

陆相断陷湖盆 复合沉积体系储层成岩作用及发育模式 ——以银额盆地拐子湖凹陷下白垩统 巴音戈壁组为例

陈思芮^{1,2}, 王斌^{1,2}, 王德波³, 单帅强^{1,2}, 万晶³, 王继远^{1,2}, 傅锚^{1,2},
刘建平⁴, 周江羽⁵, 杜彦熹⁴

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126; 3. 中国石化中原油田分公司 勘探开发研究院, 河南 濮阳 457000; 4. 重庆科技大学 石油与天然气工程学院, 重庆 401331; 5. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北 武汉 438300)

摘要:以银额盆地拐子湖凹陷下白垩统巴音戈壁组碎屑岩储层为例,采用岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜和流体包裹体测温等方法,研究拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩成岩作用与储层发育模式。结果表明:研究区发育三角洲—重力流复合沉积体系,其中,三角洲沉积体系发育泥石流与牵引流成因砂岩岩相,重力流沉积体系发育滑动—滑塌、砂质碎屑流及浊流成因砂岩岩相,不同岩相对应的储层成岩相差异显著。三角洲沉积体系中,以泥石流成因为主的储层成岩体系封闭性强,早期有机酸溶解产生的次生孔隙极易被后期方解石充填,导致方解石强胶结成岩相较为发育;以牵引流成因为主的储层物质循环能力强,次生孔隙不易被后期钙质成分充填,多以中等压实—强溶蚀成岩相为主,储层质量好。重力流沉积体系中,靠近斜坡和断层部位的浊积体易发生滑动—滑塌,导致碎屑颗粒与塑性泥质组分高度混合,整体抗压能力差,发育强压实和假杂基塑性变形充填成岩相,储层质量差;远离斜坡和断层部位的浊积体以砂质碎屑流、浊流成因为主,砂质碎屑流发育中等压实—强溶蚀成岩相,储层物性最好;浊流成因砂体的长英质颗粒边缘发育绿泥石包壳且颗粒呈带状集中分布,能够有效提升储层整体的抗压实能力,泥质杂基难入侵砂质层内部,储层物性仅次于砂质碎屑流的。该结果为陆相断陷湖盆复合沉积体系碎屑岩油气勘探提供支持。

关键词:陆相断陷湖盆;沉积体系;成岩作用;发育模式;碎屑岩储层;巴音戈壁组;下白垩统;拐子湖凹陷;银额盆地

中图分类号:TE122.2;P618.13 文献标识码:A 文章编号:2095-4107(2026)01-0063-16

0 引言

碎屑岩油气藏是常规油气勘探的核心领域之一,储层成因机制与分布规律是陆相断陷湖盆碎屑岩油气勘探的核心研究内容^[1-2]。近年来,对陆相断陷湖盆优质碎屑岩储层发育规律开展研究,认为沉积环境是优质储层发育的物质基础^[3-5],而叠加在沉积作用上的成岩演化过程是决定储层品质的关键^[6-8],提出陡坡带中厚层砂体、洼陷带断层切割型中厚层砂体及孤立状中厚层砂体是该类湖盆的有利碎屑岩储集体^[9]。随勘探程度的逐步精细化,发现陆相断陷湖盆砂体受盆地结构、断裂活动、沉降速率、沉积物输入量及气候变化等因素的综合控制^[10-11]。不同构造部位的沉积体系存在显著差异,各沉积体系内部砂体的成因类型、厚度规模、颗粒粒径、分选性和杂基含量表现出明显的分异性^[12-13]。这些差异直接或间接加剧储层在物质组成、储集空间、孔隙结构及成岩作用方面的非均质性,对有利储层分布预测与区带优选带来挑战^[9]。细化不同沉积体系、不同成因砂体的储层成因机制分析,深化优质储层分布规律研究,成为陆相断陷湖盆碎屑岩油气勘探领域的重要研究方向。

银额盆地位于中国内蒙古自治区中西部,属于典型的陆相断陷湖盆^[13]。拐子湖凹陷为银额盆地的次

收稿日期:2025-09-09;编辑:朱秀杰

基金项目:国家自然科学基金项目(42202170);中国石化科技攻关项目(P23228);中国石化石油勘探开发研究院项目(CY2024-03)

作者简介:陈思芮(1994—),男,博士,助理研究员,主要从事储层地质学及沉积学方面的研究。

级构造单元,具有断一坳双层构造结构^[14]。拐子湖凹陷巴音戈壁组的碎屑岩储层获得高产工业油气流,展现良好的勘探前景^[15-16]。巴音戈壁组沉积时期,拐子湖凹陷整体呈“东断西超”的箕状断陷格局,在湿润气候环境下发育多种沉积体系^[17-18]。人们研究巴音戈壁组构造演化与沉积充填样式,明确构造活动对沉积响应规律的控制效应^[15, 19]。有关巴音戈壁组碎屑岩储层的研究较少,主要以孔隙结构的定性—定量表征为主^[20],缺乏以复合沉积体系为约束的碎屑岩成岩—成储过程分析,对不同沉积体系的储层演化过程差异认识不足,致使储层质量控制因素不明及分布发育规律不清。

以银额盆地拐子湖凹陷下白垩统巴音戈壁组碎屑岩储层为研究对象,根据岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜观察、X线衍射分析、流体包裹体测温及物性测试数据,结合埋藏史—热演化史,进行岩石学、储集空间、成岩序列及孔隙演化等方面研究,分析不同沉积体系碎屑岩储层孔隙演化过程的差异,探讨碎屑岩储层质量的控制因素,建立以陆相断陷湖盆复合沉积体系为约束的碎屑岩储层发育模式,为具有类似地质背景的含油气盆地碎屑岩储层评价提供指导。

1 区域地质概况

银额盆地位于哈萨克斯坦板块、塔里木板块、西伯利亚板块和华北板块的结合部位,属于典型的中新生代断拗叠合型含油气盆地^[21-22]。拐子湖凹陷位于银额盆地西北部(见图 1(a-b)),经历多期的构造活动^[23]。断陷期对应巴音戈壁组至苏红图组沉积时期,研究区具有“东断西超”的半地堑格局;苏红图组至银根组沉积时期,拐子湖凹陷进入快速裂陷及断拗转换期,边界断层的活动性逐渐减弱;乌兰苏海组沉积时期,构造活动整体进入拗陷期(见图 1(c))。新生代以来^[24],拐子湖凹陷长期处于缓慢热沉降状态。

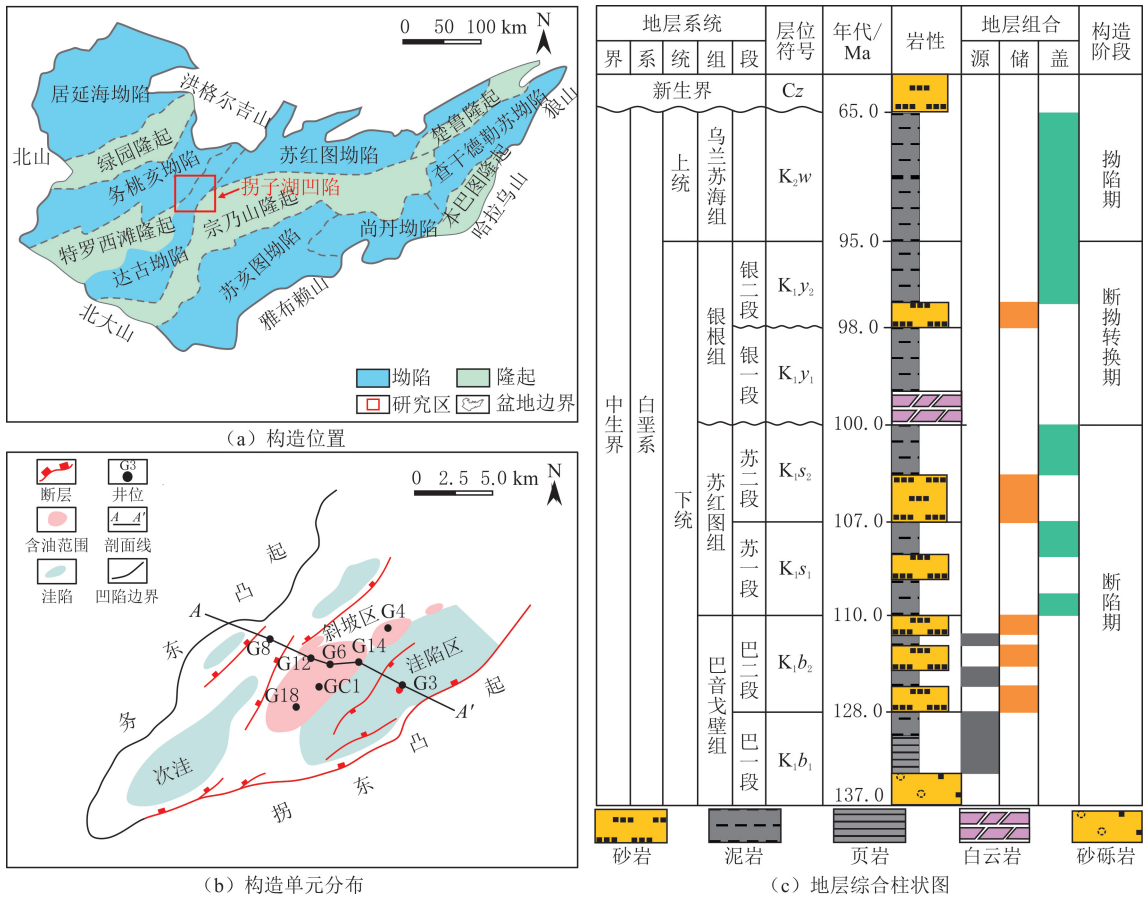


图 1 银额盆地拐子湖凹陷构造位置、构造单元分布及地层综合柱状图
 Fig. 1 Tectonic location, tectonic units distribution and comprehensive stratigraphy column in Guazihu Depression, Yin'e Basin

巴音戈壁组是研究区的高产油气层段,自下而上分为巴音戈壁组一段(巴一段)和二段(巴二段)(见图 1(c))。巴一段沉积时期,气候整体湿润,碎屑岩储层主要发育湖盆边缘的扇三角洲沉积体系^[17-18]。巴二段沉积时期,边界断层活动性的增强造成湖盆地貌差异增大,盆地边缘扇三角洲前缘砂体发生垮塌并被搬运至半深湖—深湖相,成为规模性的重力流成因砂体(见图 2)^[18]。

