

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

朱世发^{1,2}, 贾业^{2,3}, 马立驰⁴, 崔殿⁴, 景安语⁴, 佟欢^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 3. 中海石油 天津分公司 渤海石油研究院, 天津 300452; 4. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015]

摘要:以渤海湾盆地济阳坳陷中生界为研究对象,利用岩心、薄片和分析化验等资料,研究风化壳储层的复杂岩性特征、成岩作用类型和储集空间特征,分析风化壳储层质量控制因素,建立多元控储模型,为济阳坳陷乃至中国陆相含油气盆地风化壳储层勘探与开发提供地质依据。研究表明:济阳坳陷中生界风化壳储集层发育陆源碎屑岩、火山碎屑岩、火山熔岩、次火山岩和深成侵入岩等5大类12小类岩石类型。初始孔隙度较高的碎屑岩储层质量最佳。大气淡水和有机酸的溶蚀作用明显改善碎屑岩储层;气体逸散、冷凝收缩、高温熔蚀以及酸性水溶蚀对火成岩储层有建设性意义。碎屑岩储层受岩石成熟度、压实强度、早期方解石胶结和二次埋藏有机酸改造的影响显著。次生溶蚀孔是主要的储集空间类型。济阳坳陷中生界风化壳储层质量受到岩性岩相、成岩流体、构造演化及现今埋深等多个因素的综合影响,提出了五元控储模型;建立了中生界储层甜点发育模型,将有利储层分为5类:断层和不整合面窗口溶蚀带、胶结残留淋滤带、剥蚀残留淋滤带、混合溶蚀带和有利岩相对接带。

关键词:成岩作用;储层质量;甜点模型;风化壳储层;中生界;济阳坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics, quality-controlling factors and sweet spot model of the Mesozoic weathering crust reservoirs with complex lithologies in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

Zhu Shifa^{1,2}, Jia Ye^{2,3}, Ma Lichi⁴, Cui Dian⁴, Jing Anyu⁴, Tong Huan^{1,2}

[1. State Key laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China; 4. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China]

Abstract: The Mesozoic reservoir in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, is taken to solve the following problems faced by petroleum exploration, including lithology, diagenetic types, reservoir space, quality-controlling factors of weathering crust reservoirs, through core and thin section observation, as well as other means of lab analysis. Eventually, a multivariate reserve-controlling model is established to provide geological evidence for weathering crust reservoir exploration and development in the Jiyang Depression together with other continental basins in China. The results show that there are 12 types of rock in 5 categories in the Mesozoic weathering crust reservoir in the Jiyang Depression, including terrigenous clastic rock, pyroclastic rock, volcanic lava, subvolcanic rock and plutonic intrusive rock, among which the clastic rock reservoir is of the best with higher initial porosity. The dissolution of meteoric fresh water and organic acids serves to significantly improve the clastic reservoir quality. Gas spillage, condensation shrinkage, high-temperature and acid water dissolution are of constructive value to igneous reservoir quality. Clastic reservoirs are largely affected by compositional maturity, compaction strength, early calcite cementation and organic

收稿日期:2021-04-27;修订日期:2022-03-09。

第一作者简介:朱世发(1982—),男,博士、教授、博士生导师,沉积学和储层地质学。E-mail: sfzhu@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41872102,41202107)。

acid reformation during secondary burial. Secondary dissolution pores serve as the main reservoir space. The quality of weathering crust reservoir in the study area is comprehensively affected by many factors, such as lithology and lithofacies, diagenetic fluid, tectonic evolution, and present burial depth, etc.; therefore a five-element reservoir-controlling model is proposed. The development model of the Mesozoic reservoir sweet spots is established, by which the favorable reservoirs can be grouped into five types, that is, fault and unconformity window dissolution zone, residual leaching zone after cementation, residual leaching zone following denudation, mixed dissolution zone and favorable lithofacies juxtaposition zone.

Key words: diagenesis, reservoir quality, sweet spot model, weathering crust reservoir, Mesozoic, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

引用格式: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. DOI: 10. 11743/ogg20220303.

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. DOI: 10. 11743/ogg20220303.

近期,中深层风化壳储层的油气勘探备受关注且不断取得新突破。例如在渤海湾盆地2017年发现了储量超千亿方的渤中19-6凝析气田,2018年发现了探明油气地质储量达亿吨级油气当量的渤中13-2油气田,2019年在珠江口盆地发现了探明油气地质储量 $5\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 油当量的惠州26-6油气田,2020年在济阳坳陷下古生界也有新发现^[1-11]。以往勘探实践也揭示了研究区渤海湾盆地济阳坳陷中生界潜山储层具有良好的勘探势头和前景,迄今为止在多个区块发现探明石油储量,其中大43块探明石油储量为 $503 \times 10^4 \text{ t}$,埕北11块探明石油储量为 $298 \times 10^4 \text{ t}$,桩8块探明石油储量为 $273 \times 10^4 \text{ t}$,义101块探明石油储量为 $130 \times 10^4 \text{ t}$,桩202块探明石油储量为 $62 \times 10^4 \text{ t}$,孤南2块探明石油储量为 $52 \times 10^4 \text{ t}$ 。但是风化壳及内幕地层因为岩石成分,以及结构复杂、埋藏过程多旋回和成岩流体多成因而形成的储层非均质性强,储层质量预测难度大^[12-13]。济阳坳陷中生界潜山钻探失利井中,储层的原因占比高。因此,有必要通过系统研究,明确储层质量差异性机理,从而提高钻井成功率。

1 地质背景

渤海湾盆地是中国东部中新生代裂谷盆地,受伸展构造及走滑断层控制,自北向南形成了多个坳陷^[14]。济阳坳陷位于渤海湾盆地东南部,与黄骅坳陷和渤中坳陷相邻,主体包含山东省东北部及其邻近渤海海域。济阳坳陷在平面上以埕宁隆起和鲁西隆起为边界,具有向西收敛、向东撒开的形态特点,现今构造格局具有“北断南超”的特点,属于典型的箕状断陷。

坳陷内部共有9个凸起和4个凹陷,由于各个凹陷在演化过程中所处的应力场相似,都表现出北部断裂活动强、南部构造活动弱的特点^[15]。济阳坳陷中生代原型盆地受到后期构造运动的强烈改造,残留地层厚度自沉积中心向周围迅速减薄,在沾化凹陷和东营凹陷的部分地区钻遇较多。因此,本研究选取沾化凹陷孤西潜山带、滩海地区和东营凹陷高青凸起为重点研究区。研究区内中生界分布面积广、厚度大,且层组全,已取得工业油气流的井位多,成果认识对济阳坳陷中生界进一步勘探有着重要的指导意义(图1)。

研究区构造演化复杂,怀远运动和燕山运动各幕在盆地内造成了沉积间断。中生代活跃的边界断层在新生代发生构造反转(图1),伴随断层活动中生界发生抬升剥蚀和二次埋藏^[15-17]。不同地区中生界现今埋深、构造格局、地层产状和岩性组合等差异明显(图2)。研究区中生界共发育4个组,各组之间以不整合分隔,自下而上分别是侏罗系坊子组和三台组,白垩系蒙阴组和西洼组^[18]。坊子组总体为北东向展布,发育多个局部沉积中心,主要发育冲积平原及滨浅湖、沼泽相和三角洲相;三台组沉积时期研究区为平坦湖盆,由于处于盆地转型期,沉积相以河流相和冲积平原沉积为主,滨浅湖范围缩小,湖泊边缘发育三角洲;蒙阴组和西洼组沉积具有相似性,均为分割性较强,但具有一定连通性的湖盆,单个湖盆呈北西向展布,相较而言蒙阴组沉积时期湖盆的分割性更强,主要发育冲积平原-河流相,滨浅湖范围略有增大;西洼组沉积期,研究区内除发育河流-冲积平原和滨浅湖之外,火山活动强烈(图2),火山爆发相、溢流相和浅成侵入相在西洼组内也有发现^[17-19]。

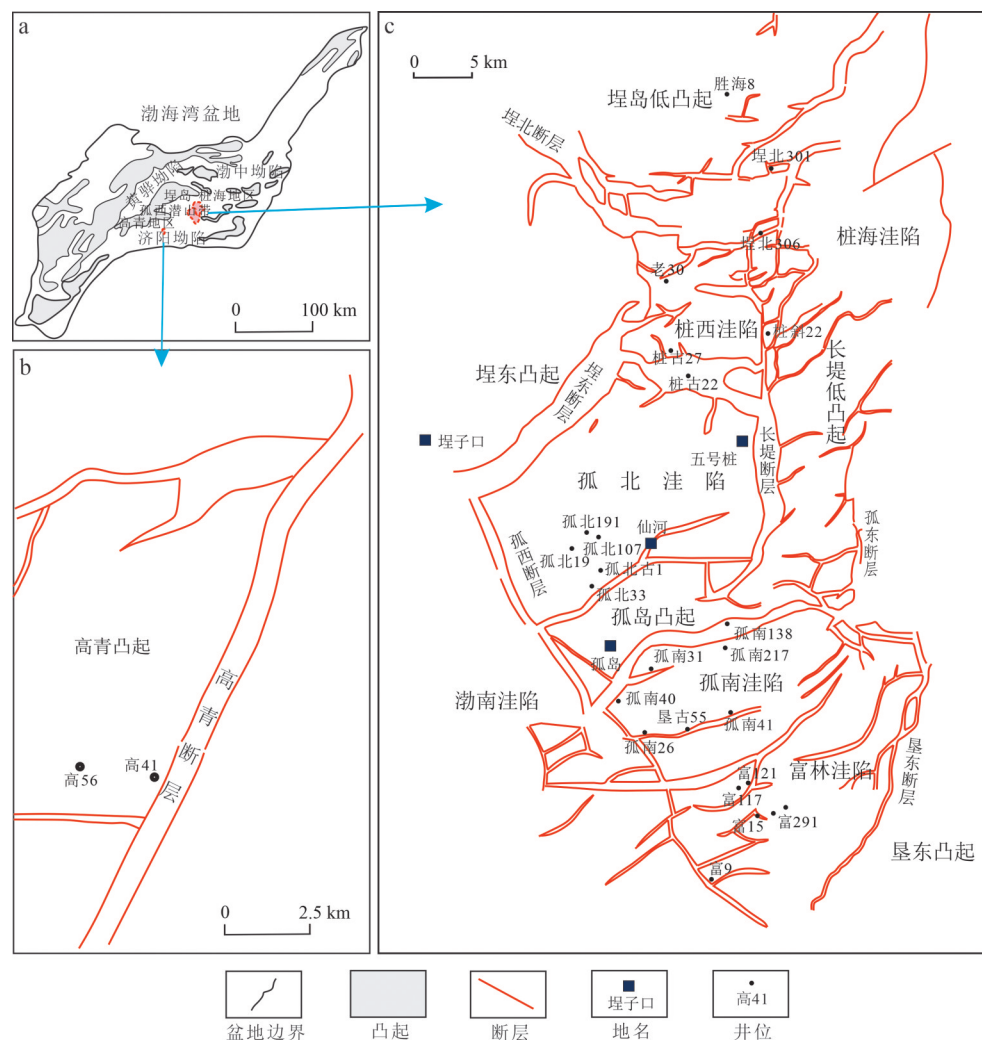


图1 渤海湾盆地济阳坳陷研究区位置与区域构造

Fig. 1 Location and tectonic divisions of the study area in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 渤海湾盆地; b. 济阳坳陷高青凸起; c. 济阳坳陷埕岛-桩海地区与孤西潜山带

