

渤海湾盆地渤中C构造区沙一段混合沉积特征与发育模式

陈善斌

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:渤海湾盆地沙河街组沙一段、沙二段陆源碎屑岩与湖相碳酸盐岩的混合沉积是古近系重要的含油层系之一。为阐明该类储层沉积特征及发育模式,更好服务于勘探开发,以渤中C构造区为例,依据钻井、测井、地震及岩心分析化验等资料,对研究区沙一段混合沉积的岩石学特征、影响因素及其发育模式开展详细研究。结果表明,研究区沙一段混合沉积主要发育生屑云岩和粒屑砂砾岩两种岩石类型,分属于扇三角洲型和生屑滩型混合沉积;其中生屑云岩属于中高孔、中渗透层,是油田产能主要贡献层,该类储层主要受古地貌和古环境等因素影响,基于回剥法精细恢复古地貌,结合实钻结果,提出了“生屑云岩环岛状分布、向阳缓坡好、背阴陡坡差的发育模式”,进而预测研究区南部缓坡区为生屑云岩发育“甜点区”。研究成果成功指导了油田调整及挖潜,对类似油田储层研究具有借鉴意义。

关键词:混合沉积;古地貌;发育模式;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2 文献标志码:A

Mixed sedimentary characteristics and developmental patterns of the first member of Shahejie Formation in Bozhong C structure area, Bohai Bay Basin

CHEN Shanbin

(Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: The mixed deposition of terrestrial clastic rocks and lacustrine carbonates in the first and second members of the Shahejie Formation in the Bohai Bay Basin is one of the most essential oil-bearing strata in the Paleogene. To clarify the depositional characteristics and development model of this type of reservoir and to better serve the exploration and development, taking the Bozhong C structural area as an example, based on the data from drilling, logging, seismic, and core analysis, it was studied in detail on the petrological characteristics, influencing factors, and development model of the mixed deposition in the first member of the Shahejie Formation in the study area. The results show that the mixed sedimentation of the first member of the Shahejie Formation in the study area mainly develops two rock types: bioclastic dolomite and grainy glutenite, which belong to the fan-delta type and bioclastic beach type of mixed sedimentation. Among them, bioclastic dolomite belongs to the medium-high porosity and medium permeability reservoir, which is the main contribution layer of oilfield productivity. This reservoir type is mainly affected by ancient landscape and paleoclimate factors. Based on the fine restoration of paleogeomorphology by the back-stripping method, combined with the actual drilling results, the development model of “bioclastic dolomite island-like distribution, good sunny gentle slope and steep slope difference of back-shade” is proposed, and then it is predicted that the southern gentle slope area of the study area is the “sweet spot area” for the development of bioclastic dolomite. The research results have successfully guided the adjustment and potential tapping of the study area, and have reference significance for similar oilfield reservoir research.

Key words: mixed deposition; ancient landform; developmental pattern; Bohai Bay Basin

引用格式:陈善斌.渤海湾盆地渤中C构造区沙一段混合沉积特征与发育模式[J].复杂油气藏,2024,17(1):62-69.

CHEN Shanbin. Mixed sedimentary characteristics and developmental patterns of the first member of Shahejie Formation in Bozhong C structure area, Bohai Bay Basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(1): 62-69.

收稿日期:2023-10-20;改回日期:2023-12-10。

作者简介:陈善斌(1989—),工程师,主要从事油气田开发研究工作。E-mail: chenshb13@cnooc.com.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司重大科技专项“渤海中深层复杂油气藏高效开发技术”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 03TJ-GD 2020-01)。

