

渤海湾盆地桩海地区古近系沙河街组一段-二段 混积岩优质储层特征与控制因素

佟欢^{1,2}, 朱世发^{1,2}, 崔航^{1,2}, 蔡文典^{1,2}, 马立驰³

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206]

摘要:渤海湾盆地桩海地区古近系沙河街组一段-二段广泛发育混积岩。近年来桩海地区混积岩油气勘探不断取得突破,已逐渐成为古近系重要的勘探目标。利用岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜观察及孔-渗分析等技术手段,研究了桩海地区混积岩储层特征及优质储层控制因素。结果表明:混积岩中的陆源碎屑颗粒多为近源沉积,岩石成分成熟度低。来自长堤凸起的岩屑主要为中-酸性喷出岩岩屑,来自埕岛凸起的岩屑主要为石英岩等变质岩岩屑。用陆源碎屑、化学成因泥晶碳酸盐、生物成因碳酸盐颗粒为三端元,将混积岩划分为以陆源碎屑为主的混积岩(陆源碎屑含量在50%~85%)、以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩(化学沉淀碳酸盐含量在50%~90%)、正混积岩(三组分均<50%)、以生物碎屑为主的混积岩4类。其中以生物碎屑为主的混积岩储层物性最好,平均孔隙度为15%~25%,储集空间主要为原生粒间孔和生物碎屑孔。泥晶化作用和环边亮晶胶结作用在以生物碎屑为主的混积岩中发育程度最高,二者形成的刚性格架使得原生孔隙得以保留。大气水淋滤和有机酸充注有利于储层次生孔隙的发育。碳酸盐嵌晶胶结在正混积岩中最发育,持续的压实作用对以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩影响最大。沉积期较高的岩石结构成熟度和较高的生物碎屑含量,准同生期泥晶包壳的发育、大气淡水的淋滤以及环边亮晶胶结物的发育,埋藏成岩期发生的较强有机酸溶蚀是优质混积岩储层形成的有利条件。

关键词:成岩作用;沙河街组一段-二段;混积岩储层;古近系;桩海地区;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of high-quality reservoirs of mixed siliciclastic-carbonate sediments in the 1st to 2nd members of the Paleogene Shahejie Formation, Zhuanghai area, Bohai Bay Basin

TONG Huan^{1,2}, ZHU Shifa^{1,2}, CUI Hang^{1,2}, CAI Wendian^{1,2}, MA Lichi³

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China]

Abstract: Mixed siliciclastic-carbonate sediments (MSCSs) occur extensively in the 1st to 2nd members of the Shahejie Formation (Es₁₋₂), Zhuanghai area, Bohai Bay Basin. Over recent years, breakthroughs have been constantly achieved in hydrocarbon exploration in the MSCSs in the Zhuanghai area, making these rocks gradually become significant exploration targets of the Paleogene strata. Using techniques such as core observation, thin section observation, scanning electron microscopy (SEM), and porosity and permeability analyses, we investigate the characteristics of MSCS reservoirs in the Zhuanghai area and the factors controlling the formation of high-quality reservoirs within. The results indicate that terrigenous clastic grains in the MSCSs in the Zhuanghai area are dominated by proximal sediment and exhibit low maturity in rock component. Rock debris originating from the Changdi uplift is dominated by intermediate-acidic extrusive rock detritus, while that from the Chengdao uplift consists primarily of the detritus of metamorphic rocks such as quartzites. Using terrigenous clasts, chemogenic micritic carbonates, and biogenic

收稿日期:2024-05-28;修回日期:2024-07-25。

第一作者简介:佟欢(1999—),男,博士研究生,储层地质学与沉积学。E-mail: 460817013@qq.com。

通信作者简介:朱世发(1982—),男,教授、博士研究生导师,储层地质学与沉积学。E-mail: sfzhu@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42272109)。

carbonate grains as three end-members, the MSCSs in the Zhuanghai area are categorized into four types: terrigenous clast-dominated MSCSs (terrigenous clast content: 50 % to 85 %), chemically precipitated carbonate-dominated MSCSs (chemically precipitated carbonate content: 50 % to 90 %), ortho-MSCSs (contents of the three components: all less than 50 %), and bioclast-dominated MSCSs. The reservoirs of bioclast-dominated MSCSs exhibit the most favorable physical properties among others, with an average porosity ranging from 15 % to 25 % and storage spaces composed largely of primary intergranular and bioclastic pores. Micritization and the sparry cementation on the rims are the most developed in the bioclast-dominated MSCSs, with the rigid framework formed by both allowing for the preservation of primary pores. Meteoric water leaching and organic acid charging are conducive to the formation of secondary pores in the MSCS reservoirs. Carbonate cementation with poikilitic textures is the most developed in the ortho-MSCSs, while continuous compaction produces the most significant impacts on the chemically precipitated carbonate-dominated MSCSs. Favorable conditions for the formation of high-quality MSCS reservoirs include (1) the high rock-texture maturity and bioclastic content in the depositional period; (2) the development of micrite coats, meteoric water leaching, and the formation of the sparry cements around the rims during the penecontemporaneous period, and (3) strong organic acid dissolution during the burial and diagenetic period.

Key words: diagenesis, Es_{1-2} , reservoir of mixed siliciclastic-carbonate sediments (MSCSs), Paleogene, Zhuanghai area, Bohai Bay Basin

引用格式: 佟欢, 朱世发, 崔航, 等. 渤海湾盆地桩海地区古近系沙河街组一段-二段混积岩优质储层特征与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1106-1120. DOI: 10. 11743/ogg20240415.

TONG Huan, ZHU Shifa, CUI Hang, et al. Characteristics and controlling factors of high-quality reservoirs of mixed siliciclastic-carbonate sediments in the 1st to 2nd members of the Paleogene Shahejie Formation, Zhuanghai area, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1106-1120. DOI: 10. 11743/ogg20240415.

碎屑岩储层和碳酸盐岩储层在20世纪就已经被广泛研究并取得一系列丰硕的成果,然而混积岩储层直到近20年才逐渐受到国内外学者的重视^[1-4]。近年来,在中国陆相含油气盆地(如渤海湾盆地、四川盆地、吐哈盆地、准噶尔盆地和柴达木盆地)混积岩储层中均有大量油气发现^[5-13],展现了混积岩储层良好的勘探前景。前人对混积岩的沉积、成岩和物性等开展了大量的研究工作,取得了丰富的成果^[14-20]。在沉积特征上,混积岩多形成于陆表海、滨浅湖和三角洲等沉积环境,古气候、古地貌、水动力条件和距离物源的远近影响了颗粒粒径、矿物组成和沉积构造。在成岩特征上,不同区块的混积岩成岩序列和物性特征有着明显的差异^[21-22],而孔隙流体的变化对于成岩过程有着直接的影响^[23-25]。由于碳酸盐组分的存在,混积岩相对于碎屑岩更易受压实作用和胶结作用影响而损失孔隙^[26],但同时,碳酸盐颗粒的溶解也会改善混积岩储层的物性^[27],古地理背景、源区条件以及基底岩性对混积岩储层厚度和岩性有着重要的控制作用^[28-31]。在物性特征上,混积岩储层整体具有岩性复杂、低孔低渗的特点,局部发育的中-高孔、中-高渗储层是油气勘探中的地质甜点^[32-33]。

渤海湾盆地渤海海域古近系沙河街组一段-二段(沙一段-沙二段)广泛发育含生物碎屑的混积岩。前

期研究认为,该地区沙河街组埋深超过3 500 m的储层物性普遍较差^[34],但近年来越来越多的实践证实超过这一深度的混积岩储层仍然可以保持较高的孔隙度和渗透率,尤其是渤中13-A等多个构造带深层混积岩储层的高产以及Q29-E5亿吨级油气田的发现^[25,33],使混积岩储层逐渐成为渤海海域中-深层油气勘探的重点目标之一。前人对渤海海域混积岩的沉积过程和沉积方式进行了大量的研究,建立了不同构造背景下的混合沉积模式^[35-37],并提出了适用于该区的混积岩分类与命名方式^[38]。此外,学者们发现不同埋深和构造区带混积岩储层物性相差很大,认为构造背景影响了混积岩的沉积类型、规模和储层物性,缓坡带和隆起带厚度相对较薄,靠近高部位储层物性往往较好,陡坡带储层规模相对较大,但以差储层为主^[28];沉积环境控制了岩石结构、组成及成熟度,波浪改造较强、分选好、生物碎屑含量高的混积岩是优质储层发育的基础^[39];成岩作用改造决定了储层物性演化过程,大气淡水及深部热液对储层孔-渗变化也有着重要的影响^[25,40]。

桩海地区油气资源丰富,具有多层系立体含油、多种油藏类型叠合连片的特点,沙河街组上部混积岩层是重要的产油层段。随着桩海101侧井在沙一段-沙二段混积岩储层获得最高日产油98.9 t,以及桩海27井

在该储层获得最高日产油 149 t、日产气 15 495 m³,掀起了桩海地区沙河街组研究的热潮,但前人的研究主要集中在碎屑岩和碳酸盐岩沉积、成藏及储层预测等方面,没有从混合沉积物的方面进行分析,也缺少对优质储层成岩-成储特征的描述,导致了沙一段-沙二段混积岩储层岩性纵横向变化、物性非均质性认识不清,制约了桩海地区沙河街组的勘探进程。因此,本文以渤海湾盆地桩海地区为研究区,利用岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜和物性等分析测试结果,对沙一段-沙二段混积岩储层的岩石学特征、成岩作用特征及储集空间特征进行分析,探讨优质混积岩储层的主控因素和发育模式,为桩海地区沙河街组油气勘探提供一定的理论支撑。

1 区域地质概况

桩海地区位于济阳拗陷东北部,构造上处于埕岛凸起和长堤凸起之间^[41](图 1a),周围分别与黄河口凹陷、渤中凹陷、沙南凹陷、埕北凹陷和五号桩洼陷相邻^[42],勘探面积约 320 m²。受古近纪早-中期活动的北东向及近东西向同沉积断裂控制,研究区形成了一系列同向断阶带^[43],可以进一步划分为第一坡折带、第二坡折带及洼陷带,对砂体展布和油气成藏起到了重要的控制作用^[44]。

桩海地区沙河街组接受了西北部埕岛凸起和东南部长堤凸起两个方向的物源供给(图 1b),自下而上发育了沙三段与沙一段-沙二段(图 1c),沙四段不发育。沙三段沉积早期水体较深,在湖盆边缘发育近源快速堆积的扇三角洲沉积,砂体粒度粗、厚度大,湖盆中心发育了厚层暗色泥岩,可以作为良好的烃源岩,湖盆中部偶见浊积扇砂体,中-晚期随湖盆水体下降,扇三角洲不断向湖盆中央进积;沙一段-沙二段沉积时期整体由炎热干旱向温暖湿润过渡,水介质较咸^[5,45],湖盆水体较浅,有利于碳酸盐矿物的析出,在局部发育的灰质滩坝沉积相带上堆积了大量碳酸盐矿物,而在湖盆边缘则发育扇三角洲、砂质滩坝沉积,堆积了大量的陆源碎屑沉积物,这些陆源碎屑物质在波浪和流水的作用下与湖水析出的碳酸盐矿物发生混合沉积,为混积岩的形成创造了有利条件。