结合构造活动与地层发育特点,将处于伸展构造断陷区,接受沉积时间长和地层厚度大的单元定义为“洼”;将处于构造翘倾区,发生超覆沉积或小范围剥蚀,以及地层厚度小的单元被称为“隆”。以“洼”和“隆”概括中-新生界构造反转前后和喜马拉雅期三大阶段的地层特点,可以在研究区内得到4种主要埋藏演化史,分别是洼—隆—隆(A区)、洼—隆—洼(B区)、隆—洼—隆(C区)和隆—洼—洼(D区)^[16-17,20]。

综合而言,现阶段研究区勘探面临的关键问题有:①目的层经历的构造演化复杂,多期抬升剥蚀作用导致了不同岩性的风化壳广泛分布,后期深埋和构造活动对古风化壳储层造成了严重的破坏^[21]。研究区内断层大量发育,中生代残留地层受到断层控制,历史最大埋深恢复具有一定的挑战性。断层和裂缝的发育沟通了不同时代地层,为大气淡水的下渗和深部热流体上涌提供了通道,与方解石等碳酸盐矿物的充填关系

密切^[22-23]。②物源供应复杂、沉积相类型多样,碎屑岩的成分和结构差异性大,岩屑种类多,以火山碎屑物质和喷出岩岩屑为主,局部地区甚至可见灰岩岩屑^[24]。岩石分选与岩屑类型的差异使得原始孔隙度存在区别。③火山机构大面积发育,完整性较高且具有一定的辨识度。火山碎屑岩在各个凹陷均有钻遇,溢流型喷出岩、深成侵入岩和火山通道相岩石也有发现^[25-26]。④中生界储层成岩流体类型丰富,不同洼陷的成岩演化和孔隙演化路径复杂^[17]。

2 复杂储层岩性

济阳坳陷中生界储层岩性复杂,平面和垂向上变化快,具有极强的非均质性。以主要矿物成分、岩石固结类型(冷凝固结/压实固结)和岩石构造等因素将研究区岩石分为火成岩和沉积岩两大类,再根据火成岩

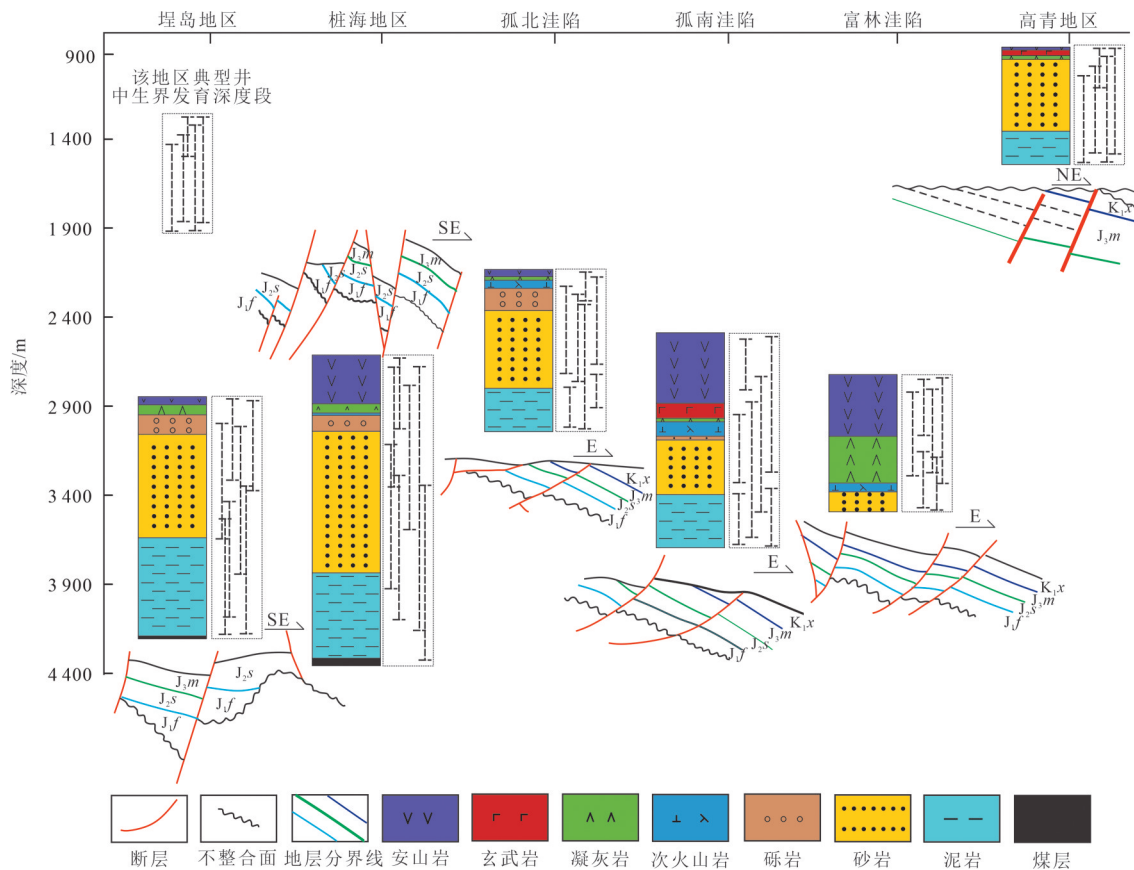


图2 渤海湾盆地济阳拗陷不同地区中生界残留地层埋藏深度、构造格局和岩性组成特征

Fig. 2 Burial depth, tectonic framework and lithologic composition characteristics of the Mesozoic residual strata in different areas of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

K_{1x}, 下白垩统西洼组; J_{3m}, 上侏罗统蒙阴组; J_{2s}, 中侏罗统三台组; J_{1f}, 下侏罗统坊子组

形成原因的差异,将岩石类型进一步分为火山熔岩、火山碎屑岩、次火山岩、侵入岩和陆源碎屑岩共5大类12小类(表1)。

研究区中生界碎屑岩储层发育于辫状河、辫状河三角洲和冲积扇相,前两者的储层物性更好,辫状河相见于高青地区。岩心观察表明,三角洲相砂岩具平行或楔状交错层理(图3a,b),砾岩发育递变层理(图3c),反映了较强的水动力条件,是济阳拗陷中生界分布面积最广的沉积相类型。冲积扇相的发育相对局限,往往紧邻洼陷边界断层交汇处呈扇形,砾石岩性以安山岩等火山熔岩为主,以富9井最为典型(图3d)。薄片观察结果显示,砂岩中的颗粒呈点-线状接触(图3e,f),分选磨圆中等-较好,自生矿物含量高,溶蚀作用强。砾岩的压实作用较强,砾石与砂质颗粒间以线接触为主,火山物质含量高,后期成岩改造强烈(图3g,h)。

中生界火山岩在富林、孤南和桩西等洼陷都有钻遇。岩心和录井等资料分析表明,济阳拗陷中生代发生多期火山喷发,火山机构在平面上分布广泛、垂向上相互叠置。常见岩性包括溢流相上部亚相安山岩和爆

发相火山角砾岩,个别溶蚀较强的次火山岩(闪长玢岩和煌斑岩)中也可见油气显示。气孔杏仁构造是识别溢流相上部亚相安山岩的重要标志,安山岩气孔沿流动方向定向排列且被拉长(图4a)。在发育完整火山机构的井中,火山角砾岩和熔岩呈互层出现,岩石矿物组成和化学成分具有相似性(图4a,b)。闪长玢岩属于凝固结形成的浅层侵入岩,岩石致密、抗压实能力强,溶蚀改造大大增加了岩石的孔隙性(图4c)。薄片观察结果显示,在未发生溶蚀的情况下,玄武岩和煌斑岩岩性致密,面孔率几乎为零;铁镁矿物普遍发生绿泥石化(图4d,e)。溶蚀作用对安山岩中半充填气孔有扩大作用(图4f),对火山角砾岩的岩屑和闪长玢岩的基质都有改造(图4g,h)。侵入岩仅在高青地区有钻遇,岩石十分致密,难以形成好储层。

3 成岩作用改造

通过岩心及铸体薄片鉴定和扫描电镜观察等分析手段,在研究区中生界识别出8类主要成岩作用(图

表1 渤海湾盆地济阳坳陷中生界复杂岩性潜山储层综合分类
Table 1 Composite classification of the Mesozoic buried-hill reservoirs of complex lithologies in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