“混合沉积物”的概念是在1984年由Mount^[1]首次正式提出,是陆源碎屑与碳酸盐颗粒在沉积作用过程中发生混合沉积的产物。概念的提出引起国内学者广泛关注,杨朝青和沙庆安^[2]在1990年对国内类似沉积现象开展深入研究,并首次提出“混积岩”的概念,即将同一岩层内陆源碎屑与碳酸盐两种组分相互混杂的产物称为“混积岩”;随后,国内众多学者对混积岩的分类命名、沉积特征、成因机制和影响因素等进行了详细的研究和探讨^[3-14],其中郭福生在2004年对浙江江山藕塘底组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征研究时对混积岩的分类进行了扩充,提出了“混积层系”的概念,即将同一岩层内相互混杂形成混积岩和陆源碎屑岩与碳酸盐岩互层和夹层现象称作“混积层系”,本次研究对象按沉积成因属于“混积层系”的范畴;另外,更有价值的是在国内陆相盆地的混积岩储层中不断获得油气发现^[15-17]。渤海湾盆地是国内陆相盆地的典型代表之一,近几年在渤海湾盆地古近系沙一段、沙二段混积岩储层中陆续发现多个油气田,经测试证明有较高产能,具有开发价值。据此,学者们^[18-22]掀起了对渤海湾盆地混积岩储层研究的热潮,但是研究尺度多集中在二级构造单元级别(凸起或凹陷古隆起),目的是优选勘探目标,而对构造单元内部混积岩的岩石特征、控制因素及发育模式研究精度不够,难以满足油田高效开发的需求。

渤中C构造区渤中C油田在沙一段混积岩储层开发中取得良好开发效果。油田构造埋深大于3 800 m,实钻井揭示储层单层厚度小,最大单井钻遇厚度7.1 m,平均厚度仅4.4 m,而地震分辨率高达44 m,导致该套储层在常规地震剖面上无响应,有利储层区带预测难度大,严重制约油田开发井位部署。因此,依据钻井、测井、地震及岩心分析化验等资料,对研究区沙一段混积岩的岩石学特征、控制因素及其发育模式开展详细研究,力求厘定优质储层有利发育区,为寻找优质接替储量和井位部署提供有力支撑。

1 地质背景

研究区位于渤中凹陷和沙南凹陷的交汇处,北部紧邻沙垒田凸起,处于沙东南构造带东南倾没端,是被断层复杂化的背斜构造^[23-24];该构造自南向北逐渐抬升,形成西北高、东南低的构造格局,平面上被三条近北东向南掉断层切割,分成南、中、北3个断块,中块为研究区已开发区域(见图1a)。

研究区地层自上而下发育第四系平原组,新近系明化镇组、馆陶组,古近系东营组、沙河街组沙一段和白垩系;其中,沙一段地层与白垩系地层呈不整合接触,按沉积旋回沙一段进一步划分为I油组和II油组,沙一段II油组为研究区主力开发单元(见图1b)。