2 实验样品及方法

本文所使用的样品及数据来自桩海地区 10 口井的岩心及钻、测井资料,主要包括岩心照片(151 张)、铸体薄片(24 件)、普通薄片(29 件)、扫描电镜分析(14 件)和

储层孔-渗分析(92 件)。其中,采用 Quanta200 扫描电镜及 EDAX 能谱仪联机进行扫描电镜实验;储层孔-渗分析遵循 SY/T5336—2006《岩心分析方法》(石油天然气行业标准),利用氦气孔隙度仪分析岩石样品的孔隙度和渗透率。通过岩心、薄片资料及扫描电镜分析了研究区混积岩储层岩石学特征、成岩作用特征及储集空间特征,通过孔-渗分析明确不同岩性储层物性特征,最终讨论混积岩优质储层控制因素,建立甜点发育模式。

3 混积岩岩性分类与岩石学特征

3.1 岩性分类

前人对混积岩的分类与命名方式进行了大量的讨论,国外学者最早提出了将陆源碎屑、黏土、碳酸盐颗粒和灰泥作为四个端元的混积岩分类方案^[14],但由于实际应用起来较为繁琐,中国学者对其进行改进后提出了将长英质矿物、黏土矿物、碳酸盐矿物作为三个端元的分类方案^[47];此后许多学者对各端元的含量界限提出了不同的见解^[17],也有学者提出了将碳酸盐矿物和陆源碎屑(长英质+黏土质矿物)作为两个端元的划分方案^[48],至今没有形成统一的分类标准。本次研究参考了前人在渤海海域沙河街组混积岩研究中提出的方案^[5,49],将陆源碎屑、化学成因碳酸盐矿物(不含胶结物)和生物成因碳酸盐颗粒作为 3 个端元进行了混积岩的分类(图 2),将目的层岩性划分为以下 6 类:(Ⅰ)陆源碎屑岩(陆源碎屑含量>85%);(Ⅱ)以陆源碎屑为主的混积岩(陆源碎屑含量在 50%~85%);(Ⅲ)以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩(化学沉淀碳酸盐含量在 50%~90%);(Ⅳ)正混积岩(三组分含量均<50%);(Ⅴ)以生物碎屑为主的混积岩(生物碎屑含量在 50%~90%);(Ⅵ)碳酸盐岩(碳酸盐含量>90%)。

3.2 岩石学特征

本次研究主要对Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ和Ⅴ型混积岩进行分析描述。

Ⅱ型(以陆源碎屑为主的混积岩)主要分布在湖盆边缘,当物源供给较强时,河流带来大量陆源碎屑矿物,形成扇三角洲前缘沉积,这些碎屑颗粒分选磨圆差,成熟度低(图 3a,b),填隙物主要为泥晶方解石、少量杂基和菱铁矿,偶见石英次生加大,而滩坝沉积的混积岩由于水动力较强,其结构成熟度相对较高(图 3c)。长堤凸起供源的碎屑颗粒成分主要为石英(含量 20%~40%)、长石(含量 30%~40%)和岩屑

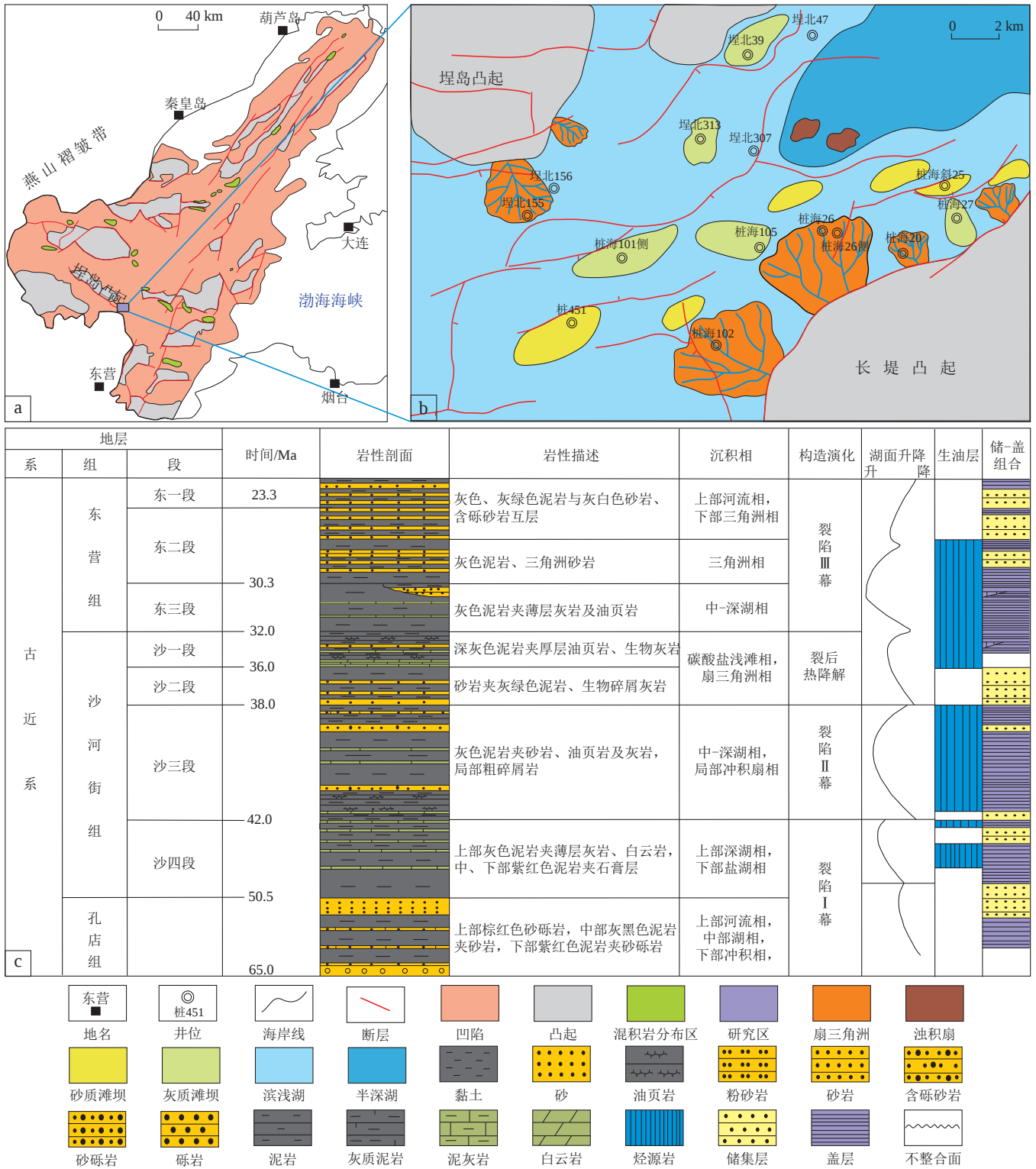


图1 渤海湾盆地济阳坳陷桩海地区区域地质背景

Fig. 1 Regional geological setting of the Zhuanghai area, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 研究区区域位置(改自文献[5]); b. 沙一段-沙二段沉积相展布; c. 渤海海域新生界地层发育特征(改自文献[46])

(含量30%~40%),近物源处岩屑含量高,成分主要为中-酸性喷出岩岩屑和部分石英岩岩屑、燧石颗粒;埕岛凸起供源碎屑颗粒中石英含量较高(40%~50%)、长石含量中等(25%~35%)、岩屑含量偏低

(15%~25%),岩屑成分主要为变质岩岩屑。

Ⅲ型(以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩)主要分布在缓坡处,以浅湖和灰质滩坝沉积为主,陆源碎屑物质供给相对较弱,碎屑颗粒分选磨圆较差,成熟度较低

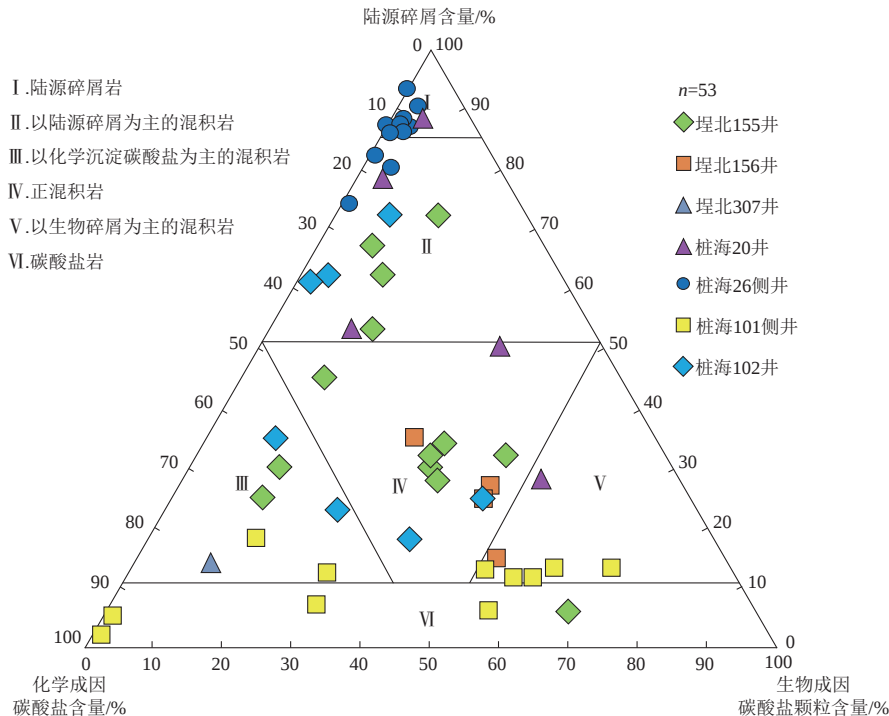


图2 桩海地区沙一段-沙二段混积岩岩石类型三角图(改自文献[5]和文献[49])

Fig. 2 Ternary diagram showing the MSCS types in the Es₁₋₂, Zhuanghai area (modified after references [5] and [49])

(图3d, e), 颗粒之间充填了大量泥晶碳酸盐矿物(图3f), 可见一定含量的生物碎屑(图3d)。

IV型(正混积岩)主要分布在浅湖与扇三角洲和滩坝的过渡地带, 碎屑颗粒粒径大小不一(图3g, h), 分选磨圆较差, 成熟度低, 粒间充填了大量方解石胶结物, 扫描电镜下可以见到少量石英次生加大边以及高岭石等黏土矿物发育, 颗粒与颗粒之间互不接触或为点接触, 鲕粒及生物碎屑含量较高(图3i)。