结构大类		成分大类	基本岩石类型	识别标志	代表井	对应层段
陆源碎屑岩 (压实固结和水化学物胶结)	碎屑结构	陆源碎屑物质	砾岩	常见于冲积扇、辫状河和辫状河三角洲河床底部滞留沉积,砾石常呈定向排列;冲积扇砾岩中泥砾常见,多为撕裂屑;中性凝灰质为杂基或岩屑	孤南40、富9	西洼组
			(杂)砂岩	冲积扇:岩石分选、磨圆差,不明显的交错层理、块状层理发育,镜下为杂基支撑,磨圆差,面孔率低;辫状河:砂体平面上带状分布,分流河道、分流河道间沉积发育,具有洪泛性越岸沉积组合,薄片下分选中等,颗粒呈次棱角状-次圆状;辫状河三角洲:岩石分选较好,平行层理、板状、槽状交错层理发育,常见冲刷面构造	孤北107	蒙阴组
					高41、高41-1	西洼组、蒙阴组
					桩33、桩205、富9	西洼组
					桩古35、桩107-1、孤北33	蒙阴组
					高41、高56	西洼组、蒙阴组
					桩181、桩斜208、桩古22、胜海8、埕北301、孤南31	三台组
					埕北306	蒙阴组、三台组
火山熔岩 (基质中分布的火山碎屑含量<10%,冷凝固结)	熔岩结构	中性 (SiO ₂ 52%~63%)	安山岩	斑状结构,气孔被后期充填具杏仁构造;斑晶矿物有辉石、角闪石、黑云母、斜长石,斜长石呈自形宽板状	富111、孤南41、高41、桩98、桩22、桩斜22、老30	西洼组
		基性 (SiO ₂ 45%~52%)	玄武岩	矿物组成包括中、基性斜长石、角闪石、黑云母、辉石,具自碎角砾结构	富117、富121、高56	西洼组
	自碎角砾结构	各成分均可形成	自碎角砾熔岩	矿物组成包括中性斜长石、角闪石、黑云母、辉石,具自碎角砾结构	孤南217、富111	西洼组
火山碎屑岩 (火山碎屑含量>90%,压实固结)	火山碎屑结构	中性 (SiO ₂ 52%~63%)	凝灰岩	超过半数粒径小于2 mm,部分可见层理,具有凝灰结构;矿物包括中、基性斜长石、角闪石、黑云母、辉石	孤南40、富121、高41、高41-1、高56、桩斜22	西洼组
			火山角砾岩	由大于2 mm的火山角砾组成,分选很差,呈棱角状	孤南40、富121、桩古35、桩斜22、老30	西洼组
次火山岩 (冷凝固结)	结晶结构	暗色脉岩类	煌斑岩	富含云母,暗色矿物含量高,具有煌斑结构;六边形角闪石斑晶直径几十微米,自形程度高	孤南26、富29	西洼组
		浅色脉岩类	闪长玢岩	灰白色,半自形粒状,斑状结构,斑晶为斜长石,矿物成分包括斜长石、碱性长石、黑云母、石英;斜长石半径颗粒自形程度高,直径可达几十微米	孤北古1	三台组
	隐爆角砾结构	脉岩类成分	隐爆角砾岩	隐爆角砾结构,岩石原地破碎,角砾边缘呈棱角状,具有可拼合性,角砾间缝隙被后期热液充填	孤南138、富291	西洼组
					孤南217、富29	西洼组
侵入岩 (冷凝固结)	辉长结构、辉绿结构	基性 (SiO ₂ 45%~52%)	辉长岩	辉石颗粒粗大、自形程度高,位于长石构成的三角形格架中	高41、高41-1、高56	西洼组

5)。根据各类成岩作用对储层孔隙影响程度,将成岩作用分为建设性、破坏性及无明显影响三大类。建设性的成岩作用包括:火成岩中特有的气体逸散作用、冷凝收缩作用和熔蚀作用,以及各类岩石中均有发生的溶蚀作用;对孔隙有破坏性的成岩作用包括:压实作用、充填作用和胶结作用;交代作用对孔隙无明显影响,但是交代作用改变了岩石原始矿物成分,为后期溶蚀打下基础。

气体逸散作用受岩相控制,在溢流相上部亚相安山岩中发育(图6a)。熔蚀作用常见于闪长玢岩中,斑晶被深部热液熔蚀,对面孔率有少量贡献(图6b)。冷凝收缩作用极易被后期成岩作用掩盖,在充填残余气孔中偶有发现,对孔隙度几乎没有影响(图6c)。以上3种建设性成岩作用主要发生于岩浆冷凝成岩早期,仅有气体逸散对储层物性有较大影响。压实作用是碎屑岩储层的主要减孔作用,薄片下可见塑性颗粒因压

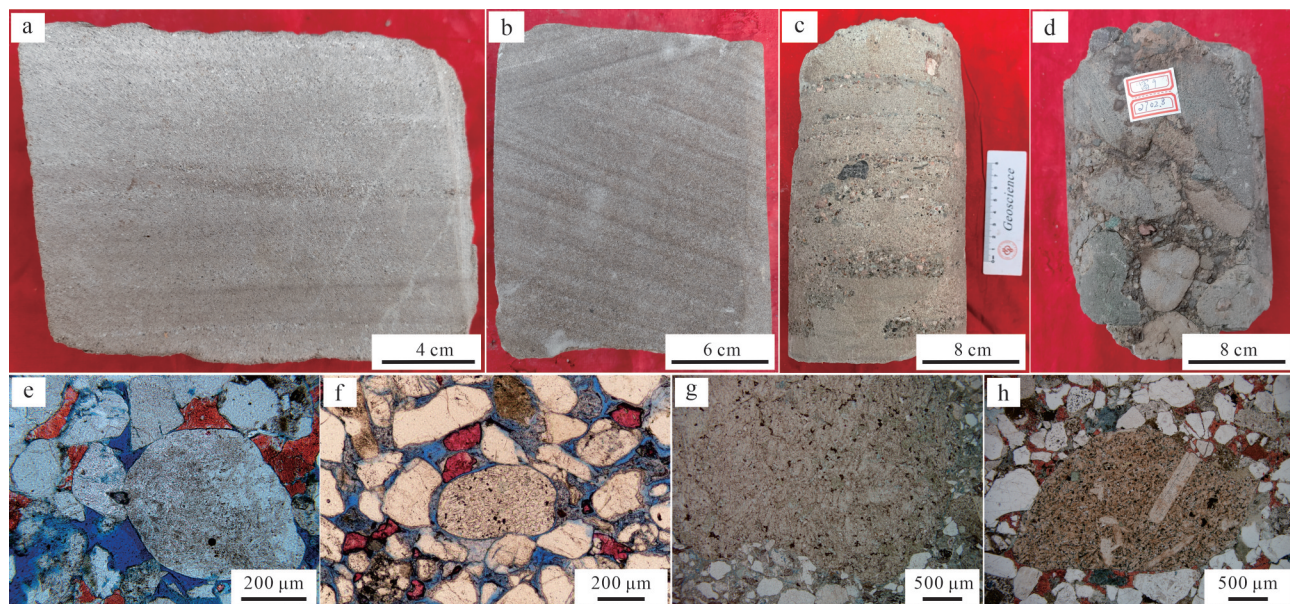


图3 渤海湾盆地济阳坳陷不同地区中生界碎屑岩储层典型岩心和薄片照片

Fig. 3 Photos and micrographs showing typical cores and thin sections of the Mesozoic clastic rock reservoirs in different areas of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 辫状河三角洲平行和楔状交错层理砂岩,高41井,埋深1 267.20 m,西洼组,岩心; b. 辫状河三角洲楔状交错层理砂岩,高41-1井,埋深1 313.20 m,西洼组,岩心; c. 辫状河三角洲递变层理砾岩,桩181井,埋深3 110.50 m,蒙阴组,岩心; d. 冲积扇砾岩,富9井,埋深2 702.80 m,西洼组,岩心; e. 钙质砂岩,高41井,埋深1 290.50 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); f. 中砂岩,桩181井,埋深3 110.50 m,三台组,茜素红染色铸体薄片(-); g. 冲积扇砾石,方解石交代强烈,富9井,埋深2 701.72 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); h. 冲积扇砾石中火山岩岩屑,孤北191井,埋深3 157.90 m,蒙阴组,茜素红染色铸体薄片(-)

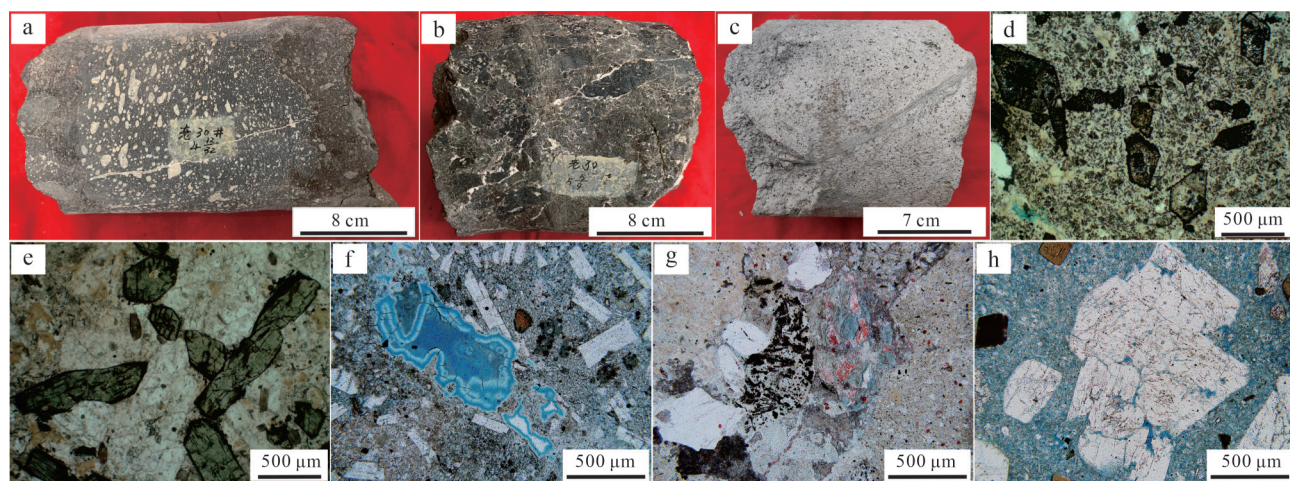


图4 渤海湾盆地济阳坳陷不同地区中生界火成岩储层典型岩心和薄片照片

Fig. 4 Photos and micrographs showing typical cores and thin sections of the Mesozoic igneous reservoirs in different areas of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 气孔杏仁状安山岩,老30井,埋深3 243.80 m,西洼组,岩心; b. 火山角砾岩,老30井,埋深3 554.00 m,西洼组,岩心; c. 闪长玢岩,孤古19井,埋深2 477.65 m,西洼组,岩心; d. 玄武岩,孤南217井,埋深3 533.50 m,西洼组,普通薄片(-); e. 煌斑岩,富291井,埋深3 116.00 m,西洼组,普通薄片(-); f. 气孔安山岩,富29井,3 327.80 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); g. 火山角砾岩,孤南40井,埋深2 354.30 m,三台组,茜素红染色铸体薄片(-); h. 闪长玢岩,孤古19井,埋深2 477.50 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-)

