



“组分混合”沉积的储层非均质性及形成机理——以渤海海域古近系沙河街组一、二段为例

叶茂松, 解习农, 杜学斌, 赵珂, 吴峰

引用本文:

叶茂松, 解习农, 杜学斌, 等. “组分混合”沉积的储层非均质性及形成机理——以渤海海域古近系沙河街组一、二段为例[J]. 沉积学报, 2025, 43(2): 635-652.

YE MaoSong, XIE XiNong, DU XueBin, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Heterogeneity in “Compositional Mixing” Reservoirs: An example from the First-Second member of the Palaeogene Shahejie Formation, Bohai Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(2): 635-652.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

南黄海西部日照海域海侵沉积地层及其古环境意义

Transgressive Succession Offshore Rizhao in Western South Yellow Sea and Paleoenvironmental Implications

沉积学报. 2020, 38(4): 790-809 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.063>

三角洲—浅海沉积体系陆源有机质分布控制因素

Control Factors of Terrestrial Organic Matter Distribution in Delta-shallow Sea Sedimentary System

沉积学报. 2020, 38(3): 648-660 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.057>

鄂尔多斯盆地镇泾地区长8致密储层成藏期临界物性厘定

Determination of Lower Limits of Critical Properties of Chang 8 Tight Sandstone Reservoirs, Zhenjing Block, Ordos Basin

沉积学报. 2020, 38(1): 231-243 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.012>

岷江上游叠溪混杂堆积体的沉积特征及其成因分析

Sedimentary Characteristics and Causes of Formation of Diamicts in Diexi, Upper Minjiang River, China

沉积学报. 2019, 37(1): 72-85 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.098>

海水进退、滩坪出没、云化岩溶等与碳酸盐岩储层关系研究——以上扬子地台龙王庙组为例

Study on Correlation between Carbonate Reservoirs and Transgression or Regression of Sea water, Uplifting or Sinking of Shoal Flat, and Dolomitized Karst——A case study of the Longwangmiao Formation of the Yangtze Platform

沉积学报. 2018, 36(6): 1190-1205 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.068>

文章编号: 1000-0550(2025)02-0635-18

“组分混合”沉积的储层非均质性及形成机理 ——以渤海海域古近系沙河街组一、二段为例

叶茂松¹, 解习农², 杜学斌², 赵珂³, 吴峰⁴

1. 海南省海洋与渔业科学院海洋工程所, 海口 571126

2. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 武汉 430074

3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

4. 河海大学海洋学院, 南京 210098

摘要 【目的】混合沉积储层是具有重要勘探潜力的油气储层类型, 但存在极强的非均质性。前人对“层系混合”型储层的非均质性问题开展了诸多探索, 然而对“组分混合”沉积储层却缺少系统认识。近年来, 渤海海域中一深层古近纪地层发现典型的“组分混合”沉积并在其中获得了重大油气突破, 这为探讨此类储层非均质性的成因机理提供了理想的研究材料。【方法】利用渤海海域丰富的钻井资料, 系统开展了“组分混合”沉积非均质性特征与成因机制的研究。【结果】研究区“组分混合”沉积的储层类型包括原生生物混积滩和混积型碎屑流块体。不同储层类型组分特征和空间分布上具有显著差异, 这受控于不同因素影响: 受古气候与物源影响, 原生生物混积滩易分布于碎屑沉积侧翼或构造高部位; 湖平面变化控制不同成因相的叠置差异。混积型碎屑流块体受古地貌与水深的约束, 主要分布于凸起斜坡近端; 水动力差异导致成因相垂向样式的频繁变化。其次, 两类储层均呈现复杂的储层物性与孔隙结构非均质性, 主要受陆源碎屑组分、选择性溶蚀量、白云岩化、胶结物产状与数量等因素的综合影响。【结论】构建的“组分混合”沉积的储层非均质性形成模式对混合沉积的分布预测与有利储层评价具有重要的启示意义。

关键词 组分混合储层; 非均质性; 沉积分布; 储集性能; 沙河街组; 渤海海域

第一作者简介 叶茂松, 男, 1988年出生, 博士, 助理研究员, 储层沉积学与海洋地质学, E-mail: yeyegood3344@163.com

通信作者 解习农, 男, 教授, 海洋地质与资源, E-mail: xnxie@cug.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.030

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.030

0 引言

混合沉积指的是陆源碎屑与碳酸盐碎屑物以组构或互层的方式发生混合作用所形成的沉积物^[1-2]。根据沉积组构的差异, 混合沉积可以分为两类: 一类为层系混合, 即“纯”陆源碎屑岩和碳酸盐岩在垂向和侧向交替沉积所构成的混合沉积体系^[3-4]。第二类被称为组分混合, 它指的是陆源碎屑和碳酸盐组分在同一沉积期内发生混合的沉积体系^[1,4]。近二十年来, 有关混合沉积特征与主控因素的研究逐步增多^[5-7]。一方面, 混合沉积为探讨盆地

沉积充填过程、重建古气候变化与关键地质事件提供了新的思路^[8-10]; 另一方面, 混合沉积的油气潜力也引起了诸多关注^[11-13]。然而, 相较于常规的碎屑岩和碳酸盐岩体系, 混合沉积的形成机制与沉积组分更为复杂, 导致不同混合沉积类型在空间展布、成岩作用及孔隙演化等方面普遍存在很强的非均质性问题^[14-18]。尽管近些年, 混合沉积的非均质现象已经得到了共识^[16-17,19]。但是针对混合沉积储层非均质性主控因素与形成机理的认识尚未完全明晰, 成为开展这类特殊沉积油气勘探与储层评价工作的瓶颈。

收稿日期: 2023-01-28; **修回日期:** 2023-04-12; **录用日期:** 2023-05-12; **网络出版日期:** 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42106058); 海南省近岸海洋生态环境过程与碳汇重点实验室开放基金项目(2022RHDKFKT07) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42106058; Open Fund Project of Key Laboratory of Coastal Eco-Environmental Processes and Carbon Sink, Hainan Province, No. 2022RHDKFKT07]

相比而言,前人对“层系混合”非均质性的问题进行了较多探讨^[17,20-21],但“组分混合”储层在这方面的研究十分缺乏。渤海海域沙河街组一、二段混合沉积储层是近些年渤海湾盆地油气勘探的亮点工作。自2012年以来,前人在该研究区近二十个构造带、埋深普遍超过3 000 m的古近纪地层广泛发现了混积型含油气储层,并获得了多个千立方级别的油气田^[22]。大量钻井资料揭示渤海海域混合沉积大部分是典型的“组分混合”沉积。当前研究表明,陆源碎屑、碳酸盐灰泥颗粒沉积及生物颗粒组分是渤海海域主要的混合沉积组分类型,但这些组分在含量及结构方面均具有显著差异性^[23-24];此外,在同一构造带相同层位布置钻井,却时常钻遇物性特征不同的混合沉积储层类型^[25-26]。因此,研究区“组分混合”沉积储层存在显著的非均质性特点。

本文在利用钻井与储层物性测试等资料厘清“组分混合”储层成因类型的基础上,查明不同成因类型“组分混合”储层在沉积特征与储集性能方面的非均质性特点。基于沉积成因机理的讨论,明确沉积非均质的不同控制因素;同时通过不同因素与储层物性、孔隙结构的相关关系分析,探讨影响储集性能非均质的要素与成因机理。依托上述工作,最终建立渤海海域“组分混合”沉积的储层非均质性形成模式并阐明其形成机制。

1 区域概况与混合沉积发育背景

渤海海域是渤海湾盆地的海域部分,地理位置上位于我国渤海,构造位置上位于华北克拉通地块之上,北部毗邻燕山褶皱带和胶辽隆起辽东隆起区,南部与济阳拗陷相接,邻近苏鲁一大别造山带。渤海海域古近系受主干边界断层影响,被分隔出15个凹陷和13个凸起,导致研究区具有明显的隆凹相间格局^[27]。混合沉积已被发现广泛分布于整个研究区的不同构造单元。其中,辽西低凸起、石臼坨凸起、沙垒田凸起、渤南低凸起、滩北凸起等二级构造单元及其周缘的凹陷是发现混合沉积最集中的区域(图1a)。

研究区沉积充填与演化研究表明,古近系始新统沙河街组至渐新统东营组沉积期,渤海湾盆地经历了典型的陆相湖盆沉积,而沙河街组一、二段(以下称沙一二段)沉积期是湖相充填过程中唯一出现大规模碳酸盐沉积的时期^[28](图1b),这为渤海海域

发育混合沉积提供了关键基础。关于沙一二段碳酸盐沉积的控制因素,前人做了诸多分析,大致可归结于以下几个方面:(1)沙一二段沉积期处于构造活动稳定期。盆地在经历了沙三段强烈断陷期后进入相对稳定的沉降期^[28];(2)沙一二段沉积期对应始新世向渐新世转变的过渡期,全球古气候由热带干旱类型向相对暖和的亚热带温湿气候转变^[29-30];(3)沙一二段沉积期湖盆具有偏咸的水介质条件^[30];(4)沙一二段沉积期湖盆处于相对浅水的环境,古水深恢复结果证实此时湖盆古水深介于10~20 m^[31]。此外,多数混合沉积分布于盆内凸起周缘^[27](图1a)。这些凸起作为盆内局部物源,在向盆地凹陷中心不断输入陆源碎屑沉积物的过程中与碳酸盐组分发生混合,最终形成不同类型的“组分混合”沉积。

2 “组分混合”储层的成因类型及特征

基于岩心和薄片资料,通过对岩性类型与组合、岩石结构和沉积构造等方面的识别,明确“组分混合”的沉积过程与成因机制。根据成因机制的差异,将渤海海域“组分混合”沉积储层划分为两大类:原生生物混积滩和混积型碎屑流块体。

2.1 原生生物混积滩

原生生物混积滩储层的组分构成以原地(或准原地)生长的生物颗粒或化学沉淀碳酸盐颗粒(如鲕粒)混合异源陆源碎屑为特征(图2a)。生物颗粒主要包括腹足、介形虫及少量双壳类浅水底栖生物。镜下观察发现生物组分粒径介于0.5~3 mm,既可具有保存相对完好的组分结构,也可呈碎片状沉积(图2b)。由此可见,生物颗粒多为原地生长或者经历了较短距离的搬运过程。陆源碎屑颗粒成分相对复杂,以中、酸性喷出岩岩屑为主,其次包括石英、长石等矿物组分。岩屑颗粒在正交镜下常呈玻基交织结构,短柱状长石微晶呈平行排列(图2c)。这些火山质陆源碎屑组分与邻近凸起区基底组分相一致,代表临近物源区的沉积(图2c)。此外,陆源碎屑颗粒由砾石至细砂质组分构成。颗粒组构分选差一中等,但多具有一定的磨圆度与定向性(图2d)。这些特征则表明碎屑颗粒可能在相对较强的水流作用下经历了一段距离的搬运。