V型(以生物碎屑为主的混积岩)主要分布在水下古地貌高点灰质滩坝沉积相带, 碎屑颗粒含量较低, 粒径普遍小于0.25 mm, 螺类及介形虫类生物碎屑大量发育(图3j, k), 岩心上可以清晰地识别出生物化石(图3l)。

4 成岩作用与成岩演化

利用薄片观察、扫描电镜分析等手段分析总结了不同类型成岩作用在不同岩性混积岩中的发育程度(图4)。

4.1 泥晶化作用

泥晶化作用主要表现为颗粒边缘发育了一圈或多圈的泥晶碳酸盐矿物, 多呈灰黑色(图5a, b), 厚度不一, 扫描电镜下可以明显观察到泥晶包壳紧紧包裹着碎屑颗粒(图5c), 在以生物碎屑为主的混积岩中发育程度最高, 在以陆源碎屑为主的混积岩中发育程度最

低。前人认为其是在同生/准同生阶段由于微生物活动而形成的, 不同圈层的泥晶包壳元素含量有一定的差异, 这可能与沉积环境的变化有关^[5]。通常泥晶包壳具有比较稳定的性质和一定的渗流能力, 流体可以通过泥晶包壳中的纳米级微孔进入内部并对其包裹的颗粒进行改造^[45], 常常可以观察到泥晶包壳保存下来而其包裹的颗粒被完全溶蚀形成铸模孔的现象。

4.2 压实作用

压实作用主要发生于早成岩时期, 使颗粒之间接触更加紧密, 加剧了储层的致密化程度^[50-52]。桩海地区混积岩储层埋深大多在2 800 m以上, 压实作用强度在不同岩性储层中有着比较明显的差异: 以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩和分选差的以陆源碎屑为主的混积岩受压实作用影响最大(图5d), 原生孔隙难以识别, 且埋深越大储层物性越差; 而在以生物碎屑为主的混积岩中, 由于泥晶包壳与早期环边亮晶胶结物的结合形成了刚性格架, 增加了颗粒的抗压实能力^[30], 导致储层受压实作用影响较小, 颗粒之间以点接触为主(图5e), 部分粒间原生孔隙得到了保留。

4.3 胶结作用

结合镜下观察, 发现混积岩储层经历了多期次的胶结作用, 胶结物成分主要为白云石和方解石(图5e,

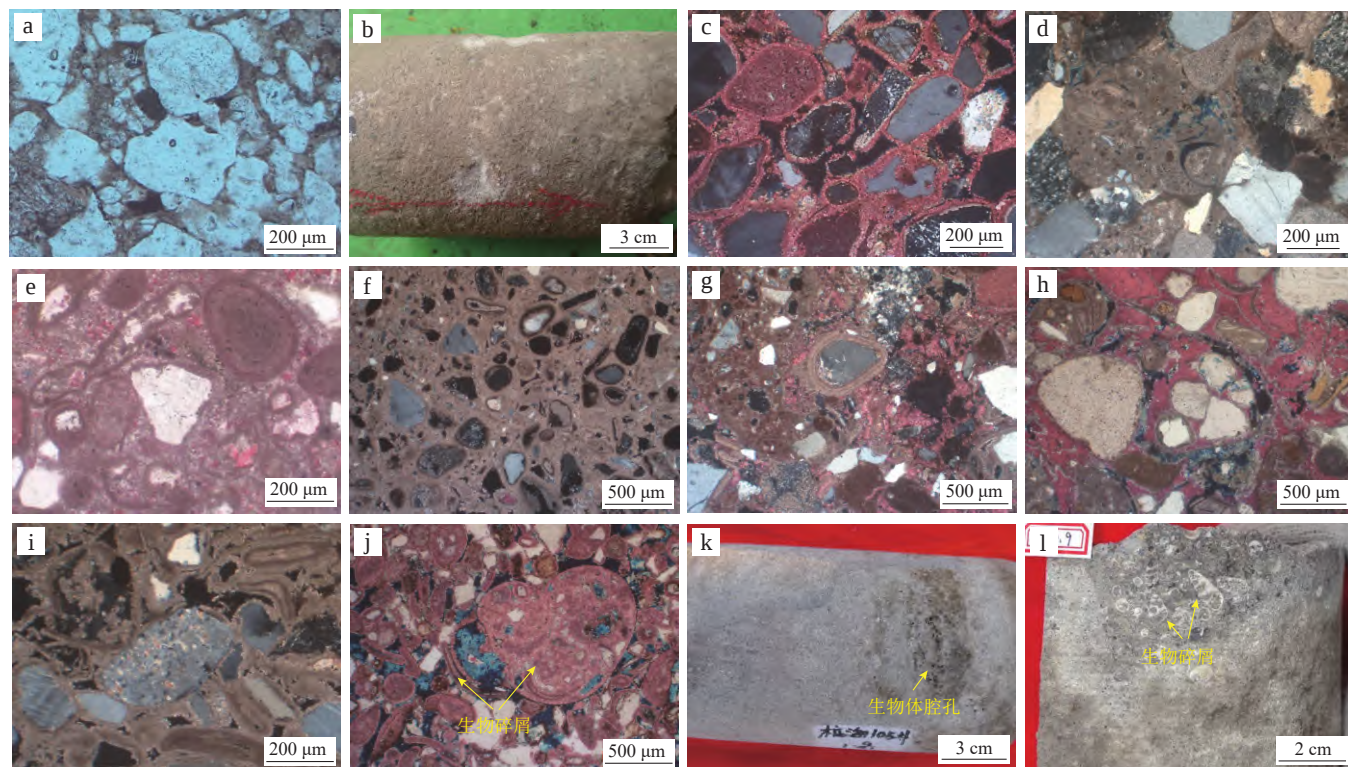


图3 桩海地区沙一段-沙二段混积岩岩石学特征照片

Fig. 3 Images showing the petrological characteristics of MSCSs in the Es_{1-2} , Zhuanghai area

a. 含泥晶细砂岩, 桩海26侧井, 埋深3 892.66 m, 单偏光薄片; b. 灰色含砾细砂岩, 桩海26侧井, 埋深3 887.29 m, 岩心照片; c. 含泥晶细砂岩, 桩海20井, 埋深3 546.85 m, 正交光薄片; d. 含生屑陆屑泥晶灰岩, 埕北155井, 埋深3 082.52 m, 正交光薄片; e. 含陆屑生屑泥晶灰岩, 桩海101侧井, 埋深3 436.43 m, 单偏光薄片; f. 含陆屑泥晶灰岩, 桩海102井, 埋深3 316.00 m, 正交光薄片; g. 含生屑陆屑泥晶灰岩, 埕北155井, 埋深3 081.90 m, 正交光薄片; h. 含生屑陆屑泥晶灰岩, 埕北155井, 埋深3 083.14 m, 单偏光薄片; i. 含陆屑生屑泥晶灰岩, 桩海102井, 埋深3 320.50 m, 正交光薄片; j. 含陆屑生物碎屑灰岩, 桩海20井, 埋深3 552.91 m, 单偏光薄片; k. 灰色含螺中细砂岩, 桩海105井, 埋深3 478.75 m, 岩心照片; l. 灰色含螺中细砂岩, 桩海20井, 埋深3 552.91 m, 岩心照片

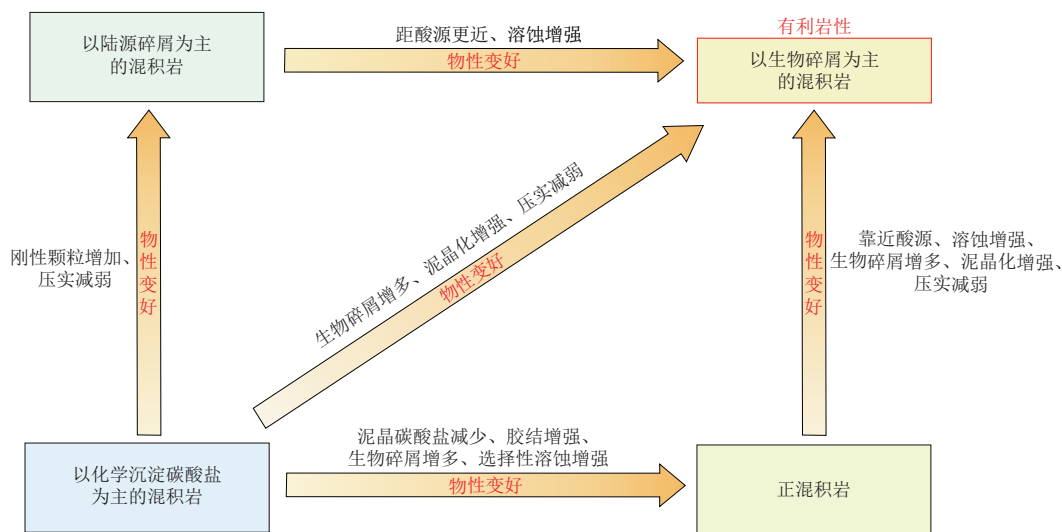


图4 桩海地区沙一段-沙二段不同混积岩成岩作用差异

Fig. 4 Diagenetic differences for different types of MSCSs in the Es_{1-2} , Zhuanghai area