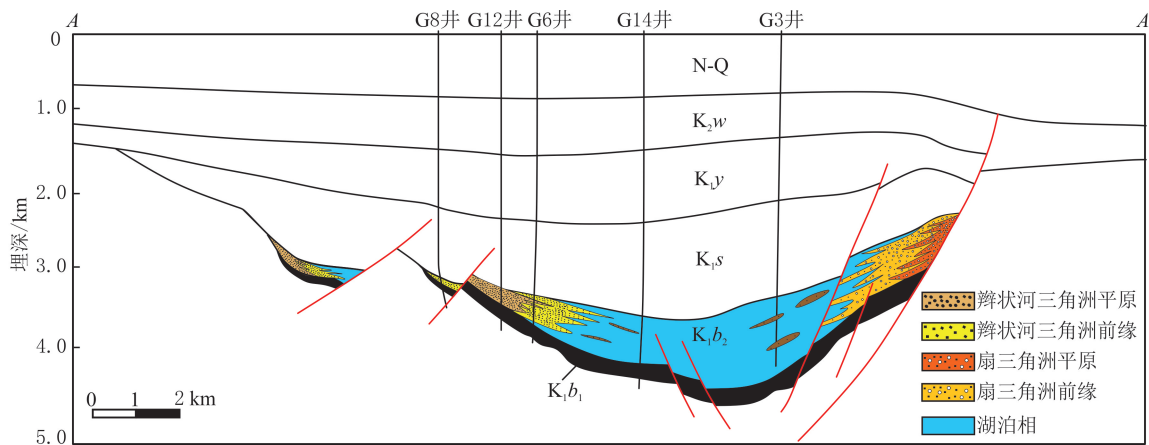


图 2 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组沉积相分布(剖面位置见图 1(b))

Fig. 2 Sedimentary facies distribution in Bayingebi Formation, Guazihu Depression, Yin'e Basin(the section position is shown in Fig. 1(b))

2 储层特征

2.1 岩相学特征

拐子湖凹陷巴音戈壁组沉积时期,主要发育三角洲与湖相重力流沉积体系(见图 3(a))。三角洲沉积体系主要发育三角洲平原与三角洲前缘亚相,三角洲平原亚相发育辫状水道,以泥石流成因的杂基支撑含砾中粗砂岩岩相(S1)为主,分选磨圆差,杂基含量高(见图 3(b));三角洲前缘亚相包括水下分流河道和河口坝沉积单元,以牵引流成因的颗粒支撑中粗砂岩岩相(S2)为主,发育典型的平行层理和交错层理,杂基含量较低(见图 3(c))。

在湖相重力流沉积体系中,根据钻井岩心观察资料,识别 3 种典型岩相,包括滑动—滑塌成因的块状泥质粉细砂岩岩相(S3),可见明显的滑塌泄水沉积构造(见图 3(d));混合事件层成因的块状粉砂岩岩相(S4),主体由砂质碎屑流成因的块状含泥质撕裂屑粉砂岩构成,局部可见浊流成因的泥质粉砂岩(见图 3(e));纯浊流成因的砂泥互层泥质粉砂岩岩相(S5),局部可见爬升波纹层理(见图 3(f-g))。

2.2 岩石学特征

巴音戈壁组储层以长石岩屑砂岩为主(见图 4)。石英颗粒体积分数为 28.0%~74.0%,平均为 46.0%,在骨架颗粒中占比最高。长石颗粒体积分数介于 5.0%~43.0%,平均为 25.0%;岩屑体积分数介于 2.0%~65.0%,平均为 29.0%(见图 4)。巴音戈壁组变质岩岩屑体积分数为 70.0%,以石英岩屑为主。岩浆岩和沉积岩屑体积分数较低,分别为 18.0%和 12.0%(见图 4)。全岩 X 线衍射分析显示,巴音戈壁组储层成岩矿物主要为方解石与黏土矿物,其中,方解石体积分数介于 0.2%~35.0%,平均为 7.4%,占比为 35.0%;自生黏土矿物体积分数为 2.0%~5.0%,平均为 4.1%,占比为 58.7%。

2.3 储层物性与储集空间

2.3.1 储层物性

巴音戈壁组碎屑岩储层孔隙度为 0.3%~16.7%,平均为 7.5%;渗透率为(0.005~94.800)×10⁻³ μm²,平均为 3.230×10⁻³ μm²。参照碎屑岩储层划分标准,巴音戈壁组碎屑岩储层物性以低孔—低渗为特征,局部为中孔—中渗(见图 5)。不同沉积体系的储层物性具有明显差别,其中三角洲沉积体系的储层物性整体优于重力流沉积体系的。不同沉积体系内部的储层物性具有较强的非均质性,在三角洲沉积体系中,S2 岩相的孔隙度为 3.7%~16.7%,平均为 12.6%,明显优于 S1 岩相(孔隙度为 0.4%~15.7%,

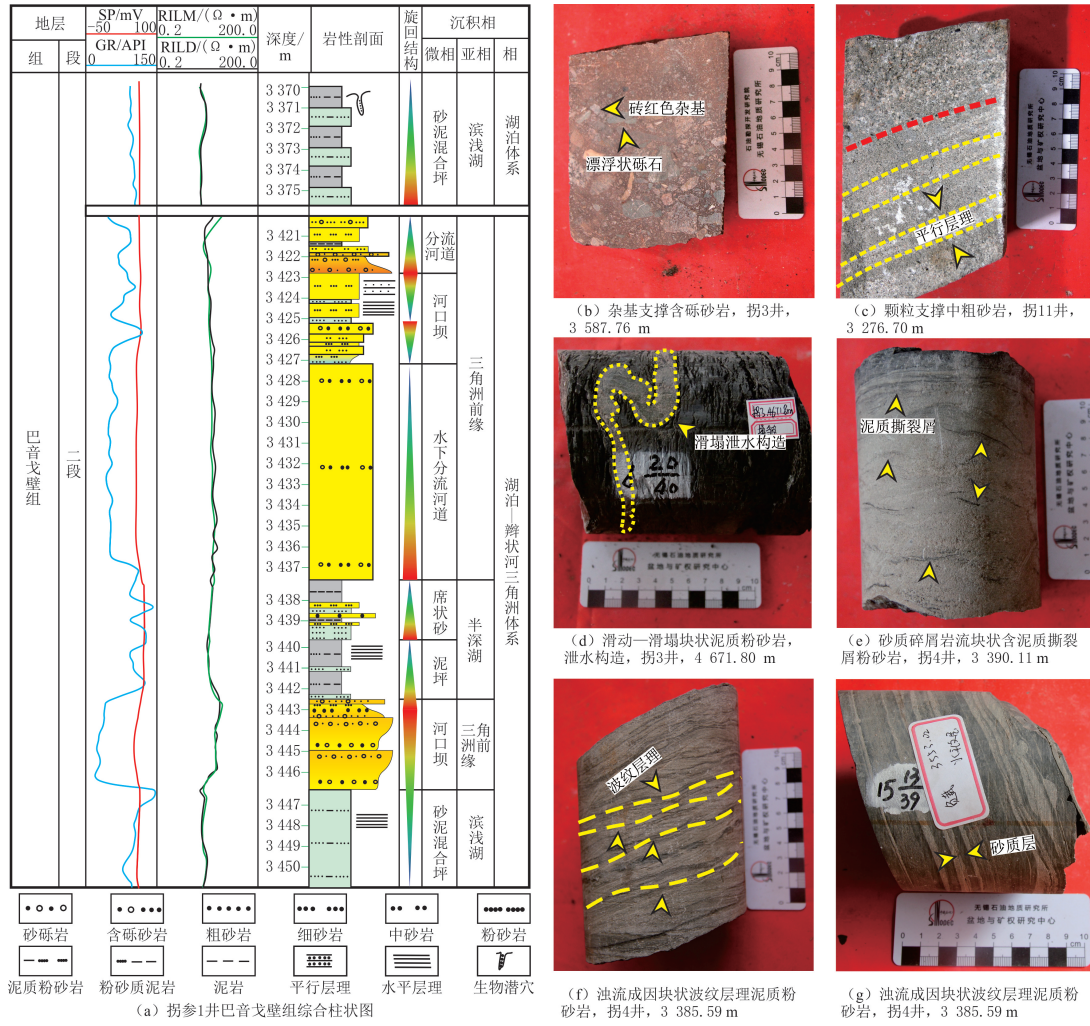


图3 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组沉积单元与岩相类型

Fig. 3 Main sedimentary units and lithofacies types in Baiyegobi Formation, Guazihu Depression, Yin'e Basin

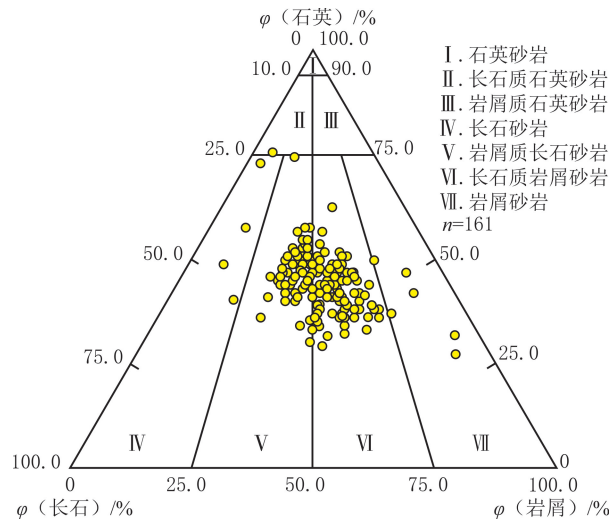


图4 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组砂岩岩石组分三端元图

Fig. 4 Ternary diagram of sandstone rock in Baiyegobi Formation, Guazihu Depression, Yin'e Basin

平均为 5.8%)的;在重力流沉积体系中,S4 岩相的孔隙度为 8.1%~12.6%,平均为 10.2%,为最好岩相,其次为 S5 岩相的,孔隙度为 4.1%~7.9%,平均为 5.6%,S3 岩相的物性最差,孔隙度为 0.4%~3.9%,平均为 2.6%。