原生生物混积滩储层可进一步划分出三个亚类,分别为生物颗粒混积滩、生物泥晶混积滩及生

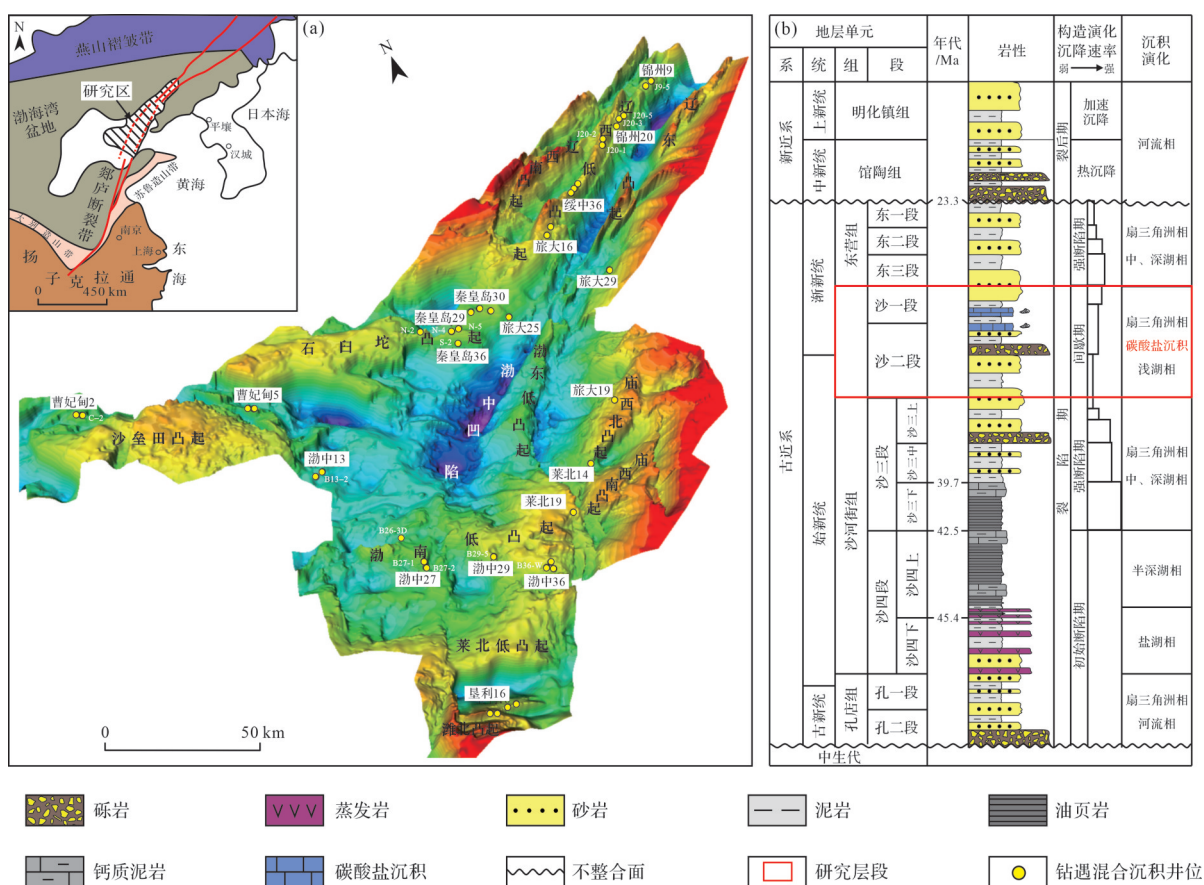


图1 渤海海域混合沉积分布与综合柱状图

(a)环渤中凹陷基底地貌与混合沉积分布的空间关系(据文献[27]修编);(b)渤海湾盆地综合柱状图及研究层段(红色方框)(据文献[28]修编)

Fig.1 Distribution of mixed sediments and stratigraphic column in the Bohai Sea

(a) spatial relationship between plan distribution of mixed sediments and base geomorphology in the marginal Bozhong Depression (modified from reference [27]); (b) stratigraphic column illustrating the main study units (red box) of the Bohai Bay Basin (modified from reference [28])

物—砾(砂)屑混积滩,三类储层由不同比例的组构相互混合构成。利用外源碎屑、化学成因碳酸盐、生物成因碳酸盐三端元的岩性—成因分类法^[23],可对上述三类储层的岩性相进行分类(图3)。生物颗粒混积滩岩性相包括含陆源碎屑生物碎屑灰岩(云)岩或陆源碎屑质生物碎屑灰岩(云)岩等。这些岩性相以生物颗粒结构为主要特征,生物颗粒含量普遍在60%以上,甚至可达85%。陆源碎屑颗粒零散分布于生物碎屑颗粒之间,平均含量介于10%~40%(图3a)。生物—泥晶混积滩的主要岩性相为含陆源碎屑—生物碎屑(质)泥晶灰(云)岩等,以泥晶结构为特征,碳酸盐泥晶为主要的组构,平均含量介于60%~70%;生物碎屑与陆源碎屑颗粒散落于泥晶颗粒之上。其中,生物碎屑颗粒多呈碎片状,含量介于20%~40%。陆源碎屑颗粒以细粒结构为主,分选较好、棱角状为主,含量约为10%(图

3b)。生物一砾(砂)屑混积滩表现为砂、砾质碎屑颗粒与生物碎屑颗粒相混合,但陆源碎屑与碳酸盐颗粒比例均可不超过50%(图3c)。因此,这类成因相岩性相比较多,如生物碎屑质砂砾岩、砾(砂)质生物碎屑灰(云)岩等。

2.2 混积型碎屑流块体

混积型碎屑流块体储层的组分构成以异地来源的陆源碎屑与生物碎屑颗粒相互混合为特征。与原生生物混积滩储层在沉积组构上的差异表现在:(1)陆源碎屑颗粒为主要组构,生物碎屑颗粒占比基本小于陆源碎屑组分。三端元岩性一成因分类投点结果表明,大部分样品中外源陆源碎屑平均为50%~70%。生物碎屑含量相对较低,平均含量介于10%~15%(图4)。因此,主要的岩性为含生物碎屑砂砾(或砾)岩、含生物碎屑或生物碎屑质砂岩等;(2)生物碎屑颗粒种属与前者相似,但多呈碎片状、少见完

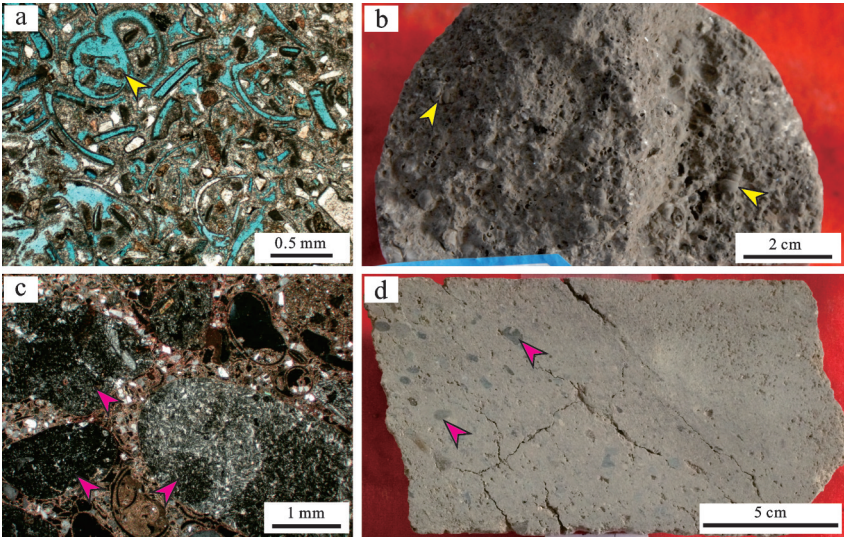


图2 原生生物混积滩储层的典型沉积特征

(a)镜下观察生物颗粒(黄色箭头)与相对少量陆源碎屑相混合,单偏光,S-2井,3 767.65 m;(b)岩心识别保存完好的腹足类生物颗粒(黄色箭头)及生物碎片,C-2井,3 429.50 m;(c)镜下观察混合沉积中的火山质陆源碎屑颗粒,单偏光,S-2井,3 771.98 m;(d)岩心观察到具有一定磨圆度和定向性的砾石质碎屑颗粒,J20-2井,2 223.68 m

Fig.2 Typical sedimentary features of the bioclastic mixing shoal

(a) photomicrographs showing bioclastic particles (yellow arrow) mixed with small amounts of siliciclastic grains, plane polarized light (PPL), well S-2, 3 767.65 m; (b) core observation showing well-preserved gastropods or bioclastic fragments (yellow arrow), well C-2, 3 429.50 m; (c) photomicrographs showing volcanoclastic gravels within mixed sediments, PPL, well S-2, 3 771.98 m; (d) core observation showing gravelly grains with rounded and directional attribution, well J20-2, 2 223.68 m

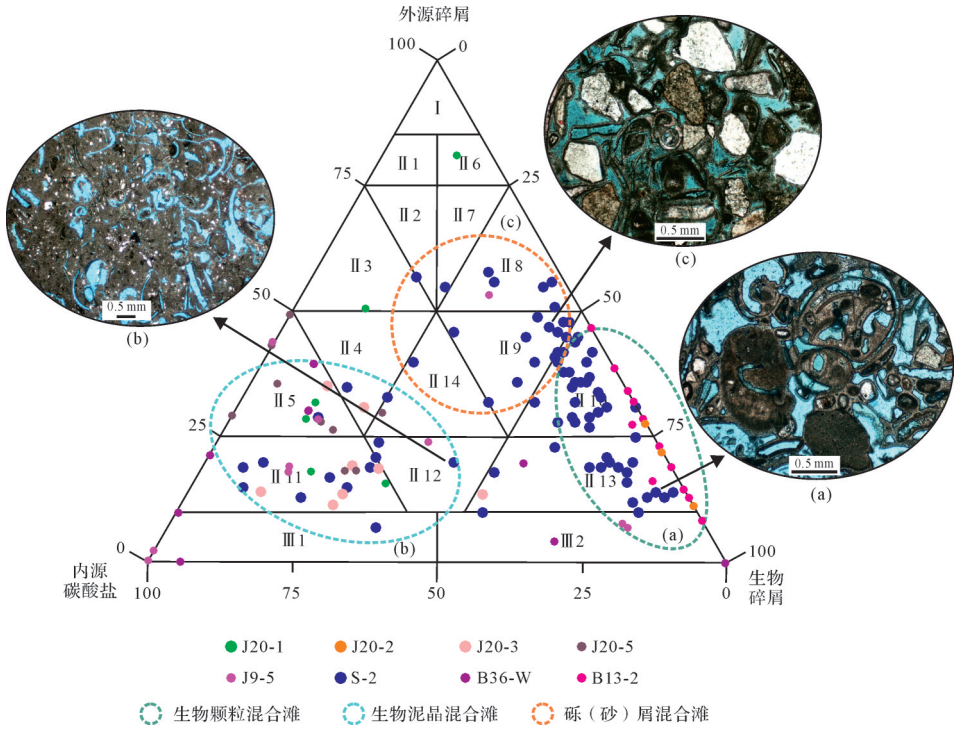


图3 原生生物混积滩储层的岩性分类及典型照片(三角图据文献[23]修编)

(a)生物颗粒混积滩岩性相组分分布及典型照片;(b)生物泥晶混积滩岩性相组分分布及典型照片;(c)生物—砾(砂)屑混积滩岩性相组分分布及典型照片

Fig.3 Lithofacies classifications and typical photomicrographs of the bioclastic mixing shoal (triangular diagram of lithofacies division modified from reference [23])

(a) lithofacies component distribution of bioclastic particles mixing shoal facies and typical photomicrograph; (b) lithofacies component distribution of bioclastic-micrite shoal facies and typical photomicrograph; (c) lithofacies component distribution of gravel (sandy) debris shoal facies and typical photomicrograph

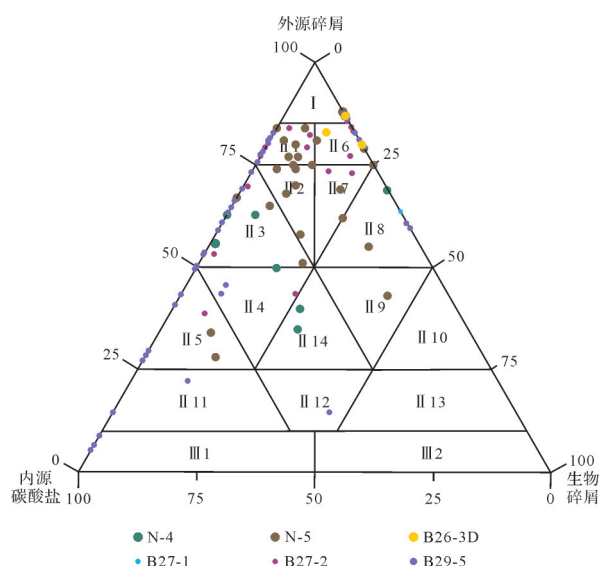


图4 混积型碎屑流块体储层的岩性相分类

(岩性分类三角图根据文献[23]修编)