f), 还有少量的次生石英、黄铁矿(图5g)和黏土矿物等。胶结类型包括环边状白云石胶结、嵌晶方解石胶结、晶粒状白云石胶结和铁方解石胶结。环边状

白云石胶结物通常发生于准同生阶段, 呈等厚状分布在泥晶包壳外侧; 嵌晶方解石胶结发生于早成岩阶段, 在颗粒还未接触时充填在孔隙之中, 可见两组

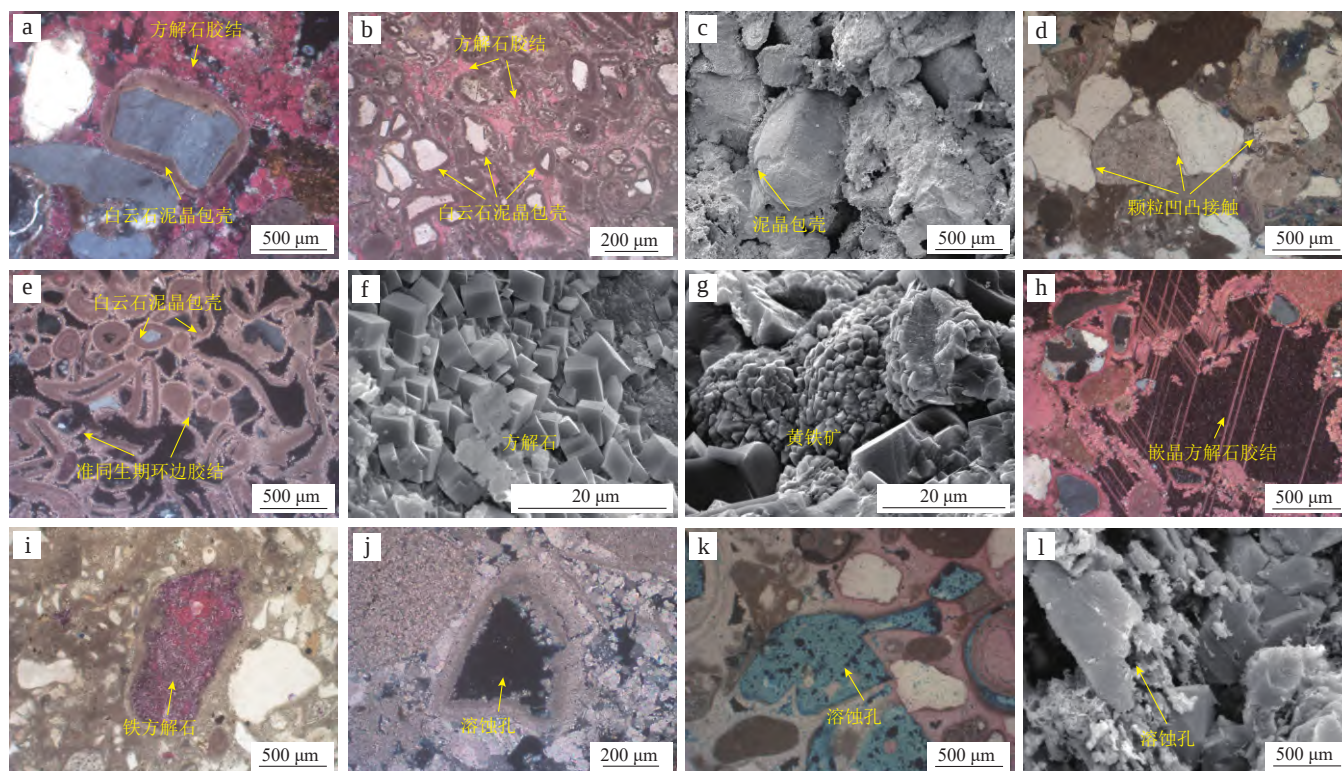


图5 桩海地区沙一段-沙二段混积岩成岩作用特征显微照片

Fig. 5 Images showing the diagenetic characteristics of the MSCs in the Es_{1-2} , Zhuanghai area

a. 白云石泥晶包壳, 埕北155井, 埋深3 084.56 m, 正交光薄片; b. 白云石泥晶包壳, 桩海101侧井, 埋深3 439.34 m, 正交光薄片; c. 白云石泥晶包壳, 桩海20井, 埋深3 546.85 m, 扫描电镜; d. 颗粒凹凸接触, 埕北155井, 埋深3 081.56 m, 单偏光薄片; e. 环边亮晶胶结, 桩海101侧井, 埋深3 437.31 m, 正交光薄片; f. 方解石胶结物, 桩海20井, 埋深3 551.50 m, 扫描电镜; g. 黄铁矿, 埕北156井, 埋深2 875.39 m, 扫描电镜; h. 方解石充填孔隙, 埕北156井, 埋深2 874.92 m, 正交光薄片; i. 铁方解石充填孔隙, 埕北155井, 埋深3 082.30 m, 单偏光薄片; j. 酸性流体溶蚀颗粒, 埕北155井, 埋深3 083.46 m, 正交光薄片; k. 酸性流体溶蚀生物颗粒, 埕北156井, 埋深2 975.39 m, 正交光薄片; l. 酸性流体溶蚀长石颗粒, 桩海26侧井, 埋深3 461.78 m, 扫描电镜

解理(图5h),在正混积岩中最发育;晶粒状白云石胶结往往发生于成岩阶段的中后期,白云石晶型较好,晶粒粗大;铁方解石胶结发生于晚期,充填在前期溶蚀形成的孔隙内,染色后在镜下显示为紫红色(图5i)。

4.4 溶蚀作用

溶蚀作用是改善储层物性的主要方式之一,依据溶蚀的特征和方式可以分为选择性溶蚀和非选择性溶蚀。选择性溶蚀主要发生在大气水成岩环境中,当混积岩储层受潮平面的变化或构造运动的影响暴露在地表时,大气淡水就会渗入储层对生物碎屑、碳酸盐矿物及少量长石颗粒进行溶蚀形成铸模孔(图5e,j),这种现象在以生物碎屑为主的混积岩中最为常见;非选择性溶蚀主要发生在埋藏成岩阶段,有机质成熟后释放出的有机酸经通道运移进入储层后对颗粒和早期碳酸盐胶结物进行溶蚀形成孔隙(图5l)。

4.5 成岩演化序列

4.5.1 以陆源碎屑为主的混积岩

本次研究重点关注了两类以陆源碎屑为主的混积岩:滩坝沉积的高结构成熟度混积岩和扇三角洲沉积的低成熟度混积岩。前者泥晶碳酸盐含量较低,颗粒分选磨圆较好,在准同生阶段发生了碳酸盐等厚环边亮晶胶结,一定程度上增强了岩石的抗压实能力,降低了压实程度;在成岩早期发生了碳酸盐嵌晶胶结,充填了粒间孔隙;成岩晚期有机质成熟后有机酸进入储层发生了一定程度的溶蚀,溶蚀对象主要为长石颗粒。后者泥晶碳酸盐含量相对多,颗粒分选磨圆较差,部分颗粒(占比约1/4)在准同生阶段发生了泥晶化作用并形成了泥晶包壳,但由于其发育程度不高,随着埋深加大岩石的压实程度也随之不断增强,现今颗粒之间以线-凹凸接触为主;埋藏晚期少量有机酸进入储层后对部分颗粒进行了溶蚀(图6)。

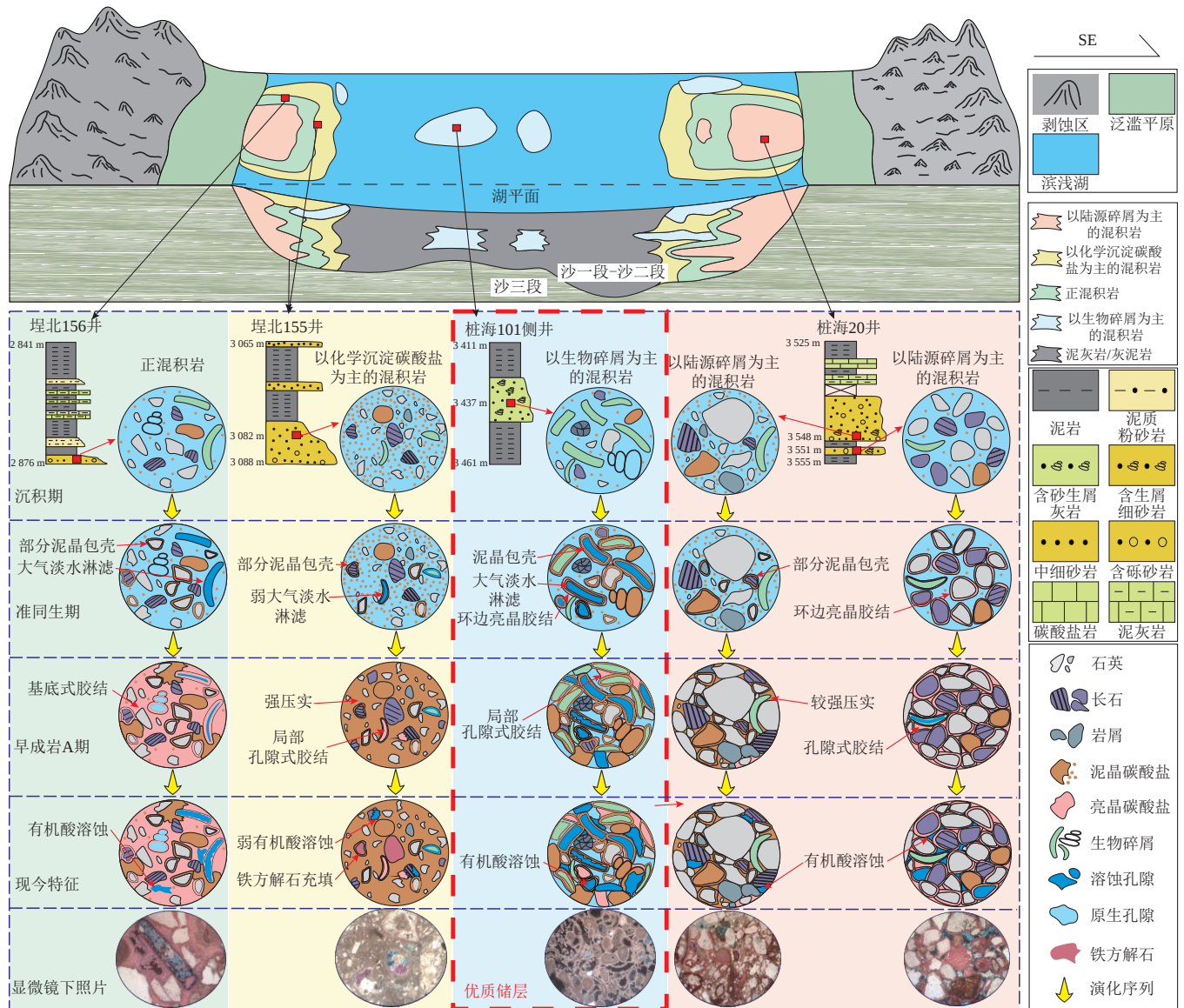


图6 桩海地区沙一段-沙二段不同岩性混积岩成岩演化模式

Fig. 6 Diagenetic evolutionary patterns of the MSCSs of diverse lithologies in the Es₁₋₂, Zhuanghai area

4.5.2 以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩

在准同生阶段部分颗粒(占比约1/5)发生泥晶化作用形成了泥晶包壳,少量的生物颗粒和碎屑颗粒受到微弱的大气淡水淋滤而被溶蚀;在成岩中早期少量方解石胶结物充填了前期溶蚀形成的次生孔隙,而由于较高含量的泥晶碳酸盐充填了粒间空隙,不断加大的埋深也未能改变颗粒之间互不接触的状态;埋藏晚期发生了少量有机酸溶蚀以及铁方解石胶结的现象(图6)。

4.5.3 正混积岩

在准同生阶段部分颗粒(约1/2)发育了泥晶包壳,之后部分生物颗粒和碎屑颗粒受到大气淡水淋滤发生

溶蚀而形成了铸模孔;成岩早期发生了方解石基底式胶结,大量的方解石充填了粒间原生孔隙和次生孔隙,极大地降低了压实作用带来的影响;埋藏晚期少量有机酸对部分长石颗粒和碳酸盐胶结物进行了溶蚀(图6)。