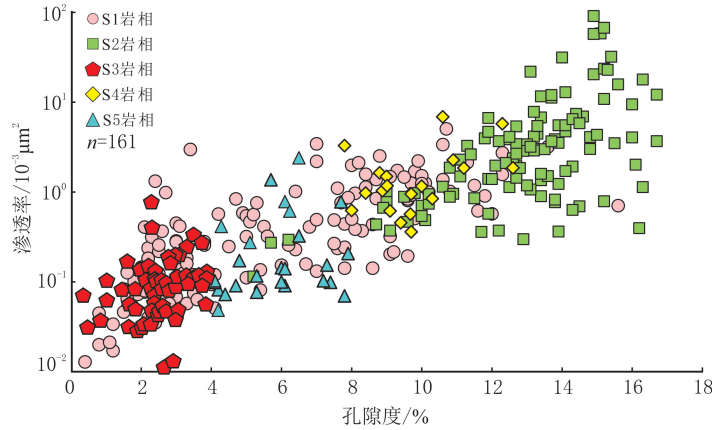


图 5 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组岩相孔隙度和渗透率分布特征
Fig. 5 Distribution characteristics of porosity and permeability in different lithofacies of Bayingebi Formation, Guazihu Depression, Yin'e Basin

2.3.2 储集空间

研究区孔隙度和渗透率之间具有良好的正相关关系,表明巴音戈壁组碎屑岩储层属于典型的孔隙型储层,孔隙对碎屑岩储层渗流能力的影响占主导地位,其次为碎屑颗粒微裂缝。镜下观察结果显示,原生孔隙与次生孔隙是巴音戈壁组碎屑岩的重要储集空间,其次为颗粒微裂缝(见图 6(a)),发育在三角洲和重力流沉积体系中。原生孔隙的形态表现规则,部分原生孔隙边缘发育明显的绿泥石包壳,在总孔隙中占比为 57.0%(见图 6(a-c))。次生孔隙包括粒内溶孔与铸模孔,在总孔隙中占比为 30.0%(见图 6(a、d-e))。微裂缝主要发育于颗粒内部,占比为 13.0%(见图 6(a、f-g))。

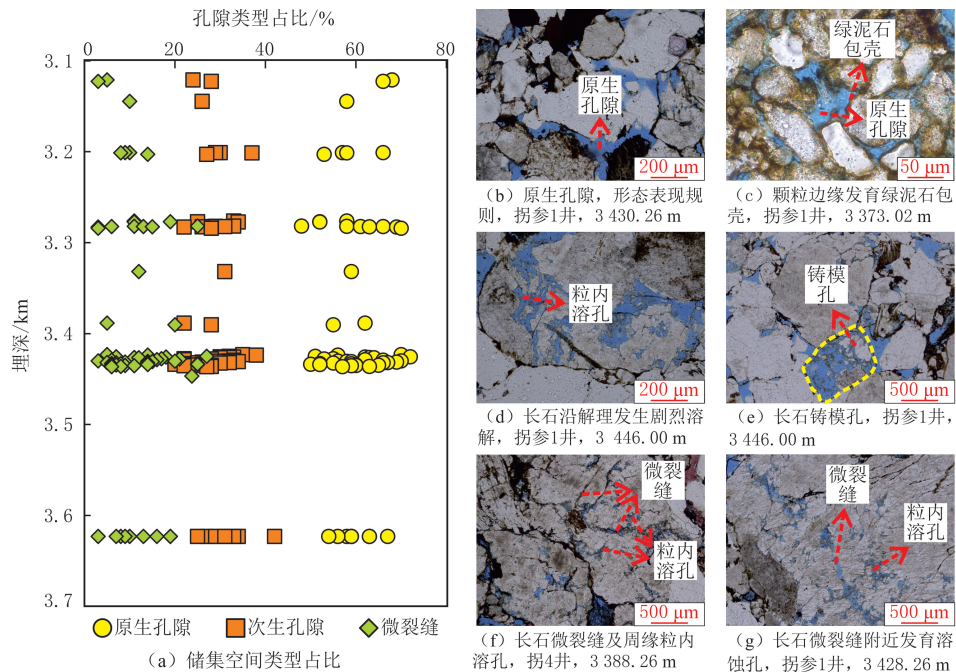


图 6 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层储集空间类型与特征
Fig. 6 Types and characteristics of reservoir space in clastic reservoirs of Bayingebi Formation, Guazihu Depression, Yin'e Basin

3 成岩作用与演化序列

3.1 成岩作用类型

成岩作用是影响碎屑岩储层质量的重要因素,厘定成岩作用类型、特征及发育期次,对探讨陆相断陷湖盆碎屑岩成岩—成储过程具有重要意义^[25-27]。基于岩石薄片与扫描电镜观察资料,拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层成岩作用包括压实、胶结和溶蚀作用。

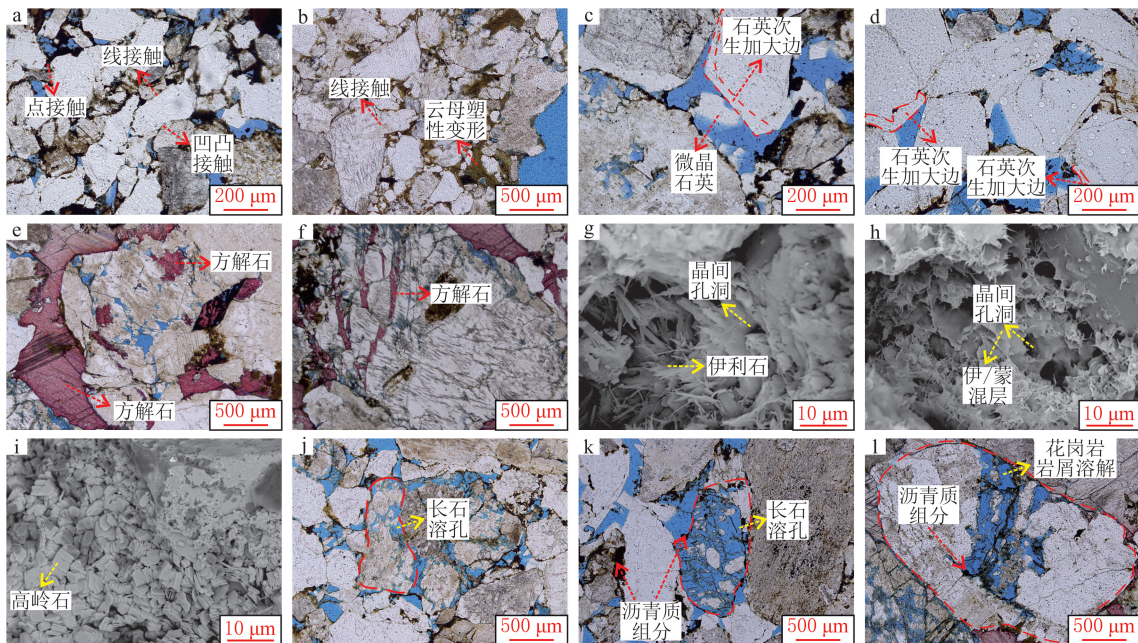
3.1.1 压实作用

压实作用对碎屑岩原生孔隙的破坏程度最明显。拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层埋深介于3.0~5.0 km,碎屑颗粒间存在明显压实改造痕迹,表现为骨架颗粒的相互挤压和塑性物质的形貌变化(见图7(a-b)),整体压实强度中等,其中,点—线接触占比为70.0%,线接触和凹凸接触占比为21.0%,点接触占比为9.0%。

3.1.2 胶结作用

处于过饱和状态下的成岩流体不断析出各种自生成岩矿物,占据孔隙喉道,加剧碎屑岩储层的致密化。巴音戈壁组碎屑岩储层的胶结类型包括硅质胶结、碳酸盐胶结及自生黏土矿物胶结。

(1)硅质胶结。硅质胶结物在巴音戈壁组碎屑岩储层中普遍发育,体积分数介于0.7%~10.1%,平均为3.9%。硅质胶结物类型以微晶石英和石英次生加大边为主,其中,微晶石英常以填隙物形式充填原生粒间孔,形成时间多晚于石英次生加大边的(见图7(c));石英次生加大边主要环绕石英颗粒生长,“尘线”是识别关键标志(见图7(d))。石英次生加大边的原生盐水包裹体均一温度为90~100℃(见图8(a-b)),结合埋藏史—热演化史,确定形成时间为距今110~109 Ma(见图9)。



(a) 碎屑颗粒以线接触、凹凸接触为主,拐4井,3 122.88 m; (b) 云母发生明显塑性形变,压实作用强,拐4井,3 122.88 m; (c) 石英次生加大边环绕颗粒生长,微晶石英分布在石英次生加大边之后,拐参1井,3 446.00 m; (d) 石英次生加大边阻塞孔隙喉道,拐参1井,3 446.00 m; (e) 方解石充填原生孔隙及次生粒内溶孔,拐参1井,3 435.66 m; (f) 方解石充填颗粒微裂缝,拐参1井,3 435.66 m; (g) 丝缕状伊利石,发育晶间孔,拐4井,3 384.25 m; (h) 蜂窝状伊/蒙混层,发育晶间孔,拐4井,3 386.31 m; (i) 蠕虫状高岭石充填原生孔隙,拐4井,3 385.12 m; (j) 长石沿解理发生剧烈溶解,拐参1井,3 446.00 m; (k) 长石铸模孔,拐参1井,3 446.00 m; (l) 花岗岩岩屑被选择性溶蚀,拐参1井,3 428.26 m

图7 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层成岩作用特征

Fig. 7 Diagenetic characteristics of clastic reservoirs in Bayingebi Formation, Guaizihu Depression, Yin'e Basin

(2)碳酸盐胶结。巴音戈壁组碎屑岩储层的碳酸盐胶结物以方解石为主,其他碳酸盐胶结物的发育程度较低。方解石主要以孔隙充填的形式占据颗粒间原生孔隙,部分方解石充填粒内溶孔或颗粒微裂缝(见图7(e-f))。巴音戈壁组方解石的原生盐水包裹体均一温度为120~130℃(见图8(c-d));结合埋藏