实形成假杂基(图6d)。研究区自生矿物包括碳酸盐(方解石、铁方解石和白云石)、石英和粘土矿物(高岭石和绿泥石),以碳酸盐矿物含量最高。自生碳酸盐矿

物的形成具有期次性,受碱性地层流体的控制,早期胶结物充填颗粒间隙,提高了储层抗压实能力,矿物颗粒在镜下呈点接触(图6e);后期碳酸盐胶结物铁含量

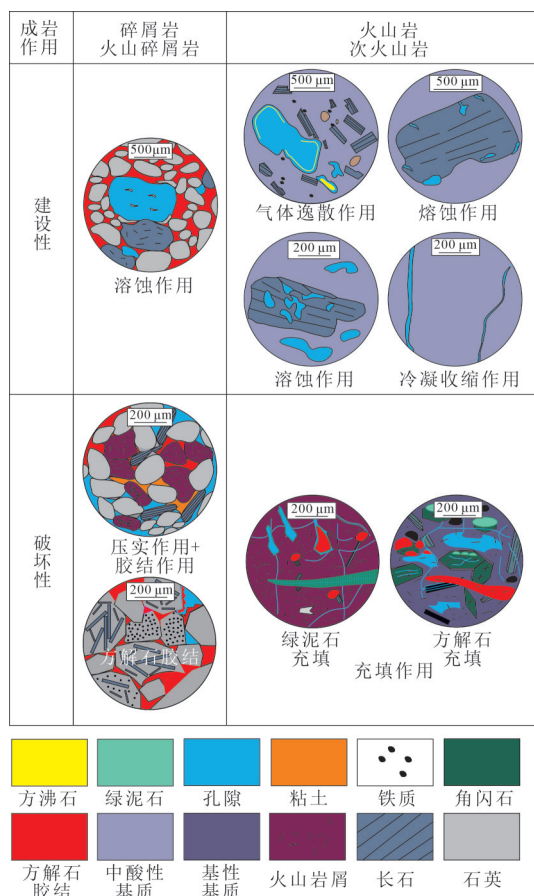


图5 渤海湾盆地济阳坳陷中生界不同岩性主要成岩作用类型

Fig. 5 Main diagenesis types of different lithologies in the Mesozoic reservoirs of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin
(交代作用成岩现象及其对储层孔隙影响作用不明显,故图中未体现。)

高,对溶蚀孔隙造成破坏(图6f),阴极发光照片中颜色的差异反映出不同期次碳酸盐胶结物成分的区别(图6g)。研究区硅质胶结物以石英次生加大的形式出现,由于火山物质蚀变导致孔隙流体碱性较强,石英加大发育受到限制,仅在桩海地区远离岩浆岩的石英砂岩储层中较为常见(图6h)。自生粘土矿物在全区都有发现,高岭石在高青地区最为常见,这与高青地区中生界暴露时间长、地层埋深浅有关(图6i)。研究区绿泥石主要形成于碱性条件下火山物质的蚀变,碎屑岩中的火山岩岩屑、岩浆岩中的暗色矿物和长石都是其物质来源,以粒间充填或交代产物的形式出现(图6j,k)。交代作用既有对长石和暗色矿物的交代,也有对胶结物的交代,如白云石化(图6l)。溶蚀作用是研究区最主要的建设性成岩作用,在碎屑岩中表现为岩屑和长石的溶解(图6m,n),在火成岩中也可以看到基质和斑晶的溶蚀(图6o,p)。研究区溶蚀作用受到有机质成熟排酸和大气淡水淋滤的共同影响,强溶蚀区在洼陷内和凸起区都有发现。

4 储集空间类型

本研究分析鉴定了42口井,共324个铸体薄片。现将研究区孔隙类型分为4类,分别为:原生孔(碎屑岩中以残余粒间孔为主,火成岩以残余气孔为主)、斑晶/粒内溶孔、基质/粒间溶孔和以溶蚀缝为主的微裂缝。研究表明,埕岛-桩海地区、孤西潜山带和高青地区均以碎屑岩为有利储层,以次生溶蚀孔-缝为主要储集空间(图7,图8)。

由于济阳坳陷构造演化复杂,中生界碎屑岩中的原生孔隙往往难以保存。尽管如此,在埋深较浅的地层中,仍有不同类型的原生孔被发现。残余粒间孔的大量出现反映经历的压实和胶结作用较弱(图8a);杂基孔多保留在分选较差的凝灰质(杂)砂岩中,此类孔隙连通性差,对储层物性的贡献小(图8b)。高41井和桩181井中都有溶蚀扩大孔发育,但是两者的成因有较大区别。高青地区中生界埋深较浅,暴露淋滤时间较长,残留原生孔对面孔率贡献大,溶蚀作用对孔隙扩大的贡献小(图8c)。桩海地区储层埋深大,压实作用破坏了几近全部的原生孔隙,发育于颗粒边缘的溶蚀扩大孔以溶孔占比更高(图8d)。碎屑岩中的次生溶孔是有机酸、大气淡水等酸性成岩流体共同作用的结果,沿长石解理缝对颗粒进行溶蚀(图8e,f),在酸性较弱时形成粒内溶孔,在强酸性环境下颗粒可以被完全溶蚀形成铸模孔(图6m,图6n,图8g,图8h)。

火成岩储层中特殊的储集空间类型与独特的成岩作用相对应,原生孔隙包括颗粒间孔(图8i)、残余气孔(图6a,图8j)、熔蚀孔和冷凝收缩缝(图6b,c),原生孔的发育受岩相控制。火成岩中的次生孔主要为溶蚀孔,斑晶和基质都可以发生溶蚀(图6o,图6p,图8k)。研究区中生界构造运动伴生了复杂的裂缝,但是裂缝往往被后期成岩矿物充填,裂缝对面孔率的贡献非常小(图4b)。碎屑岩中见少量溶蚀缝(图8l)。

5 储层质量及控制因素

济阳坳陷中生代发育多个彼此不连通的小湖盆,储层岩性岩相复杂、非均质性强^[19]。不同洼陷中生界残留地层时代不同,埋藏过程和现今埋深不同,储层质量差异明显。整体上,埕岛地区和高青地区的碎屑岩储层质量较好,是潜在的有利储层;孤西潜山带复杂岩性储层孔隙度平均值为9.9%,70%的样品渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,多为致密孔隙型储层。