Fig.4 Lithofacies classifications of the debris-flows mixing shoal (triangular diagram of lithofacies division modified from reference [23])

整个体,代表生物颗粒组分经历了强烈的水动力作用与异地搬运过程。

混积型碎屑流块体储层可进一步划分两类沉积组分具有差异的储层类型:混积砾质碎屑流块体和混积砂质碎屑流块体。前者岩性整体多为砂或者泥质基质支撑、块状构造,不见水流成因层理(图5a)。砾石颗粒为主要组分,含量可超过75%(图5b)。砾石颗粒组分为中、酸性喷出岩岩屑,颗粒多呈次圆状一次棱角状;颗粒粒径从5 mm至3 cm不等,分选中等一差。生物碎屑呈破碎状、多数难以识别出生物结构,零散分布于砾石颗粒之间(图5a~c)。混积砂质碎屑流块体以砂质碎屑结构为主,多见块状构造或者反粒序层理构造。有时见泥岩撕裂屑、泥质团块或条带、炭屑等呈分散状均匀悬浮分布(图5d)。砂质颗粒成分主要包括火山岩屑和石英颗粒,含量多介于60%~70%,颗粒分选中等并多呈次棱角状。生物碎屑颗粒含量介于15%~25%,以碎片状呈零散(图5e)或层状分布(图5f)。

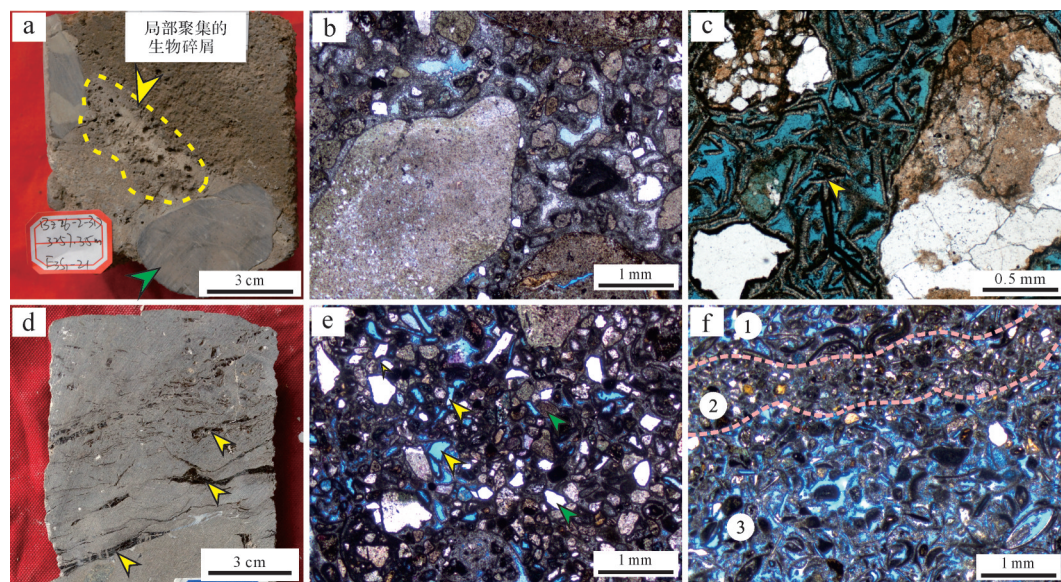


图5 混积型碎屑流块体储层的典型沉积特征

(a)混积砾质碎屑流块体岩心宏观观察,砾石质碎屑颗粒(绿色箭头)与局部聚集的生物碎屑(黄色箭头与曲线区域)混合,砂质基质支撑、块状构造,B26-3D井,3 257.25~3 257.35 m;(b)混积砾质碎屑流块体沉积以砾石颗粒为主要骨架组分,含量可超过75%,单偏光,N-5井,3 374.88 m;(c)镜下观察零散分布于砾石颗粒之间、呈破碎状生物碎屑(黄色箭头),单偏光,B26-3D井,3 257.10 m;(d)岩心观察混积砂质碎屑流块体中分散状均匀悬浮分布的炭屑,N-5井,3 379.40~3 379.52 m;(e)镜下观察碎片状生物碎屑颗粒(黄色箭头)零散于砂质碎屑颗粒(绿色箭头)之间,单偏光,N-5井,3 373.51 m;(f)镜下观察不同粒级和含量的生物碎屑与碎屑颗粒混合,并呈层状分布(①~③层),单偏光,N-5井,3 344.69 m

Fig.5 Typical sedimentary features of the debris-flows mixing shoal

(a) core observation showing gravel-sized siliciclastic (green arrow) mixing with limited occurrences of bioclasts (yellow arrow and curve region) within gravel debris-flows mixed shoals, characterized by massive structure with muddy sand matrix, PPL, well B26-3D, 3 257.25-3 257.35 m; (b) gravel debris-flows mixed shoals with a content of more than 75% gravelly clasts, PPL, well N-5, 3 374.88 m; (c) disarticulated bioclast fragments (yellow arrow) randomly distributed between fine-grained pebbles, PPL, well B26-3D, 3 257.10 m; (d) core observation showing several horizontally aligned organic clasts within sandy debris-flows mixing shoals, PPL, well N-5, 3 379.40-3 379.52 m; (e) occurrence of bioclasts (yellow arrow) distributed between sand-sized siliciclastics, well N-5, 3 373.51 m; (f) photomicrographs showing bioclast fragments mixed with siliciclastics of varied size and content as stratified beds (①~③ bed), PPL, well N-5, 3 344.69 m

3 “组分混合”沉积储层的非均质性特征

3.1 “组分混合”的沉积非均质性特征

“组分混合”沉积的分布显著受到碎屑岩沉积体系的影响和约束,具有侧向连通性有限、砂体横向展布面积不一的特征(图6a,b)。不同“组分混合”沉积类型平面分布具有差异性:原地生物混积滩多分布于冲积扇或扇三角洲体系侧翼、低凸起或凹中隆起等构造位置相对较高且陆源碎屑供给较少的区域;反之,混积型碎屑流块体沉积则普遍分布于邻近凸起的斜坡近端带^[27]。

垂向上,“组分混合”的分布亦存在非均质性特

点:(1)在层序地层单元中不同混合沉积类型局限于特定体系域。结合前人认识,沙一二段可作为一个三级层序^[32-33]。原生物混积滩沉积大量集中湖侵体系域。反之,高位体系域主要发育重力流成因的混积型碎屑流块体(图6)。(2)不同尺度的垂向剖面上形成多样的储层叠置样式(图6a,b、图7)。多口钻井岩心观察表明,不同原生物混积滩储层类型在垂向上变化多样,例如从C-2井取心段可以识别出多个生物泥晶混积滩向砾(砂)屑混积滩或生物颗粒混积滩转变的旋回序列;镜下薄片观察也表明不同岩性相组构在垂向上发生频繁的变化(图7)。同样,多个混积碎屑流块体沉积体与扇三角洲等碎屑沉积体系互层叠置,单个成因相沉积厚度和岩性相垂向变化较大(图6a照片)。

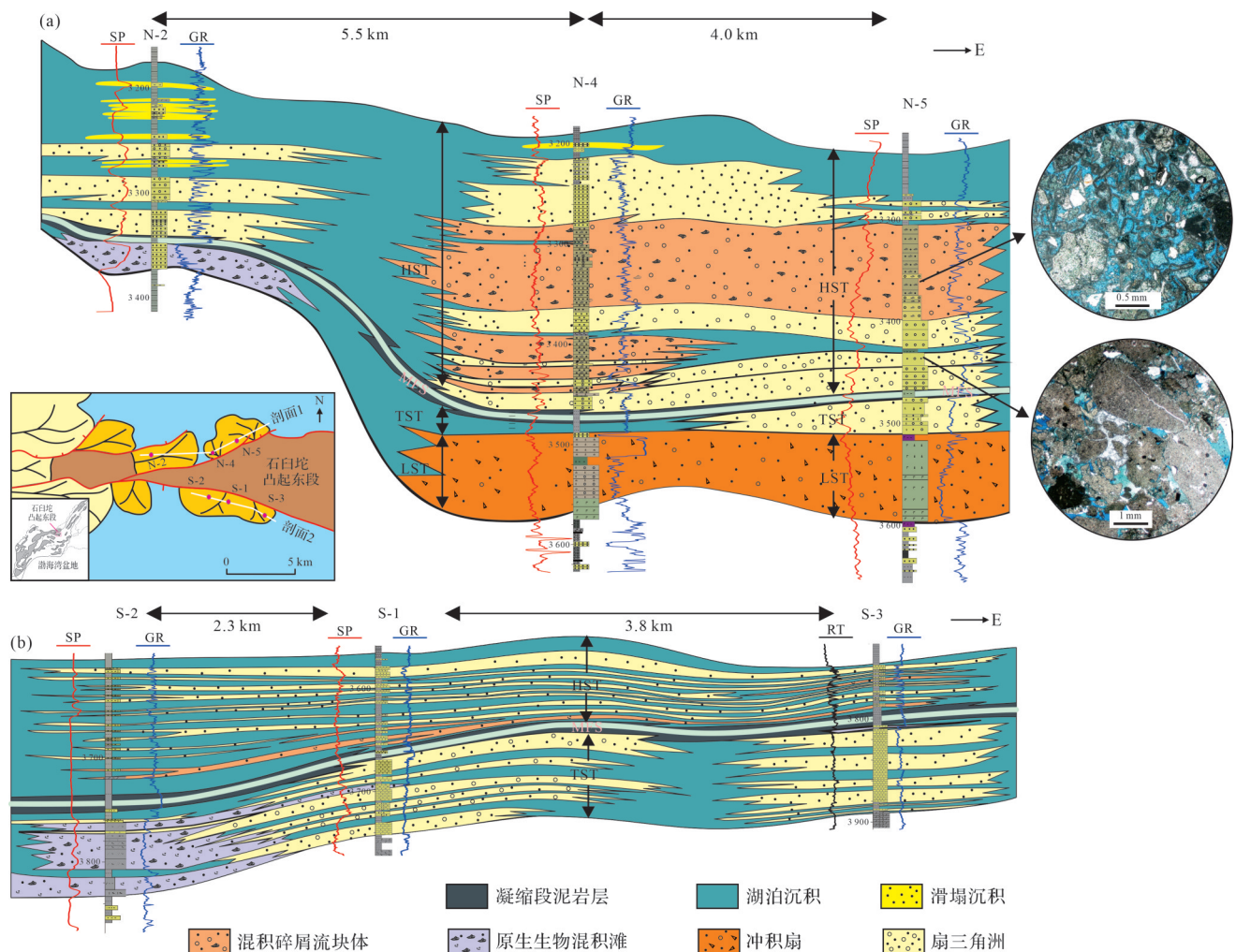


图6 不同区域混合沉积剖面

(a) 石臼坨凸起东段北侧西北—北东向剖面1; (b) 石臼坨凸起东段南侧西北—南东向剖面2

Fig.6 Depositional cross-sections of mixed sediments in different regions

(a) section 1 (SW-NE) in the northern part of the eastern Shijiutuo uplift; (b) section 2 (NW-SE) in the southern part of the eastern Shijiutuo uplift