史—热演化史,方解石胶结物形成于距今 73~70 Ma(见图 9),时间晚于储层自生硅质胶结物的。

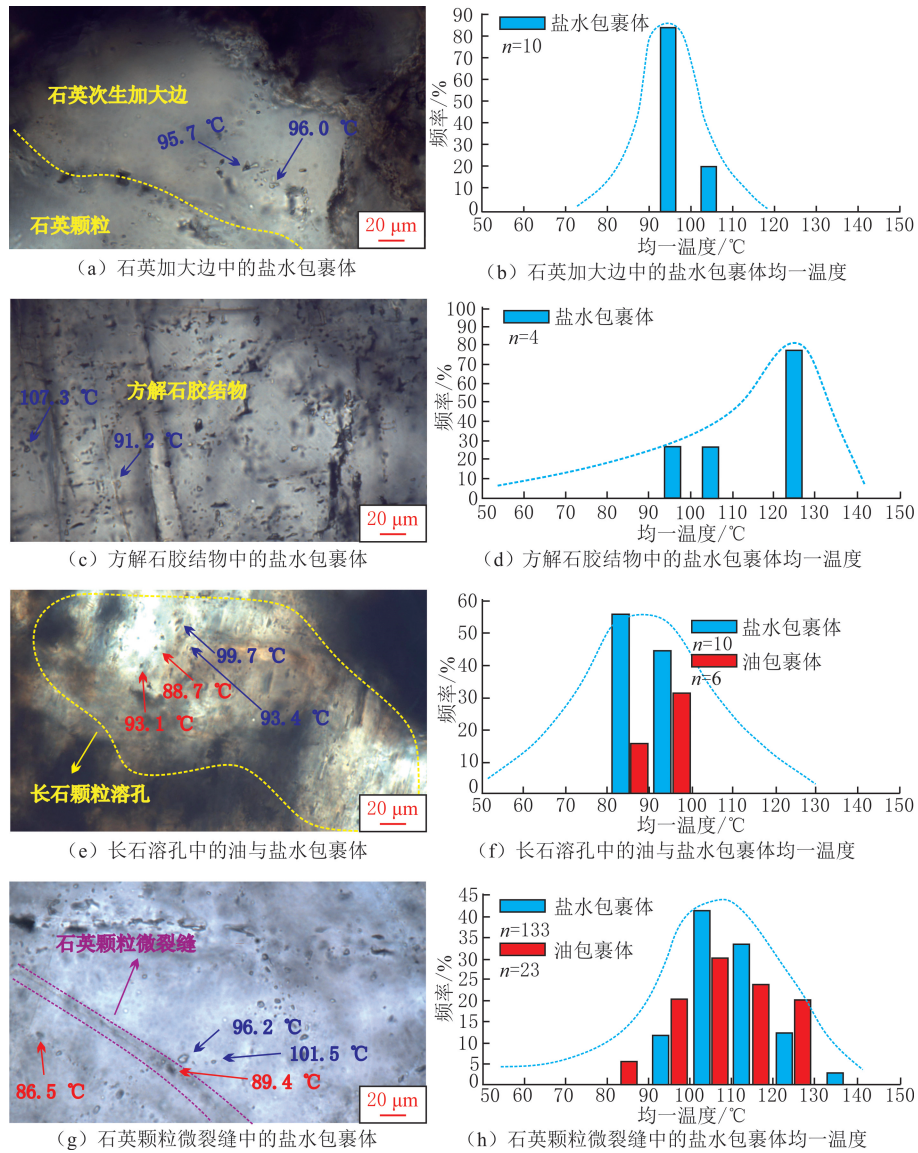


图 8 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层流体包裹体均一温度分布特征
Fig. 8 Distribution characteristics of homogenization temperatures of fluid inclusions in clastic reservoirs of Bayingebi Formation, Guaizihu Depression, Yin'e Basin

(3)黏土矿物胶结。巴音戈壁组黏土矿物由伊利石、伊/蒙混层、高岭石和绿泥石组成。伊利石具有“毛发状”特点,平均体积分数为 45.8%;伊/蒙混层为典型“蜂窝状”特征,平均体积分数为 29.2%;绿泥石主要赋存于碎屑颗粒的边缘,平均体积分数为 18.1%;高岭石常呈“蠕虫状”,平均体积分数为 6.9%(见图 7(g-i))。

3.1.3 溶蚀作用

巴音戈壁组碎屑岩溶蚀对象主要为长石颗粒,可见斜长石被强烈溶解并产生大量粒内溶孔及铸模孔;其次为花岗岩岩屑,可见花岗岩岩屑的长石质组分被选择性溶解(见图 7(j-l))。在次生溶孔成因上,由于巴音戈壁组过早进入深埋阶段(见图 9),导致大气淡水对溶蚀孔隙发育的贡献不大。有机酸是控制储层次生孔隙发育的主要因素,可见大量粒内溶孔与沥青质组分伴生(见图 7(k-l)),指示颗粒在油气充注前遭受有机酸的强烈溶蚀。

长石溶孔附近与油包裹体伴生的盐水包裹体均一温度为 80~100 °C(见图 8(e-f));结合埋藏史—热演化史,巴音戈壁组有机酸和油气充注主要发生于距今 110~108 Ma(见图 9),与溶蚀作用发生时间接

近。石英颗粒微裂缝中与油包裹体伴生的盐水包裹体均一温度为 100~110 °C(见图 8(g-h)),指示微裂缝开启与有机酸充注同属一个时期,有利于有机酸在储层中的运移,提高对不稳定矿物的溶蚀效率。

3.2 成岩演化序列

基于矿物交代一切割关系及包裹体测温,恢复拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩成岩演化过程,建立完整成岩演化序列。以埋藏史—热演化为约束,巴音戈壁组碎屑岩储层经历渐进深埋、快速深埋、构造抬升和缓慢深埋 4 个阶段(见图 9)。

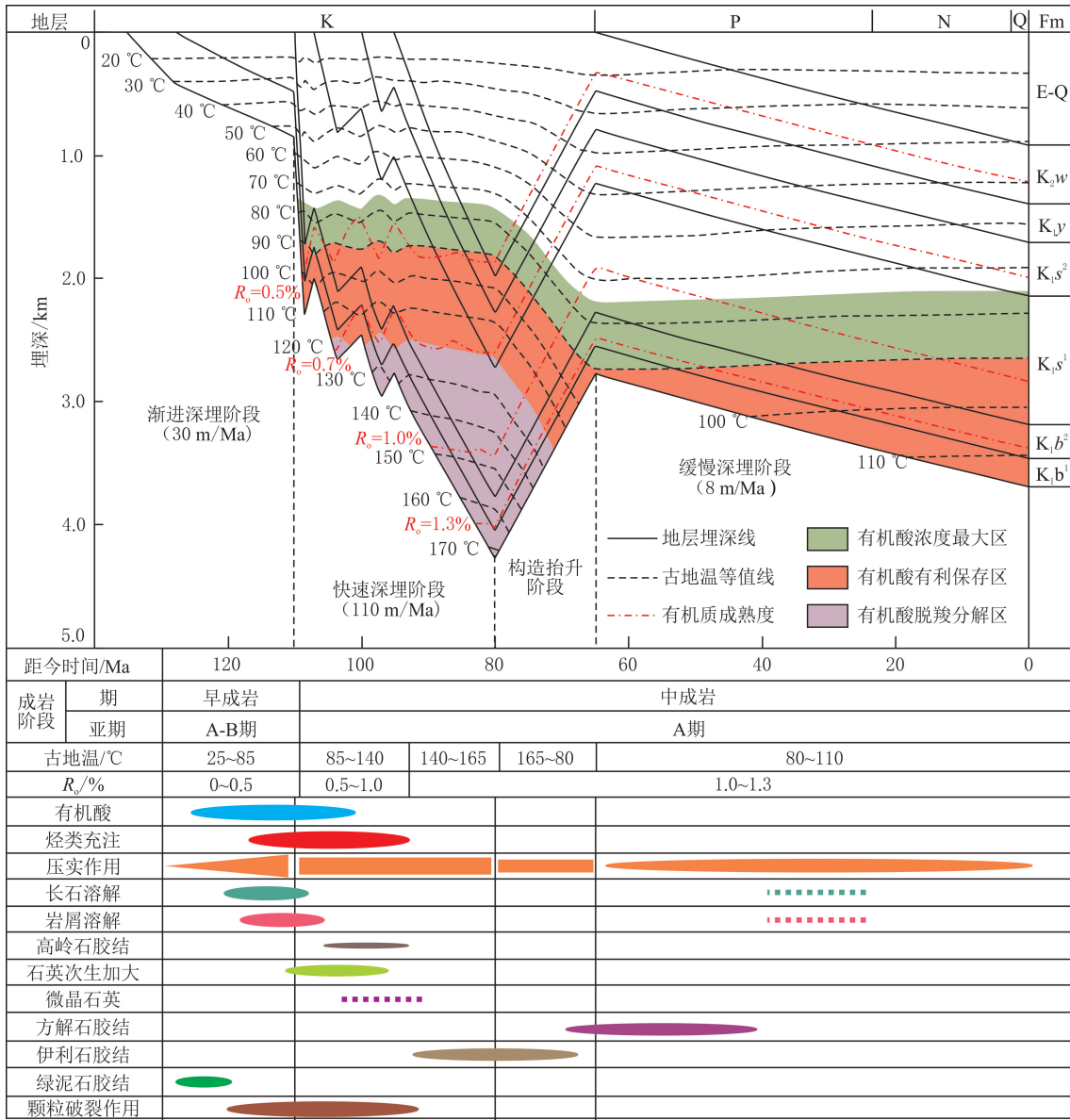


图 9 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层成岩演化序列

Fig. 9 Diagenetic sequence of clastic reservoirs in Bayingebi Formation, Guaizihu Depression, Yin'e Basin

(1) 渐进深埋阶段。巴音戈壁组以约 30 m/Ma 的埋藏速率脱离大气淡水的影响,早成岩期的大气淡水溶蚀作用微弱,储层以机械压实作用减孔为主,在部分沉积过程中,附着在颗粒表面的绿泥石包壳发挥抵抗机械压实作用。

(2) 快速深埋阶段。巴音戈壁组以 110 m/Ma 的埋藏速率沉降于地下 4.0 km,地层温度迅速升高,加速烃源岩的成熟进程。距今 110~108 Ma,烃源岩开始释放规模性有机酸,进入储层内部并溶解长石及花岗岩岩屑,既是巴音戈壁组碎屑岩储层的关键增孔期,也是硅质胶结物、高岭石等溶蚀副产物的重要沉淀

期。此外,高埋藏速率有利于孔隙内部保持高流体压力,促进微裂缝发育。微裂缝的开启与有机酸、油气充注同属一个时期,强化有机酸对不稳定组分的溶解能力,大量次生溶孔与微裂缝呈明显伴生关系。

(3)构造抬升阶段。随埋深的继续增加和地层温度的继续升高,有机酸由受保护状态转为被分解状态。快速深埋阶段晚期到构造抬升阶段早期,储层成岩环境逐渐由酸性向碱性过渡。方解石开始在原生粒间孔、次生溶孔及微裂缝中大量沉淀,蒙脱石与孔隙水中的 K^+ 结合而形成伊利石、伊/蒙混层等黏土矿物。

(4)缓慢深埋阶段。构造抬升阶段末期,随埋深的继续降低,地层温度重新回到有机酸的适宜保存区间。由于后期缺乏油气充注,有机酸数量供给不足,缓慢深埋阶段以长石、花岗岩岩屑的微弱溶蚀为主。