4.5.4 以生物碎屑为主的混积岩

在准同生阶段几乎所有的颗粒均发育了泥晶包壳,在沙一段晚期由于小幅度的构造抬升,使沉积物受到了较强的淡水影响,形成了大量生物碎屑和长石铸模孔,而后溶蚀产物在泥晶包壳周围沉淀下来形成了环边状亮晶碳酸盐胶结物;成岩中早期局部沉淀了少量碳酸盐胶结物;埋藏晚期有机酸进入储层后对部分颗粒和粒间胶结物进行了溶蚀(图6)。

5 储层物性与储集空间

5.1 物性特征

对桩海地区沙一段-沙二段39个混积岩样品的分析数据进行统计,发现该地区以生物碎屑为主的混积岩储层物性最好,平均孔隙度为15%~25%,部分样品孔隙度大于30%,孔隙度与渗透率整体呈正相关关系(图7a)。不同岩性的面孔率有一定的差异(图7b),其中以生物碎屑为主的混积岩平均面孔率最高(7.0%),正混积岩其次(4.3%),以陆源碎屑为主的混积岩和以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩平均面孔率相对较低(分别为3.0%和2.4%),这可能是与早期沉淀的泥晶碳酸盐含量及后期强烈的压实和较弱的溶蚀等因素有关。岩石薄片的鉴定和数据统计表明,生物碎屑及化学沉淀碳酸盐含量与面孔率有着明显的相关性,生物碎屑尤其是螺类壳体的含量越多,面孔率越高(图7c,d)。化学沉淀的泥晶碳酸盐矿物抗压实能力较弱,粒间孔隙随压实作用的增强而迅速减少,酸性流体难以进入储层进行溶蚀改造,溶蚀形成的产物也不

能及时排出,导致岩石面孔率较低(图7e,f)。

5.2 储集空间特征

桩海地区沙一段-沙二段混积岩储层储集空间主要包括次生溶蚀孔及原生粒间孔(图8)。原生孔隙整体含量偏低,主要为生物体腔孔及原生粒间孔,次生溶蚀孔隙占比较大,包括粒间溶孔、粒内溶孔、生屑铸模孔和陆屑铸模孔等,裂缝发育程度低,其中生物体腔孔和生屑铸模孔均属于生物碎屑孔。

5.2.1 原生粒间孔

原生粒间孔可以分为压实剩余粒间孔隙和胶结剩余粒间孔隙。由于研究区混积岩储层埋深较大且多为近源沉积,黏土矿物或泥晶碳酸盐矿物含量高,经过成岩作用改造后,原生粒间孔几乎损失殆尽,仅在以生物碎屑为主的混积岩中有所发育。

压实剩余粒间孔隙在泥晶包壳和环边亮晶胶结强烈发育的层段保留程度相对较高(图9a),这是由于石英、长石颗粒及生物碎屑被碳酸盐包裹形成包壳后抗压实能力得到了很大的提升,颗粒变形程度弱,接触方式主要是点-线接触,原生粒间孔得到了较好的保存。

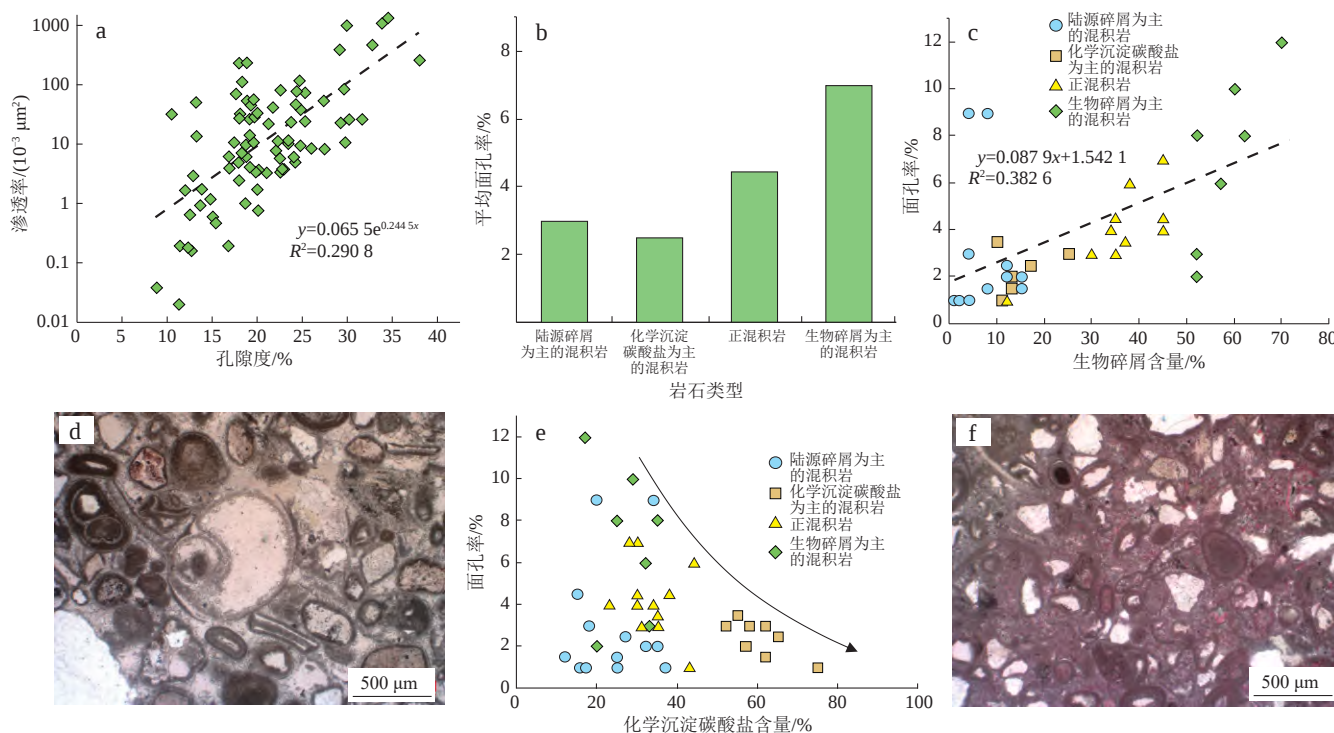


图7 桩海地区沙一段-沙二段不同岩性混积岩物性特征

Fig. 7 Physical properties of the MSCSs with diverse lithologies in the Es₁₋₂, Zhuanghai area

a. 以生物碎屑为主混积岩的孔隙度与渗透率交会图; b. 岩性与岩石面孔率关系; c. 生物碎屑含量与岩石面孔率关系; d. 生物碎屑含量高, 桩海101侧井, 埋深3 441.77 m, 单偏光, 薄片显微照片; e. 化学沉淀碳酸盐含量与岩石面孔率关系; f. 泥晶碳酸盐含量高, 桩海101侧井, 埋深3 436.43 m, 单偏光, 薄片显微照片

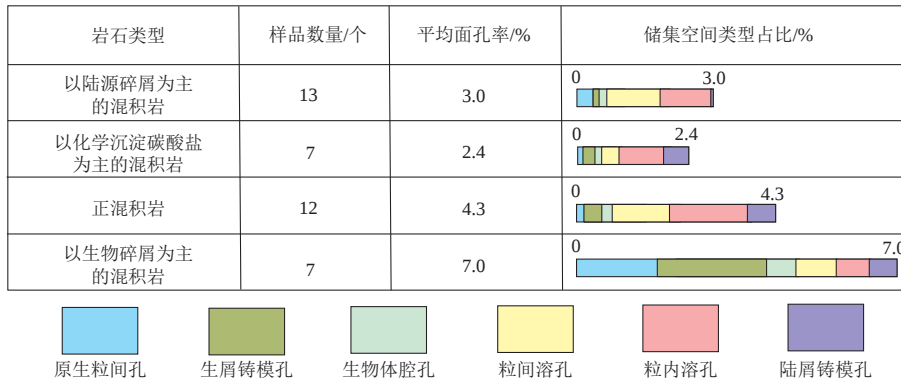


图8 桩海地区沙一段-沙二段不同岩性混积岩储集空间类型占比

Fig. 8 Percentages of various reservoir space types in the MSCSs with different lithologies in the E_{s1-2} , Zhuanghai area

胶结剩余粒间孔隙是指方解石、白云石和高岭石等自生矿物充填孔隙后残余的粒间孔隙(图9b,c),发育在胶结作用较强的层段,这类孔隙需借助扫描电镜实验进行识别,孔隙直径较小、连通性较差,对与储层孔贡献相对较小。

5.2.2 生物体腔孔

生物体腔孔在以生物碎屑为主的混积岩和正混积岩储层中含量较高,这两类储层含有较多的生物(尤其是腹足类)颗粒,当生物壳体能够相对完整地沉积下来时,其内部的体腔孔就有可能避免遭破坏保留至今,这类孔隙通常体积较大但连通性较差(图9d—f)。

5.2.3 次生溶蚀孔

桩海地区沙一段-沙二段混积岩储层经历了局部大气淡水、有机酸等酸性流体的溶蚀改造,形成了一系列粒间、粒内溶孔和铸模孔。粒间溶孔主要是在原生粒间孔的基础上,酸性流体对颗粒边缘及部分后期粒间充填的碳酸盐胶结物溶蚀而形成的(图9g,h),这类孔隙往往对储层面孔率有突出贡献;粒内溶孔主要为碎屑颗粒内部发育的溶蚀孔隙(图9g,i),通常是酸性流体沿长石解理缝对其内部发生溶蚀或是对岩屑颗粒内部进行溶蚀而成;生屑铸模孔主要由准同生期大气淡水对介形虫的选择性溶蚀而形成(图9a),陆屑铸模孔则主要是长石颗粒被彻底溶解,且溶解产物几乎完全随流体迁移,只剩下颗粒的轮廓外形(图9j—l)。

6 优质储层控制因素

综合以上分析认为,原始沉积条件、泥晶包壳的发育程度以及成岩流体改造等因素共同控制了桩海地区沙一段-沙二段优质储层的发育。

6.1 沉积条件

原始的沉积条件决定了不同尺度下沉积物的非均质性^[49,53-54],控制了颗粒的成分、含量及粒径大小^[55],影响了后期成岩作用改造的强度^[56-57]。扇三角洲沉积物杂基含量高,岩石成熟度差,整体初始孔隙度低;而滩坝沉积物由于受到波浪的不断冲刷、淘洗,形成的岩石颗粒分选磨圆较好、杂基含量低,有着较高的初始孔隙度和抗压实能力,成储条件较好,同时灰质滩坝沉积物中具有较高的生物碎屑含量,利于原生孔隙的保存和次生孔隙的形成。因此,灰质滩坝相是优质储层最发育的沉积相类型。