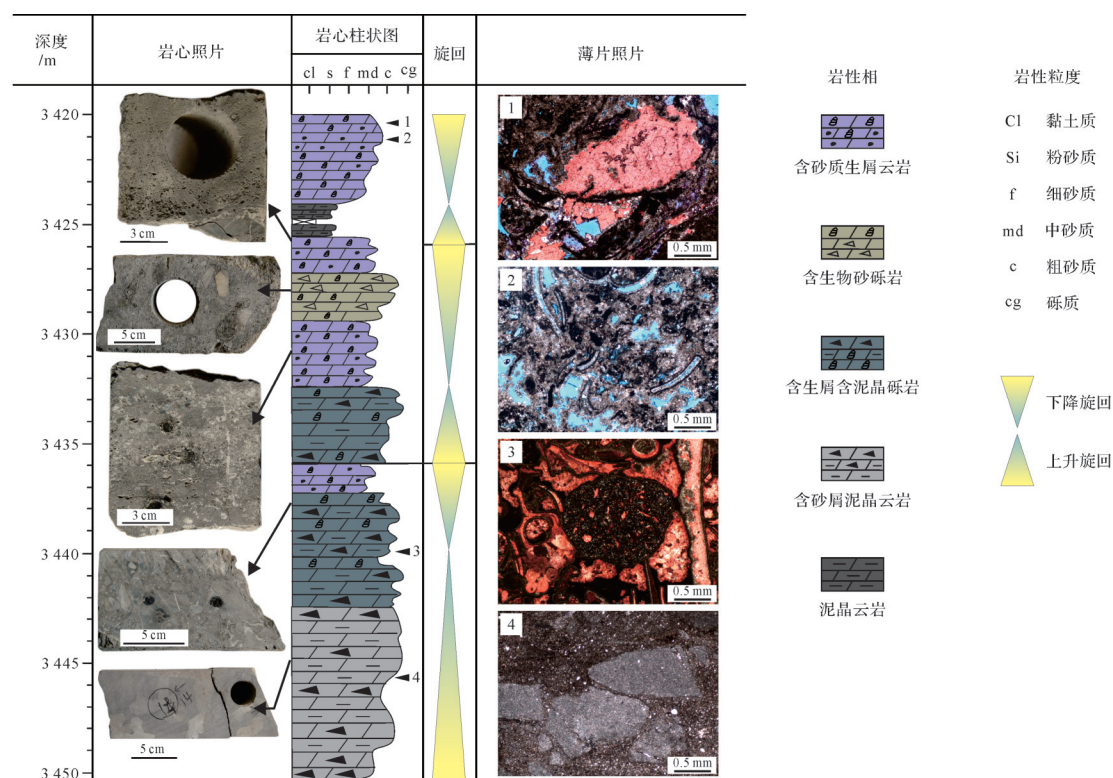


图7 C-2井取心段柱状图与不同岩性相组构变化

Fig.7 Coring column showing the textural changes of different lithofacies in well C-2

3.2 “组分混合”的储层特征及非均质性

3.2.1 储层孔渗性及其非均质性特点

基于岩心实测的孔隙度和渗透率数据表征“组分混合”沉积的储层物理性质。结果表明,原生生物混积滩孔隙度与渗透率整体相关性较好,但不同储层类型的物性分布存在明显的差异。其中,生物颗粒混积滩储层物性最佳,144个生物颗粒混积滩样品孔隙度介于8.7%~40.1%,平均值为29.4%;渗透率介于 $(0.06\sim 2\ 350.40)\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$,平均值为 $473.11\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$ 。生物泥晶混积滩及砾(砂)屑混积滩的样品相对较少,17个生物泥晶混积滩样品孔隙度介于2.5%~19.1%,平均值为9.6%;渗透率介于 $(0.01\sim 1.30)\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$,平均值为 $0.32\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$,其储层物性是三类储层中最差的。获取的8个砾(砂)屑混积滩储层物性孔隙度则介于14.7%~25.2%,平均值为19.8%;渗透率介于 $(47.4\sim 318.3)\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$,平均值为 $138.6\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$ 。另一个方面,同一储层类型的储集物性也存在差异性。以生物颗粒混积滩样品为例,测试样品孔隙度最值相差20%左右,而渗透率最值相差则达四个数量级(图8a)。

相较而言,混积型碎屑流块体样品的孔隙度与

渗透率的相关性较差,储层物性不受成因相控制,因而非均质性更为明显。187个混积砂质碎屑流块体沉积的储层样品的孔隙度与渗透率呈一定相关性,但分布范围较大:孔隙度介于4.0%~34.6%,最值相差达30%;渗透率介于 $(0.02\sim 340.05)\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$,最值相差约三个数量级。混积砾质碎屑流块体沉积储层共计61个样品,孔隙度介于7.8%~18.8%,平均值为14.3%;但其渗透率范围分布较大,介于 $(0.2\sim 767.5)\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$,平均值为 $20.3\times 10^{-6}\ \mu\text{m}$ 。因此,相较于前者,混积砾质碎屑流块体储层孔隙度与渗透率相关性更差(图8b)。

3.2.2 储层微观孔隙结构特征及非均质性

利用高压压汞数据表征不同“组分混合”储层的孔隙结构特征。原生生物混积滩不同储层类型的孔隙结构参数具有差异性。生物颗粒混积滩储层曲线特征呈左下方倾斜或向右上方倾斜,但曲线相对位置较低(图9a, I 和 II)。个别样品曲线具有较短的单个或两个平台段,但平台较短并呈斜坡状(图9a, III)。这表明,储层孔隙空间较大、分选差,因而孔隙结构复杂。同时,这类储层的曲线均表现出相对低的排驱压力($<1\ \text{MPa}$)及较高汞饱和度的

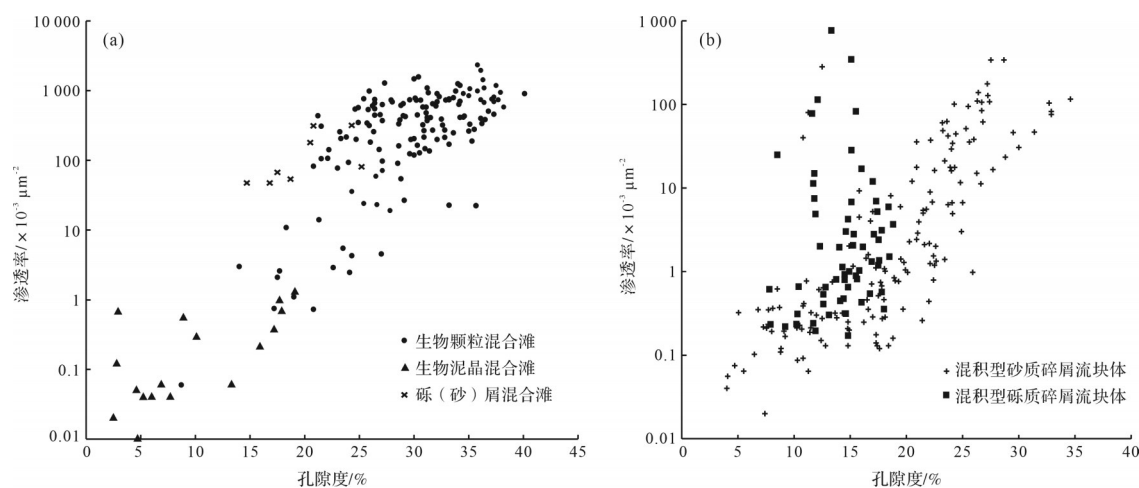


图8 不同“组分混合”成因相孔隙度与渗透率交汇图

(a)原生生物混积滩不同成因相储层物性分布;(b)混积碎屑流块体沉积不同成因相储层物性分布

Fig.8 Cross-plot of porosity versus permeability for “compositional mixing” sediments with different facies

(a) cross-plot of porosity versus permeability for different facies within bioclastic mixing shoals; (b) cross-plot of porosity versus permeability for different facies within debris-flows mixing shoals

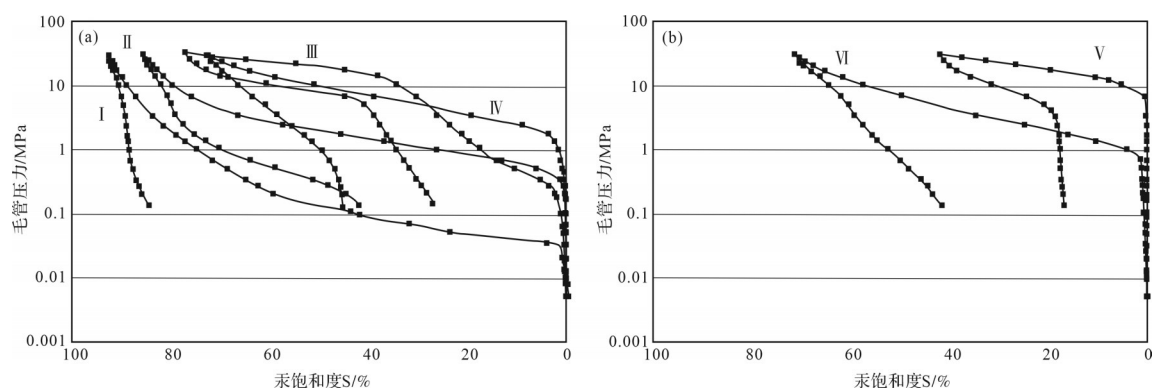


图9 原生生物混积滩不同储层类型的高压压汞曲线特征

(a)生物颗粒混积滩储层代表性的压汞曲线形态, I~IV代表不同样品曲线形态;(b)生物泥晶混积滩(V)与砾(砂)屑混积滩(VI)储层的高压压汞曲线

Fig.9 Characteristics of capillary pressure curve of bioclastic mixing shoals reservoirs

(a) representative capillary pressure curves of bioclastic particles mixing shoals with different samples (I-IV); (b) capillary pressure curves of bioclastic-micrite shoal facies (V) and gravel (sandy) debris shoal facies (VI)

特点(>70%),指示相对较强的储层渗透性。与之相比,生物泥晶混积滩与砾(砂)屑混积滩储层样品的压汞曲线均表现出向右上方倾斜且无平台段特点,具有明显的高排驱压力(>1 MPa)、低汞饱和度(<70%)及高退汞效率(>20%)(图9b)。这些特征表明储层孔隙空间可能以微细喉道为主,孔隙结构相对简单、渗流能力相对较差。

此外,同一储层类型的孔隙结构也呈显著差异性。例如,生物颗粒混积滩储层具有四类不同特征的曲线样式。图9a中I类曲线具有排驱压力低(<0.01 MPa)、汞饱和度高及退汞效率低的特点,曲线平台较短并具有一定斜率,代表其孔隙结构复杂、孔

喉分布多样,因此储层孔隙度高、渗透性强。II类曲线排驱压力相对低(0.1~1.0 MPa)、汞饱和度高但退汞效率高,曲线呈向右上方倾斜且无平台段,代表储层孔隙度较高,但孔隙空间细喉道比例高,渗透性一般。III类曲线与II类曲线在排驱压力、汞饱和度高及退汞效率方面特征相似,但其排驱压力更低;同时具有两个平台段,代表其孔隙结构分选中等、细喉道的比例极高,导致该类储层的储集空间虽然较大但渗透率很低。IV类曲线表现出明显的高排驱压力(>1 MPa)特点,曲线呈斜坡状、无明显平台段,代表储层孔隙结构以细喉道空间为主、孔喉分布集中,其孔隙度与渗透率相对低。

混积碎屑流块体储层的压汞曲线表现出相对类似的特征:曲线表现为向左上方倾斜、无平台段的斜坡式形态。这表明这类储层普遍以细小孔隙空间为主,孔隙结构分选性相对较差(图10)。然而,不同岩性组构特征的储层样品表现出明显的孔隙结构差异性。例如,在混积砂质碎屑流块体中选取极细粒、中—细粒、中—粗粒为主要粒度样品的压汞曲线进行比较。结果表明,极细粒混积砂质碎屑流块体样品比其他样品具有明显高的排驱压力(>10 MPa),曲线位置明显偏高、向右上方倾斜,代表其孔隙空间可能以单一的细小喉道为主,储集物性偏差。反之,其他粒度结构的样品储集性能明显相比其偏好。此外,相同粒度样品孔隙结构参数可能也会具有较大差异。例如,中—粗粒的两个样品(图10b,Ⅲ和Ⅳ曲线)孔隙度相差不大、但渗透率却具有明显的差异。Ⅳ号曲线明显具有较高的排驱压力(1.99 MPa)而Ⅲ号曲线表现出明显偏低的排驱压力(0.55 MPa)。此外,Ⅳ号曲线呈高斜率、无平台段特征;Ⅲ号曲线则偏左下方倾斜并具有较短的平台段。这些特点代表后者具有相对粗径的孔隙空间、孔隙结构分选性差且储层渗流能力更强。类似的情况还可见Ⅰ和Ⅱ两个样品的曲线对比(图10b):曲线形态相似但排驱压力相差较大,说明相同粒径样品之间可能具有相似的孔隙空间,但渗透能力相差甚远。