4 成岩相类型及孔隙演化

拐子湖凹陷巴音戈壁组沉积时期,发育三角洲—重力流复合沉积体系,碎屑沉积物对应的沉积单元多样,岩相类型复杂。受原始物质组成与岩石结构的影响,不同沉积单元及岩相的碎屑沉积物经历的成岩事件及强度存在显著差异^[28-30],成岩—成储演化路径明显不同,造成复合沉积体系背景的碎屑岩储层质量在时空分布上具有强烈非均质性。

成岩相是成岩环境、成岩事件及成岩产物的综合体现,能够直接反映储层的成岩作用强度并间接指示储层的物性响应特征^[31-33],常用于强非均质性碎屑岩储层的成因机制分析与分布规律研究。

4.1 成岩相类型及特征

根据拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层对应的主要沉积体系,以及岩相类型、关键成岩事件强度及主体储集空间的发育程度,共划分 4 种典型的成岩相,包括强压实成岩相、假杂基塑性变形充填成岩相、方解石强胶结成岩相和中等压实—强溶蚀成岩相。

4.1.1 强压实成岩相

强压实成岩相主要以机械压实作用为主,储层成分成熟度低,碎屑颗粒以线接触和凹凸接触为主,整体呈强压实作用。化学胶结及溶解作用相对微弱,镜下可见少部分粒间孔隙被方解石和自生硅质胶结物充填(见图 10(a-c))。强压实成岩相主要发育于湖相重力流沉积体系的滑动—滑塌成因砂体(S3 岩相)(见图 3(d))。

4.1.2 假杂基塑性变形充填成岩相

假杂基塑性变形充填成岩相,主要分布于湖相重力流沉积体系的滑动—滑塌成因砂体(S3 岩相)和浊流成因砂体(S5 岩相)(见图 3(d-e))。碎屑颗粒以点—线接触为主,压实作用相对中等(见图 10(d-e))。由于三角洲前缘砂体在发生滑动—滑塌及继续向湖盆中心搬运的过程中裹挟泥质杂基,导致储层内部的杂基含量较高。泥质杂基在机械压实作用下极易发生塑性变形并嵌入周围颗粒间的原生孔隙,形成特殊的杂基充填胶结(见图 10(d-f))。

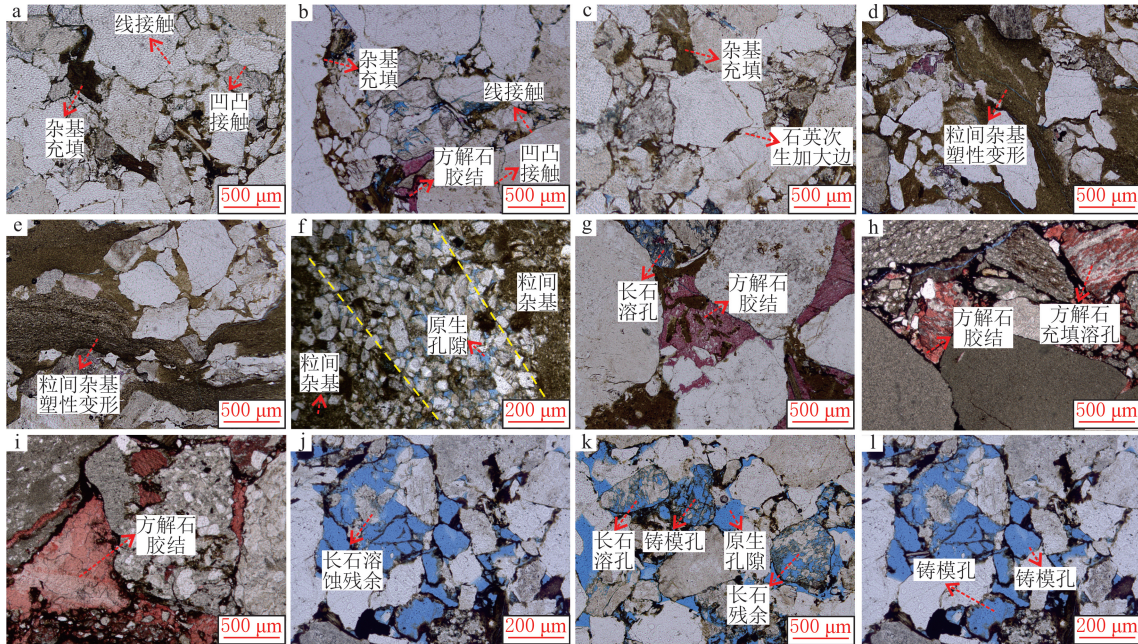
4.1.3 方解石强胶结成岩相

方解石强胶结成岩相主要发育于三角洲沉积体系的砂体。在三角洲前缘亚相中,成岩相发育于以牵引流成因为主的砂体(S2 岩相)(见图 3(c)),发育位置多出现在砂泥界面交界处(见图 10(g))。在深埋藏碱性环境下,泥岩中蒙脱石向伊/蒙混层转化脱水,同时释放 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 进入砂体内部,离子与泥岩所排层间水中的 HCO_3^- 及有机质热演化产生的 CO_2 结合,在砂泥接触部位产生强烈方解石胶结^[34]。三角洲平原亚相以泥石流成因砂体(S1 岩相)为主(见图 3(b)),储层整体发育方解石强胶结成岩相(见图 10(h-i))。

4.1.4 中等压实—强溶蚀成岩相

中等压实—强溶蚀成岩相属于陆相断陷湖盆复合沉积体系中的典型优质储层成岩相,分布于三角洲与重力流沉积体系。在三角洲沉积体系中,对应的岩相为牵引流成因的砂体(S2 岩相)(见图 3(c)),受强水动力淘洗影响,长英质组分体积分数高,填隙物体积分数低,原生孔隙占比整体较高(见图 10(j))。同时,在有机酸与微裂缝的耦合作用下,长石颗粒内部产生大量与微裂缝伴生的粒内溶孔(见图 10(k-l)),显

著改善储层质量。在重力流沉积体系中,多分布于以砂质碎屑流成因为主的砂体(S4 岩相),储层物性最佳。



(a) 强压实成岩相, 颗粒凹凸接触, 拐4井, 3 122.88 m; (b) 残留粒间孔隙被杂基、方解石充填, 拐4井, 3 122.88 m; (c) 石英次生加大边充填残留原生孔隙, 拐4井, 3 122.88 m; (d) 泥质杂基发生塑性变形, 拐4井, 3 495.62 m; (e) 塑性变形的泥质杂基侵入原生孔隙, 拐4井, 3 495.62 m; (f) 泥质杂基与长英质组分呈明显的互层状, 拐4井, 3 553.02 m; (g) 方解石交代泥质杂基, 拐参1井, 3 435.66 m; (h) 方解石充填长石溶孔, 拐参1井, 3 691.26 m; (i) 方解石充填长石溶孔, 拐参1井, 3 691.26 m; (j) 长石粒内溶孔及铸模孔, 拐参1井, 3 446.00 m; (k) 长石铸模孔, 拐参1井, 3 446.00 m; (l) 长石颗粒几乎被完全溶解, 可见颗粒边缘残余, 拐参1井, 3 446.00 m

图 10 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层成岩相特征

Fig. 10 Characteristics of diagenetic facies in clastic reservoirs of Bayingebi Formation, Guaizihu Depression, Yin'e Basin

4.2 孔隙演化

受原始沉积环境、岩石结构及矿物组分影响,不同成岩相的机械压实、化学胶结及溶蚀作用强度明显不同,共同控制储层的孔隙发育程度。

以埋藏史—热演化史、成岩演化史为约束,采用反演回剥法与人工绘制—计算机绘制图像分析方法,从现今孔隙状态开始,对各个成岩阶段进行逐次回剥,计算关键成岩事件在不同时期造成的储层面孔率变化量。根据孔隙度与对应的实测面孔率,建立面孔率和孔隙度的关系(见图 11)。将各成岩事件造成的储层面孔率变化量转化为孔隙度,进行以成岩演化序列为约束的储层孔隙度演化历史恢复。

4.2.1 强压实成岩相

在强压实成岩相中,压实作用是导致原生粒间孔隙损失的主要因素。孔隙度变化曲线(见图 12)显示,渐进深埋阶段是储层压实减孔强度最大的时期,压实减孔量为 17.3%。虽然后期发生深部有机酸溶蚀事件,但强压实对孔隙喉道的破坏加剧成岩体系的封闭程度,使酸性流体难以成规模进入储层内部,导致溶蚀增孔效应极其微弱,增孔量为 0.2%。快速深埋阶段地层温度急剧升高,导致原本数量不多的有机酸被快速分解,储层以化学胶结为主,其中,方解石胶结减孔量为 7.6%,相对最强;其次为自生黏土矿物

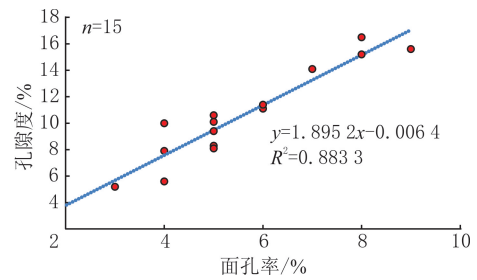


图 11 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层面孔率与孔隙度关系

Fig. 11 Relationship between surface-porosity and porosity of clastic reservoirs in Bayingebi Formation, Guaizihu Depression, Yin'e Basin