6.2 泥晶包壳的发育

前文介绍了不同岩性混积岩储层均在准同生阶段不同程度地发育了碳酸盐泥晶包壳,这很大程度上增加了岩石的抗压实能力,有利于原生孔隙的保存。研究发现,原生孔隙含量与泥晶包壳含量成正比,在泥晶包壳发育程度高的储层中能够见到大量残余粒间孔的存在(图3k),而在泥晶包壳不发育的储层中很难见到残留下来的原生孔隙(图3c)。

6.3 成岩流体改造

碱性流体多促成碳酸盐胶结,造成原生孔隙的减少。研究区混积岩储层发育了多期碳酸盐胶结作用,在准同生期储层往往会因受到咸湖富钙流体下渗的影响而发育环边状亮晶碳酸盐胶结物,这种胶结物可以直接包裹在颗粒边缘,也可以在泥晶包壳外缘形成,其与泥晶包壳组成的圈层组合能够极大地提高岩石的抗压实能力;而在埋藏成岩期形成的碳酸盐嵌晶胶结物主要起到了充填孔隙、降低储层物性的作用。

酸性流体主要为大气淡水和有机酸,起到改善储

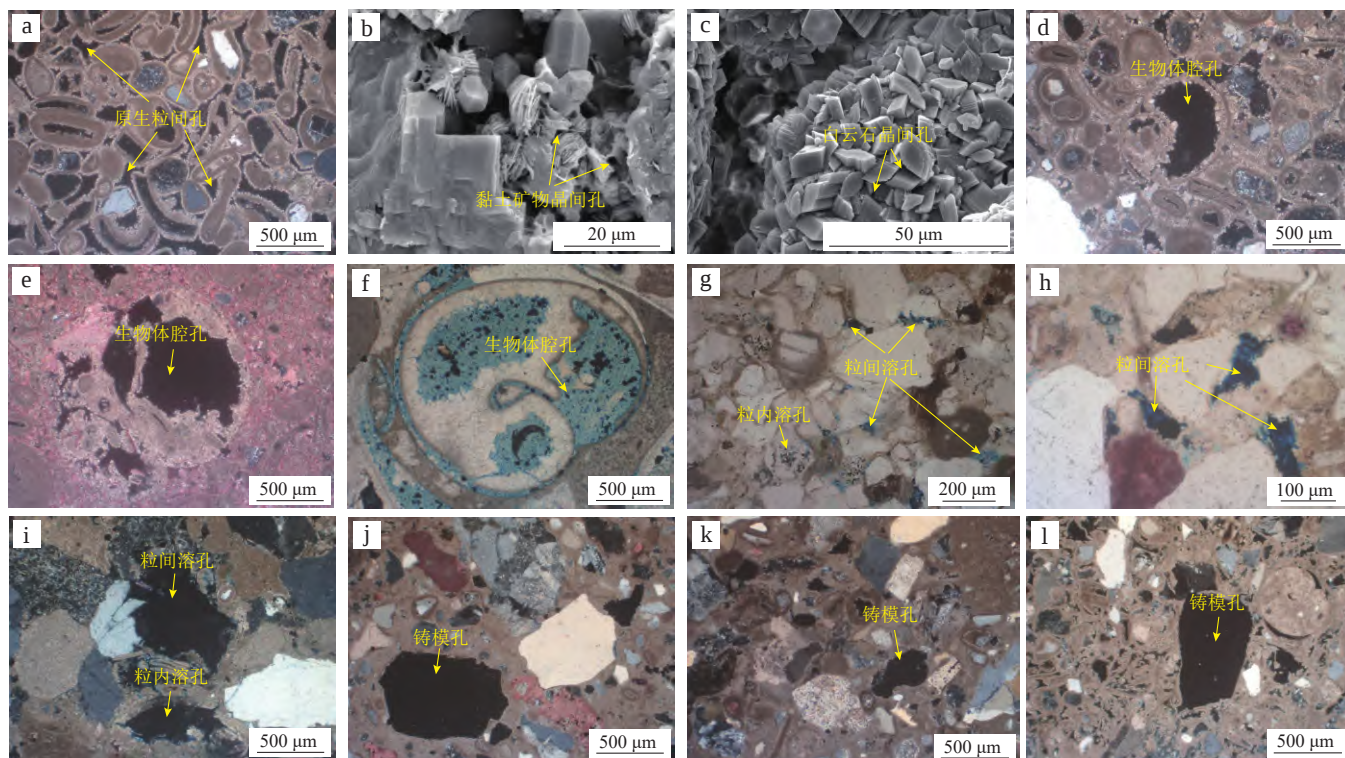


图9 桩海地区沙一段-沙二段混积岩储集空间类型显微照片

Fig. 9 Reservoir space types of the MSCs in the Es_{1-2} , Zhuanghai area

a. 原生粒间孔和生物铸模孔, 桩海101侧井, 埋深3 437.31 m, 正交光薄片; b. 晶间孔, 桩海26侧井, 埋深3 888.34 m, 扫描电镜; c. 晶间孔, 埕北156井, 埋深2 875.79 m, 扫描电镜; d. 生物体腔孔, 桩海101侧井, 埋深3 441.77 m, 正交光薄片; e. 生物体腔孔, 桩海101侧井, 埋深3 441.16 m, 正交光薄片; f. 生物体腔孔, 埕北156井, 埋深2 875.39 m, 单偏光薄片; g. 粒间及粒内溶孔, 桩海20井, 埋深3 548.80 m, 单偏光薄片; h. 粒间溶孔, 桩海20井, 埋深3 548.80 m, 单偏光薄片; i. 粒间及粒内溶孔, 埕北155井, 埋深3 082.52 m, 正交光薄片; j. 铸模孔, 桩海102井, 埋深3 319.90 m, 正交光薄片; k. 铸模孔, 桩海102井, 埋深3 319.90 m, 正交光薄片; l. 铸模孔, 桩海102井, 埋深3 320.50 m, 正交光薄片

层物性的作用^[58-59]。大气淡水主要是由于湖平面的变化而阶段性地作用于混积岩储层, 大气淡水下渗会导致水体对碳酸盐矿物不饱和而发生溶蚀, 或是由于斜长石在低温环境下的不稳定性而发生部分溶蚀, 这为埋藏成岩期流体的作用提供了空间。有机酸主要来源于桩海地区和黄河口凹陷沙三段厚层烃源岩。当有机质开始成熟时, 释放的有机酸会优先沿断层和不整合面进入沙一段-沙二段储层对长石颗粒、火山岩岩屑及少量粒间胶结物溶蚀改造, 而后生成的油气进入储层时就会发生油气侵位, 这对储层孔隙的发育和保存具有重要意义。

6.4 甜点模式建立

结合前文提出的混积岩储层4大主控因素, 根据桩海地区的实际钻井资料, 建立沙一段-沙二段混积岩优质储层发育模式(图10)。桩海地区混积岩主要发育在扇三角洲前缘、砂质滩坝和灰质滩坝处, 其中古地貌高点发育的灰质滩坝生物碎屑含量较高, 抗压能力强, 原生孔隙保存程度高, 且易受酸性流体的影响

形成次生孔隙, 是优质储层的潜在发育位置。砂质滩坝处发育的混积岩岩石结构成熟度较高, 早期易受方解石胶结影响而导致孔隙度迅速降低, 但后期可以受有机酸影响而形成部分次生孔隙, 现今储层物性中等。扇三角洲前缘处发育的混积岩可能受到其临近灰质滩坝早期溶蚀而产生的富钙流体侧向运移的影响, 成岩早期沉淀的大量方解石胶结物破坏孔隙, 后期受酸性流体影响弱, 现今储层物性较差。

7 结论

1) 以陆源碎屑、化学成因碳酸盐(不含胶结物)和生物成因碳酸盐颗粒为三端元, 在桩海地区沙一段-沙二段划分出6种岩石类型、4种混积岩类型, 其中以生物碎屑为主的混积岩物性最好, 平均孔隙度为21%, 其生物碎屑含量高, 碎屑颗粒粒径小、分选好, 储集空间主要为原生粒间孔和生物碎屑孔。

2) 有利成岩作用包括泥晶化、环边亮晶胶结和溶蚀作用, 泥晶包壳和环边亮晶胶结物的发育有利

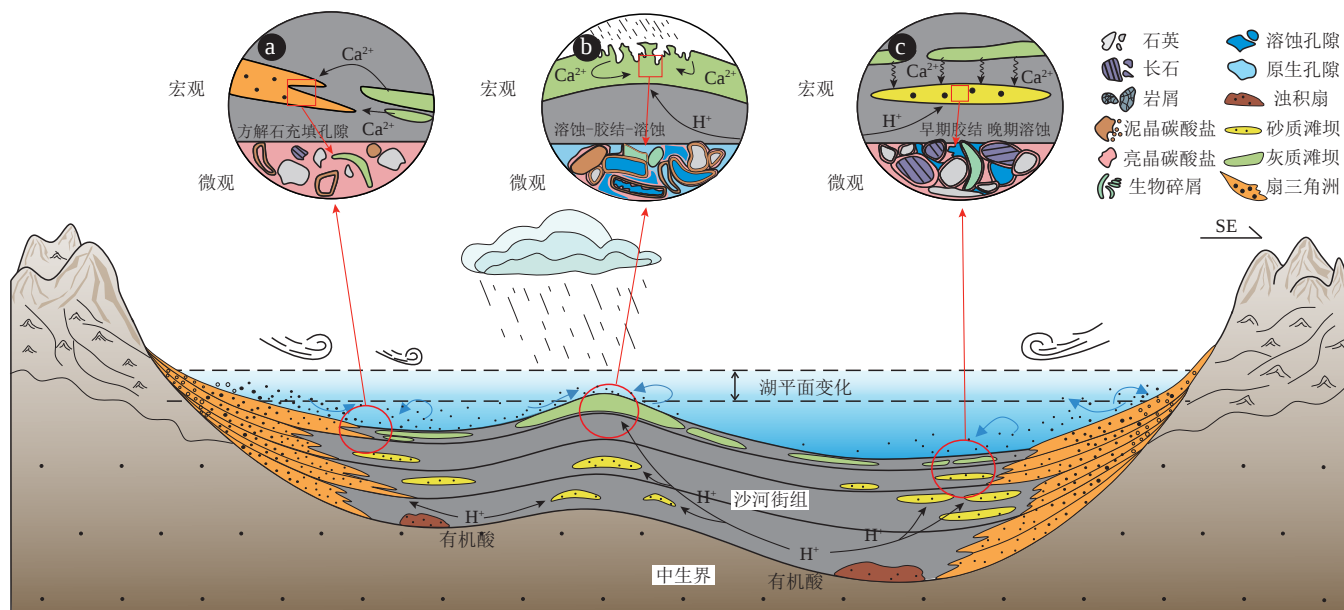


图10 桩海地区沙一段-沙二段混积岩优质储层发育模式

Fig. 10 Developmental model of high-quality MSCS reservoirs in the Es_{1-2} , Zhuanghai area

a. 扇三角洲前缘处发育的正混积岩,受富钙流体影响早期发生方解石充填;b. 灰质滩坝处发育的以生物碎屑为主的混积岩,受大气淡水和有机酸溶蚀影响孔隙度较高;c. 砂质滩坝处发育的以陆源碎屑为主的混积岩,早期受富钙流体影响发生方解石沉淀,后期发生有机酸溶蚀