4 讨论

4.1 沉积分布非均质性的控制因素

沉积剖面显示,原生生物混积滩在空间上集中于沙一二层序的湖侵体系域,大致对应于沙河街组

二段至沙河街组一段早期(图6)。前人对于这一地质时期的古环境研究表明,渤海湾盆地处于一个相对干燥的气候背景^[30]。在这种条件下,流入湖盆的陆源碎屑相对较少,凸起或凹中隆起区、冲积扇或扇三角洲沉积体系侧翼等相对干净的浅水环境,有利于底栖生物的生长,是原生生物混积滩发育的重要因素(图6a,b)。湖平面的频繁变动是不同成因相在垂向发生非均质叠置的控制因素:沙一二层序湖侵体系域沉积期,盆地处于从断陷期向稳定热沉降期的转换阶段,构造活动导致湖平面易动态波动。湖平面上升淹没凸起,并不利于生物碎屑颗粒的生长,因此以碳酸盐泥晶颗粒沉积为主(图7)。伴随少量陆源碎屑受风化剥蚀作用的流入,会形成生物—泥晶混积滩沉积;当湖平面下降,浅水型生物生长繁盛,邻近凸起风化作用增强带入较多陆源碎屑颗粒,但并未大量“毁灭”碳酸盐沉积,因而形成生物颗粒混积滩。当湖平面进一步下降,近岸凸起暴露面积加大、风化作用加强,砾质或者砂质碎屑大量流入,并可能在水流或者重力作用驱动下与原地沉积的生物滩相混合,形成砾(砂)屑混积滩(图7)。

相较而言,古地貌与古水深是控制混积型碎屑流块体平面分布的因素。凸起区地貌具有一定的沉积坡度。在坡度控制下,随着沉积物的大量输入易导致沉积失稳而引发重力流沉积(图6a)。此外,沉积剖面表明,混积碎屑流块体沉积集中于沙一二层序的高位体系域,该沉积期大致对应于沙河街组一段时期。在这一地质历史时期,盆地构造活动开始减弱,湖平面稳定上升。由于湖平面的持续上升,喜好浅水环境的底栖生物分布受到水深的控制,集中分布于邻近凸起的近岸带。因此,当在一定条件的

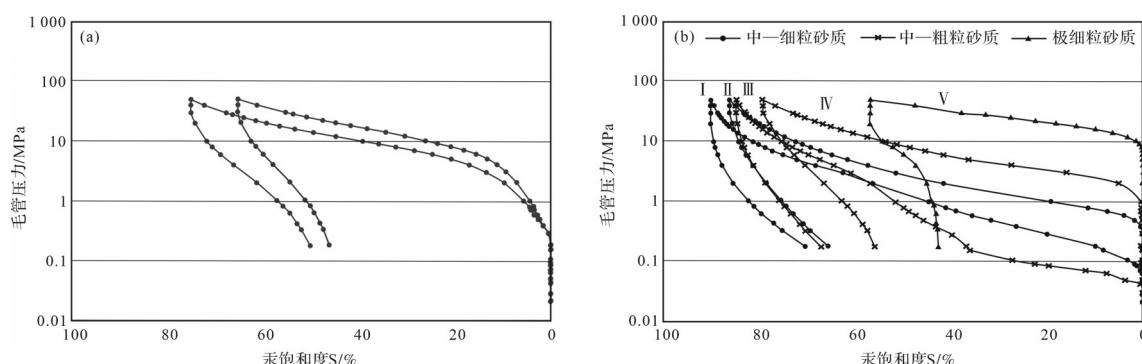


图10 混积碎屑流块体储层高压压汞曲线特征

(a)混积砾质碎屑流块体储层高压压汞曲线;(b)混积砂质碎屑流块体储层高压压汞曲线,Ⅰ~Ⅴ代表不同粒度样品曲线形态

Fig.10 Characteristics of capillary pressure curve for debris-flows mixing shoal reservoirs

(a) capillary pressure curves of gravel debris-flow mixing shoals (I-IV); (b) representative capillary pressure curves of sandy debris-flow mixing shoals with different grain sizes (I-V)

促发下引起重力事件,大量沉积物会迅速从凸起区向湖盆流动,并裹挟近岸生物一同搬运。这一沉积过程最终演变为重力流(碎屑流)成因的“组分混合”沉积,并局限于凸起区近端沉积。混积碎屑流块体沉积组构与叠置样式的差异性受控于重力事件驱动机制的差异。根据所识别的两类成因相特征推测,促发重力沉积事件(碎屑流沉积)的动力因素包括:(1)沉积失稳。凸起区未固结的三角洲前缘砂体在斜坡带上方失稳滑落,并沉积于斜坡下方。这一过程可能形成砂质碎屑流混合沉积;(2)洪水驱动。洪水期河流携带大量陆源碎屑的高密度水体会引起重力事件。相较于前者,洪水驱动机制由于动能大,因而可能是形成混积砾质碎屑流块体沉积的动力机制。垂向不同成因相的叠置沉积(图6a)很可能反映了物源区水动力机制或者强度的变化。

4.2 储集性能非均质性的控制因素

利用研究区现有资料,通过定量分析不同因素与储层物性(孔隙度与渗透率)及孔隙结构参数的关系,厘定控制储集性能非均质性的因素并探讨其控制机理。基于上述思路,发现陆源碎屑颗粒、生物颗粒的选择性溶蚀作用、早期胶结与白云岩化及方解石胶结是控制储集能力非均质的关键因素。

4.2.1 陆源碎屑颗粒

前人对于混合沉积中的组分差异(异化粒与陆源碎屑颗粒比例)如何控制储层质量的差异性存在诸多争议^[15,34-36]。本文的结果表明,无论是原生生物混积滩还是混积型碎屑流块体,陆源碎屑颗粒含量与储层孔隙度及渗透率均具有正相关关系(图11a, b):碎屑含量较多的样品,储层质量变差;反之碎屑

组分占比较小的样品,储层质量相对较好。

通过定量统计不同粒径样品的陆源碎屑含量探讨陆源碎屑颗粒的控储机制。首先,不同粒级(例如中—粗砂、中细砂及含砾砂质级)的储层陆源碎屑颗粒含量越高,均表现出孔隙孔喉半径、分选系数降低、排驱压力增加的趋势(图12c~e)。这可能表明,“组分混合”沉积中的陆源碎屑含量越高,储层的孔隙结构会向低孔隙空间、分选均一、渗流能力降低的趋势变化,从而导致储层物性随之降低。这与图12a和b展示的结果相一致。

其次,碎屑颗粒的粒径明显影响储层的孔隙度与渗透性。以砾级为主要组分或含砾级颗粒的样品大多数孔隙度在20%以下,平均值为18%;反之,以中—细砂级碎屑为主要组分的混合沉积样品,其孔隙度多数在20%以上,平均值可达28%(图12a)。而渗透率与粒径关系特征则表明,含砾组分颗粒的样品渗透率差异性较大;反之,砂级碎屑构成的混合沉积样品渗透性与粒径变化呈明显的相关性(图12b)。进一步将不同粒径的样品与其孔隙结构参数进行对比发现,含有砾石级碎屑颗粒的样品相较含有砂质级碎屑颗粒的混合沉积具有相对较低的孔隙喉道半径和分选系数、较高的排驱压力(图12c~e)。这表明,含有砂质级陆源碎屑颗粒的储层孔隙喉道半径更大、分选较差,具有相对复杂的储集空间。相对粗粒(砾级以上)的碎屑颗粒的流入可能改变孔隙结构空间:降低孔隙喉道的大小、导致分选系数下降,孔隙空间趋于相对单一细小孔隙类型的特点。由此推断,孔隙结构的改变可能是影响储层渗透率的机制。其中,砂质颗粒为组构的混合沉积相较具有明显更强的渗流能力(图12e)。

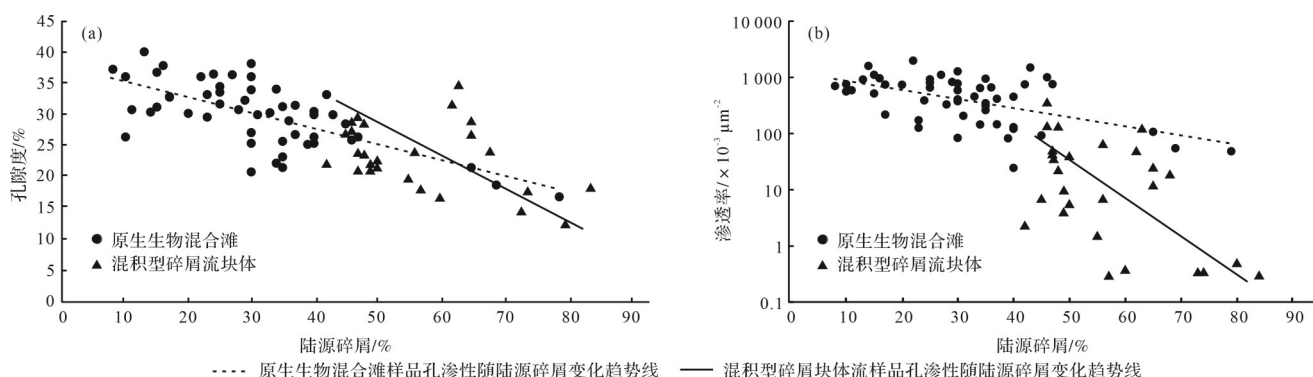


图11 不同储层类型中陆源碎屑与储层物性交图

(a)不同成因相组合中陆源碎屑含量与孔隙度的关系;(b)不同成因相组合中陆源碎屑含量与渗透率的关系

Fig.11 Cross-plot of siliciclastic content versus reservoir properties with different reservoir types

(a) cross-plot of siliciclastic content versus porosity with different facies associations; (b) cross-plot of siliciclastic content versus permeability with different facies associations

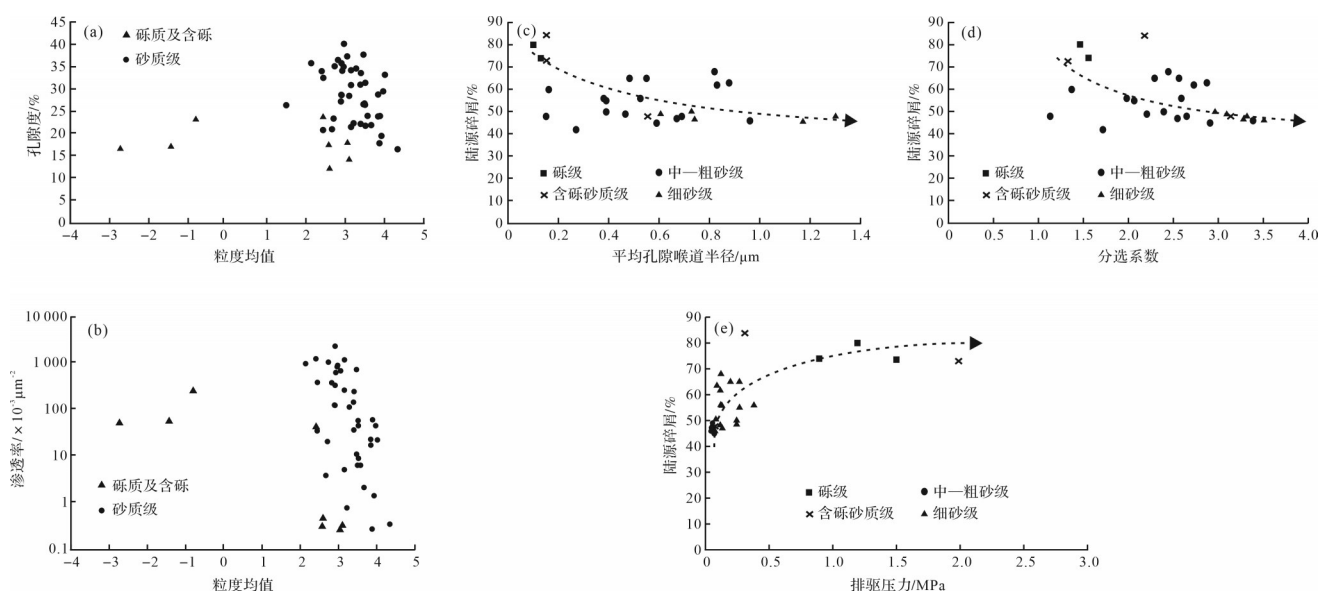


图12 “组分混合”沉积中陆源碎屑颗粒与储层物性及孔隙结构相关性

(a)不同粒径碎屑颗粒的混合沉积孔隙度分布;(b)不同粒径碎屑颗粒的混合沉积渗透率分布;(c)不同粒径及不同碎屑颗粒含量的混合沉积与平均孔隙喉道半径关系;(d)不同粒径及不同碎屑颗粒含量的混合沉积与分选系数关系;(e)不同粒径及不同碎屑颗粒含量的混合沉积与排驱压力大小关系