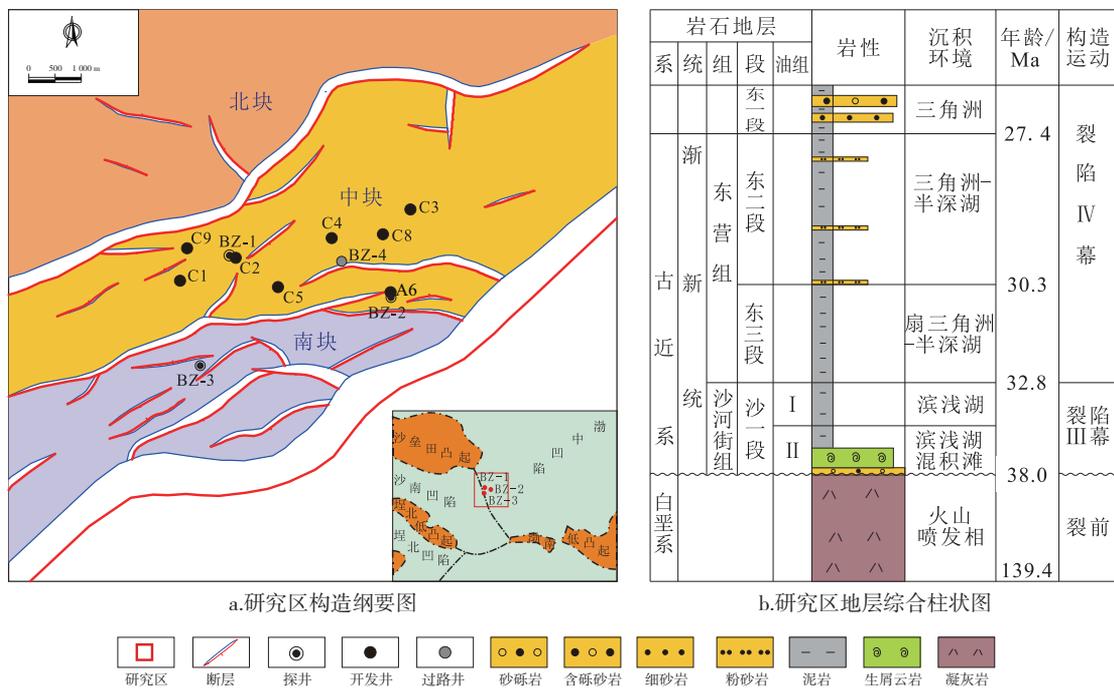


图1 研究区构造纲要图和地层综合柱状图

2 混合沉积特征

2.1 岩石学特征

依据探井 BZ-2 井岩心及扫描电镜资料分析,研究区沙一段岩石碎屑成分复杂,呈现陆源碎屑与碳酸盐颗粒混合沉积特征,主要发育生屑云岩和粒屑砂砾岩两种岩石类型。

生屑云岩为浅灰色,质轻多孔,明显可见网状或枝管状生物骨架结构,与蜂窝形态相似,为块状构造特征(见图 2a)。BZ-2 井镜下观察显示,生屑云岩碎屑成分以螺屑为主,呈粉晶螺屑结构,含量 30%~80%,平均 67.5%。螺屑多呈破碎状,局部定向排列,偶见介形虫、藻屑和陆源碎屑颗粒;粒屑间填隙物主要为重结晶的半自形—它形白云石,粒径达 0.05~1.50 mm,少量泥晶白云石不均匀分布于粒屑间及生物体腔内,局部可见残余藻球、团粒、隐藻结构(见图 2b)。

粒屑砂砾岩为深灰色,质重致密,局部可见螺屑颗粒,部分螺屑颗粒内饰、纹络清晰(见图 2c)。BZ-2 井镜下观察显示,粒屑砂砾岩碎屑成分主要为变质花岗岩和中、酸性喷出岩,中—粗砂状结构,次棱角状,以陆源岩屑为主,含量 70%,次为螺屑、砂

屑及藻球团粒,后者杂乱充填于陆源碎屑颗粒间,填隙物为泥—粉晶白云石,白云石重结晶呈栉壳状(见图 2d)。

2.2 物性及电性特征

依据岩心观察和测井解释,生屑云岩储层中生物碎屑含量高,镜下可见生物体腔孔,溶蚀孔发育,颗粒支撑,溶孔呈蜂窝状分布,局部晶间或粒间孔连通较好(见图 2b),测井解释平均孔隙度 21.6%,平均渗透率 $70.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,该类储层具有良好的渗透性,属于中高孔、中渗储层。从电性特征看,生屑云岩呈现中高电阻、低密度、高中子的特征,其中电阻率值大于 $16 \Omega \cdot \text{m}$,密度值小于 2.4 g/cm^3 ,中子值大于 0.2,与围岩可明显区分(见图 2e)。

粒屑砂砾岩整体致密,储集空间主要为粒间溶蚀孔,孔隙不均匀发育于粒间或填隙物晶间,多呈孤立状(见图 2d),测井解释平均孔隙度 17.8%,平均渗透率 $23.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,该类储层具有一定的渗透性,属于低孔、低渗储层。从电性特征看,粒屑砂砾岩呈现中电阻率、中高密度、低中子的特征,其中电阻率值大于 $12 \Omega \cdot \text{m}$,密度值大于 2.4 g/cm^3 ,中子值小于 0.2,与生屑云岩和泥岩差异较大、区分明显(见图 2e)。

