎, 王俊鹏, 等. 塔里木盆地库车坳陷侏罗系阿合组与白垩系巴什基奇克组储层特征对比与勘探开发启示[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(4): 556–571.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, WANG Junpeng, et al. Comparison of reservoir characteristics between Jurassic Ahe Formation and Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression of Tarim Basin and implications for exploration and development [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(4): 556–571.
- [21] 唐雁刚, 杨宪彰, 谢会文, 等. 塔里木盆地库车坳陷侏罗系阿合组致密气藏特征与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 113–124.
- TANG Yangang, YANG Xianzhang, XIE Huiwen, et al. Tight gas reservoir characteristics and exploration potential of Jurassic Ahe Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(4): 113–124.
- [22] 张惠良, 寿建峰, 陈子料, 等. 库车坳陷下侏罗统沉积特征及砂体展布[J]. 古地理论, 2002, 4(3): 47–58.
- ZHANG Huiliang, SHOU Jianfeng, CHEN Ziliao, et al. Sedimentary characteristics and sandstone body distribution of the Lower Jurassic in Kuqa Depression [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2002, 4(3): 47–58.
- [23] 霍宏亮, 刘成林, 李闻达, 等. 沉积和成岩作用对湖相重力流致密砂岩储层质量的影响——以鄂尔多斯盆地合水地区长7段为例[J]. 地质论评, 2024, 70(6): 2411–2427.
- HUO Hongliang, LIU Chenglin, LI Wenda, et al. Effect of sedimentation and diagenesis on the quality of lacustral gravity flow tight sandstone reservoirs—A case study of the Chang-7 Member in Heshui area, Ordos Basin [J]. *Geological Review*, 2024, 70(6): 2411–2427.
- [24] 李宇志, 毕明威, 刘惠民, 等. 沙三中亚期东营三角洲前缘滑塌浊积岩定量预测[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 146–155.
- LI Yuzhi, BI Mingwei, LIU Huimin, et al. Quantitative prediction of slump turbidites of the Dongying Delta front in mid Es₃ [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 146–155.
- [25] 卫欢, 单长安, 朱松柏, 等. 库车坳陷克深地区白垩系巴什基奇克组致密砂岩裂缝发育特征及地质意义[J]. 岩性油气藏, 2025, 37(1): 149–160.
- WEI Huan, SHAN Changan, ZHU Songbai, et al. Fracture development characteristics and geological significance of tight sandstone of Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen area, Kuqa Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2025, 37(1): 149–160.
- [26] 操应长, 远光辉, 杨海军, 等. 含油气盆地深层—超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 112–140.
- CAO Yingchang, YUAN Guanghui, YANG Haijun, et al. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 112–140.
- [27] 景涛涛, 李文浩, 董卫, 等. 库车坳陷迪北地区阿合组储层致密过程与油气充注耦合关系[J]. 现代地质, 2025, 39(4): 1156–1168.
- JING Taotao, LI Wenhao, DONG Wei, et al. Coupling relationship between the reservoir densification process and hydrocarbon charging process in the Ahe Formation in the Dibe area of the Kuqa Depression [J]. *Geoscience*, 2025, 39(4): 1156–1168.
- [28] 唐明明, 孔令沂, 唐佳凡, 等. 分流河道型致密砂岩储层地质工程一体化研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(5): 1–12.
- TANG Mingming, KONG Lingyi, TANG Jiafan, et al. Study on geological engineering integration of distributary channel tight sandstone reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum*

- (Edition of Natural Science), 2024, 48(5): 1-12.
- [29] 袁纯, 张惠良, 王波. 大型辫状河三角洲砂体构型与储层特征——以库车坳陷北部阿合组为例[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(6): 73-84.
- YUAN Chun, ZHANG Huiliang, WANG Bo. Sand body configuration and reservoir characteristics of large braided river delta: A case study of Ahe Formation in northern Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(6): 73-84.
- [30] 李明强, 张立强, 李政宏, 等. 塔里木盆地侏罗统阿合组下砂砾岩段致密砂岩成岩相划分及测井识别——以库车坳陷依奇克里克地区为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1559-1570.
- LI Mingqiang, ZHANG Liqiang, LI Zhenghong, et al. Diagenetic facies division and logging identification of tight sandstone in the lower conglomerate member of Lower Jurassic Ahe Formation in Tarim Basin: Case study of Yiqikelike area in Kuqa Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1559-1570.
- [31] 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.
- [32] 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 Lüliang City, Shanxi Province [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2018, 20(5): 909-924.
- [33] YIN Senlin, ZHU Baiyu, GUO Haiping, et al. 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), 2023, 97(1): 269-285.
- [34] YIN Senlin, FENG Kaiyue, XIN Nie, et al. Characterization of marine shale in Western Hubei Province based on unmanned aerial vehicle oblique photographic data [J]. Advances in Geo-Energy Research, 2022, 6(3): 252-263.
- [35] MIALI A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22(4): 261-308.
- [36] MIALI A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: Anatomy of the Kayenta formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado [J]. Sedimentary Geology, 1988, 55(3/4): 233-240, 247-262.
- [37] 印森林, 陈恭洋, 许长福, 等. 陆相混积细粒储集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, 2022, 43(5): 1180-1193.
- YIN Senlin, CHEN Gongyang, XU Changfu, et al. 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, 2022, 43(5): 1180-1193.
- [38] 潘辉, 蒋裕强, 朱讯, 等. 河流相致密砂岩气地质甜点评价——以四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组二段1亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 471-485.
- PAN Hui, JIANG Yuqiang, ZHU Xun, et al. Evaluation of geological sweet spots in fluvial tight sandstone gas: A case study of the first submember of the second member of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 471-485.
- [39] 刘明洁, 刘恒宇, 肖尧, 等. 断层-砂体配置演化模式对远源型致密砂岩气差异富集的影响——以川中地区侏罗系沙溪庙组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1630-1645.
- LIU Mingjie, LIU Hengyu, XIAO Yao, et al. Effects of the fault-sandbody configuration evolution model on differential enrichment of far-source tight sand gas: A case study of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1630-1645.

(编辑 张玉银)