Fig.12 Correlation between siliciclastics and reservoir properties as well as pore structure

within “compositional mixing” deposits(a) cross-plot of mean grain size versus porosity with gravel and sandy samples; (b) cross-plot of mean grain size versus permeability with gravel and sandy samples; (c) cross-plot of mean pore-throat radius versus siliciclastic content with different grain sizes; (d) cross-plot of sorting coefficient versus siliciclastic content with different grain sizes; (e) cross-plot of displacement pressure versus siliciclastic content with different grain sizes

4.2.2 生物颗粒的选择性溶蚀作用

薄片观察表明,混合沉积储层主要受到大气淡水的选择性溶蚀作用,形成了大量粒内溶蚀孔隙(图2a、图5e)。通过对选择性溶蚀孔含量的统计发现,随着选择性溶蚀量的增加,不同类型的“组分混合”沉积储层孔隙度和渗透率均呈增大的趋势(图13a,b)。

选择性溶蚀作用与孔隙结构的关系表明其对储层的控制机理包括两个方面。首先,选择性溶蚀可以明显增加孔隙空间。溶蚀孔含量与排驱压力关系表明,当溶蚀作用仅产生5%的溶蚀孔隙度时,排驱压力会降低80%(图13c)。这表明,选择性溶蚀作用可以产生大面积的铸模孔或者生物体腔孔,这些大孔隙空间的增加可减少流体在储层中的阻力,导致排驱压力迅速降低,显著提高储层的渗流能力。其次,选择性溶蚀程度会对微细喉道产生显著影响。选择性溶蚀孔含量与平均喉道半径呈正相关性,表明这类溶蚀会有效增大狭小喉道的空间(图13d)。随着储层喉道空间不同程度的扩大,储层孔隙结构变得复杂、分选性变差,驱动汞退出的毛细管压力减小。选择性溶蚀量与分选系数呈正相关性、与汞采收率呈负相关关系契合了这一解释(图13e,f)。

4.2.3 早期胶结与白云石化

通过薄片观察,混合沉积储层中存在大量早成岩期的白云岩石化胶结物。这些胶结物根据产状的不同,可以分为两类。一类是生长于颗粒边缘的栉壳状或者等厚环边状胶结物(图14a),另一类则是充填于颗粒之间的粉—细晶胶结物(图14b)。两类胶结物含量与储层物性之间存在明显的差异性。桎壳状或环边状的白云石胶结与储层孔隙度及渗透率呈显著的正相关关系。随着这类胶结物含量的增加,储层物性明显变好(图14c,d)。反之,晶粒状胶结物普遍导致孔隙度不高,主要介于5%~10%(图14c)。同时这类胶结物对储层渗透率破坏较大,随着胶结物含量增加,渗透率呈降低的趋势(图14d)。

环边胶结物是典型的成岩早期(大气渗流带)胶结作用,同时也经历了白云石化作用。大量案例已经证实,尽管这种类型的胶结物会占据少量的原生孔隙空间,但是却能在成岩早期阶段有效增强储层的抗压实性,从而很好地保存粒间原生孔隙^[19,37-38],这与本文数据及观察相一致(图14a,c)。反之,粉—细晶胶结物同样作为成岩早期(大气潜流带)产物,却会占据大量原生孔隙空间,形成大量狭窄的喉道。尽管这类胶结物也经历了白云石化作用,但并不能

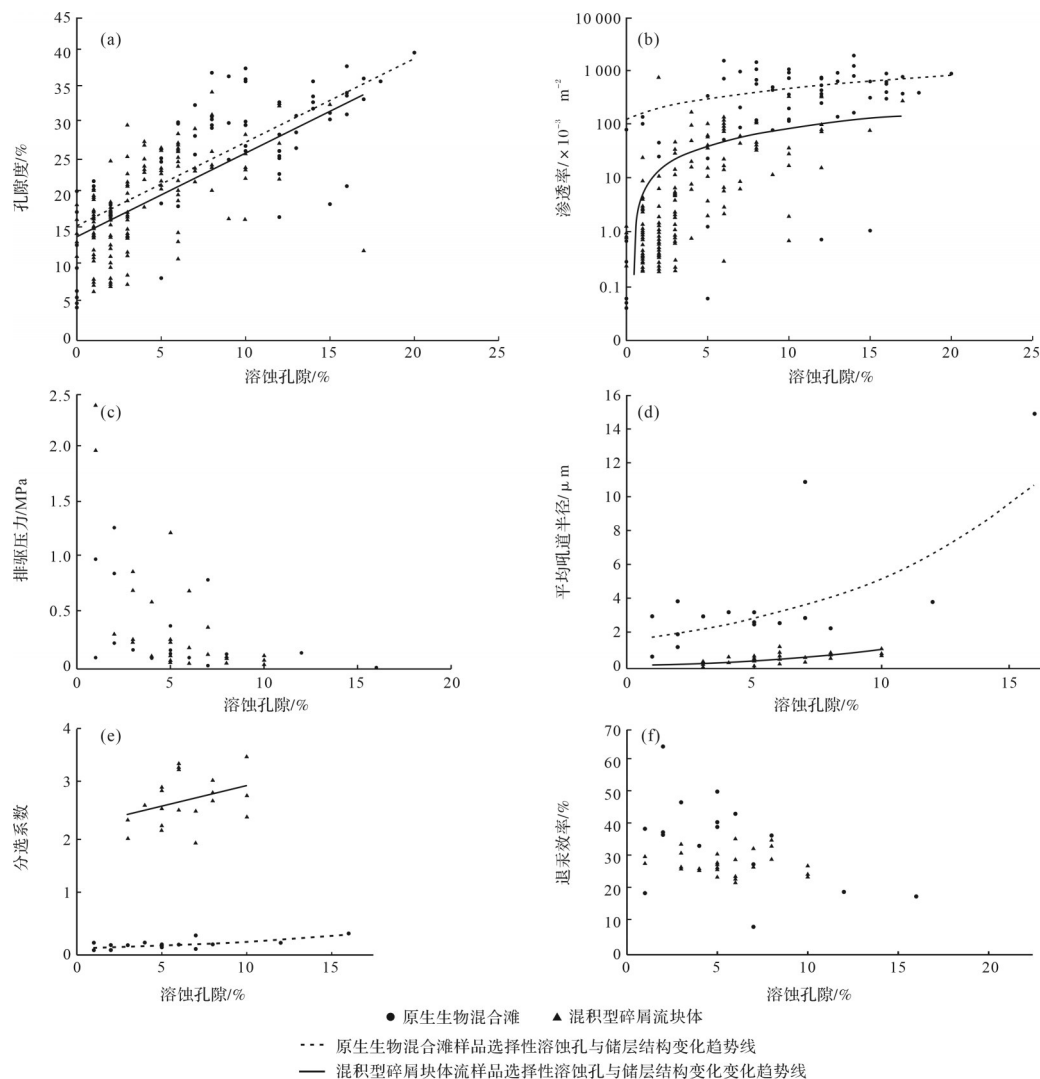


图13 不同储层类型选择性溶蚀含量与储层物性及孔隙结构相关性

(a)溶蚀量与储层孔隙度交会关系;(b)溶蚀量与储层渗透率交会关系;(c)溶蚀量与排驱压力交会关系;(d)溶蚀量与平均喉道半径交会关系;(e)溶蚀量与分选系数交会关系;(f)溶蚀量与退采效率交会关系

Fig.13 Correlation between selective dissolution and reservoir properties as well as pore structure

within different reservoirs types(a) cross-plot of selective dissolution versus porosity; (b) cross-plot of selective dissolution versus permeability; (c) cross-plot of selective dissolution versus displacement pressure; (d) cross-plot of selective dissolution versus mean throat radius; (e) cross-plot of selective dissolution versus sorting coefficient; (f) cross-plot of selective dissolution versus withdrawal efficiency

改善孔隙空间^[39],反而由于储层中存在大量微小喉道导致渗透性降低(图14d)。

4.2.4 方解石胶结

薄片研究表明,混合沉积储层中普遍存在嵌晶方解石胶结(图7)。随着这类胶结物含量的增加,储层孔隙度和渗透率呈明显下降的趋势(图15a, b)。方解石嵌晶胶结导致储层质量下降的机理表现在两个方面:随着方解石胶结量的增加,一方面,造成储层孔隙喉道半径减小(图15c);另一方面,则明显导致储层排驱压力增加、渗流能力下降(图15d)。

此外,方解石充填在空间分布上的非均质性是造成储层质量差异化的成因。例如,图7中1和2号薄片样品岩性与沉积相相同,垂向距离仅相差约0.5 m。然而由于方解石的充填作用,1号样品储层物性及孔隙结构明显差于2号样品,从而导致储层质量垂向的非均质性。

4.3 “组分混合”沉积非均质性的形成模式

在厘定非均质性控制因素基础上,基于沉积作用过程与关键成岩事件发生的次序作为约束条件,构建沉积一成岩演变过程中“组分混合”沉积非均质性的形成模式(图16)。

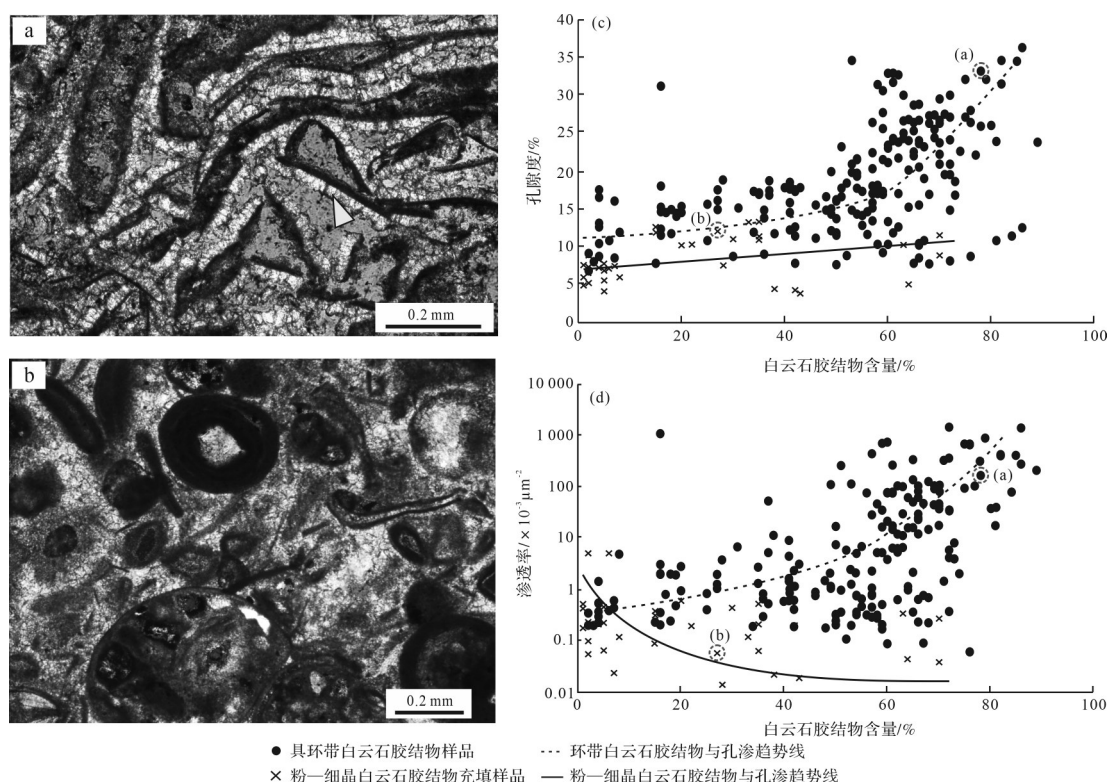


图 14 不同白云石胶结物类型镜下照片及其含量与储层物性关系

(a)环边白云石胶结物(黄色箭头)镜下照片,单偏光,S-2井,3 762.83 m;(b)镜下观察粉—细晶白云石胶结物(蓝色箭头)充填原生孔隙,单偏光,B27-2井,3 788.01 m;(c)不同胶结物类型含量与孔隙度交会关系;(d)不同胶结物类型含量与渗透率交会关系

