

# 玛南斜坡侏罗系三工河组二段砂质碎屑流 沉积特征及成藏条件

卢红刚<sup>1</sup>,刁志龙<sup>1</sup>,王志维<sup>1</sup>,曾书玲<sup>2</sup>,李智<sup>3</sup>,谢天寿<sup>1</sup>

(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 百口泉采油厂,新疆 克拉玛依 834000; 3. 中国石油新疆油田分公司 采气一厂,新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:**玛湖凹陷南斜坡(玛南斜坡)侏罗系三工河组二段发育砂质碎屑流沉积。根据储层物性和地震资料,采用岩心观察和薄片鉴定方法,分析玛南斜坡侏罗系三工河组二段砂质碎屑流沉积特征和成藏条件。结果表明:玛南斜坡三工河组二段砂质碎屑流砂体具有突变接触、漂浮泥砾和泥质撕裂屑等主要识别标志;粒度概率累积曲线大多呈宽缓上拱的“两段式”形态,以跳跃组分为主;地震剖面上具有先强波谷、后强波峰的双相强反射结构,横向上表现为短轴、不连续的舌状分布特征。玛南斜坡三工河组二段存在两级坡折带,当物源充分或水动力条件较强时,坡折带之上的三角洲前缘砂体滑塌至半深湖亚相,形成砂质碎屑流沉积。玛南斜坡三工河组二段砂质碎屑流砂体具有烃源岩条件高效、储盖组合良好、输导体系立体和侧向封挡优越等成藏条件。该结果为研究区下一步油气勘探提供指导。

**关键词:**玛南斜坡;侏罗系;三工河组;砂质碎屑流;沉积特征;成藏条件

**中图分类号:**TE122.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)05-0024-10

## 0 引言

SHANMUGAM G 等提出砂质碎屑流沉积相模式(Sandy Debrites Facies Model)<sup>[1]</sup>,砂质碎屑流是一种介于泥质碎屑流与颗粒流之间的过渡黏滞性重力流,沉积物呈连续冻结式块状搬运,多发育在盆地斜坡区及坡折带之下,建立“高密度流体塑性运移”和“基质强度支撑”沉积力学判断依据,为深水砂体成因解释提供理论依据。人们在鄂尔多斯、四川、渤海湾、莺歌海和江汉等陆相盆地开展砂质碎屑流识别标志方面的研究。邹才能等<sup>[2]</sup>、李相博等<sup>[3]</sup>认为,鄂尔多斯盆地湖盆中心深水区延长组发育砂质碎屑流沉积,砂质碎屑流空间分布主要受深水坡折带控制,由滑塌成因形成不规则舌状体;王翔等<sup>[4]</sup>、蒲宇新等<sup>[5]</sup>、李楠等<sup>[6]</sup>认为,大型地貌坡折带控制砂质碎屑流砂体发育,优质储层受岩性、沉积、成岩及构造作用共同控制;夏景生等<sup>[7]</sup>、张磊岗等<sup>[8]</sup>、包汉勇等<sup>[9]</sup>认为,砂质碎屑流沉积主要由地震、风暴和洪水等外部因素触发,为扇三角洲前缘砂体发生滑动、滑塌、再沉积而形成。

砂质碎屑流成为沉积学与油气地质学领域研究的重点之一,在成因机制、识别标志、沉积特征、发育模式、储层特征及油气地质意义等方面取得成果<sup>[10-13]</sup>。人们研究准噶尔盆地盆 1 井西凹陷三工河组砂质碎屑流沉积,厚刚福等<sup>[14-15]</sup>、孙靖等<sup>[16-17]</sup>的研究主要集中在成因机制及发育模式上,认为研究区受两级坡折影响,水下分流河道砂体可滑塌至坡折之下的深水区,形成重力流成因的砂质碎屑流沉积;费李莹等<sup>[18]</sup>的研究集中在坡折带控制上,认为研究区存在两级坡折带,对沉积体系的控制作用明显,砂质碎屑流主要发育于浅湖—半深湖沉积相带;雷海艳等<sup>[19]</sup>认为研究区具有 4 个有利成藏条件,即广泛发育的烃源岩、两级坡折控制下的沟槽控砂体系、优越的储盖组合和良好的油气输导体系。

关于玛湖凹陷砂质碎屑流沉积识别标志、发育规律及成藏要素等方面的研究较薄弱。根据岩心观察、测井解释与测试资料,采用地震属性解释技术,分析玛湖凹陷南斜坡侏罗系三工河组碎屑流沉积体系空间展布特征,建立“岩性—电性—地震”三位一体的分析模型和三角洲前缘—湖盆深水区的源—汇沉积模式,揭示研究区砂质碎屑流的沉积特征与成藏条件,为研究区下一步的油气勘探提供依据。

收稿日期:2025-05-19;编辑:朱秀杰

基金项目:中国石油天然气集团有限公司重大专项(2023ZZ24YJ02)

作者简介:卢红刚(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事油藏评价、油气勘探等方面的研究。

## 1 区域地质概况

玛湖凹陷是准噶尔盆地主要的富油气区带之一,北部及上倾方向与乌夏断裂带相接,西部紧邻克百断裂带,南部分别与中拐凸起、达巴松凸起相邻,东部可达夏盐凸起与英西凹陷<sup>[20-22]</sup>。研究区位于准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷西部隆起与中央凹陷结合部,是西北缘断裂带油气富集构造单元之一,具有多层系立体成藏特征,纵向上发现 10 套含油层系,具备良好的勘探潜力<sup>[23]</sup>(见图 1(a))。

根据岩性、电性及地震响应特征,将侏罗系三工河组自下而上划分为一段( $J_{1s_1}$ )、二段( $J_{1s_2}$ )和三段( $J_{1s_3}$ ),其中一段主要发育一套前三角洲相泥岩,局部发育薄砂层;二段储层岩性以浅灰色—灰色含砾砂岩、粉—细砂岩为主,间夹薄层灰色泥岩,顶部砂体为研究区最主要含油气层系;三段为一套湖相泥岩沉积,全区分布广泛,为区域性盖层,与二段砂体形成良好储盖组合(见图 1(b))。