于抵抗压实、保留原生孔隙,在以生物碎屑为主的混积岩中最发育;溶蚀作用有利于次生孔隙的形成,在以生物碎屑为主的混积岩中最发育。破坏性成岩作用包括压实和嵌晶胶结作用,其中压实作用对以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩和颗粒分选差的以陆源碎屑为主的混积岩影响最大,嵌晶胶结在正混积岩中最发育。

3) 沉积期较高的岩石结构成熟度和较高的生物碎屑含量,准同生期泥晶包壳的发育、大气淡水的淋滤以及环边亮晶胶结物的发育,埋藏成岩期发生较强的有机酸溶蚀是优质混积岩储层形成的有利条件。

参考文献

- [1] PALERMO D, AIGNER T, GELUK M, et al. Reservoir potential of a lacustrine mixed carbonate/siliciclastic gas reservoir: The Lower Triassic Rogenstein in the Netherlands [J]. Journal of Petroleum Geology, 2008, 31(1): 61-96.
- [2] 王冠民, 廖黔渝, 高亮. 孤北洼陷西部陡坡带沙一段混积岩滩沉积特征[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(4): 28-30. WANG Guanmin, LIAO Qianyu, GAO Liang. Sedimentary characteristics of mixed snail-shell beach of Es_1 Formation in the West of Gubei Sag [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(4): 28-30.
- [3] 朱如凯, 邹才能, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1168-1184. ZHU Rukai, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1168-1184.
- [4] 刘惠民, 杨怀宇, 张鹏飞, 等. 古湖泊水介质条件对混积岩相组合沉积的控制作用——以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组三段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 297-306. LIU Huimin, YANG Huaiyu, ZHANG Pengfei, et al. Control effect of paleolacustrine water conditions on mixed lithofacies assemblages: A case study of the Palaeogene Es_3 , Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 297-306.
- [5] 解习农, 叶茂松, 徐长贵, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷混积岩优质储层特征及成因机理[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3526-3539. XIE Xinong, YE Maosong, XU Changgui, et al. High quality reservoirs characteristics and forming mechanisms of mixed siliciclastic-carbonate sediments in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3526-3539.
- [6] DU Xiaofeng, LIU Hao, HUANG Xiaobo, et al. A near-shore clastic-carbonate mixing mode in a continental rift basin (Early Oligocene, eastern Shijiutuo Uplift, Bohai Bay Basin, China): Sedimentology, reservoir characteristics and exploration practice [J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 9(1): 25.
- [7] 邓远, 陈世悦, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段细粒沉积岩形成机理与环境演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 811-823, 890. DENG Yuan, CHEN Shiyue, PU Xiugang, et al. Formation mechanism and environmental evolution of fine-grained sedimentary rocks from the second member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 811-823, 890.
- [8] 崔航, 朱世发, 施振生, 等. 川北侏罗系大安寨段湖相混积层系沉积特征与发育模式[J]. 古地学报, 2022, 24(6): 1099-

- 1113.
- CUI Hang, ZHU Shifa, SHI Zhensheng, et al. Sedimentary characteristics and development model of lacustrine fine-grained hybrid sedimentary rocks in the Jurassic Da'anzhai Member, northern Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2022, 24(6): 1099-1113.
- [9] CUI Hang, ZHU Shifa, LIANG Chao, et al. Facies association analysis of a Toarcian siliciclastic-carbonate lacustrine system, Sichuan Basin, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 631: 111841.
- [10] 李天军, 黄志龙, 张亦婷, 等. 吐哈盆地胜北洼陷七克台组浅水湖相细粒沉积岩岩相特征、成因模式及页岩油意义 [J]. *地质学报*, 2021, 95(12): 3869-3884.
- LI Tianjun, HUANG Zhilong, ZHANG Yiting, et al. Lithofacies characteristics and genetic model of shallow lacustrine fine-grained sediments and its geological significance for shale oil in the Qiketai Formation in the Shengbei subsag, Turpan-Hami Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(12): 3869-3884.
- [11] 王越. 博格达地区中二叠世咸化湖盆混积相带沉积特征及有利岩相预测 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- WANG Yue. The sedimentary characteristics and favorable lithofacies prediction of the mixed sedimentary facies belt in the Permian Saline Lacustrine Basin in Bogda region [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [12] JIANG Qicai, MA Yongsheng, SHEN Yingchu, et al. High-frequency redox variations of the Eocene cyclic lacustrine sediments in the Yingxi area, western Qaidam Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 174: 135-151.
- [13] 陆统智. 柴达木盆地英西地区致密混积岩储层油气运移和聚集特征 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- LU Tongzhi. Characteristics of oil and gas migration and accumulation in tight migmatite reservoirs in the west of Yingxiqing area, Qaidam [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.
- [14] MOUNT J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments [J]. *Geology*, 1984, 12(12): 432-435.
- [15] 杨朝青, 沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境: 一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积 [J]. *沉积学报*, 1990, 8(2): 59-66.
- YANG Chaoping, SHA Qing'an. Sedimentary environment of the Middle Devonian Qujing Formation, Qujing, Yunnan Province: A kind of mixing sedimentation of terrigenous clastics and carbonate [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(2): 59-66.
- [16] SANDERS D, PONS J M. Rudist formations in mixed siliciclastic-carbonate depositional environments, Upper Cretaceous, Austria: Stratigraphy, sedimentology, and models of development [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 148(4): 249-284.
- [17] 张雄华. 混积岩的分类和成因 [J]. *地质科技情报*, 2000, 19(4): 31-34.
- ZHANG Xionghua. Classification and origin of mixed sedimentite [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2000, 19(4): 31-34.
- [18] GARCÍA-HIDALGO J F, GIL J, SEGURA M, et al. Internal anatomy of a mixed siliciclastic-carbonate platform: The Late Cenomanian-Mid Turonian at the southern margin of the Spanish Central System [J]. *Sedimentology*, 2007, 54(6): 1245-1271.
- [19] 董艳蕾, 朱筱敏, 滑双君, 等. 黄骅坳陷沙河街组一段下亚段混合沉积成因类型及演化模式 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(1): 98-107.
- DONG Yanlei, ZHU Xiaomin, HUA Shuangjun, et al. Genetic types and evolutionary model of mixed clastic-carbonate deposits in the lower part of the Sha-1 Formation, the Huanghua Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 98-107.
- [20] DIX G R, NEHZA O, OKON I. Tectonostratigraphy of the Chazyan (Late Middle-Early Late Ordovician) mixed siliciclastic-carbonate platform, Quebec Embayment [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83(6): 451-474.
- [21] 马艳萍, 刘立. 大港滩海区第三系湖相混积岩的成因与成岩作用特征 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(4): 607-613.
- MA Yanping, LIU Li. Sedimentary and diagenetic characteristics of Paleogene lacustrine "Hunji" rock in beach district, Dagang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 607-613.
- [22] 吕正祥, 王先东, 吴家洋, 等. 渤海海域中部古近系湖相碳酸盐岩储层成岩演化特征 [J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(7): 921-931.
- LYU Zhengxiang, WANG Xiandong, WU Jiayang, et al. Diagenetic evolution characteristics of Paleogene lacustrine carbonate reservoirs in the central Bohai Sea area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(7): 921-931.
- [23] DIX G R, PARRAS A. Integrated diagenetic and sequence stratigraphy of a Late Oligocene-Early Miocene, mixed-sediment platform (Austral Basin, southern Patagonia): Resolving base-level and paleoceanographic changes, and paleoaquifer characteristics [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 307: 17-33.
- [24] DU Xuebin, YE Maosong, XIE Xinong, et al. Why is it easy to form high-quality reservoirs in a mixed siliciclastic-carbonate system? Evidence from diagenetic characteristics [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 212: 110339.
- [25] 卢欢, 王清斌, 牛成民, 等. 湖相混积岩系同沉积淋滤作用识别标志与优质储层形成机理: 以石臼坨凸起陡坡带 Q29 和 Q36 构造沙一、二段为例 [J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3721-3730.
- LU Huan, WANG Qingbin, NIU Chengmin, et al. Meteoric leaching evidences, diagenetic model and its geology significance in mixed rock of steep slope zone of Shijiutuo uplift [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3721-3730.
- [26] MANSURBEG H, CAJA M A, MARFIL R, et al. Diagenetic evolution and porosity destruction of turbiditic hybrid arenites and siliciclastic sandstones of foreland basins: Evidence from the Eocene Hecho Group, Pyrenees, Spain [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(9): 711-735.
- [27] FENG Jinlai, CAO Jian, HU Kai, et al. Dissolution and its impacts on reservoir formation in moderately to deeply buried strata of mixed siliciclastic-carbonate sediments, northwestern Qaidam Basin, northwest China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 124-137.
- [28] 薛永安, 庞小军, 郝轶伟, 等. 渤海海域秦南凹陷东南缘沙一段混积岩优质储层成因及勘探意义 [J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3527-3542.
- XUE Yong'an, PANG Xiaojun, HAO Yiwei, et al. Genesis of