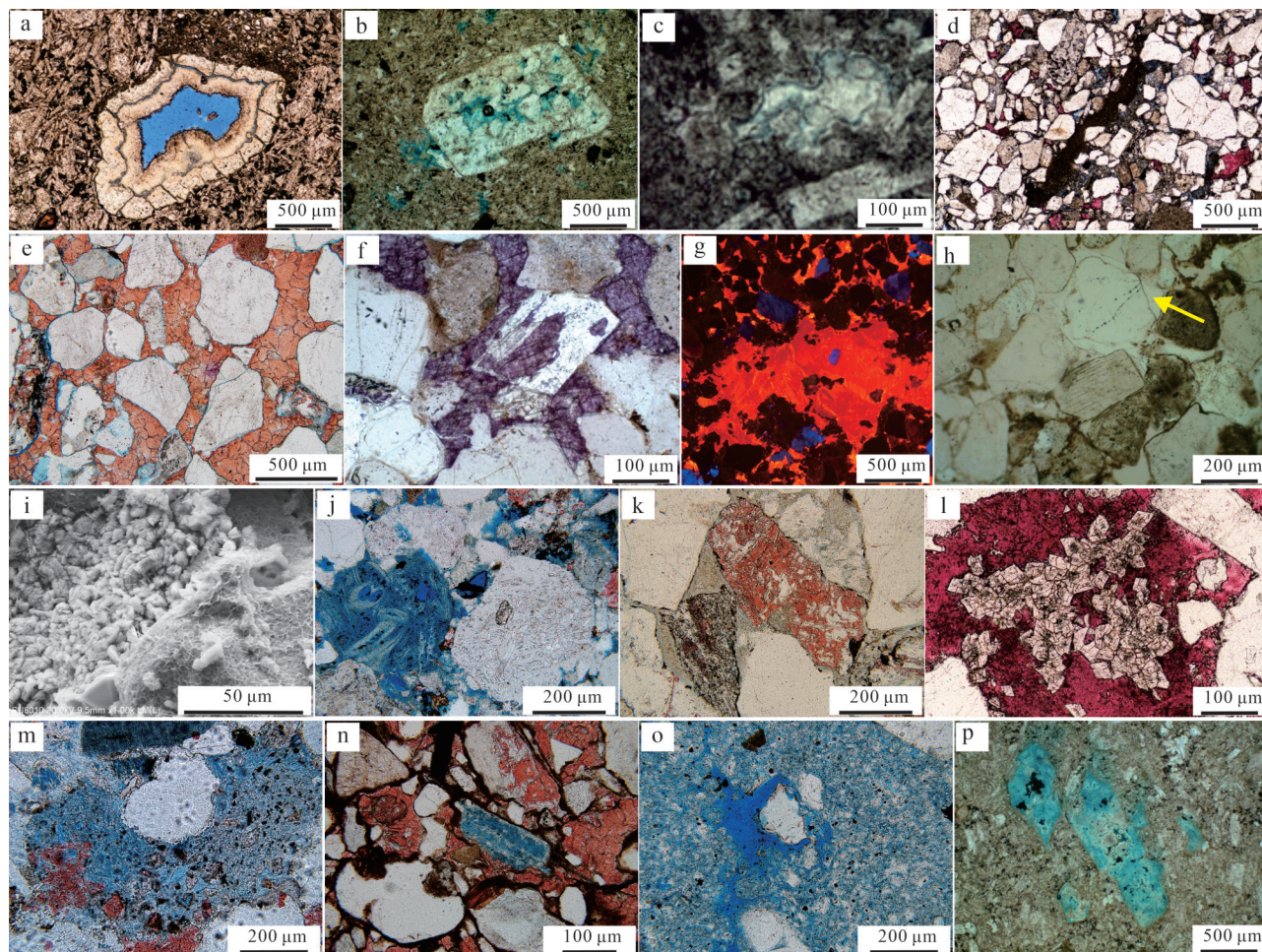


图6 渤海湾盆地济阳坳陷中生界不同岩性储层中典型成岩作用

Fig. 6 Typical diagenesis of the Mesozoic reservoirs with different lithologies in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 安山岩中的原生气孔,老30井,埋深3 418.60 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); b. 闪长玢岩熔蚀孔,富291井,埋深3 116.00 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); c. 安山岩中硅质杏仁体收缩缝,富29井,埋深3 332.49 m,西洼组,铸体薄片(-); d. 塑性颗粒变形,岩屑砂岩,桩181井,埋深3 027.90 m,三台组,茜素红染色铸体薄片(-); e. 早期方解石胶结,长石质岩屑砂岩,孤北33井,埋深3 245.60 m,蒙阴组,茜素红染色铸体薄片(-); f. 后期铁方解石胶结,长石砂岩,高56井,埋深928.64 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); g. 多期方解石胶结,长石岩屑质石英砂岩,高41-1井,埋深1 317.40 m,西洼组,阴极发光; h. 石英次生加大,石英砂岩,桩古35井,埋深3 435.55 m,蒙阴组,普通薄片(-); i. 自生高岭石,长石岩屑质石英砂岩,高41井,埋深1 290.50 m,蒙阴组,扫描电镜; j. 残余绿泥石,岩屑砂岩,高56井,埋深944.90 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); k. 绿泥石和方解石交代长石,火山碎屑岩,孤南31井,埋深2 425.76 m,三台组,茜素红染色铸体薄片(-); l. 方解石胶结物白云石化,埕北301井,埋深2 965.40 m,三台组,茜素红染色铸体薄片(-); m. 岩屑溶蚀,岩屑砂岩,孤北191井,埋深3 157.90 m,蒙阴组,茜素红染色铸体薄片(-); n. 长石的溶蚀作用,长石砂岩,孤北33井,埋深3 246.10 m,蒙阴组,茜素红染色铸体薄片(-); o. 基质的溶蚀作用,闪长玢岩,孤古19井,埋深2 477.50 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); p. 斑晶的溶蚀作用,安山岩,富121井,埋深3 615.40 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-)

5.1 储层质量差异

对来自不同地区的储层样品进行统计发现,平均孔隙度由好到差的顺序为:埕岛地区(14.6%)、高青地区(12.7%)、桩海地区(11.8%)、孤北洼陷(10.7%)、孤南洼陷(10.7%)、富林洼陷(9.1%);渗透率由好到差的顺序为:埕岛地区、高青地区、桩海地区、孤北洼陷、富林洼陷和孤南洼陷。对比各个地区物性和现今埋深发现,中生界埋深较浅的高青地区储层物性好;而埋深较大的埕岛-桩海地区储层受溶蚀作用影响,也具

有较好的物性;孤西潜山带的储层物性最差。

埕岛地区中生界相对高孔、高渗样品以砂岩和含砾砂岩为主,中砂岩和灰质砂岩样品个数较少。样品孔隙度范围在2%~25%,主要集中在10%以上;渗透率普遍大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度和渗透率之间具有线性正相关关系,反映储层储集空间类型为孔隙型(图9a)。样品的含油性较好,大部分达到油浸级别,整体上含油级别随物性改善而提高。桩海地区样品孔渗值分布范围更广,以孔隙度10%、渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为界,绝大多数的火成岩和杂砂岩储层属于致密储层;同

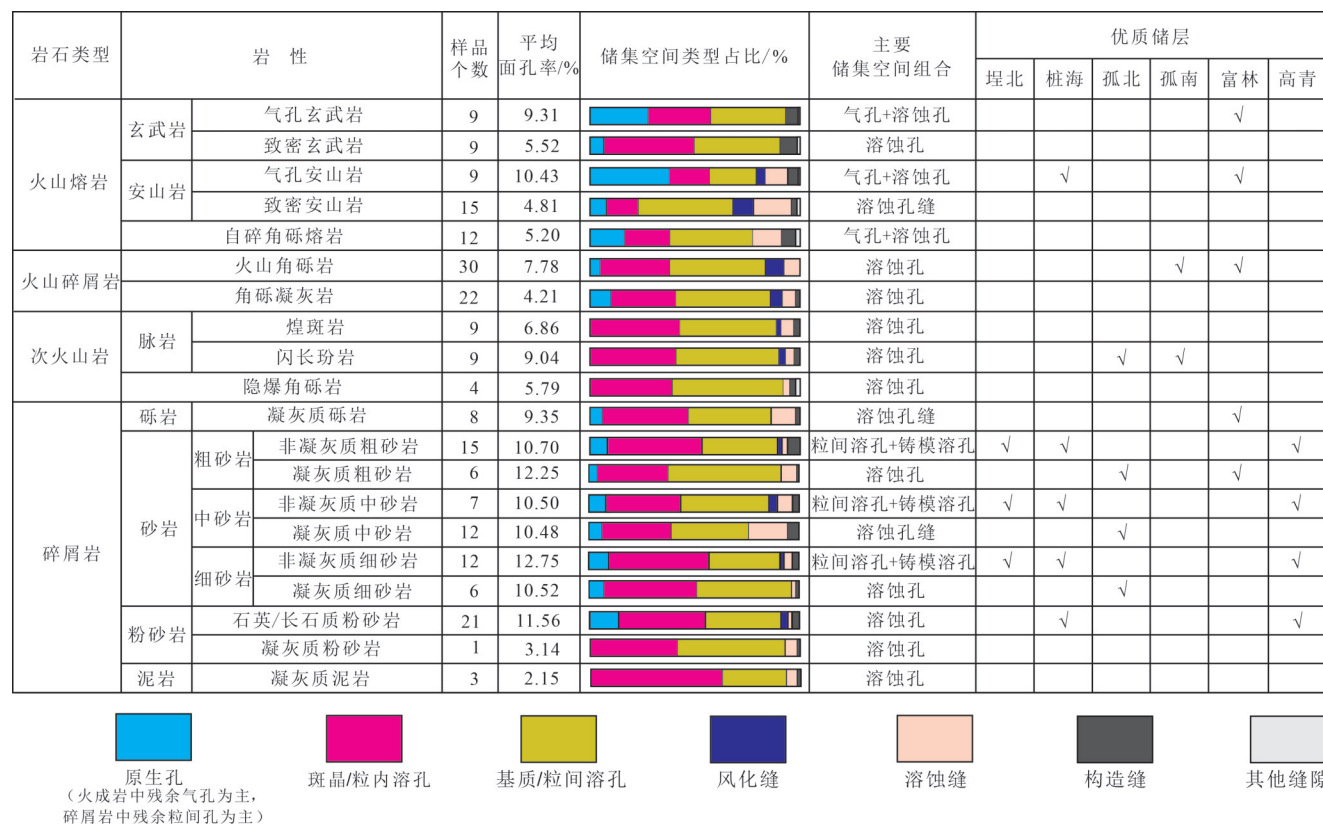


图7 渤海湾盆地济阳坳陷中生界不同岩性储集空间类型

Fig. 7 Diagram of reservoir space types with diverse lithologies of the Mesozoic in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

一岩性样品点分布集中,细砂岩储层物性最好,其次为粉砂岩和含砾砂岩(图9b)。样品含油级别以油斑和油迹为主,其次为油浸,储层物性与含油级别无明显关系。就碎屑岩的粒度而言,油浸样品以较粗的含砾砂岩和细砂岩为主,具有孔隙型储集空间,粒度较细的粉砂岩样品大多数为油迹或荧光。

孤西潜山带岩性复杂,熔岩和火山碎屑岩发育于富林洼陷,碎屑岩在孤北洼陷较为常见(图2)。中生界孔渗交会图表明,富林洼陷的火山凝灰岩和绝大部分安山岩属于致密储层,孔隙度在2%~15%,除个别样品外渗透率均小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;相对高孔、高渗储层的岩性以孤北洼陷的(凝灰质)砂岩为主,孔隙度和渗透率有正相关性;孤南、孤北洼陷的火山角砾岩和闪长玢岩储层物性介于两者之间(图10a)。整体而言,孔渗值间无明显线性关系,储集空间类型为裂缝/孔隙型。就构造演化而言,C区和A区整体好于B区,但受控于岩性(图10b)。高青地区储层岩性以碎屑岩为主,大部分火成岩储层属于致密储层(孔隙度2%~12%,渗透率 $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);砂岩相对高孔、高渗,主要岩性包括含砾砂岩、中砂岩、细砂岩和粉砂岩,其中粉砂岩和中砂岩储层物性最好,细砂岩的物性分布范围大,反映出较强的成岩作用差异(图11)。高青地区含

油样品数量多,样品含油级别大体上随物性变好而升高,油浸样品集中在高孔渗区域,物性接近情况下中砂岩含油性优于粉砂岩。

5.2 控制因素分析

岩性、岩相和沉积相、现今埋深、构造演化(埋藏过程)以及成岩流体改造5个因素相互影响,综合控制了济阳坳陷中生界复杂岩性的储层质量,因此,本研究建立五元控储模型,并绘制不同地区储层雷达图进行储层综合评价(图12)。