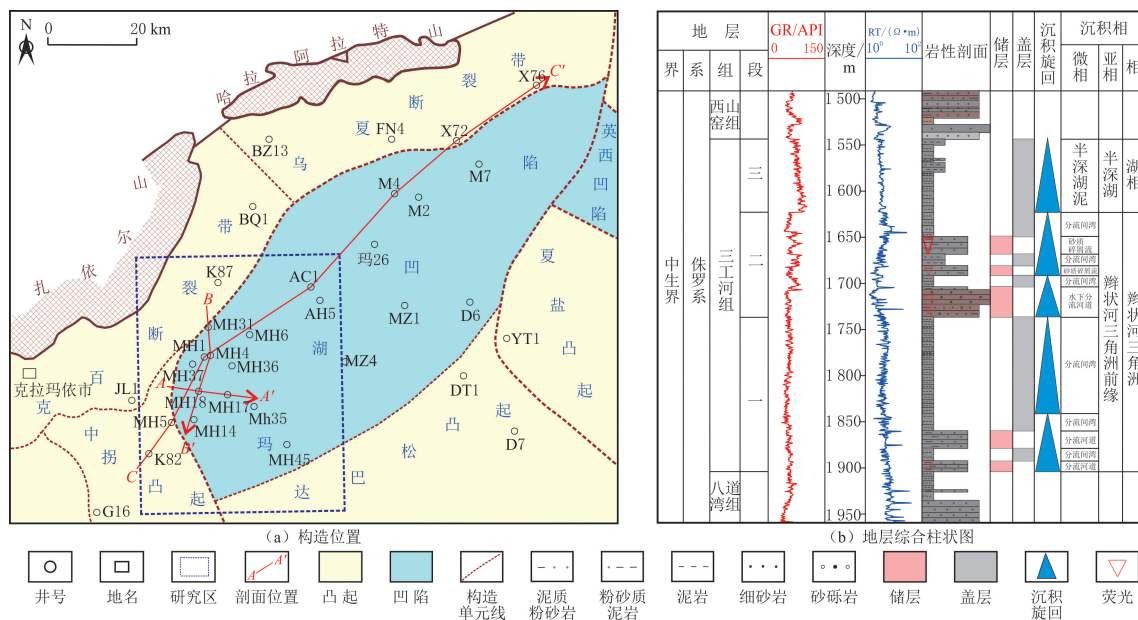


图 1 玛南斜坡构造位置及三工河组综合柱状图

Fig. 1 Structural location on southern slope of Mahu Depression and stratigraphic column of Sangonghe Formation

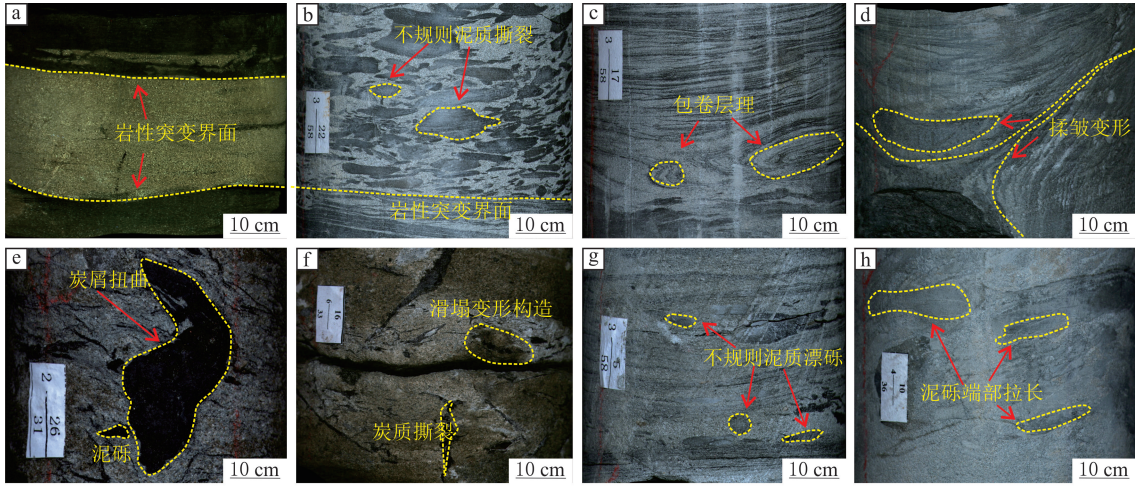
研究区侏罗系三工河组二段(三二段)顶面构造形态整体呈向东南倾的单斜特征,具有西北部高、东南部低的空间分布特点。平面上,断裂主要分为两组,一组为近东西向大侏罗沟走滑断裂,断开层系多,纵向沟通深层油源;另一组为与大侏罗沟走滑断裂同时期形成的近北西—南东向的次级羽列式断裂体系,断距整体较小,延伸长度较短,与走滑断裂在平面上主要表现为低角度斜交的几何样式,对油气的二次运移调整及分布具有重要意义。三二段发育辫状河三角洲—湖相沉积体系,物源主要来自于西北向的克拉玛依扇。在物源丰富且水动力较强的条件下,辫状河三角洲前缘沉积物经过再搬运,在坡折带以下区域形成砂质碎屑流沉积,并沿坡折带以舌状体展布,分选较差,测井曲线呈弱齿化箱型,有多期叠合的特征<sup>[24-26]</sup>。

## 2 砂质碎屑流沉积特征

### 2.1 砂体识别特征

根据岩心观察,研究区三二段砂质碎屑流砂体的单层厚度较大,普遍超过 3 m,纵向上可见多期砂体复合叠加,夹在灰色—灰黑色湖侵泥岩之间,具有“泥包砂”结构。取心段常见砂泥岩顶底突变接触(见图 2(a-b)),垂向上具有典型鲍马序列沉积特征;整体上主要发育块状构造和滑塌变形构造,牵引流形成的层理构造欠发育,岩相组合为以悬浮载荷为主的沉积机制,岩心上常见包卷层理(见图 2(c))和揉皱变形层理(见图 2(d)),常夹炭质撕裂屑(见图 2(e-f))、泥质团块(见图 2(b))及漂浮泥砾(见图 2(g))等,局部可见泥砾端部拉长,灰黑色泥砾以漂浮状镶嵌于灰白色泥质细砂岩(见图 2(h))。三二段砂质碎屑流砂体具有

阵发性重力流沉积机制,不同于正常牵引流引起的沉积构造,可作为研究区砂质碎屑流储层的识别标志。



(a) 细砂岩, 岩性突变接触, MH37井, 1 634.85 m; (b) 粉—细砂岩, 不规则泥质撕裂, MH37井, 1 651.94 m; (c) 泥质细砂岩, 包卷层理, MH37井, 1 649.55 m; (d) 粉—细砂岩, 揉皱变形构造, MH183井, 1 877.69 m; (e) 中—细砂岩, 泥砾及炭屑扭曲, MH371井, 1 797.89 m; (f) 中—细砂岩, 滑塌变形构造、炭屑撕裂, MH183井, 1 865.32 m; (g) 泥质细砂岩, 不规则泥质漂砾, MH37井, 1 649.95 m; (h) 粉—细砂岩, 泥砾端部拉长, MH183井, 1 853.20 m

图 2 玛南斜坡三二段砂质碎屑流砂体典型沉积构造岩心照片

Fig. 2 Typical sedimentary structure core photo of sandy debris flow in the second member of Sangonghe Formation on southern slope of Mahu Depression