胶结,减孔量为 5.7%;硅质胶结整体微弱,减孔量为 3.8%。

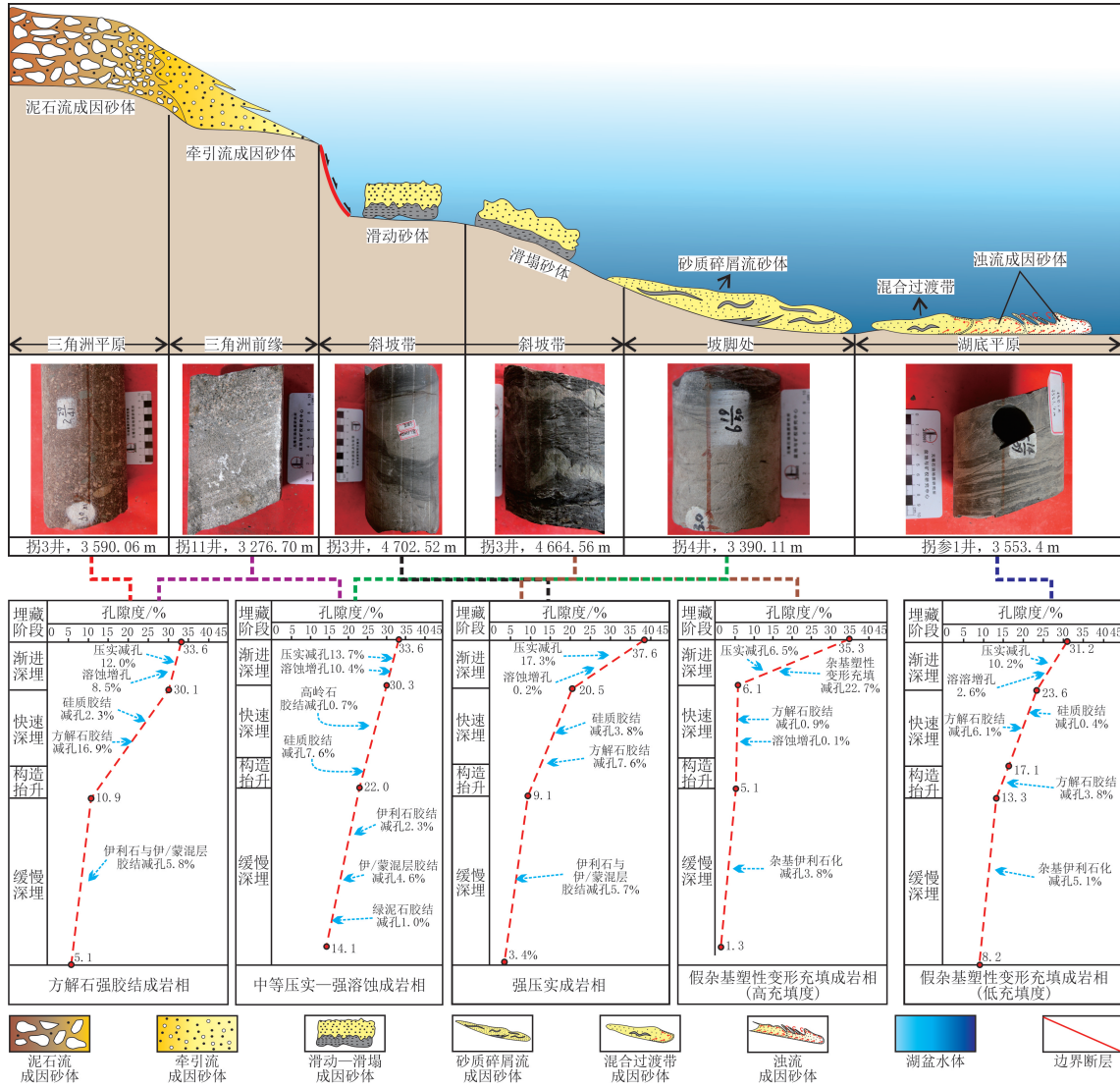


图 12 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组碎屑岩储层孔隙演化特征

Fig. 12 Porosity evolution characteristics of clastic reservoirs in Bayingebi Formation, Guazihu Depression, Yin'e Basin

4.2.2 假杂基塑性变形充填成岩相

假杂基塑性变形充填成岩相发育于重力流沉积体系的 S3、S5 岩相,储层的孔隙演化过程存在明显差异。S3 岩相属于滑动—滑塌成因(见图 3(d)),在与周围水体充分接触的过程中泥质杂基含量不断增加。随含水量增加,岩相整体的刚性强度降低,液化程度升高,在埋藏压实过程中极易发生塑性变形^[35-36]。S3 岩相的孔隙度变化曲线显示,压实作用作为致密化的诱因(压实减孔量为 6.5%),诱发泥质杂基塑性变形是导致储层致密化的主要原因。沉积初期,碎屑颗粒与泥质杂基相互混杂,随压实作用强度逐渐增大,泥质杂基发生塑性变形,以胶结物的形式侵入碎屑颗粒的原生孔隙,致使储层快速致密化(杂基充填减孔量为 22.7%)。由于原生孔隙基本被泥质杂基占据,导致后期胶结减孔(总胶结减孔量为 4.7%)与溶蚀增孔(溶蚀增孔量为 0.1%)对储层质量的影响相对微弱(见图 12)。

S5 岩相属于浊流成因(见图 3(e)),内部碎屑颗粒以紊流支撑颗粒的形式进行搬运,当外力降低时,开始以悬浮沉降的方式进行卸载^[37-39]。岩心观察显示,巴音戈壁组浊流成因砂体在垂向上表现为粒度旋回的多期叠置,砂泥岩层呈明显互层状,属于鲍马序列的 Ta 段。砂质层是由呈层状的密集长英质颗粒组成,强化砂质层的整体抗压实能力,外部塑性泥质杂基不易侵入颗粒间的原生孔隙,颗粒的绿泥石包壳在

一定程度上缓解砂质层内部的压实作用。受双重保孔机制影响, S5 岩相的原生孔隙损失程度明显低于 S3 岩相的, 溶蚀作用(溶蚀增孔量为 2.6%)对储层物性的改善程度高于 S3 岩相的(见图 12)。

自生伊利石体积分数对不同沉积体系碎屑岩储层质量的影响明显不同。在三角洲沉积体系中, 中粗粒砂岩岩相(S1、S2 岩相)的自生伊利石体积分数与孔隙度呈负相关关系(见图 13(b)); 在重力流沉积体系中, 细粒砂岩岩相(S3、S5 岩相)的自生伊利石体积分数与孔隙度呈正相关关系(见图 13(a))。一般认为伊利石占据原生孔隙, 但常忽视自带的晶间孔(见图 7(g-h))。三角洲平原和前缘等亚相具有粗粒沉积背景的碎屑岩储层的大孔隙相对发育, 自生伊利石主要起阻塞孔隙的负面作用; 对于以重力流沉积为主的细粒碎屑岩储层, 原生粒间孔隙发育程度低, 伊利石自带的晶间孔在储层中起增孔的积极作用。

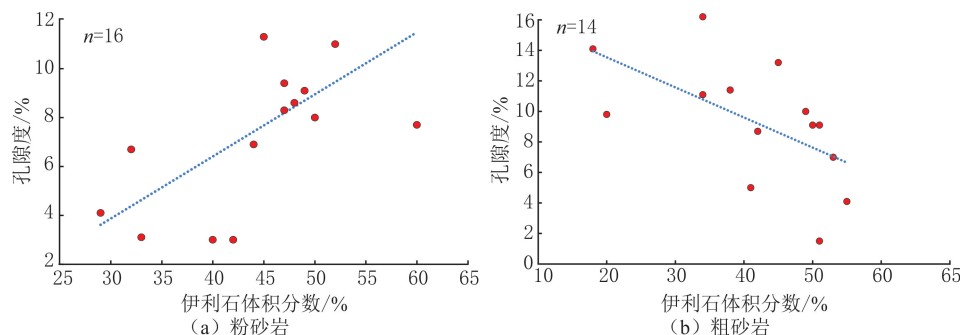


图 13 银额盆地拐子湖凹陷巴音戈壁组伊利石体积分数与孔隙度之间关系
Fig. 13 Relationship between volume fraction of illite and porosity in Bayingebi Formation, Guaizihu Depression, Yin'e Basin

4.2.3 方解石强胶结成岩相

孔隙度变化曲线(见图 12)显示, 发育方解石强胶结成岩相的储层在早期渐进深埋阶段经历的压实强度相对中等(压实减孔量为 12.0%), 原生孔隙发育程度高于强压实成岩相的。较开放的成岩体系对应快速深埋阶段的有机酸充注事件, 储层在埋藏早期的溶蚀增孔效果明显(溶蚀增孔量为 8.5%)。由于酸性环境快速向碱性环境转换, 储层 Ca^{2+} 富集, 导致前期由溶蚀作用增加的次生孔隙再次被方解石充填(方解石胶结减孔量为 16.9%), 有机酸溶蚀对储层的改造效果不明显, 储层质量较差。

三角洲平原亚相整体发育泥石流成因岩相(S1 岩相), 储层结构成熟度差, Ca^{2+} 在埋藏后期的碱性封闭体系下难以被排出孔隙而发生原地沉淀, 储层整体以方解石强胶结为主。三角洲前缘亚相以发育牵引流成因岩相(S2 岩相)为主, 储层整体结构成熟度高, 抗压能力强。由于部分储层紧靠砂泥接触界面, 受机械压实作用影响, 泥岩层向砂岩层排出大量 Ca^{2+} , 储层孔隙喉道基本被钙质组分充填, 失去物质循环能力, 形成钙质强胶结。三角洲前缘亚相的方解石强胶结成岩相在特定部位发育, 规模远不及三角洲平原亚相的, 对规模优质储层发育的消极影响较小。

4.2.4 中等压实—强溶蚀成岩相

在渐进深埋阶段, 相较于方解石强胶结成岩相, 中等压实—强溶蚀成岩相的孔隙演化过程并无明显差别, 表现为中等压实减孔(压实减孔量为 13.7%)和有机酸强溶蚀增孔(溶蚀增孔量为 10.4%)。在高速水动力条件下, 三角洲前缘亚相发育的砂质碎屑流岩相(S2、S4 岩相)具有高结构成熟度与低泥质杂基含量特征。进入快速深埋阶段后, 成岩相能够保持相对开放的成岩体系, 保证储层在成岩晚期维持良好的物质循环能力, 抑制次生碳酸盐矿物的沉淀和胶结(总胶结减孔量为 16.2%), 有效保存更多的原生孔隙和次生孔隙(见图 12)。

5 储层发育模式

建立陆相断陷湖盆三角洲—重力流复合沉积体系控制下的碎屑岩储层发育模式。在三角洲沉积体系中, 三角洲前缘亚相碎屑岩储层多为牵引流成因背景, 主要发育中等压实—强溶蚀成岩相, 在局部砂泥接触界面附近发育方解石强胶结成岩相, 储层质量整体最佳; 三角洲平原亚相碎屑沉积物多为泥石流成因,

结构成熟度低,在埋藏过程中,成岩体系封闭性强,物质循环能力差,导致方解石强胶结成岩相发育程度高,储层质量整体较差。在强构造活动与高沉积速率背景下,三角洲沉积前缘斜坡砂体开始向湖盆深处发生进一步搬运,形成湖相重力流沉积。