Fig.14 Photomicrographs of different dolomitic cements and the relationship between

dolomite content and reservoir properties (a) photomicrographs of dolomitic rim cements (yellow arrow), PPL, well S-2, 3 762.83 m; (b) photomicrographs of silt to fine crystalline dolomitic cements (blue arrow), PPL, well B27-2, 3 788.01 m; (c) cross-plot of contents of different types of dolomitic cements versus porosity; (d) cross-plot of contents of different types of dolomitic cements versus permeability

沙一二段沉积时期,在不同要素的共同影响下,碎屑岩和碳酸盐岩组分发生不同混合沉积作用的过程,并在空间上呈现显著的非均质性分布:受古气候与物源影响,原生生物混积滩易分布于陆源碎屑供给减少的区域;受潮平面变化控制,不同组构的成因相在垂向上反复叠置沉积,造成垂向序列的不均质性。混积型碎屑流块体沉积受古气候与水深的约束,分布于凸起斜坡近端带;重力事件水动力强弱的变化则导致混合沉积的垂向频繁变化。受不同混合沉积过程的影响,不同类型“组分混合”储层具有不同含量与粒径特征的陆源碎屑颗粒,这些组构差异性影响了储集性质的不同:储层碎屑含量越高会导致储集性能的下降;以砂质陆源碎屑组分为主的混合沉积具有更高的孔喉半径、分选系数及渗流能力而含砾质组分的储层渗流能力相对较差。

准同生沉积阶段,“组分混合”储层经历了广泛的大气淡水作用,大量文石质的生物颗粒发生选择

性溶蚀。高溶蚀量会对孔隙和喉道结构产生明显的改善,导致储层平均喉道半径增加、排驱压力和退汞效率降低,因而储层的渗流能力受到显著的影响。反之,相对较低的溶蚀量产生较小的孔隙与喉道空间,储层物性改善有限。

准同生期一早成岩作用阶段,胶结作用与白云石化过程是对储层影响最大的关键事件。这一过程至少发生了三期,包括准同生期泥晶化及白云石化、早成岩期环边胶结与白云石化、晶粒胶结及白云石化^[24]。泥晶化作用形成白云质的泥晶套,与环边白云质胶结物共同构成了颗粒外圈的包壳组构。包壳组构含量越高,越能有效增加岩石的抗压实性,从而有效保护原生孔隙空间、提高储层的渗透能力。反之,晶粒胶结物堵塞原生孔隙,白云岩化作用并不能提高储层物性,反而由于胶结作用形成大量狭小喉道结构,导致储层渗透性变差。

方解石嵌晶胶结亦是影响储层非均质性的因素。方解石嵌晶胶结堵塞原生孔隙空间,并会显著

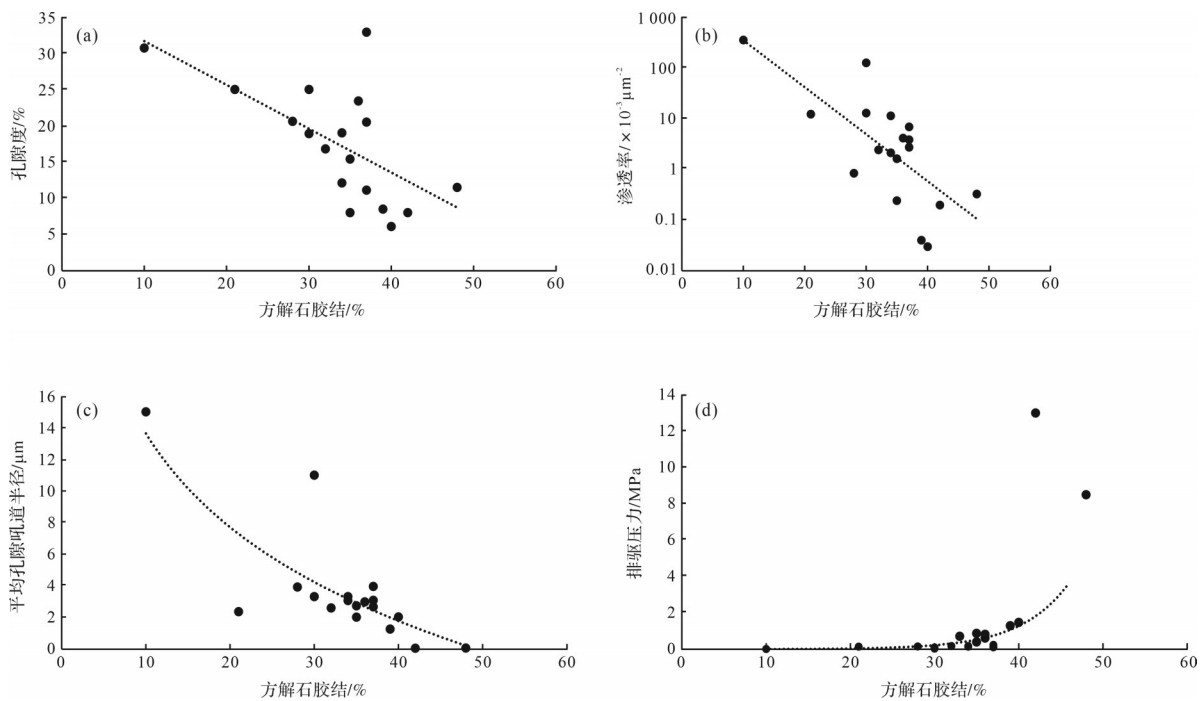


图15 方解石胶结量与储层物性及孔隙结构相关性

(a)方解石胶结与孔隙度交会关系;(b)方解石胶结与储层渗透率交会关系;(c)方解石胶结与平均孔隙喉道半径交会关系;(d)方解石胶结与排驱压力交会关系

Fig.15 Correlation between calcite cements and reservoir properties as well as pore structure

(a) cross-plot of calcite cements versus porosity; (b) cross-plot of calcite cements versus permeability; (c) cross-plot of calcite cements versus mean pore-throat radius; (d) cross-plot of calcite cements versus displacement pressure

减小孔隙喉道半径,降低孔隙空间;而随着胶结物含量增加,也会明显降低储层的渗透能力。方解石嵌晶胶结在空间分布与胶结物充填量存在差异性,进一步增强了储集性能的非均质性。

混合沉积储层的非均质性问题是开展该类特殊储层勘探与评价的关键问题。研究区的勘探实践是极具代表性的案例:在已获得油气突破的混合沉积储层钻孔邻近区域跟进打井,却时常出现勘探失败的情况。因此,本研究基于典型“组分混合”沉积非均质成因及控制因素的探讨,有望为研究区及其他盆地混合沉积的分布预测与储层评价工作提供重要的启示。

5 结论

(1) 渤海海域沙河街组一、二段发育典型的“组分混合”沉积。结合沉积特征,识别出两大类储层类型:原生生物混积滩和混积型碎屑流块体。受不同沉积过程的影响,两类储层形成不同的组构和岩性相。

(2) 混合沉积的空间分布受不同沉积因素的影

响而具有显著的差异性。原地生物混积滩受古气候和物源的影响,平面上易分布于碎屑沉积侧翼或低凸起等构造高部位;反之,混积型碎屑流块体沉积易在凸起斜坡近端分布,这可归结于古地貌与古水深的共同影响。垂向上,前者受湖平面变化的控制导致不同组构的成因相相互叠置;而重力事件水动力强弱的变化则导致混积碎屑流块体沉积垂向的频繁变化。

(3) 两类“组分混合”沉积储层均呈现复杂的储层物性与孔隙结构非均质性,这受控于陆源碎屑组分供给、选择性溶蚀量、白云岩化、胶结物产状与数量等因素对孔隙空间的差异化影响。

(4) 渤海海域“组分混合”沉积非均质性形成模式的提出对进一步探讨混合沉积储层发育机理具有重要的启发意义,同时也将为研究区及其他盆地混合沉积的分布预测与储层评价工作提供重要的理论指导。

致谢 感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司相关专家为本文提供重要的基础数据及具有启发性的指导工作。感谢审稿专家及期刊编辑对本文提出的宝贵意见和建议。

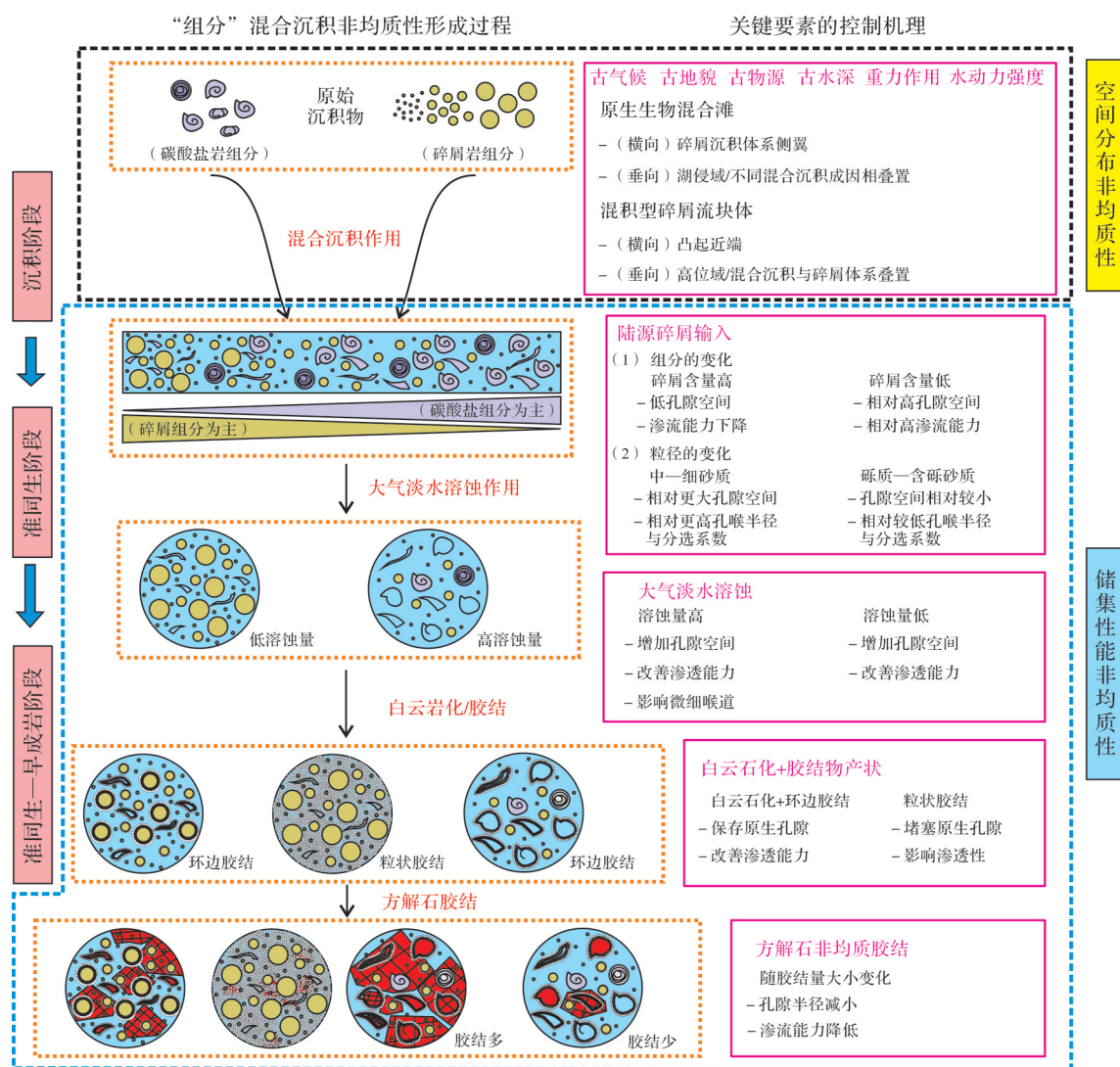


图 16 沉积—成岩演化过程中“组分混合”沉积非均质性的形成模式

Fig.16 Formative model of “compositional mixing” heterogeneity during depositional and diagenetic processes