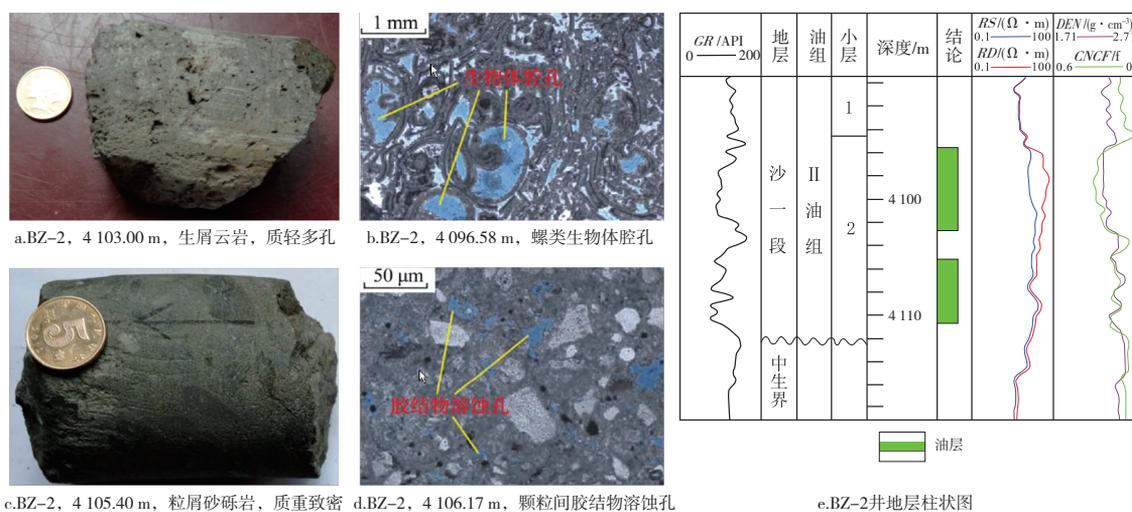


图2 研究区沙一段混合沉积储层岩石学类型、物性及电性特征

2.3 沉积成因

依据 BZ-2 井岩心及薄片资料观察结果,沙一段底部发育的粒屑砂砾岩不整合覆盖于中生界火山碎屑岩的古暴露面之上,陆屑颗粒以中—酸性喷出岩岩屑为主,与下伏中生界基底岩性相同,反映出该区构造受华北运动影响形成古隆起之后,长时间暴露地表,研究区沙一段沉积早期地貌相对较高

的中生界基岩遭侵蚀破碎后形成碎屑颗粒,经短距离搬运后直接入湖,在地貌斜坡区大量堆积,同时混入少量的生物碎屑颗粒,发育一套以近源扇三角洲沉积为主的混积岩。沙一段沉积中期随着湖盆缓慢扩张,沉降速度变小,水体缓慢加深,研究区古隆起基本处于水下环境,并远离物源区,整个区域几乎不受陆源碎屑的影响;依据沙一段白云石碳氧

同位素测定结果, $\delta^{13}C_{\text{PDB}}$ (PDB 标准) 值分布范围在 2.2‰~8.7‰, $\delta^{18}O_{\text{PDB}}$ (PDB 标准) 值分布范围在 -12.3‰~6.2‰, 基于基恩-韦伯公式计算可知 99% 样品的盐度指数均大于 120, 表明该时期沙一段沉积环境处于封闭状态, 水质条件具有咸水的特点; 加之湖泊水体清浅温暖, 有利于生物碎屑在斜坡区原地大量堆积, 发育一套质地较纯的生屑滩沉积。沙一段沉积晚期随着湖盆断裂活动加剧, 水体急剧加深, 主要发育一套湖相泥岩沉积。