从三角洲斜坡向湖盆深水环境过渡,重力流主要经历滑动—滑塌、砂质碎屑流及浊流等搬运过程。研究区滑动—滑塌成因岩相(S3)杂基含量高,抗压实能力差,多发育强压实和假杂基塑性变形充填成岩相(充填度高),储层质量普遍较差(见图 14)。砂质碎屑流是重力流体系中被高能水体淘洗最为充分且距离深湖泥岩较远的砂体,具有砂质含量高、泥质杂基含量低的特点,储层质量最佳。浊流成因砂体经受高能水动力淘洗,靠近深湖泥岩,砂泥互层的韵律结构频繁发育。由于砂质层的长英质颗粒含量高且分布集中,发育假杂基塑性变形充填成岩相,砂体的整体抗压实能力较强,泥质杂基难以侵入原生孔隙,储层质量居中。在湖相重力流体系中,砂质碎屑流与浊流成因砂体在埋藏过程中发育为优质碎屑岩储层的潜力最大,是陆相断陷湖盆深水油气勘探重点目标(见图 14)。

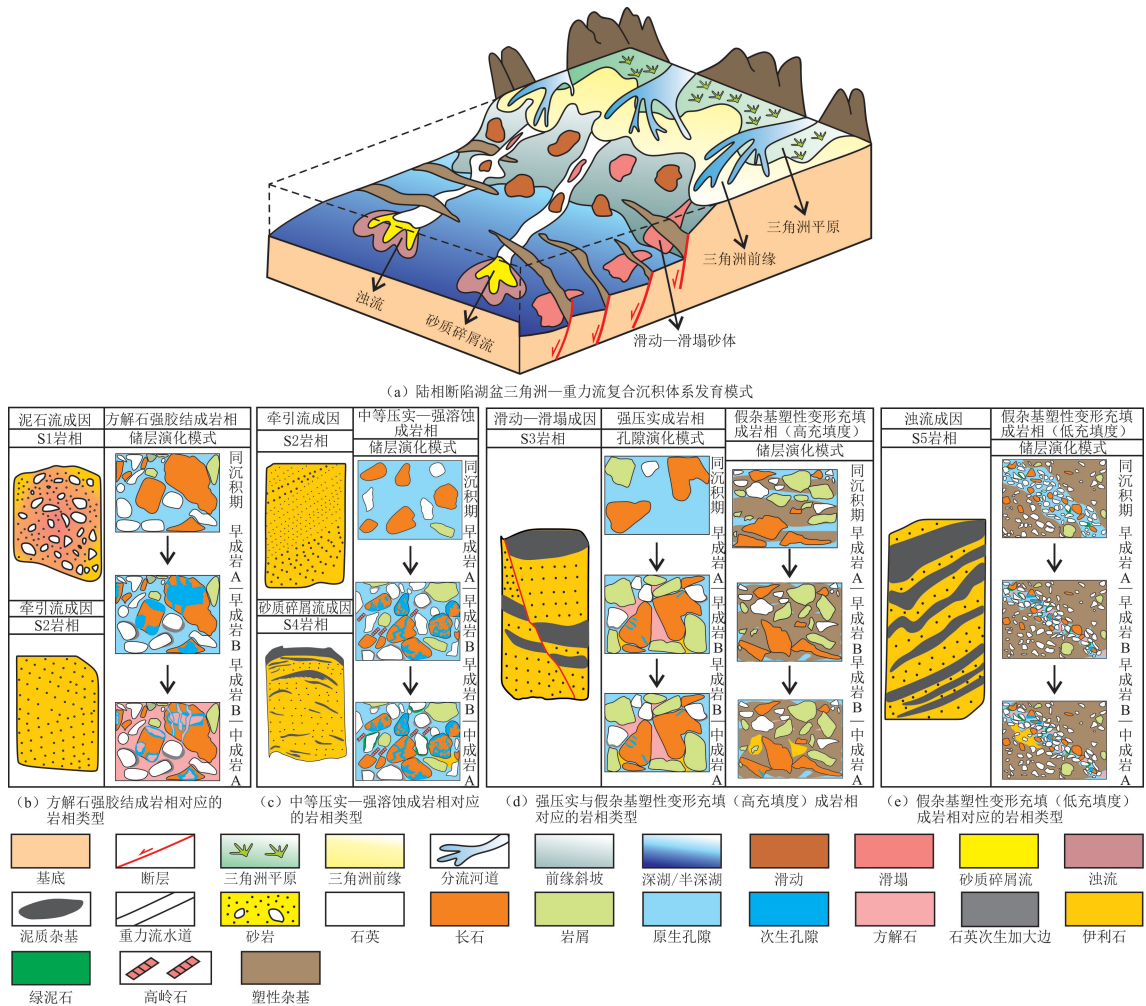


图 14 陆相断陷湖盆复合沉积体系控制下的碎屑岩储层发育模式

Fig. 14 Development model of clastic reservoirs controlled by the complex sedimentary system in continental faulted lacustrine basins

6 结论

(1) 银额盆地拐子湖凹陷下白垩统巴音戈壁组发育三角洲—重力流复合沉积体系,三角洲沉积体系主要发育泥石流成因杂基支撑含砾中粗粒砂岩岩相(S1)与牵引流成因中粗粒砂岩岩相(S2);重力流沉积体系以发育滑动—滑塌成因的块状泥质粉砂岩岩相(S3)、砂质碎屑流成因的块状含泥质撕裂屑粉砂岩(S4)

与浊流成因的砂泥互层泥质粉砂岩相(S5)为主。

(2)巴音戈壁组碎屑岩储层岩石类型以长石岩屑砂岩为主,储集空间以原生粒间孔和次生粒内溶孔为主。储层整体经历机械压实、矿物胶结(硅质、碳酸盐和黏土矿物)及颗粒溶解作用,发育强压实、假杂基塑性变形充填、方解石强胶结及中等压实—强溶蚀4类典型成岩相。

(3)巴音戈壁组三角洲前缘砂体以牵引流成因为主,储层抗压实能力和物质循环能力强,主要发育中等压实—强溶蚀成岩相,在局部砂泥接触界面处发育方解石强胶结成岩相;三角洲平原砂体以泥石流成因为主,储层物质循环能力差,成岩流体在埋藏过程中易发生过饱和和沉淀,导致方解石强胶结成岩相极度发育。

(4)巴音戈壁组重力流滑动—滑塌成因砂体的碎屑颗粒与塑性泥质杂基混合程度高,抗压实能力整体较弱,储层主要发育强压实和假杂基塑性变形充填成岩相,储层质量较差;砂质碎屑流与浊流成因砂体的杂基含量低,储层抗压实能力强,原生孔隙的保存度高,储层质量较好,是陆相断陷湖盆深水油气勘探重点目标。

参考文献(References):

- [1] 胡涛,熊智明,肖惠译,等. 断陷湖盆全油气系统油气藏有序分布特征及差异富集机制:以渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组为例[J]. 石油与天然气地质,2025,46(4):1169-1182.
Hu Tao, Xiong Zhiming, Xiao Huiyi, et al. Ordered distribution and differential hydrocarbon enrichment mechanisms of hydrocarbon reservoirs in the whole petroleum system of lacustrine rift basin: a case study of the Paleogene Shahejie Formation, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025,46(4):1169-1182.
- [2] 肖惠译,庞雄奇,李才俊,等. 全油气系统形成演化过程中常规与非常规油气藏转化机制及模式[J]. 石油与天然气地质,2025,46(4):685-704.
Xiao Huiyi, Pang Xiongqi, Li Caijun, et al. Mechanisms and models of conversion between conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs during the formation and evolution of the whole petroleum system[J]. Oil & Gas Geology, 2025,46(4):685-704.
- [3] 朱筱敏,王晓琳,胡鑫,等. 国际沉积学研究前沿和发展讨论:第37次国际沉积学家年会述评[J]. 石油与天然气地质,2025,46(3):685-704.
Zhu Xiaomin, Wang Xiaolin, Hu Xin, et al. Frontiers and future prospects of international sedimentological research: review on the 37th international meeting of sedimentology[J]. Oil & Gas Geology, 2025,46(3):685-704.
- [4] 李建平,贾万丽,李宏义,等. 物源—地貌双控背景下海底扇沉积储层特征及勘探意义:以琼东南盆地梅山组为例[J]. 地质科学,2024,59(1):148-165.
Li Jianping, Jia Wanli, Li Hongyi, et al. Sedimentary reservoir characteristics and exploration significance of submarine fan under the dual control of provenance and geomorphology: taking the Meishan Formation in Qiongdongnan Basin as an example[J]. Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica), 2024,59(1):148-165.
- [5] 李欢,王清斌,庞小军,等. 渤海湾盆地辽东凹陷旅大29构造沙二段近源砂砾岩体优质储层形成机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2019,49(2):294-309.
Li Huan, Wang Qingbin, Pang Xiaojun, et al. Generation of high quality near source glutenite reservoir of 2nd member of Shahejie Formation in Lyuda-29 Structure, Liaodong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2019,49(2):294-309.
- [6] 袁静,周涛,景安语,等. 断陷湖盆斜坡带储层差异性成岩—成储模式:以渤海湾盆地北低凸起东部斜坡带东营组为例[J]. 沉积学报,2023,41(3):804-817.
Yuan Jing, Zhou Tao, Jing Anyu, et al. Differential diagenesis-reservoir formation model of the slope belt of a faulted lacustrine basin: case study of the Dongying Formation in the eastern slope belt of the Chengbei low uplift, Bohai Bay Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023,41(3):804-817.
- [7] 曹江骏,陈朝兵,程皇辉,等. 成岩作用对深水致密砂岩储层微观非均质性的影响:以鄂尔多斯盆地合水地区长7油层组为例[J]. 沉积学报,2021,39(4):1031-1046.
Cao Jiangjun, Chen Chaobing, Cheng Huanghui, et al. Effect of diagenesis on microheterogeneity of deepwater tight sandstone reservoirs: a case study from the Triassic Chang 7 oil-bearing formation in Heshui Area, Ordos Basin, NW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021,39(4):1031-1046.
- [8] 蕙克来,操应长,王艳忠,等. 低渗透储集层成岩作用与孔渗演化:以准噶尔盆地中部1区侏罗系三工河组为例[J]. 石油勘探与开发,2015,42(4):434-443.