参考文献(References)

- [1] Mount J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984, 12(7): 432-435.
- [2] 张锦泉,叶红专. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积[J]. 成都地质学院学报, 1989, 16(2): 87-92. [Zhang Jinquan, Ye Hongzhan. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1989, 16(2): 87-92.]
- [3] 江茂生,沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. 地球科学进展, 1995, 10(6): 551-554. [Jiang Maosheng, Sha Qing'an. Research advances in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(6): 551-554.]
- [4] Chiarella D, Longhitano S G, Tropeano M. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 617-627.
- [5] Carcel D, Colombié C, Giraud F, et al. Tectonic and eustatic control on a mixed siliciclastic-carbonate platform during the Late Oxfordian-Kimmeridgian (La Rochelle platform, western France) [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 223(3/4): 334-359.
- [6] Schwarz E, Veiga G D, Trentini G Á, et al. Climatically versus eustatically controlled, sediment-supply-driven cycles: Carbonate-siliciclastic, high-frequency sequences in the Valanginian of the Neuquén Basin (Argentina)[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(4): 312-335.
- [7] Zeller M, Verwer K, Eberli G P, et al. Depositional controls on mixed carbonate-siliciclastic cycles and sequences on gently inclined shelf profiles[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(7): 2009-2037.
- [8] Tănăvsuu-Milkeviciene K, Plink-Björklund P, Kirsimäe K, et al. Coeval versus reciprocal mixed carbonate-siliciclastic deposition, Middle Devonian Baltic Basin, eastern Europe: Implications from the regional tectonic development[J]. *Sedimentology*, 2009, 56

- (5): 1250-1274.
- [9] Isaack A, Gischler E, Hudson J H, et al. A new model evaluating Holocene sediment dynamics: Insights from a mixed carbonate-siliciclastic lagoon (Bora Bora, Society Islands, French Polynesia, South Pacific)[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 343: 99-118.
- [10] Korngreen D, Bialik O M. The characteristics of carbonate system recovery during a relatively dry event in a mixed carbonate/siliciclastic environment in the Pelsonian (Middle Triassic) proximal marginal marine basins: A case study from the tropical Tethyan northwest Gondwana margins[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 440: 793-812.
- [11] 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.
- [12] Feng J L, Cao J, Hu K, 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.
- [13] 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.]
- [14] Almeida Carvalho A M, Hamon Y, Gomes De Souza O, Jr, et al. Facies and diagenesis distribution in an Aptian pre-salt carbonate reservoir of the Santos Basin, offshore Brazil: A comprehensive quantitative approach[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 141: 105708.
- [15] Györi O, Haas J, Hips K, et al. Dolomitization of shallow-water, mixed siliciclastic-carbonate sequences: The Lower Triassic ramp succession of the Transdanubian Range, Hungary[J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 395: 105549.
- [16] Khazaie E, Noorian Y, Kavianpour M, et al. Sedimentological and diagenetic impacts on porosity systems and reservoir heterogeneities of the Oligo-Miocene mixed siliciclastic and carbonate Asmari reservoir in the Mansuri oilfield, SW Iran[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 213: 110435.
- [17] Hussain A, Butt M N, Olariu C, et al. Unravelling reservoir quality heterogeneity in mixed siliciclastic-carbonate deposits: An example from Miocene Red Sea rift, NW Saudi Arabia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 145: 105850.
- [18] Shehata A A, Kassem A A, Brooks H L, et al. Facies analysis and sequence-stratigraphic control on reservoir architecture: Example from mixed carbonate/siliciclastic sediments of Raha Formation, Gulf of Suez, Egypt[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 131: 105160.
- [19] Kleipool L M, Reijmer J J G, Bádenas B, et al. Variations in petrophysical properties along a mixed siliciclastic carbonate ramp (Upper Jurassic, Ricla, NE Spain)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 158-177.
- [20] 杜学斌, 刘晓峰, 陆永潮, 等. 陆相细粒混合沉积分类、特征及发育模式: 以东营凹陷为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(11): 1324-1333. [Du Xuebin, Liu Xiaofeng, Lu Yongchao, et al. Classification, characteristics and development models of continental fine-grained mixed sedimentation: A case study of Dongying Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(11): 1324-1333.]
- [21] 伊硕, 王龙, 倪军娥, 等. 伊拉克M油田Asmari组混积储层隔夹层特征及地质意义[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(6): 1014-1024. [Yi Shuo, Wang Long, Ni Jun'e, et al. Characteristics and geological significance of interlayers in mixed reservoir of Asmari Formation in M oilfield, Iraq[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(6): 1014-1024.]
- [22] 夏庆龙. 渤海油田近10年地质认识创新与油气勘探发现[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(3): 1-9. [Xia Qinglong. Innovation of geological theories and exploration discoveries in Bohai oilfields in the last decade[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(3): 1-9.]
- [23] 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.]
- [24] 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.]
- [25] Ye M S, Xie X N, Xu C G, et al. Sedimentary features and their controls in a mixed siliciclastic-carbonate system in a shallow lake area: An example from the BZ-X block in the Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(4): 2016-2033.
- [26] 叶茂松. 环渤中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: 36-38. [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: 36-38.]
- [27] 杜晓峰, 徐长贵, 朱红涛, 等. 陆相断陷盆地陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究进展[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3509-3526. [Du Xiaofeng, Xu Changgui, Zhu Hongtao, et al. Research advances of mixed siliciclastic and carbonate sediments in conti-

- mental rift basins[J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3509-3526.]
- [28] 何仕斌,李丽霞,李建红. 渤中坳陷及其邻区第三系沉积特征和油气勘探潜力分析[J]. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(1): 61-71. [He Shibin, Li Lixia, Li Jianhong. Tertiary sedimentology and hydrocarbon potential in Bozhong Depression and its adjacent area[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2001, 15(1): 61-71.]
- [29] 刘士磊,王启飞,龚莹杰,等. 渤海海域古近纪微体化石组合特征及油气勘探意义[J]. *地层学杂志*, 2012, 36(4): 700-709. [Liu Shilei, Wang Qifei, Gong Yingjie, et al. Paleogene microfossil assemblages from the Bohai area and their importance for the oil and gas exploration[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2012, 36(4): 700-709.]
- [30] 朱伟林. 中国近海含油盆地古湖泊学研究[D]. 上海:同济大学, 2002: 26-37. [Zhu Weilin. Oil-bearing basins offshore China: A paleolimnological perspective[D]. Shanghai: Tongji University, 2002: 26-37.]
- [31] 杜庆祥,郭少斌,沈晓丽,等. 渤海湾盆地南堡凹陷南部古近系沙河街组一段古水体特征[J]. *古地理学报*, 2016, 18(2): 173-183. [Du Qingxiang, Guo Shaobin, Shen Xiaoli, et al. Palaeo-water characteristics of the member 1 of Paleogene Shahejie Formation in southern Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(2): 173-183.]
- [32] 高红灿,郑荣才,陈发亮,等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组层序地层[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(6): 839-850. [Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Chen Faliang, et al. Sequence stratigraphy of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6): 839-850.]
- [33] 刘晓晶,谢庆宾,徐翔,等. 辽河盆地东部凹陷古近系沙河街组层序地层及沉积相研究[J]. *东北石油大学学报*, 2015, 39(6): 1-11. [Liu Xiaojing, Xie Qingbin, Xu Xiang, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary facies in the Shahejie Formation of the Paleogene in Dongpu Sag, Liaohe Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015, 39(6): 1-11.]
- [34] Ma B J, Qin Z L, Betzler C, et al. Sedimentology of ephemeral carbonate accumulations in siliciclastic-dominated passive margin settings, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 130: 105122.
- [35] Duan Y J, Xie J, Li B C, et al. Lithology identification and reservoir characteristics of the mixed siliciclastic-carbonate rocks of the lower Third member of the Shahejie Formation in the south of the Laizhouwan Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2020, 35(2): 55.
- [36] Fu M Y, Song R C, Gluyas J, et al. Diagenesis and reservoir quality of carbonates rocks and mixed siliciclastic as response of the Late Carboniferous glacio-eustatic fluctuation: A case study of Xiaohaizi Formation in western Tarim Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 177: 1024-1041.
- [37] Lü Z X, Zhang S L, Yin C, et al. Features and genesis of Paleogene high-quality reservoirs in lacustrine mixed siliciclastic-carbonate sediments, central Bohai Sea, China[J]. *Petroleum Science*, 2017, 14(1): 50-60.
- [38] Bloch S, Lander R H, Bonnell L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(2): 301-328.
- [39] Duarte D, Milad B, Elmore R D, et al. Diagenetic controls on reservoir quality of a mixed carbonate-siliciclastic system: Sycamore Formation, Sho-Vel-Tum Field, Oklahoma, USA[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 134: 105375.

Characteristics and Formation Mechanism of Heterogeneity in “Compositional Mixing” Reservoirs: An example from the First-Second member of the Palaeogene Shahejie Formation, Bohai Sea

YE MaoSong¹, XIE XiNong², DU XueBin², ZHAO Ke³, WU Feng⁴

1. Marine Engineering Department, Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China

2. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

4. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: [Objective] Mixed siliciclastic-carbonate reservoirs are a new target reservoir for hydrocarbon exploration; however, the heterogeneities can lead to unanswered questions. Previous studies have focused on “strata mixing” sediments, with little attention given to the “compositional mixing” type. In recent years, typical “compositional mixing” sedimentation has been discovered in medium-deep Paleogene deposits in the Bohai Sea with breakthroughs in oil and gas exploration, providing an ideal case to explore the heterogeneity within “compositional mixing” deposits. [Methods] Abundant drilling data were used for detailed studies on the characteristics and main controlling factors of the heterogeneities associated with “compositional mixing”. [Results] Two principal reservoir types were recognized in this study: biological and debris-flows mixing shores. The two types have significant heterogeneities in petrofabric and spatial distribution owing to a complex interplay of controlling factors. The biological mixing shore reservoir is distributed in the flanks of detrital deposition and/or a higher position of structural units controlled by paleoclimate. Lake-level changes influence the vertical stacking of different genetic facies within this reservoir type. The debris-flows mixing shoal reservoir has later distribution on the proximal area of nearby uplift because this type can be controlled by the interplay of paleoclimate and paleo water-depth. Furthermore, the vertical patterns are heterolithic and are related to the variational hydrodynamic strength of gravity-driven depositional processes. The complex heterogeneity of the reservoir physical properties and pore structure is attributed to the mutual influence of clastic components supply, selective dissolution, dolomitization, cement type, and quantity. [Conclusions] Finally, a formation model of “compositional mixing” heterogeneity was developed, with significance for the further reservoir prediction and evaluation of worldwide mixed sediments reservoirs.

Key words: compositional mixing reservoir; heterogeneity; sedimentary distribution; reservoir properties; Shahejie Formation; Bohai Sea