岩性从好到坏为砂岩、气孔熔岩、火山碎屑岩、次火山岩和致密熔岩。岩相和沉积相则被分为三角洲相、冲积扇相、火山爆发相、次火山岩相和火山溢流相。岩性-岩相决定了储层的初始孔隙度,是成岩和孔隙演化的基础,现今物性较好的样品往往具有较高的初始孔隙度。将前文提到的构造演化过程命名为A,B,C,D,由于滩海地区的B类演化受构造抬升影响大而现今埋藏很深,与一般B类不同,因而将其定为B*,构造演化由好至坏为C—A—B*—B—D(D类分区中无有利储层,本次研究未做讨论)。构造演化控制了储层的埋藏史,早期埋藏速率、抬升剥蚀等因素对原生孔的保存和次生孔的形成具有明显的控制作用。成岩流体

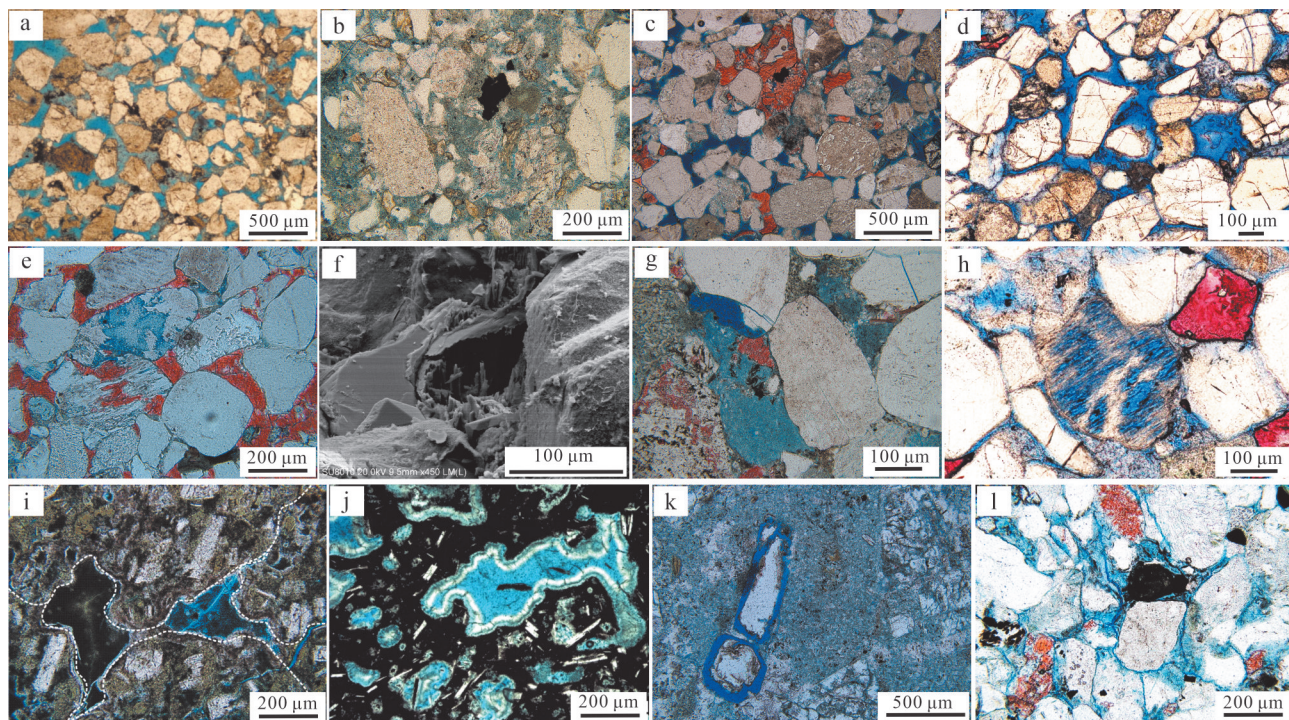


图8 渤海湾盆地济阳坳陷中生界复杂岩性储层中典型储集空间类型

Fig. 8 Typical reservoir space types of the Mesozoic reservoirs of complex lithologies in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 残余粒间孔,凝灰质砂岩,富9井,埋深2 662.10 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); b. 杂基孔,凝灰质砂岩,富9井,埋深2 695.86 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); c. 粒间溶孔,长石岩屑中砂岩,高41井,埋深1 552.50 m,蒙阴组,茜素红染色铸体薄片(-); d. 溶蚀扩大孔,岩屑中砂岩,桩181井,埋深3 099.50 m,三台组,茜素红染色铸体薄片(-); e. 粒内溶蚀孔,长石岩屑中砂岩,高41井,埋深1 318.52 m,蒙阴组,茜素红染色铸体薄片(-); f. 长石溶蚀孔,钙质粗砂岩,高41井,埋深1 290.50 m,蒙阴组,扫描电镜; g. 铸模孔,凝灰质砂岩,孤北191井,埋深3 157.90 m,蒙阴组,茜素红染色铸体薄片(-); h. 铸模孔,岩屑砂岩,桩181井,埋深3 102.60 m,三台组,茜素红染色铸体薄片(-); i. 颗粒间孔隙,火山角砾岩,富117井,埋深3 879.00 m,西洼组(白色虚线为颗粒边缘)铸体薄片(-); j. 残余原生气孔,安山岩,富15井,埋深3 197.70 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); k. 基质和斑晶均溶蚀孔,闪长玢岩,孤南138井,埋深2 347.80 m,西洼组,茜素红染色铸体薄片(-); l. 粒间溶蚀缝,凝灰质砂岩孤北33井,埋深3 247.20 m,三台组,茜素红染色铸体薄片(-)

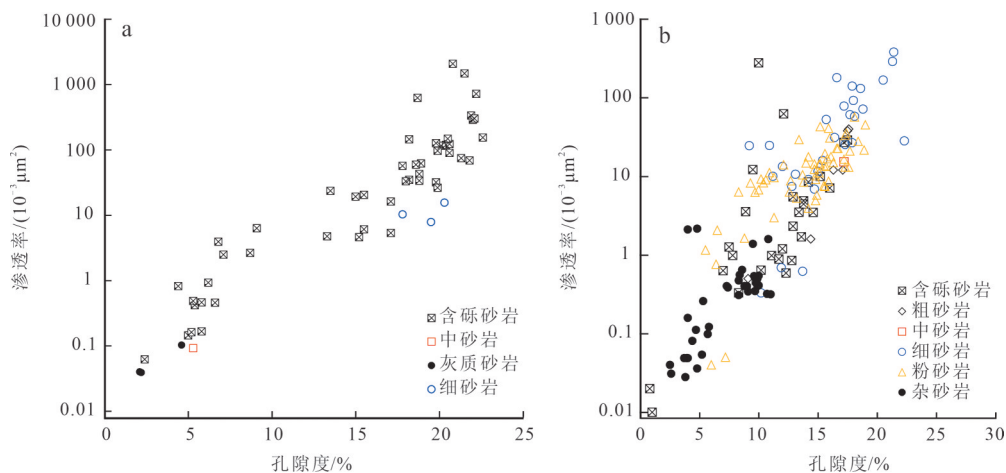


图9 渤海湾盆地济阳坳陷埕岛-桩海地区中生界岩性与孔渗交会图

Fig. 9 The cross plots showing the Mesozoic lithology vs. porosity-permeability in Chengdao-Zhuanghai area,

Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 埕岛地区; b. 桩海地区

以酸性流体作用强度进行区分,受大气淡水和有机酸双重改造的储层最佳,仅受有机酸影响的次之,仅受大

气淡水影响也可能形成有利储层。在封闭性成岩环境中,储层完全受碱性流体控制时其物性最差。现今埋

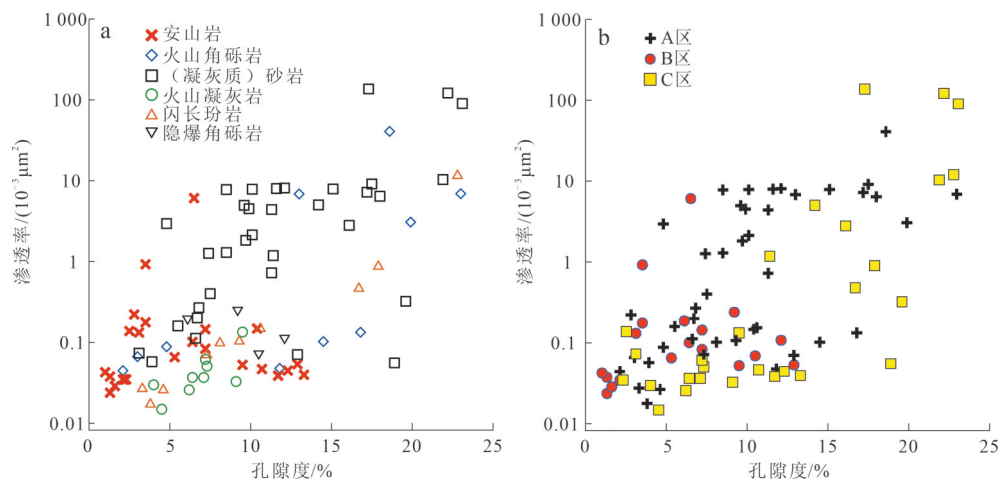


图10 渤海湾盆地济阳坳陷孤西潜山带中生界岩性与孔渗交会图

Fig. 10 The cross plots showing the Mesozoic lithology vs. porosity-permeability in the Guxi buried hill belt,

Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 不同岩性; b. 不同构造分区

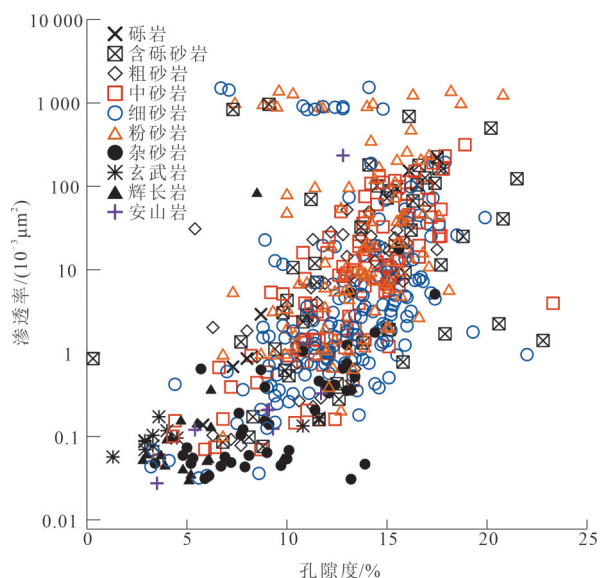


图11 渤海湾盆地济阳坳陷高青地区中生界岩性与孔渗交会图

Fig. 11 The cross plots showing the Mesozoic lithology vs. porosity-permeability in Gaoqing area, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

藏深度也是重要的影响因素,一般而言,深度越大物性越差。根据中生界储层主要埋深范围,设置1 000, 2 000, 3 000和4 000 m,共4个刻度。研究表明储层物性质量顺序为:埕岛-桩海地区碎屑岩>高青地区碎屑岩>孤西潜山带碎屑岩>埕岛-桩海地区火成岩>孤西潜山带火成岩。

埕岛-桩海地区的风化壳储层以次生溶蚀作用最为明显,受到大气淡水和有机酸的双重改造,抵消了构造演化和现今埋深的不利影响;埕岛-桩海地区的

内幕储层仅受有机酸的影响,储层物性略低于高青地区(图12a)。高青地区的碎屑岩储层各项参数适中,整体较好,现今埋深最浅,这为有利储层的形成创造了条件(图12b)。孤西潜山带的碎屑岩物性一般,在碎屑岩中其平均孔隙度最低,岩石中火山物质含量高;沉积相以冲积扇相和三角洲相为主,岩石成分和结构成熟度低;受酸性流体成岩改造弱且现今埋深较大(图12c)。

火成岩储层物性普遍低于碎屑岩,埕岛-桩海地区火成岩物性相对较好,以老30井气孔熔岩为代表。老30井位于C类构造演化区,原始孔隙被保存且后期受有机酸改造,形成了有利储层。对于埕岛-桩海地区的次火山岩和火山碎屑岩而言,后期酸性流体改造是形成有利储层的关键(图12d)。孤西潜山带火成岩中,次火山岩和火山碎屑岩物性较好,地层酸性流体改造和埋藏过程是较好储层形成的关键(图12e)。

6 储层甜点模型建立

在进行复杂断陷湖盆潜山储层评价时,要将储层发育情况与成藏条件相结合,对比不同地区烃源岩和储层发育特点。在岩性、成岩作用和储集空间分析的基础上,本研究将中生界有利储层按照成因和发育位置分为5类(图13),分别为:①断层和不整合面窗口溶蚀带;②胶结残留淋滤带;③剥蚀残留淋滤带;④混合溶蚀带;⑤有利岩相对接带。

窗口溶蚀带位于中-新生界断层面或不整合面附近,新生界烃源岩热演化过程中排出有机酸和后续的

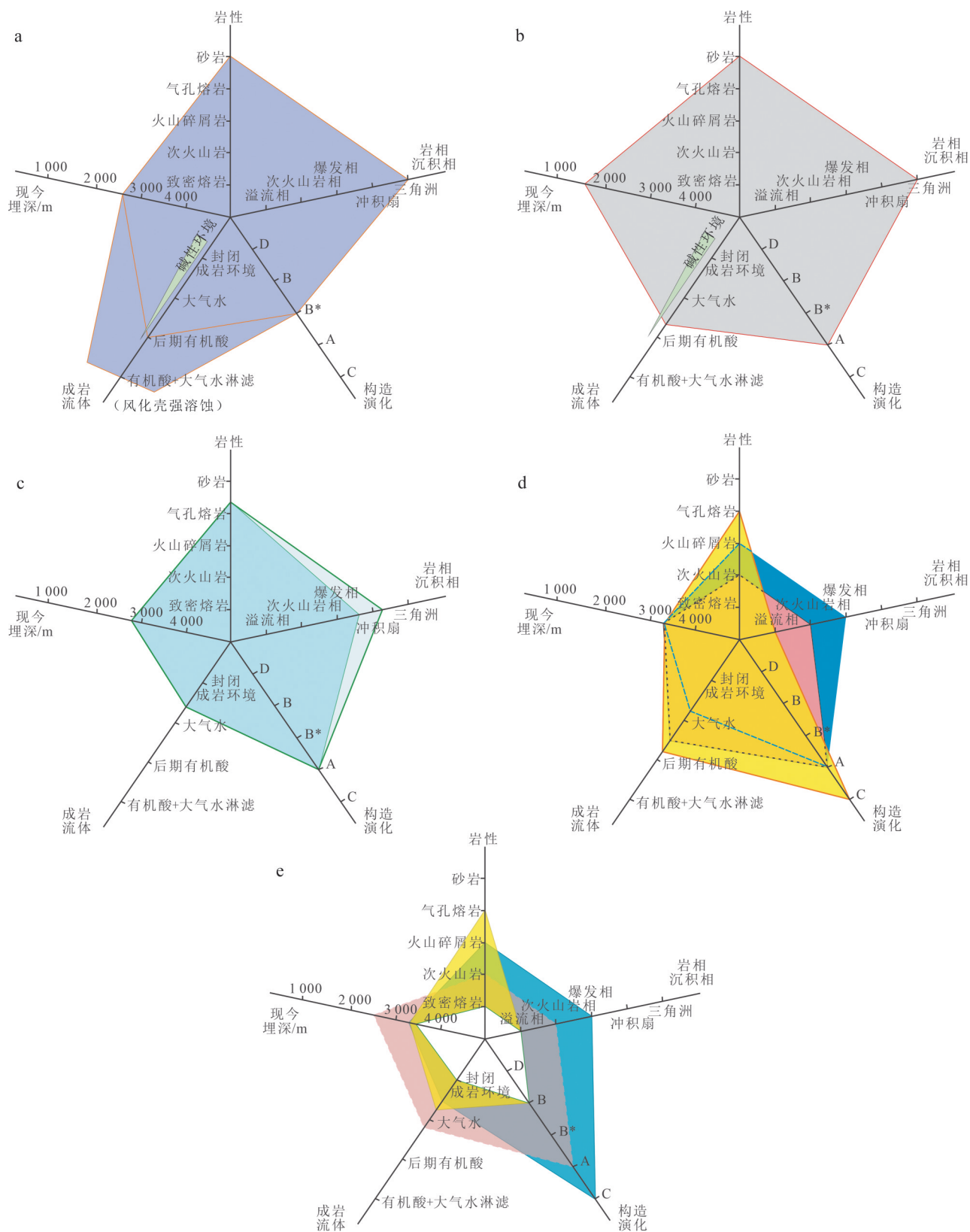


图12 渤海湾盆地济阳坳陷不同地区中生界五元控储模型及储层综合评价

Fig. 12 Five-element reserve-controlling model and composite evaluation of the Mesozoic in different areas of Jiyang Depression , Bohai Bay Basin

a. 埕岛-桩海地区碎屑岩; b. 高青地区碎屑岩; c. 孤西潜山带碎屑岩; d. 埕岛-桩海地区火成岩; e. 孤西潜山带火成岩

A. 洼—隆—隆; B. 洼—隆—洼 I 型; B*. 洼—隆—洼 II 型; C. 隆—洼—隆; D. 隆—洼—洼

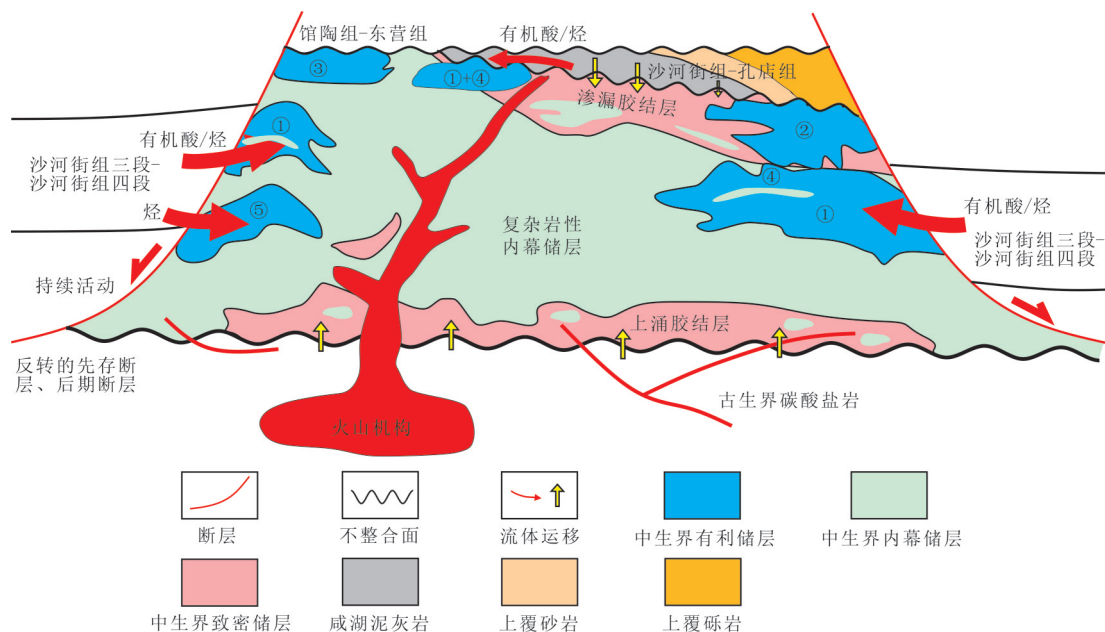


图13 渤海湾盆地济阳坳陷中生界有利储层发育模式

Fig. 13 The schematic diagram showing the development pattern of the Mesozoic favorable reservoirs in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