## 2.2 粒度曲线特征

砂岩粒度特征可作为古沉积环境恢复和微相类型识别的重要依据,能够有效揭示沉积体系的动力学特征及空间展布规律<sup>[14]</sup>。研究区 7 口取心井岩心样品的粒度分析数据显示,沉积物粒径中值( $C$ )呈 360~770  $\mu\text{m}$  的优势分布特征,平均为 510  $\mu\text{m}$ ;搬运指数( $M$ )呈 160~330  $\mu\text{m}$  的典型牵引流分选分布特征,平均为 220  $\mu\text{m}$ ,指示中等水动力能量的沉积环境。基于  $C$ — $M$  图( $C$  为 1% 粒径,  $M$  为 50% 粒径),样品点沿  $C$ — $M$  基线呈准平行分布模式(见图 3(a)),指示重力流沉积搬运机制的特征。

由图 3(b)可以看出,砂质碎屑流砂体概率累积曲线多表现为宽缓上拱形的“两段式”特征,跃移载荷占比优势显著(62%~75%),悬浮组分与跳跃组分交截点介于 3.7~4.2;偏度介于 0.15~0.64,平均为 0.41;峰度介于 0.99~1.72,平均为 1.29;标准偏差介于 0.97~2.47,平均为 1.75。基于 Visher 粒度模型解析,跃移段概率累积曲线斜率相对较小,沉积物经过较长距离搬运后,粗粒碎屑物质量分数较低,跳跃组分质量分数整体低于 60%,斜率较小,分选一般,悬浮组分质量分数较高,一般为 10%~25%,在坡折带滑塌时,砂质碎屑流具有重力流搬运且砂体快速堆积的水动力背景。

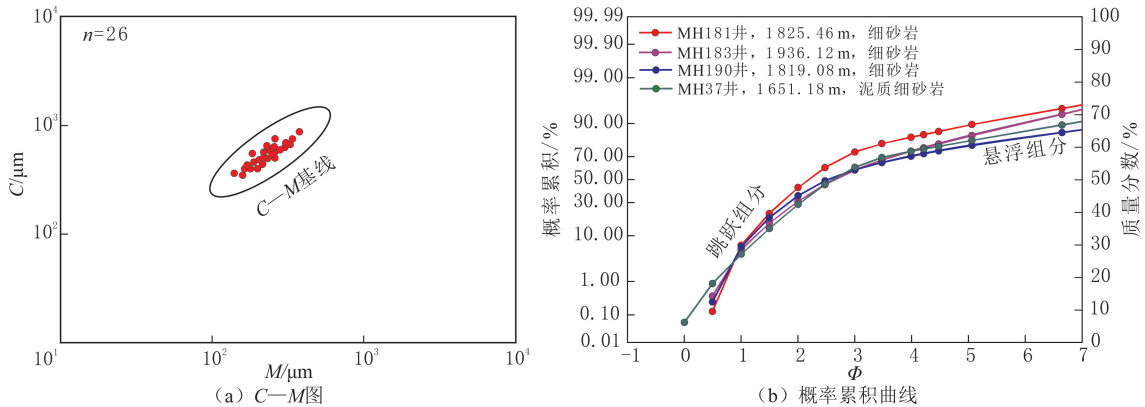


图 3 玛南斜坡三二段砂质碎屑流砂体粒度曲线特征

Fig. 3 Grain size analysis curve characteristics of sandy debris flow sand body in the second member of Sangonghe Formation on southern slope of Mahu Depression

### 2.3 地震反射特征

根据地震反射结构、振幅连续性和频率属性等参数,能够有效推断沉积环境,实现沉积相带展布的三维预测<sup>[15]</sup>。玛南斜坡三二段砂质碎屑流砂体在地震解释剖面上具有先强波谷(负相位)、后强波峰(正相位)组成的双相强反射结构,横向上表现为短轴、不连续的特征,整体呈舌状孤立分布(见图4(a))。坡折带以上区域主要表现为中—强振幅、近平行且连续性较好的反射特征,坡折带以下区域以积式反射为主,地震反射整体呈中—强振幅,与下伏地层呈一定角度的斜交关系,反映断裂坡折带控制下的深水重力流沉积机制,接触关系表现为地层单元间的差异沉降特征,指示古地貌坡折带对再搬运沉积体系的空间约束作用(见图4(b))。