3 混合沉积控制因素

通过对研究区混合沉积特征及成因的深入分析, 认为沙一段底部发育的生屑云岩储层物性好、连通性好, 储层品质更优; C6 井射孔产生生屑云岩和粒屑砂砾岩储层, 试井资料反映物性好的储层为产出层; 动静态资料明确生屑云岩储层为产能主要贡献层。但 3 口探井和 8 口开发井实钻生屑云岩厚度 0~7.1 m, 平均厚度仅 3.2 m, 储层厚度差异大, 横向变化快。针对以上问题, 综合分析古地貌与实钻结果匹配关系, 结合岩石组分特征和物性变化规律, 认为古地形、古坡度和古环境是生屑云岩发育的主要控制因素。

3.1 古地貌精细恢复

古地貌恢复常用的方法包括层拉平法、回剥法、沉积学分析法以及层序地层学恢复法^[25]。其中, 随着层序地层学理论和三维可视化技术的发展, 层拉平古地貌恢复法因操作相对简单、应用效果较为显著而被学者们广泛应用。但是, 层拉平法恢复古地貌主要考虑了地层的横向变化, 并不完全与地下实际相符合, 特别是在断层和褶皱发育的条件下, 很容易造成断层和褶皱附近地层厚度和界面

形态的计算出现较大误差。

渤中 C 油田 ODP 阶段(油田开发总体方案编制阶段)动用单元为中块区域, 考虑到中块区域内部次生断层相对不发育且地层产状较为单一, 该阶段主要采用层拉平法恢复古地貌, 并且 8 口开发井钻后证实古地貌与生屑云岩厚度匹配关系良好。但是, 油田目前已进入内部调整挖潜阶段, 层拉平恢复古地貌方法已经不能满足油田整个区域储层精细研究的需求; 考虑到油田实际地质特征, 油田内部南北具有一定差异性, 南部区域靠近边界大断层, 内部次生断层较北部更为发育, 该区域靠层拉平法恢复古地貌可能存在较大误差; 因此, 在考虑断层、视倾角、地层压实等多因素矫正条件下, 应用回剥法精细恢复古地貌, 准确刻画出沙一段沉积古地貌特征(见图 3)。

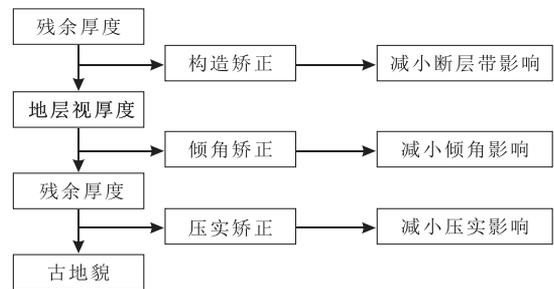


图 3 研究区沙一段回剥法恢复古地貌技术路线

层拉平法古地貌显示在研究区南部古地貌整体较高, 分析认为主要是受边界断层和内部次生断层影响表现出来的假高现象(见图 4a); 而应用回剥法恢复古地貌通过祛除断层、倾角和压实对沙一段地层厚度的影响, 结果显示研究区南部整体呈现为斜坡地貌特征, 更符合实际。依据精细古地貌恢复成果, 将研究区古地貌划分为隆起区、斜坡区、鞍部、低凹区四个地貌单元(见图 4b)。