- high-quality mixed rock reservoir and its exploration significance in Es1 around southeast margin of Qinnan Sag, Bohai Sea [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3527-3542.
- [29] 宋章强, 陈延芳, 杜晓峰, 等. 渤海海域A构造区沙二段混合沉积特征及储层研究[J]. *海洋石油*, 2013, 33(4): 13-18.
SONG Zhangqiang, CHEN Yanfang, DU Xiaofeng, et al. Study on sedimentary characteristics and reservoir of second member of Shahejie Formation, A structural area, Bohai Sea [J]. *Offshore Oil*, 2013, 33(4): 13-18.
- [30] 庞小军, 牛成民, 杜晓峰, 等. 渤海海域环渤中地区沙一二段混积岩优质储层差异及成因[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3853-3869.
PANG Xiaojun, NIU Chengmin, DU Xiaofeng, et al. Differences and genesis of high-quality reservoirs of mixed siliciclastic carbonate rocks in the Es12 around Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3853-3869.
- [31] 王清斌, 牛成民, 潘文静, 等. 渤海海域沙一段基底岩性条件对湖相混积岩储层的控制作用[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3556-3566.
WANG Qingbin, NIU Chengmin, PAN Wenjing, et al. Impacts of basement lithology on reservoir of lacustrine carbonate and clastic mixed-deposition in member 1 of Shahejie Formation, Bohai Sea area [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3556-3566.
- [32] 代黎明, 牛成民, 庞小军, 等. 黄河口凹陷渤中27-A构造沙一二段湖相混积岩储层特征及成因[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3797-3807.
DAI Liming, NIU Chengmin, PANG Xiaojun, et al. Reservoir characteristics and forming mechanisms of lacustrine mixed sedimentary rock of first and second members of Shahejie Formation in BZ27-A structure, Huanghekou Sag [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3797-3807.
- [33] 庞小军, 牛成民, 王冠民, 等. 渤海海域深层沙一段混积岩优质储层成因——以渤中13-A构造为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(2): 354-369.
PANG Xiaojun, NIU Chengmin, WANG Guanmin, et al. Genesis of high-quality reservoirs with deeply mixed rocks in the Es1 in BZ13-A structure, Bohai Sea [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(2): 354-369.
- [34] 张藜, 王德英, 张新涛, 等. 渤海海域秦皇岛29-2东构造优质混积储层主控因素[J]. *沉积学报*, 2019, 37(1): 200-211.
ZHANG Li, WANG Deying, ZHANG Xintao, et al. The controlling factors of the high-quality mixed reservoirs in QHD29-2E structure, Bohai Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(1): 200-211.
- [35] 叶子倩, 朱红涛, 杜晓峰, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷古近系沙一段混积岩发育特征及沉积模式[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3731-3745.
YE Ziqian, ZHU Hongtao, DU Xiaofeng, et al. Sedimentary characteristics and model of mixed siliciclastic-carbonates of member 1 of Paleogene Shahejie Formation, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3731-3745.
- [36] 付鑫, 杜晓峰, 官大勇, 等. 渤海海域沙河街组一二段扇三角洲混合沉积特征、沉积模式及勘探意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3706-3720.
FU Xin, DU Xiaofeng, GUAN Dayong, et al. Depositional system, plane distribution and exploration significance of fan delta mixed siliciclastic-carbonate sediments in lacustrine basin: An example of member 1-2 of Shahejie Formation in offshore Bohai Bay, Eastern China [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3706-3720.
- [37] 倪军娥, 孙立春, 古莉, 等. 渤海海域石臼坨凸起Q油田沙二段储层沉积模式[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 491-498.
NI June, SUN Lichun, GU Li, et al. Depositional patterns of the 2nd member of the Shahejie Formation in Q oilfield of the Shijituo uplift, Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 491-498.
- [38] 叶茂松, 解习农, 徐长贵, 等. 混积岩分类命名体系探讨及对混积岩储层评价的启示——以渤海海域混积岩研究为例[J]. *地质论评*, 2018, 64(5): 1118-1131.
YE Maosong, XIE Xinong, XU Changgui, et al. Discussion for classification—designation system of mixed siliciclastic—carbonate sediments and the implication for their reservoir prediction——A case study of mixed sediments from Bohai Sea area [J]. *Geological Review*, 2018, 64(5): 1118-1131.
- [39] 王冠民, 张婕, 王清斌, 等. 渤海湾盆地秦南凹陷东南缘中深层砂砾岩优质储层发育的控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 330-339.
WANG Guanmin, ZHANG Jie, WANG Qingbin, et al. Factors controlling medium-to-deep coarse siliciclastic reservoirs of high quality at the southeastern margin of Qinnan Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 330-339.
- [40] 王清斌, 刘立, 牛成民, 等. 渤中凹陷北部陡坡带热液活动及其对湖相碳酸盐岩储层的影响[J]. *地球科学*, 2019, 44(8): 2751-2760.
WANG Qingbin, LIU Li, NIU Chengmin, et al. The geological evidences and impacts of deep thermal fluid on lacustrine carbonate reservoir in the actic area of the north part of Bozhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science*, 2019, 44(8): 2751-2760.
- [41] 罗霞, 方旭庆, 张云银, 等. 济阳拗陷桩海地区古生界潜山构造特征及形成机制[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 33-42.
LUO Xia, FANG Xuqing, ZHANG Yunyin, et al. Structural characteristics and formation mechanism of the Palaeozoic buried hills of the Zhuanghai area in the Jiyang Depression [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 33-42.
- [42] 韦敏, 于世娜, 佟欢, 等. 济阳拗陷桩海地区碎屑岩优质储层特征及成因机制[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(3): 27-36.
WEI Min, YU Shina, TONG Huan, et al. Characteristics and genesis mechanism of high-quality clastic reservoirs in Zhuanghai area of Jiyang Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(3): 27-36.
- [43] 卢妹男, 吴智平, 程燕君, 等. 济阳拗陷滩海地区构造演化差异性分区[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(4): 61-66.
LU Shunan, WU Zhiping, CHENG Yanjun, et al. Division of differential tectonic evolution in Shengli shallow sea area of Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(4): 61-66.
- [44] 吴智平, 张勐, 张晓庆, 等. 渤海湾盆地“埕北-垦东”构造转换带形成演化及成藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1321-1333, 1358.
WU Zhiping, ZHANG Meng, ZHANG Xiaoping, et al. Evolution and reservoir characteristics of the “Chengbei-Kendong” structural

- transfer zone in the Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1321-1333, 1358.
- [45] 王清斌. 渤海海域湖相混积岩中流体活动对储集层质量的控制作用[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- WANG Qingbin. The difference control of fluids to the lacustrine carbonate and clastic mixed deposition reservoir, Bohai Sea area [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [46] 叶茂松. 环渤海坳陷古近系沙河街组一二段混积岩特征及优质储层形成机理[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- YE Maosong. Characteristics of siliciclastic-carbonate sediments and forming mechanism of high-quality reservoirs in the Member 1 ~ 2 of the Shahejie Formation, circum-Bozhong Depression, Bohai Bay Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- [47] 梁薇, 牟传龙, 周思恩, 等. 湖南寒武系第三统混积岩沉积特征与成因探讨[J]. *地质论评*, 2016, 62(4): 881-896.
- LIANG Wei, MOU Chuanlong, ZHOU Kenken, et al. Origin and sedimentary characteristics of mixed carbonate-siliciclastic sediments of the third series of Cambrian in Hunan Province, South China [J]. *Geological Review*, 2016, 62(4): 881-896.
- [48] 董桂玉, 陈洪德, 李君文, 等. 环渤海湾盆地寒武系混合沉积研究[J]. *地质学报*, 2009, 83(6): 800-811.
- DONG Guiyu, CHEN Hongde, LI Junwen, et al. The Cambrian mixed sedimentation around Bohai Sea Bay Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(6): 800-811.
- [49] 刘佳庚, 王艳忠, 操应长, 等. 渤海湾盆地东营凹陷民丰洼陷陡坡带深层-超深层碎屑岩优质储层控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1203-1217.
- LIU Jiageng, WANG Yanzhong, CAO Yingchang, et al. Factors controlling the development of deep and ultra-deep coarse-grained siliciclastic reservoirs with high quality in the steep slope zone of the Minfeng sub-sag, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1203-1217.
- [50] 刘自亮, 张明何, 刘四兵, 等. 广西雪峰山南缘石炭系寺门组储层特征及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 902-916.
- LIU Ziliang, ZHANG Minghe, LIU Sibing, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of the Carboniferous Simen Formation at the southern margin of Xuefeng Mountain, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 902-916.
- [51] 谢佳彤, 李斌, 彭军, 等. 塔中地区柯坪塔格组储层致密化成因[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(2): 59-62.
- XIE Jiatong, LI Bin, PENG Jun, et al. Densification genesis of Kepingtage reservoirs in Tazhong [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(2): 59-62.
- [52] 王宏博, 马存飞, 曹铮, 等. 基于岩相的致密砂岩差异成岩作用及其储层物性响应——以准噶尔盆地莫西庄地区下侏罗统三工河组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 976-992.
- WANG Hongbo, MA Cunfei, CAO Zheng, et al. Differential diagenesis and reservoir physical property responses of tight sandstone based on lithofacies: A case study on the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 976-992.
- [53] 范建平, 宋金民, 江青春, 等. 川东地区中二叠统茅口组一段储层特征与形成模式[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1413-1430.
- FAN Jianping, SONG Jinmin, JIANG Qingchun, et al. Reservoir characteristics and development model of the Middle Permian Mao-1 Member in eastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1413-1430.
- [54] 罗亮, 胡晨林, 唐雅妮, 等. 准噶尔盆地东部北三台凸起烧房沟组沉积模式及其对储层发育的控制作用[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(3): 9-18.
- LUO Liang, HU Chenlin, TANG Yani, et al. Sedimentary pattern of the Shaofangou Formation in the north Santai high area of the eastern Junggar Basin and its control on reservoir development [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(3): 9-18.
- [55] 徐昊清, 袁静, 赵广昊. 埕岛东部斜坡带古近系东营组沉积特征及对物性的影响[J]. *石油地质与工程*, 2023, 37(5): 1-9.
- XU Haoqing, YUAN Jing, ZHAO Guanghao, et al. Sedimentary characteristics of the Paleogene Dongying formation in the eastern slope zone of Chengdao and its influence on physical properties [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2023, 37(5): 1-9.
- [56] 梅嘉豪, 魏钦廉, 陈曦, 等. 吴起-志丹地区长7致密砂岩储层孔隙结构特征及影响因素研究[J]. *石油地质与工程*, 2023, 37(3): 38-44.
- MEI Jiahao, WEI Qinlian, CHEN Xi, et al. Pore structure characteristics and influencing factors of Chang 7 shale oil sandstone reservoir in Wuqi-Zhidan area [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2023, 37(3): 38-44.
- [57] 赖锦, 王贵文, 柴毓, 等. 致密砂岩储层孔隙结构成因机理分析及定量评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组为例[J]. *地质学报*, 2014, 88(11): 2119-2130.
- LAI Jin, WANG Guiwen, CHAI Yu, et al. Mechanism Analysis and Quantitative Assessment of Pore Structure for Tight Sandstone Reservoirs: An Example from Chang 8 Oil Layer in the Jiyuan Area of Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(11): 2119-2130.
- [58] 吕修祥, 陈佩佩, 陈坤, 等. 深层碳酸盐岩差异成岩作用对油气分层聚集的影响——以塔里木盆地塔中隆起北斜坡鹰山组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 957-971.
- LV Xiuxiang, CHEN Peipei, CHEN Kun, et al. Effects of differential diagenesis of deep carbonate rocks on hydrocarbon zonation and accumulation: A case study of Yingshan Formation on northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 957-971.
- [59] 朱世发, 贾业, 马立驰, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷中生界复杂岩性风化壳储层特征、质量控因与甜点模型[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 514-527.
- ZHU Shifa, JIA Ye, MA Lichi, et al. Characteristics, quality-controlling factors and sweet spot model of the Mesozoic weathering crust reservoirs with complex lithologies in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 514-527.

(编辑 董奕含)