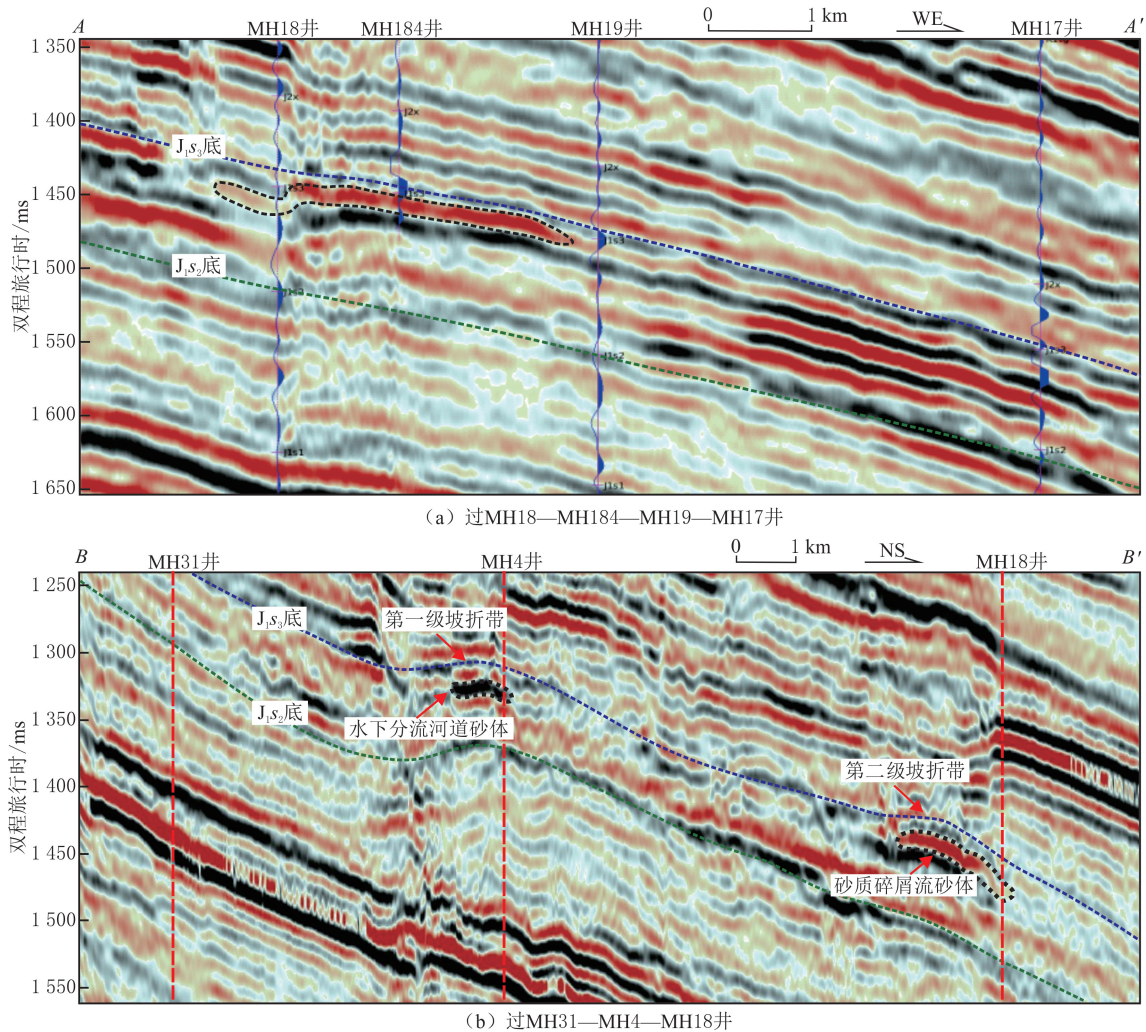


图4 玛南斜坡三二段砂质碎屑流砂体地震剖面特征(剖面位置见图1(a))

Fig. 4 The seismic reflection characteristics of the sandstone debris flow sand body in the second member of Sangonghe Formation on southern slope of Mahu Depression(section position as shown in fig. 1(a))

## 3 砂质碎屑流展布特征及沉积模式

### 3.1 砂体发育条件

砂质碎屑流形成过程与重力流作用密切相关,主要受古地貌特征、物源供应及触发机制共同控制。古地貌特征对砂质碎屑流砂体的形成具有基础性作用,地形的高低起伏直接影响重力流的运动路径和能量分布;物源供应不可或缺,辫状河三角洲前缘积累大量松散的沉积物,容易被重新搬运,形成砂质碎屑流砂体;触发机制(如地震)导致地表不稳定,促使大量松散物质滑落到半深湖亚相,形成砂质碎屑流沉积。

对研究区 170 余口钻井矩阵层位标定进行系统分层,建立研究区三工河组层序地层格架,恢复三二段沉积古地貌(见图 5)。三二段沉积时期,玛湖 18—玛湖 37 井区为玛南斜坡沉降中心,围绕沉降中心识别出两级坡折带,两级坡折带具有连续继承性发育特征,控制辫状河三角洲沉积体系的展布。第一级坡折带为低隆起—沟谷与斜坡之间的坡折,为同沉积断裂活动形成断裂坡折;第二级坡折带为斜坡向凹陷过渡的坡折,为地形坡度变化形成的沉积坡折,成因与燕山运动期多幕构造应力场耦合相关,构造运动导致古地貌高带翼部发育同沉积构造披覆,地层产生挠曲变形,从而形成的挠曲坡折带。相较于坡折带以上的地层,坡折带以下的地层显著增厚,反映明显的同向轴上超特征。

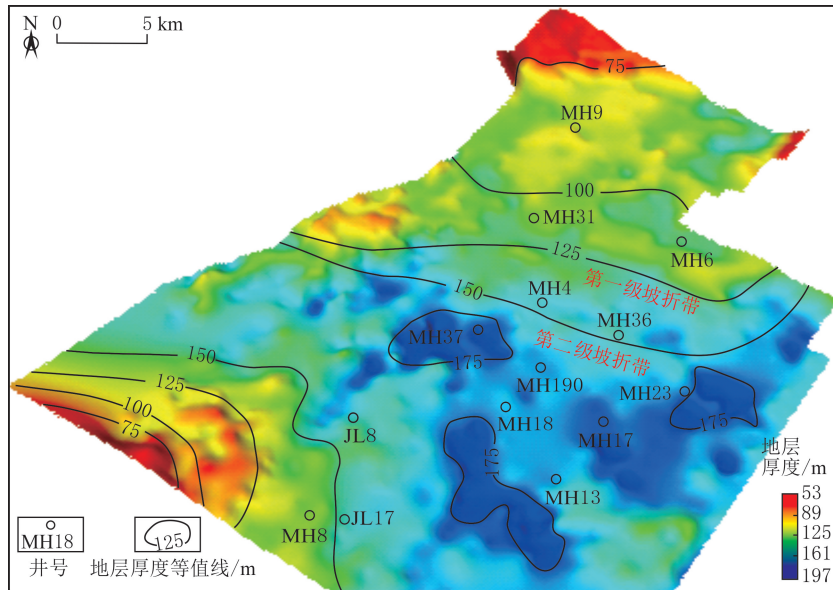


图 5 玛南斜坡三二段沉积古地貌

Fig. 5 Presedimentary paleogeomorphological map in the second member of Sangonghe Formation on southern slope of Mahu Depression

### 3.2 砂体展布特征

由岩心观察可知,垂向上,研究区砂质碎屑流砂体主要发育于三二段的顶部,被厚层暗色泥岩包裹,具有典型的“泥包砂”结构特征,砂体较薄,横向变化快,岩性主要为灰色粉—细砂岩;测井曲线主要表现为弱齿化箱型特征。平面上,砂质碎屑流砂体多顺水道延伸,表现为舌状或朵叶状的不规则展布特征,与坡折带上部发育的水下分流河道砂体间呈非连续性展布特征;在一定的阵发性触发机制下,受重力驱动影响,坡折带之上的砂质碎屑流砂体中的斜坡失稳沉积物,向半深水湖盆区域沿坡折带滑塌卸载,坡折带之下形成舌状分布的砂质碎屑流砂体,具有多期叠加特征(见图 6(a))。

### 3.3 沉积模式

类比盆 1 井西凹陷侏罗系三工河组辫状河三角洲发育模式,玛南斜坡具有“盆大、水浅、远源、物源足”的特征,沉积模式呈受断裂坡折和沉积坡折物源体系影响下的构造转换带辫状河三角洲特点。

侏罗纪,受中拐凸起影响,玛南斜坡形成西北高、东南低的古地貌格局;三工河组沉积时期,成为重要沉积沉降中心<sup>[23]</sup>。三二段沉积时期,来自于西北向扎伊尔山和哈拉阿拉特山的多方物源供应充足,多支水系汇聚形成宽缓的辫状河,向湖盆内搬运卸载砂体,形成良好的辫状河三角洲源—汇系统。玛南斜坡及周缘发育两级坡折带,辫状河三角洲被两级坡折带分为 3 个带,从源区到湖盆沉降中心依次发育三角洲前缘带、坡折带和湖盆深水区砂质碎屑流带(见图 6(a))。三角洲前缘带以水下分流河道微相为主,在一定触发机制下,砂质碎屑流带的砂体为三角洲前缘带水下分流河道砂体滑塌至深水区再沉积而形成,储层物性和含油气性较好,纵向上表现为类似“泥包砂”的层状结构,顶板为三工河组三段(三三段)最大湖侵期的厚层泥岩,有利于形成岩性圈闭(见图 6(b))。