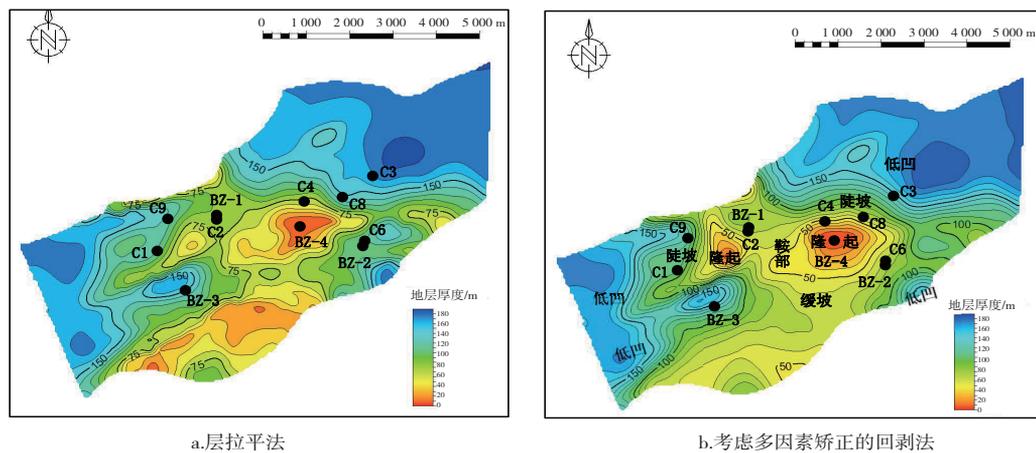


图 4 研究区沙一段沉积古地貌

3.2 古地形控制储层发育厚度

从横穿多个地貌单元的井间对比可以看出, C4井靠近隆起区, 生屑云岩厚度 2.3 m, C3井位于低凹区域, 生屑云岩厚度仅 1.0 m, C6、C8和 BZ-2井处于斜坡区, 生屑云岩发育, 厚度 3.2~7.1 m, 明显看出生屑云岩厚度受控于古地貌形态; 统计研究区 11口井生屑云岩厚度和沙一段地层厚度数据关系, 结果表明生屑云岩在地层厚度 80~170 m 范围厚度普遍大, 而在地层厚度小于 80 m 和大于 170 m 范围厚度较小(见图 5a), 更进一步说明生屑云岩主要在斜坡区发育, 在古地貌高点和低凹处生屑云岩发育差或者不发育。

3.3 古坡度控制储层发育宽度

在古地貌单元精细划分的基础上, 利用古地貌图和实钻资料提取地层坡度信息, 进一步将研究区斜坡区划分为南部缓坡区和北部陡坡区, 其中南部缓坡区地层坡度为 4~9°, 北部陡坡区地层坡度为 8~19°。实钻结果显示, 北部陡坡区 C8井与低凹区 C3井平面距离 690 m, 生屑云岩厚度从 6.6 m 锐减至 1.0 m, C8井距离生屑云岩储层尖灭点 850 m, 反映

出北部陡坡区储层厚度变化快、发育窄; 而南部缓坡区 BZ-2井生屑云岩储层厚度 7.1 m, 平面距离储层尖灭点 1 100 m, 反映出南部缓坡区储层厚度变化慢、发育宽。

3.4 古环境控制储层发育物性

BZ-2井岩心观察可见生屑云岩质轻多孔, 发育网状或枝管状生物骨架结构; 镜下薄片可见生屑云岩含大量螺屑, 且部分螺类骨架保存较完整, 统计生屑云岩碎屑组分可见螺屑含量占比 69.85%(见图 5b)。依据岩心分析化验资料统计, 螺屑百分含量与岩心渗透率呈正相关, 相关系数 R^2 高达 0.85, 反映出生屑云岩螺屑含量越高, 渗透率则越大。研究区北陡坡 C9井生屑云岩厚度 4.0 m, 渗透率 $28.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, C8井生屑云岩厚度 6.6 m, 渗透率 $21.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 南缓坡 BZ-2井生屑云岩厚度 7.1 m, 渗透率 $165.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 分析认为生屑云岩物性受古环境控制, 研究区古地貌南斜坡坡度缓、水体浅、光照充足、水体温暖, 有利于螺生物大量繁殖, 生屑云岩螺含量高, 储层物性好, 北部陡坡区生屑云岩物性相对较差。