① 窗口溶蚀带; ② 胶结残留淋滤带; ③ 剥蚀残留淋滤带; ④ 混合溶蚀带; ⑤ 有利岩相对接带

油气,能够通过断层或不整合面的对接窗口,进入中生界储层中,形成有利储层。胶结残留淋滤带位于中-新生界不整合面之下,是受上覆沙河街组-孔店组碱性流体下渗影响较弱的区域,原生残余孔隙未被完全胶结。剥蚀残留淋滤带是指残余层被剥蚀且远离钙源的淋滤带,既可以位于中-新生界不整合面之下,因沙河街-孔店组缺失导致中生界与馆陶组-东营组直接接触,也可以位于中生界内幕不整合面附近。此类储层的成岩作用不受咸化湖盆中流体下渗影响,是强烈构造抬升剥蚀的结果,在青东地区较为常见。混合溶蚀带储层受大气淡水和有机酸叠加改造。有利岩相对接带储层具有近油源、溶蚀弱和原生孔为主的特点。

7 结论

1) 岩性、岩相是形成有利储层的基础,渤海湾盆地济阳坳陷中生界风化壳储集层发育陆源碎屑岩、火山碎屑岩、火山熔岩、次火山岩和深成侵入岩等5大类12小类岩石类型,以初始孔隙度较高的碎屑岩储层质量最佳。

2) 大气淡水和有机酸的溶蚀作用明显改善中生界碎屑岩储层;气体逸散、冷凝收缩、高温熔蚀以及酸性水溶蚀对火成岩储层有一定改善作用。碎屑岩储层受岩石成熟度、压实强度、早期方解石胶结和二次埋藏

有机酸改造影响显著。

3) 由于中生界储层现今埋深普遍较大,原生孔隙保存困难,抬升和埋藏阶段形成的次生溶蚀孔是主要的储集空间类型。受到碱性流体影响大、邻近钙源的储层由于自生碳酸盐矿物大量发育,储层物性相对较差。

4) 渤海湾盆地济阳坳陷风化壳储层质量受到岩性岩相、成岩流体、构造演化和现今埋深等多个因素的综合影响,提出五元控储模型;将有利储层分为5类:① 断层和不整合面窗口溶蚀带;② 胶结残留淋滤带;③ 剥蚀残留淋滤带;④ 混合溶蚀带;⑤ 有利岩相对接带。

参 考 文 献

- [1] 薛永安,李慧勇,许鹏,等. 渤海海域中生界覆盖型潜山成藏认识与渤中13-2大油田发现[J]. 中国海上油气, 2021, 33(1): 13-22.
Xue Yong'an, Li Huiyong, Xu Peng, et al. Recognition of oil and gas accumulation of Mesozoic covered buried hills in Bohai Sea area and the discovery of BZ 13-2 oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(1): 13-22.
- [2] 施和生,王清斌,王军,等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45.
Shi Hesheng, Wang Qingbin, Wang Jun, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 Structure in deep Bozhong Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 36-45.
- [3] 胡安文,王德英,于海波,等. 渤海湾盆地渤中19-6凝析气田天然气成因及油气成因关系认识[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 903-912, 984.
Hu Anwen, Wang Deying, Yu Haibo, et al. Genesis of natural

- gas and genetic relationship between the gas and associated condensate in BZ 19-6 gas condensate field, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 903-912, 984.
- [4] 薛永安, 王奇, 牛成民, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 891-902.
- Xue Yongan, Wang Qi, Niu Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 891-902.
- [5] 牛成民, 王飞龙, 何将启, 等. 渤海海域渤中19-6潜山气藏成藏要素匹配及成藏模式[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 259-267.
- Niu Chengmin, Wang Feilong, He Jiangqi, et al. Accumulation factor matching and model of Bozhong 19-6 buried hill gas reservoir, Bohai Sea area [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 259-267.
- [6] 谢玉洪. 渤海湾盆地渤中凹陷太古界潜山气藏BZ19-6的气源条件与成藏模式[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 858-866.
- Xie Yuhong. Gas resources and accumulation model of BZ19-6 Archean buried-hill large-scale gas reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 858-866.
- [7] 田立新, 刘杰, 张向涛, 等. 珠江口盆地惠州26-6大中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 1-11.
- Tian Lixin, Liu Jie, Zhang Xiangtao, et al. Discovery and accumulation pattern of HZ26-6 large-medium sized pan-buried hill oil and gas field in Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 1-11.
- [8] 马立驰, 王永诗, 景安语. 渤海湾盆地济阳拗陷下古生界潜山勘探新认识与新发现[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 10-16, 2.
- Ma Lichi, Wang Yongshi, Jing Anyu. New understanding and discovery in exploration of Lower Paleozoic buried hills in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 10-16, 2.
- [9] 杨一珉, 罗健, 徐云龙, 等. 渤南低凸起下古生界碳酸盐岩潜山储层特征及控制因素[J]. 断块油气田, 2020, 27(4): 448-453.
- Yang Yimin, Luo Jian, Xu Yunlong, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of carbonate buried hill in the Lower Paleozoic of Bonan low uplift [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(4): 448-453.
- [10] 马立驰, 王永诗, 景安语. 渤海湾盆地济阳拗陷隐蔽潜山油藏新发现及其意义[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 13-18.
- Ma Lichi, Wang Yongshi, Jing Anyu. Discovery and significance of subtle buried hills in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 13-18.
- [11] 高坤顺, 叶涛, 孙哲, 等. 渤海海域JZ25-1S太古宇潜山储层特征及其油气产能差异控制因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(3): 694-704.
- Gao Kunshun, Ye Tao, Sun Zhe, et al. Reservoir characteristics and control factors of hydrocarbon production of JZ25-1S archean buried-hill in Bohai Bay Area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(3): 694-704.
- [12] 郭峰, 崔殿. 孤西地区中生界火山岩储层发育机制[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 39-48.
- Guo Feng, Cui Dian. The development mechanism of Mesozoic volcanic reservoirs in Guxi area [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(2): 39-48.
- [13] 田伟超, 卢双舫, 王伟明, 等. 三塘湖盆地卡拉岗组火山岩风化壳储层微纳孔隙演变机制及与含油性关系[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1281-1294, 1307.
- Tian Weichao, Lu Shuangfang, Wang Weiming, et al. Evolution mechanism of micro/nano-scale pores in volcanic weathering crust reservoir in the Kalagang Formation in Santanghu Basin and their relationship with oil-bearing property [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1281-1294, 1307.
- [14] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 845-851.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 845-851.
- [15] 吴智平, 李伟, 任拥军, 等. 济阳拗陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 280-286.
- Wu Zhiping, Li Wei, Ren Yongjun, et al. Basin evolution in the Mesozoic and superposition of Cenozoic Basin in the area of the Jiyang Depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 280-286.
- [16] 王迪. 沾化凹陷孤西地区中生界构造特征及其对储层发育的影响[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- Wang Di. Structural feature of Mesozoic Erathem and its influence on reservoirs in Guxi area, Zhanhua Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (east China), 2016.
- [17] 朱世发, 贾业, 万超凡, 等. 济阳拗陷富林洼陷中生界复杂岩性风化壳储集层成岩作用[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 555-569.
- Zhu Shifa, Jia Ye, Wan Chaofan, et al. Diagenetic of the Mesozoic complex weathering crust reservoir rock in Fulin Subsag, Jiyang Depression [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(3): 555-569.
- [18] 徐振中, 陈世悦, 王永诗, 等. 济阳拗陷白垩系沉积特征及其控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(2): 1-5.
- Xu Zhenzhong, Chen Shiyue, Wang Yongshi, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of Cretaceous in Jiyang Depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2006, 30(2): 1-5.
- [19] 徐振中, 陈世悦, 姚军, 等. 残留盆地沉积相研究方法——以济阳拗陷中生代盆地为例[J]. 世界地质, 2009, 28(2): 199-206.
- Xu Zhenzhong, Chen Shiyue, Yao Jun, et al. Methods for the study of sedimentary facies in residual basins—A case study of the Mesozoic Basin in Jiyang Depression [J]. World Geology, 2009, 28(2): 199-206.
- [20] 侯旭波, 吴智平, 李伟. 济阳拗陷中生代负反转构造发育特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 18-23, 28.
- Hou Xubo, Wu Zhiping, Li Wei. Development characteristics of Mesozoic negative inversion structures in Jiyang Depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34(1): 18-23, 28.
- [21] 马立驰, 王永诗, 景安语, 等. 济阳拗陷滩海地区古近系构造样式及其控藏作用[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(1): 1-5.
- Ma Lichi, Wang Yongshi, Jing Anyu, et al. Paleogene tectonic styles and their controls on hydrocarbon accumulation in the shallow sea of the Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 1-5.
- [22] 解习农, 成建梅, 孟元林. 沉积盆地流体活动及其成岩响应[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 863-871.
- Xie Xinong, Cheng Jianmei, Meng Yuanlin. Basin fluid flow and associated diagenetic processes [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 863-871.
- [23] Yang T, Cao Y C, Henrik F, et al. Genesis and distribution pattern of carbonate cements in lacustrine deep-water gravity-flow sandstone reservoirs in the third member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag, Jiyang Depression, Eastern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92, 547-564.
- [24] 巩建强. 济阳拗陷孤北斜坡带中生界碎屑岩有效储层成因机制[J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 143-150.
- Gong Jianqiang. Mechanism of effective reservoir in Mesozoic clastic rocks in Gubei Slope Zone, Jiyang Depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(2): 143-150.
- [25] 孙耀庭, 李辉, 孙超, 等. 济阳拗陷桩西地区中生界火成岩岩相序列[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 120-127.
- Sun Yaoting, Li Hui, Sun Chao, et al. Petrographic sequence of the Mesozoic igneous rock in the Zhuangxi area, Jiyang Depression [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 120-127.
- [26] Wang X, Yang S C, Zhao Y, et al. Improved pore structure prediction based on MICP with a data mining and machine learning system approach in Mesozoic Strata of Gaoqing Field, Jiyang Depression [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 171: 362-393.