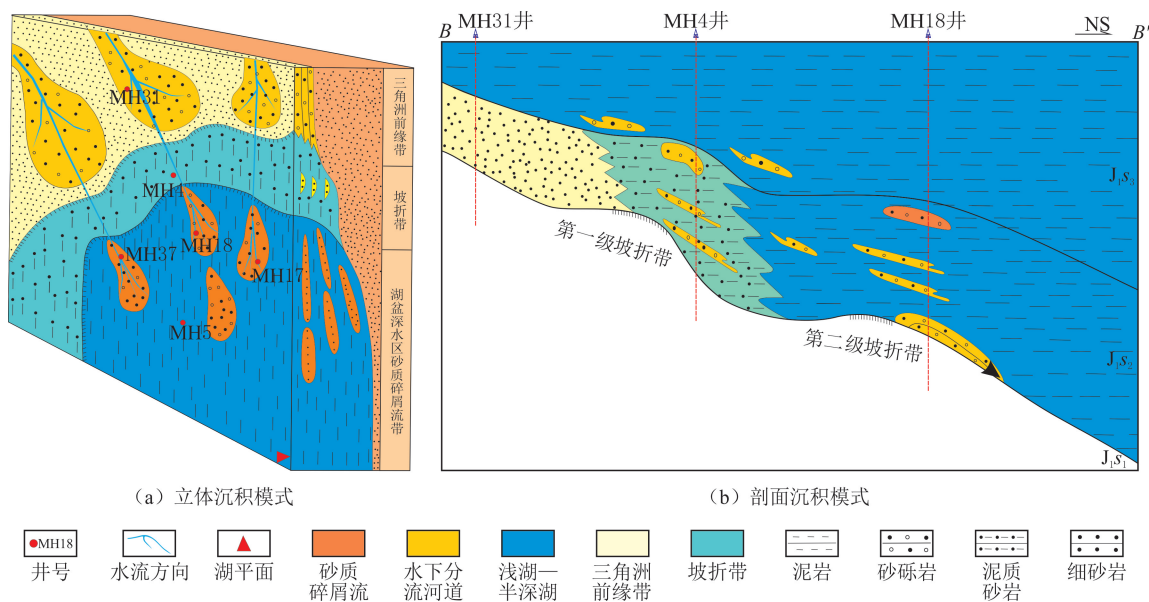


图 6 玛南斜坡三二段砂质碎屑流砂体沉积模式(剖面位置见图 1(a))

Fig. 6 Sedimentary model diagram of sandy debris flow sand body in the second member of Sangonghe Formation on southern slope of Mahu Depression(section position as shown in fig. 1(a))

## 4 成藏条件

### 4.1 烃源条件高效

玛湖凹陷是准噶尔盆地典型的富烃凹陷, 烃源岩层系发育具有显著的多期性特征, 主要分布于下二叠统佳木河组、中二叠统风城组、上二叠统下乌尔禾组及中下侏罗统煤系地层, 其中风城组为最优质高效的烃源岩。玛湖凹陷三二段砂质碎屑流储层紧邻玛湖凹陷二叠系烃源岩, 风城组烃源岩厚度大, 超过 200 m, 分布面积约为  $5.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ <sup>[27]</sup>。烃源岩母质类型以 II 型干酪根为主, 镜质体反射率分布在 0.85%~1.16% 之间, 处于生油窗主带(成熟—高成熟演化阶段), 排油高峰期 of 早侏罗世—早白垩世<sup>[28-30]</sup>。玛湖凹陷二叠系烃源岩具有优越的形成条件, 油气资源丰富, 为玛南斜坡三二段砂质碎屑流油藏的发育提供优质高效的物资基础<sup>[31]</sup>。

### 4.2 储盖组合良好

玛南斜坡三二段发育辫状河三角洲供源型砂质碎屑流沉积, 构造坡折带为沉积物分配的关键地貌单元, 当上部的水道砂体堆积厚度超过临界坡度角承载力时, 触发递变式重力滑塌作用, 在坡折带下倾方向形成具有典型鲍玛序列的砂质碎屑流砂体。研究区三二段砂质碎屑流储层岩性主要为灰色细砂岩和粉砂质细砂岩, 分选中等, 颗粒磨圆中—差, 以次圆状为主。颗粒间以线接触、压嵌式泥质胶结为主, 胶结中等(见图 7(a))。储层孔隙度为 9.90%~27.80%, 平均为 18.52%; 渗透率为  $(0.04 \sim 1\ 040.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为  $28.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 为中孔隙度低渗透率储层。储集空间以剩余原生粒间孔为主(占比为 85.9%), 其次是粒间溶孔和粒内溶孔(见图 7(b-c))。孔喉结构参数显示分选因数为 1.8~3.2, 排驱压力为 0.05~0.62 MPa, 平均毛细管半径为 1.1~6.1  $\mu\text{m}$ , 为粗歪度, 中值压力高, 属中孔细喉特征的储层, 储集性能相对较好(见图 7(d))。

此外, 三三段发育一套稳定且平均厚度大于 30 m 的滨浅湖泥岩(见图 1(b)), 物性相对较差, 可形成良好的封堵条件。这种退积型扇体呈下部以砂质为主、上部以泥质为主的沉积特征, 垂向上形成优越的储盖组合, 为三二段砂质碎屑流砂体成藏提供必要的保存条件。

### 4.3 输导体系立体

玛湖环洼带断裂系统具有幕式演化特征, 海西—印支运动期(310~290 Ma), 形成 NW 向高角度右旋走滑断裂系; 印支—早燕山运动期(160~140 Ma), 发育 NE 向左行张扭断裂; 中燕山运动期(100~

80 Ma), 转为近 SN 向伸展正断裂。三者垂向上形成向深部收敛的“Y”型构造组合(交切角为  $50^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ), 揭示研究区经历古亚洲洋闭合(走滑体制)向太平洋板块俯冲(伸展体制)的构造体制转换过程。晚燕山运动期, 正断裂与走滑断裂相伴生的羽状断裂与早燕山运动期的张扭断裂沟通二叠系烃源岩(见图 8), 促使油气向浅层再运移并聚集成藏。深层走滑断裂作为油源优势通道, 中层张扭断裂调控横向分流, 浅层正断裂(圈闭匹配度  $>85\%$ )控制聚集成藏, 三者时空耦合形成“断—毯”复合输导系统。深、中、浅三期断裂配置和成藏要素匹配关系较好, 为油气运聚提供良好条件<sup>[32-34]</sup>, 油气能够源外成藏。