- Xi Kelai, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Diagenesis and porosity-permeability evolution of low permeability reservoirs: a case study of Jurassic Sangonghe Formation in block 1, Central Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4): 434-443
- [9] 操应长, 杨田, 宋明水, 等. 陆相断陷湖盆低渗透碎屑岩储层特征及相对优质储层成因: 以济阳坳陷东营凹陷古近系为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(7): 727-743.
- Cao Yingchang, Yang Tian, Song Mingshui, et al. Characteristics of low-permeability clastic reservoirs and genesis of relatively high-quality reservoirs in the continental rift lake basin: a case study of Paleogene in the Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(7): 727-743.
- [10] 陈彬滔, 马轮, 洪亮, 等. 断陷湖盆陡坡带扇三角洲—滑塌扇复合扇体的沉积演化及油气地质意义: 以中非地区 Melut 盆地 A 凹陷白垩系为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(3): 1058-1072.
- Chen Bintaoy, Ma Lun, Hong Liang, et al. Sedimentary evolution and controlling factors of fan delta and slump fan complex deposition in a steep slope belt of a faulted basin: a case study from the Cretaceous deposits of the A Sag in Melut Basin, Central Africa[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 42(3): 1058-1072.
- [11] 陈柄屹, 林承焰, 马存飞, 等. 陆相断陷湖盆陡坡带深水重力流沉积类型、特征及模式: 以东营凹陷胜坨地区沙四段上亚段为例[J]. *地质学报*, 2019, 93(11): 2921-2934.
- Chen Bingyi, Lin Chengyan, Ma Cunfei, et al. Types, characteristics and sedimentary model of deep water gravity flow deposition in the steep slope zone of terrestrial faulted lacustrine basin: a case study of the Es₄^s submember in the Shengtuo Area of Dongying Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(11): 2921-2934.
- [12] 陈广坡, 李娟, 吴海波, 等. 陆相断陷湖盆滑塌型深水重力流沉积特征、识别标志及形成机制: 来自海拉尔盆地东明凹陷明 D₂ 井全井段连续取心的证据[J]. *石油学报*, 2018, 39(10): 1119-1129.
- Chen Guangpo, Li Juan, Wu Haibo, et al. Sedimentary characteristics, identification mark and formation mechanism of the slump-ingdeepwater gravity flow in fault lacustrine basin: a case study on the consecutive coring well of Ming D₂ in Dongming Sag, Hailaer Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(10): 1119-1129.
- [13] 张斌, 王宏语, 樊太亮, 等. 银额盆地拐子湖凹陷早期沉积充填演化[J]. *东北石油大学学报*, 2018, 42(4): 15-26.
- Zhang Bin, Wang Hongyu, Fan Tailiang, et al. Tectonic evolution and sedimentary filling characteristics during the early rifting phase of Guaizihu Depression, Yin'e Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2018, 42(4): 15-26.
- [14] 杨润泽, 王宏语, 樊太亮, 等. 银额盆地拐子湖凹陷构造特征及其对古地貌演化的控制[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(6): 39-51.
- Yang Runze, Wang Hongyu, Fan Tailiang, et al. Structural characteristics and their controlling effects over the paleogeomorphic evolution for Guaizihu Sag in Yin'e Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(6): 39-51.
- [15] 张洪安, 李继东, 王学军, 等. 银额盆地形成演化及油气勘探展望[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 780-789.
- Zhang Hongan, Li Jidong, Wang Xuejun, et al. Formation and evolution of Yin'gen-Ejinaqi Basin and prospects for oil and gas exploration[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 780-789.
- [16] 李继东, 付玉鑫, 蒋飞虎, 等. 银额盆地地下白垩统巴音戈壁组泥岩地球化学特征及其古环境意义[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3): 48-56.
- Li Jidong, Fu Yuxin, Jiang Feihu, et al. Geochemical characteristics and their paleoenvironmental significance of the mudstones from the Lower Cretaceous Bayingebi Formation in the Yin'e Basin[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2022, 41(3): 48-56.
- [17] 卫平生, 姚清洲, 吴时国. 银根—额济纳旗盆地白垩纪地层、古生物群和古环境研究[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2005, 20(2): 17-21.
- Wei Pingsheng, Yao Qingzhou, Wu Shiguo. Study on Cretaceous stratum, palaeobiota and palaeoclimate of Yin'gen-Ejinaqi Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition)*, 2005, 20(2): 17-21.
- [18] 侯云超, 樊太亮, 王宏语, 等. 银额盆地拐子湖凹陷深层优质储层特征及形成机理[J]. *沉积学报*, 2019, 37(4): 758-767.
- Hou Yunchao, Fan Tailiang, Wang Hongyu, et al. Characteristics and formation mechanism of a high-quality reservoir in the deep strata of the Guaizihu Depression, Yin'e Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(4): 758-767.
- [19] 崔海峰, 韩小锋, 白晓寅, 等. 银额盆地构造单元划分与油气勘探方向[J]. *天然气工业*, 2024, 44(7): 89-96.
- Cui Haifeng, Han Xiaofeng, Bai Xiaoyin, et al. Structural unit division and petroleum exploration direction in the Yin'e Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(7): 89-96.
- [20] 彭谋, 李江海, 杨博. 深层砂岩储层孔隙结构特征及影响因素: 以银额盆地拐子湖凹陷为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(2): 249-264.
- Peng Mou, Li Jianghai, Yang Bo. Pore structure characteristics and influencing factors of deep sandstone reservoirs: a case study of Guaizihu Depression in Yin'e Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2024, 60(2): 249-264.
- [21] 郭彦如, 王新民, 樊太亮, 等. 层序地层框架下的含油气系统: 以查干凹陷下白垩统为例[J]. *大庆石油地质与开发*, 2006, 25(3): 1-4.

- Guo Yanru, Wang Xinmin, Fan Tailiang, et al. Petroleum system based on sequence stratigraphic setting: a case study on Lower Cretaceous in Chagan Sag[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006,25(3):1-4.
- [22] 卫平生,张虎权,陈启林,等. 银根—额济纳旗盆地油气地质特征及勘探前景[M]. 北京:石油工业出版社,2006:1-345.
- Wei Pingsheng, Zhang Huquan, Chen Qilin, et al. Petroleum geological features and exploration prospect of Yin'gen-Ejinaqi Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006:1-345.
- [23] 荆国强. 银根—额济纳旗地区晚古生代盆地形成与演化研究[D]. 西安:长安大学,2010:18-26.
- Jing Guoqiang. Study on formation and evolution of the basin in Neopaleozoic in area of Yin'gen-Ejinaqi[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010:18-26.
- [24] 杨国臣,焦大庆,肖斌,等. 内蒙古银额盆地查干凹陷构造—层序—沉积特征、盆地原型及其成因机制[J]. *古地理学报*, 2013,15(3):305-316.
- Yang Guochen, Jiao Daqing, Xiao Bin, et al. Tectono-sequence-sedimentary characteristics, basin prototypes and their genetic mechanisms in Chagan Sag of Yin-E Basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013,15(3):305-316.
- [25] 赵玉龙,强贤宇,张芮菡,等. 深层—超深层碳酸盐岩油气藏储层特征及渗流特征研究进展[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2024,44(5):44-53.
- Zhao Yulong, Qiang Xianyu, Zhang Ruihan, et al. Research progress on reservoir characteristics and seepage characteristics of deep and ultra-deep carbonate oil and gas reservoirs[J]. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 2024,44(5):44-53.
- [26] 李盛谦,曾澧辉,刘亚洲,等. 东海盆地西湖凹陷孔雀亭地区古近系平湖组储层成岩作用及孔隙演化[J]. *岩性油气藏*, 2023,35(5):49-61.
- Li Shengqian, Zeng Jianhui, Liu Yazhou, et al. Reservoir diagenesis and pore evolution of Paleogene Pinghu Formation in Kongquet-ing Area of Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023,35(5):49-61.
- [27] 陈思芮,鲜本忠,纪友亮,等. 埋藏过程对深层—超深层碎屑岩成岩作用及优质储层发育的影响:以准噶尔盆地南缘下白垩统清水河组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2024,51(2):323-336.
- Chen Sirui, Xian Benzong, Ji Youliang, et al. Influences of burial process on diagenesis and high-quality reservoir development of deep-ultra-deep clastic rocks: a case study of Lower Cretaceous Qingshuihe Formation in southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024,51(2):323-336.
- [28] 陈思芮,王卫学,曲希玉,等. 东营凹陷北带沙四上亚段砂砾岩储层物性主控因素分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022,52(4):1091-1106.
- Chen Sirui, Wang Weixue, Qu Xiyu, et al. Main controlling factors of physical properties of glutenite reservoirs of Es₄^s Member in north zone of Dongying Depression[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2022,52(4):1091-1106.
- [29] 马奔奔,操应长,王艳忠,等. 东营凹陷盐家地区沙四上亚段砂砾岩储层岩相与物性关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015,45(2):495-506.
- Ma Benben, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Relationship between lithofacies and physical properties of sandy conglomerate reservoirs of Es₄^s in Yanjia Area, Dongying Depression[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2015,45(2):495-506.
- [30] 林建力,张宪国,林承焰,等. 岩相约束下的深层致密砂岩气藏储层演化特征[J]. *石油与天然气地质*, 2019,40(4):886-899.
- Lin Jianli, Zhang Xianguo, Lin Chengyan, et al. Diagenetic evolution characteristics constrained by lithofacies in deep tight sand gas reservoir[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019,40(4):886-899.
- [31] 司振宇,朱锐,袁波,等. 准噶尔盆地南缘中段喀拉扎组成岩相类型及优质储层主控因素[J]. *东北石油大学学报*, 2024,48(6):1-16.
- Si Zhenyu, Zhu Rui, Yuan Bo, et al. Diagenetic facies types and main controlling factors for the high quality reservoirs of the Kalazha Formation in the middle part of the southern margin of Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(6):1-16.
- [32] 朱鑫达,曲希玉,闫振,等. 松辽盆地长岭断陷龙凤山次凹营城组—沙河子组致密砂岩储层孔隙演化特征[J]. *科技导报*, 2024,42(23):119-134.
- Zhu Xinda, Qu Xiyu, Yan Zhen, et al. Characteristics of pore evolution in tight sandstone reservoirs of Yingcheng Formation-Shahezi Formation, Longfengshan Sub-sag in Changling Fault Depression, Songliao Basin[J]. *Science & Technology Review*, 2024,42(23):119-134.
- [33] 付林圃,王喜鑫,马生晖,等. 重力流成因致密砂岩储层成岩相识别与分布:以鄂尔多斯盆地合水南区长7段为例[J]. *东北石油大学学报*, 2025,49(3):68-82.
- Fu Linpu, Wang Xixin, Ma Shenghui, et al. Diagenetic facies identification and distribution of gravity flow tight sandstone reservoirs: a case of Chang 7 reservoir in Heshuinan Area, Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2025,49(3):68-82.
- [34] 钟大康,朱筱敏,张琴,等. 不同埋深条件下砂泥岩互层中砂岩储层物性变化规律[J]. *地质学报*, 2004,78(6):863-871.
- Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhang Qin. Variation characteristics of sandstone reservoirs when sandstone and mudstone are inter-bedded at different buried depths[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004,78(6):863-871.

(下转第97页)