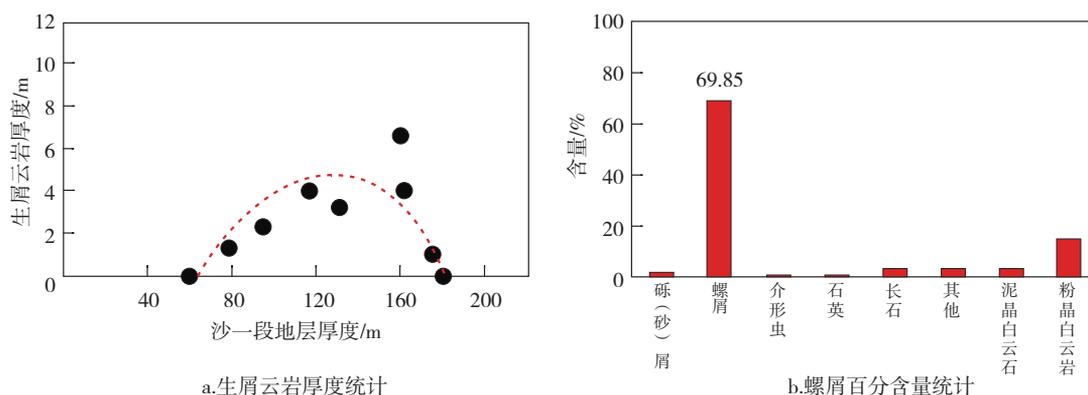


图5 研究区沙一段生屑云岩厚度及螺屑百分含量统计

4 混合沉积发育模式及应用

4.1 建立发育模式

在精细古地貌恢复的基础上, 基于生屑云岩主控因素分析, 建立研究区沙一段“生屑云岩环岛状分布、向阳缓坡好、背阴陡坡差的发育模式”。纵向上, 沙一段沉积早期古地貌隆起区暴露地表范围较大, 隆起区剥蚀风化作用强, 全区陆源碎屑物质供给量大, 与原地死亡的古生物遗骸直接混合堆积, 形成坚硬致密的粒屑砂砾岩; 沙一段沉积中期古地貌隆起区暴露地表范围小, 隆起区风化剥蚀作用

弱, 滨浅湖斜坡内沉积作用基本不受陆源碎屑影响, 在粒屑砂砾岩硬底板之上大量生物遗骸原地死亡后直接堆积, 形成横向分布较稳定的生屑滩沉积, 呈“透镜状”产出, 古地貌南缓坡区生屑云岩发育、厚度大、物性好, 古地貌北陡坡区则发育相对较差、厚度薄、物性差(见图 6a); 平面上, 生屑云岩在斜坡区发育, 呈环状分布在隆起区四周, 南缓坡区生屑云岩延展距离宽, 北陡坡区则发育相对较窄(见图 6b)。据此, 研究区南部缓坡区为生屑云岩发育有利区带, 是油田滚动挖潜的重要目标。

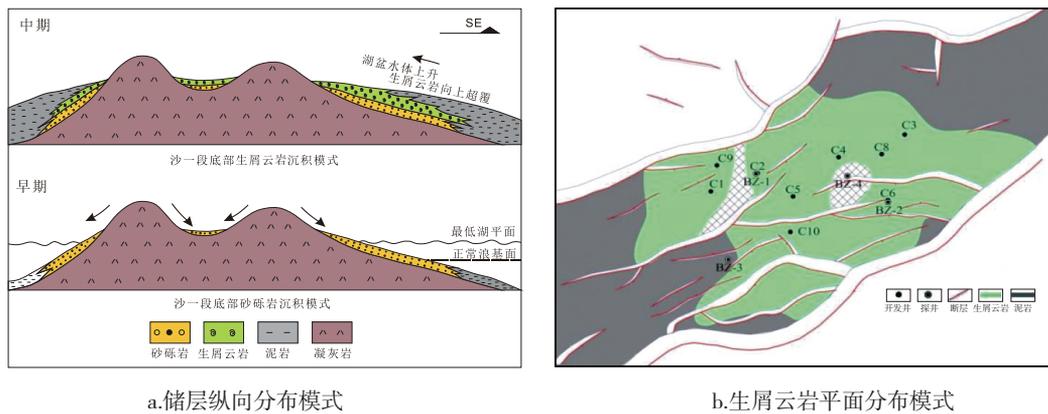


图6 研究区沙一段生屑云岩沉积模式

4.2 研究成果应用

在生屑云岩发育模式指导下,研究区南部缓坡区成功实施1口开发井C10井,该井实钻生屑云岩9.3 m;井间对比显示C5井处于古地貌隆起区附近,生屑云岩1.3 m,BZ-3井处于古地貌低凹区,发育泥质灰岩,C10井处于斜坡区,生屑云岩更为发育,进一步证实该发育模式能够准确反映地下实际;C10井投产后,初期日产油超100 m³,日产气超11×10⁴ m³,生产形势稳定、效果好。研究成果成功指导渤中C油田滚动挖潜,下一步将持续在南部缓坡区开展二次挖潜研究,以期能够为油田高效开发提供有力地质支撑。