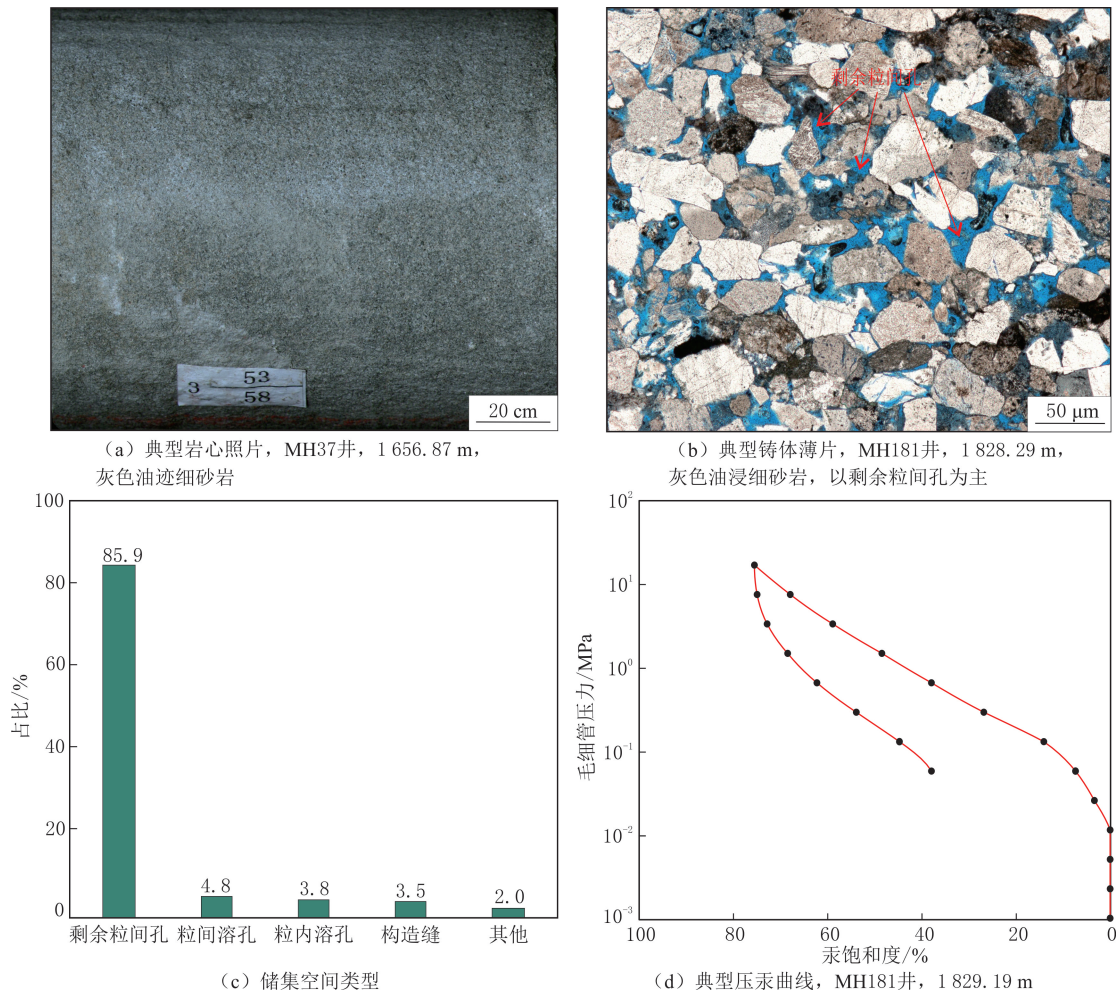


图 7 玛南斜坡三二段砂质碎屑流储层物性特征

Fig. 7 Comprehensive physical properties characteristic diagram of sandstone debris flow reservoir body in the second member of Sangonghe Formation on southern slope of Mahu Depression

#### 4.4 侧向封挡优越

岩性圈闭成藏有效性主要受控于侧向封堵体系的完整性, 储集体与围岩系统的接触面封闭能力是有效聚集烃类的核心地质要素<sup>[35]</sup>。玛南斜坡三二段沉积微相分析表明, 砂质碎屑流砂体在侧向上与滨浅湖泥岩相邻, 在垂向上呈“泥包砂”结构, 泥岩厚度适中, 颗粒较细, 物性较差, 具备优越的侧向封挡能力, 为油气聚集提供有利条件, 有助于形成有效的岩性圈闭。

随三角洲前缘有利相带岩性勘探开发, 玛湖凹陷南斜坡侏罗系三工河组砂质碎屑流型砂体成为玛南斜坡勘探目标, 勘探有利区面积达到  $75 \text{ km}^2$ 。对玛南斜坡三二段砂质碎屑流砂体部署 5 口井, 三二段钻遇砂质碎屑流砂体平均厚度达 7.6 m, 试油达到工业油流标准, 日产油为 6.5~15.8 t, 平均为 9.6 t, 表明坡折带之下砂质碎屑流砂体具有形成规模岩性油气藏的有利条件, 是下一步油气勘探有利方向。

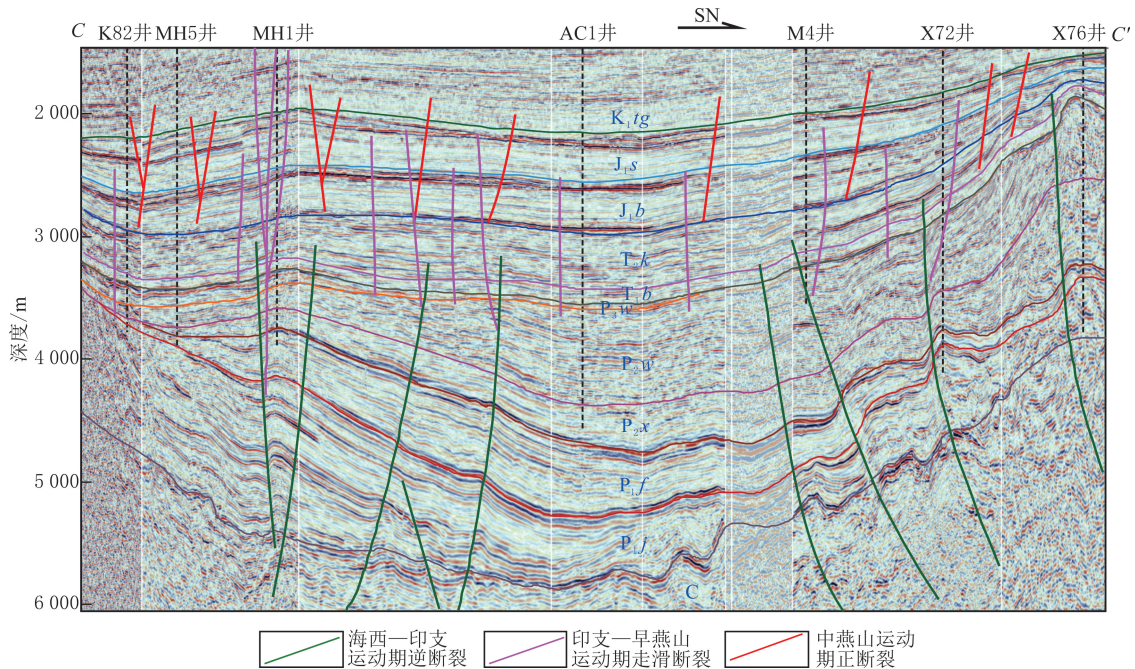


图8 玛湖凹陷多期断裂体系纵向解释剖面(剖面位置见图1(a))

Fig. 8 Multi-stage lengthways interpretation section on faults in Mahu Depression(section position as shown in fig. 1(a))

## 5 结论

(1)玛南斜坡侏罗系三工河组二段发育砂质碎屑流砂体,具有突变接触、漂浮泥砾和泥质撕裂屑等主要识别标志;粒度概率累积曲线特征大多为宽缓上拱的“两段式”形态,以跳跃组分为主;地震剖面为先强波谷、后强波峰组成的双相强反射结构,整体呈舌状孤立分布。

(2)玛南斜坡具有“盆大、水浅、远源、物源足”的特征,沉积模式呈受断裂坡折和沉积坡折物源体系影响下的构造转换带辫状河三角洲特点,砂质碎屑流砂体为三角洲前缘带水下分流河道砂体在一定触发机制下滑塌至湖盆深水区再沉积而形成。

(3)玛南斜坡三工河组二段砂质碎屑流砂体具有烃源岩条件高效、储盖组合良好、输导体系立体和封挡条件优越等成藏条件,为下一步有利勘探方向。

## 参考文献(References):

- [1] SHANMUGAM G, MOIOLA R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence(Pennsylvanian Jackfork Group), Quachita Mountains, Arkansas and Oklahoma[J]. AAPG Bulletin, 1995,79(5):672-695.
- [2] 邹才能,赵政璋,杨华,等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征:以鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1065-1075.  
ZOU Caineng, ZHAO Zhengzhang, YANG Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009,27(6):1065-1075.
- [3] 李相博,付金华,陈启林,等. 砂质碎屑流概念及其在鄂尔多斯盆地延长组深水沉积研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3): 286-294.  
LI Xiangbo, FU Jinhua, CHEN Qilin, et al. The concept of sandy debris flow and its application in the Yanchang Formation deep water sedimentation of the Ordos Basin[J]. Advances in Earth Science, 2011,26(3):286-294.
- [4] 王翔,高吉宏,庞玉东,等. 鄂尔多斯盆地 M34 区块侏罗系延 10 段砂质辫状河储层特征及控制因素[J]. 东北石油大学学报, 2024, 48(3):23-39.  
WANG Xiang, GAO Jihong, PANG Yudong, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Jurassic Yan 10 Member sandy braided river of M34 Block, Ordos Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(3):23-39.

- [5] 蒲宇新,李伟,罗顺社,等.鄂尔多斯盆地陇东地区长7油层组深水水道型重力流沉积特征及沉积模式[J].东北石油大学学报,2023,47(4):70-81.  
PU Yuxin, LI Wei, LUO Shunshu, et al. Sedimentary characteristics and sedimentary model of deepwater channel-induced gravity flow of Chang 7 oil layer group in Longdong Area of the Ordos Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023,47(4):70-81.
- [6] 李楠,李国辉,吴长江,等.坡折带控制下的砂质碎屑流对油气勘探的意义:以四川盆地上三叠统须家河组为例[J].四川地质学报,2014,34(4):505-509.  
LI Nan, LI Guohui, WU Changjiang, et al. The application of sandy debris flow under the control of slope break to oil-gas exploration [J]. Acta Geologica Sichuan, 2014,34(4):505-509.
- [7] 夏景生,刘晓涵,王政军,等.渤海湾盆地南堡凹陷西部东营组三段—沙河街组一段砂质碎屑流沉积特征及油气勘探意义[J].石油学报,2017,38(4):399-413.  
XIA Jingsheng, LIU Xiaohan, WANG Zhengjun, et al. Sedimentary characteristics of sandy debris flow in the 3rd member of Dongying Formation and the 1st member of Shahejie Formation of the Western Nanpu Sag, Bohai Bay Basin and its significance in hydrocarbon exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017,38(4):399-413.
- [8] 张磊岗,屈红军,陈硕,等.浅海砂质碎屑流沉积特征与模式:以莺歌海盆地东方1-1气田莺二段为例[J].地质科技通报,2021,40(6):140-150.  
ZHANG Leigang, QU Hongjun, CHEN Shuo, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow sea sandy debris flow: a case study of Ying II Member in the Dongfang 1-1 Gas Field, Yinggehai Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021,40(6):140-150.
- [9] 包汉勇,郭丽彬,葛涛元,等.江汉盆地潜江凹陷北部潜江组盐湖重力流沉积特征与模式[J].现代地质,2024,38(5):1291-1305.  
BAO Hanyong, GUO Libin, GE Taoyuan, et al. Characteristics and modeling of saline lake gravity flow deposition in the Qianjiang Formation, Northern Qianjiang Depression, Jianghan Basin[J]. Geoscience, 2024,38(5):1291-1305.
- [10] 肖子洋,黄传炎,谢通,等.砂质碎屑流典型特征及识别标志[J].特种油气藏,2016,23(2):45-49.  
XIAO Ziyang, HUANG Chuanyan, XIE Tong, et al. Typical characteristics and identification marks of sandy debris flow[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016,23(2):45-49.
- [11] 李聪,鲜本忠,王鹏宇,等.南堡凹陷东北部东二段重力流砂岩储层发育规律[J].地质科技通报,2023,42(2):159-169.  
LI Cong, XIAN Benzong, WANG Pengyu, et al. Development law of gravity flow sandstone reservoir in the second member of the Dongying Formation in the Northeastern Nanpu Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023,42(2):159-169.
- [12] 符勇,李忠诚,万谱,等.三角洲前缘滑塌型重力流沉积特征及控制因素:以松辽盆地大安地区青一段为例[J].岩性油气藏,2021,33(1):198-208.  
FU Yong, LI Zhongcheng, WAN Pu, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of slump gravity flow in delta front: a case study of Qing 1 Member in Da'an Area, Songliao Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021,33(1):198-208.
- [13] 吕奇奇,辛红刚,王林,等.鄂尔多斯盆地宁县地区三叠系延长组7段湖盆细粒重力流沉积类型、特征及模式[J].古地理学报,2023,25(4):823-840.  
LYU Qiqi, XIN Honggang, WANG Lin, et al. Sedimentary types, characteristics and model of lacustrine fine-grained gravity flow in the member 7 of Triassic Yanchang Formation in Ningxian Area, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2023,25(4):823-840.
- [14] 厚刚福,徐洋,孙靖,等.三角洲前缘—湖盆深水区沉积模式及意义:以准噶尔盆地盆1井西凹陷三工河组二段—砂组为例[J].石油学报,2019,40(10):1223-1232.  
HOU Gangfu, XU Yang, SUN Jing, et al. Sedimentary model from delta front to deep water area and its significance: a case study of the first sand group of member 2 of Sangonghe Formation in the well Pen-1 west sag, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(10):1223-1232.
- [15] 厚刚福,曾德龙,牛志杰,等.准噶尔盆地砂质碎屑流砂体新发现及其油气勘探意义[J].天然气工业,2020,40(11):41-49.  
HOU Gangfu, ZENG Delong, NIU Zhijie, et al. New discovery of sandy debris flow sandbody and its implications for oil and gas exploration in the Junggar Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020,40(11):41-49.
- [16] 孙靖,薛晶晶,厚刚福,等.湖盆凹陷区砂质碎屑流沉积特征与模式:以准噶尔盆地盆1井西凹陷侏罗系三工河组为例[J].中国矿业大学学报,2019,48(4):858-869.  
SUN Jing, XUE Jingjing, HOU Gangfu, et al. Sedimentary characteristics and model of sandy debris flow in depression area of lacustrine basin: a case study of the Jurassic Sangonghe Formation in the western well Pen-1 sag, Junggar Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019,48(4):858-869.
- [17] 孙靖,薛晶晶,费李莹,等.粗粒浅水三角洲沉积特征及模式:以准噶尔盆地莫北地区侏罗系三工河组为例[J].东北石油大学学报,2022,46(2):13-22.

- SUN Jing, XUE Jingjing, FEI Liying, et al. Sedimentary characteristics and model of coarse-grained shallow-water delta: a case study of Jurassic Sangonghe Formation in Mobei Area, Junggar Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(2): 13-22.
- [18] 费李莹,王仕莉,吴涛,等.坡折带对砂质碎屑流沉积的控制作用:以准噶尔盆地盆1井西凹陷及周缘侏罗系三工河组为例[J].油气地质与采收率,2020,27(2):26-34.
- FEI Liying, WANG Shili, WU Tao, et al. Control of slope break zone on sandy debris flow deposition: a case study of Jurassic Sangonghe Formation in west sag of well Pen-1 and its periphery in Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020,27(2):26-34.
- [19] 雷海艳,王剑,陈锐兵,等.准噶尔盆地盆1井西凹陷东斜坡下侏罗统三工河组二段油气成藏有利地质因素[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1052-1064.
- LEI Haiyan, WANG Jian, CHEN Ruibing, et al. Favorable geological factors for hydrocarbon accumulation in the second member of Sangonghe Formation of Low Jurassic in the east slop of western well Pen-1 sag in Junggar Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022,52(4):1052-1064.
- [20] 唐勇,郭文建,王霞田,等.玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J].新疆石油地质,2019,40(2):127-137.
- TANG Yong, GUO Wenjian, WANG Xiatian, et al. A new breakthrough in exploration of large conglomerate oil province in Mahu Sag and its implications[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019,40(2):127-137.
- [21] 支东明,唐勇,郑孟林,等.玛湖凹陷源上砾岩大油区形成分布与勘探实践[J].新疆石油地质,2018,39(1):1-9.
- ZHI Dongming, TANG Yong, ZHENG Menglin, et al. Discovery, distribution and exploration practice of large oil provinces of above-source conglomerate in Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018,39(1):1-9.
- [22] 雷德文,陈刚强,刘海磊,等.准噶尔盆地玛湖凹陷大油(气)区形成条件与勘探方向研究[J].地质学报,2017,91(7):1604-1619.
- LEI Dewen, CHEN Gangqiang, LIU Hailei, et al. Study on the forming conditions and exploration fields of the Mahu giant oil(gas) province, Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017,91(7):1604-1619.
- [23] 王然,郑孟林,杨森,等.玛南斜坡区上乌尔禾组弱胶结砂砾岩储层特征及控制因素[J].特种油气藏,2022,29(1):23-30.
- WANG Ran, ZHENG Menglin, YANG Sen, et al. Characteristics and controlling factors of weakly cemented glutenite reservoir in Permian Upper Urho Formation, south slope of Mahu Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022,29(1):23-30.
- [24] 王辉,侯文锋,李婷,等.前陆盆地坡折带对沉积相的控制作用:以准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷三工河组为例[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(3):1136-1145.
- WANG Hui, HOU Wenfeng, LI Ting, et al. Control of slope break on sedimentary facies in foreland basin: a case study of Sangonghe Formation in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2022,53(3):1136-1145.
- [25] 王辉,武鑫,李婷,等.准噶尔盆地西北缘侏罗系三工河组沉积特征[J].新疆地质,2020,38(1):66-70.
- WANG Hui, WU Xin, LI Ting, et al. Sedimentary characteristics Sangonghe Formation of Jurassic in northwest margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2020,38(1):66-70.
- [26] 邱争科,吴让彬,李武,等.玛湖凹陷西北缘侏罗系三工河组油藏特征[J].新疆地质,2020,38(3):378-382.
- QIU Zhengke, WU Rangbin, LI Wu, et al. Reservoir characteristics of Jurassic Sangonghe Formation in northwest margin of Mahu Depression[J]. Xinjiang Geology, 2020,38(3):378-382.
- [27] 李晓慧,姜振学,黄立良,等.玛湖凹陷风城组页岩油富集主控因素及有利富集层段[J].东北石油大学学报,2022,46(2):33-44.
- LI Xiaohui, JIANG Zhenxue, HUANG Liliang, et al. Main controlling factors of shale oil enrichment and optimization of Fengcheng Formation in Mahu Sag[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(2):33-44.
- [28] 王小军,王婷婷,曹剑.玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩基本特征及其高效生烃[J].新疆石油地质,2018,39(1):9-15.
- WANG Xiaojun, WANG Tingting, CAO Jian. Basic characteristics and highly efficient hydrocarbon generation of alkaline-lacustrine source rocks in Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018,39(1):9-15.
- [29] 支东明,曹剑,向宝力,等.玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩生烃机理及资源量新认识[J].新疆石油地质,2016,37(5):499-506.
- ZHI Dongming, CAO Jian, XIANG Baoli, et al. Fengcheng alkaline lacustrine source rocks of Lower Permian in Mahu Sag in Junggar Basin: hydrocarbon generation mechanism and petroleum resources reestimation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016,37(5): 499-506.
- [30] 何晋译,冷筠滢,李志明,等.不同岩相泥页岩生烃能力与含油性特征:以玛湖凹陷风城组玛页1井为例[J].东北石油大学学报,2025,49(1):1-17.
- HE Jinyi, LENG Junying, LI Zhiming, et al. Hydrocarbon generation capacity and oil-bearing properties of shale with different lithofacies: a case study of well Maye1 in Fengcheng Formation, Mahu Sag[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2025,49(1): 1-17.