5 结论

(1)研究区沙一段混合沉积主要发育生屑云岩和粒屑砂砾岩两种岩石类型,分属于扇三角洲和生屑滩沉积;其中,生屑云岩属于中高孔、中渗储层,为油田产能主要贡献层,粒屑砂砾岩属于低孔、低渗储层。

(2)研究区沙一段生屑云岩发育主要受古地形、古坡度和古环境等因素控制。古地形控制储层发育厚度,生屑云岩主要在斜坡区发育;古坡度控制储层发育宽度,南部缓坡区生屑云岩厚度变化慢、发育宽;古环境控制储层发育物性,古地貌南斜坡坡度缓、水体浅、光照充足、水体温暖,有利于螺类生物大量繁殖,生屑云岩螺含量高,储层物性好。

(3)建立研究区沙一段“生屑云岩环岛状分布、向阳缓坡好、背阴陡坡差的发育模式”;在模式指导下,研究区南部缓坡区成功实施1口开发井,下一步将在南部缓坡区开展二次挖潜研究,为油田持续高效开发提供有力支撑。

参考文献:

- [1] MOUNT J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments [J]. *Geology*, 1984, 12 (7):432-435.
- [2] 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 Chaoqing, SHA Qingan. 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.
- [3] 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 mixosedimentite [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(4):31-34.
- [4] 沙庆安. 混合沉积和混积岩的讨论[J]. *古地理学报*, 2001, 3(3):63-66.
SHA Qingan. Discussion on mixing deposit and hunji rock [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(3):63-66.
- [5] 郭福生. 浙江江山藕塘底组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征及其构造意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1):136-141.
GUO Fusheng. Characteristics and tectonic significance of mixing sediments of siliciclastics and carbonate of Outangdi Formation in Jiangshan, Zhejiang province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1):136-141.
- [6] 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]. *地质评论*, 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.
- [7] 冯越, 黄志龙, 张华, 等. 吐哈盆地胜北洼陷七克台组二段混积岩致密储层特征研究[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(5):56-63.
FENG Yue, HANG Zhilong, ZHANG Hua, et al. Diamictite tight reservoir characterization of Qiketai Formation member-2 in the Shengbei depression of Tuhua Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(5): 56-63.
- [8] 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.
- [9] 程涛, 陶维祥, 于水, 等. 下刚果盆地北部碳酸盐岩层序地层分析[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(2):25-28.
CHENG Tao, TAO Weixiang, YU Shui, et al. Sequence stratigraphy of the carbonate rock in northern Lower Congo Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(2):25-28.
- [10] 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.
- [11] 张世铭, 张小军, 王建功, 等. 咸化湖盆混合沉积特征及控制因素分析——以柴达木盆地西部地区古近系下干柴沟组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1):160-173.
ZHANG Shiming, ZHANG Xiaojun, WANG Jiangong, et al. Characteristics and their controlling factors of mixed sediments in saline lakes: A case study of Lower Ganchaigou Formation in the western Qaidam Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1):160-173.
- [12] YE M S, XIE X N, SWENNEN R, et al. Depositional characteristics of a lacustrine mixed sediment system: A case study from the eastern Shijiutuo uplift, offshore Bohai Bay Basin, eastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 209:104671.
- [13] 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.
- [14] 蒋裕强, 刁志龙, 徐昌海, 等. 川东地区台洼边缘二叠系生物礁滩储层特征及控制因素[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(5):7-13.
JIANG Yuqiang, DIAO Zhilong, XU Changhai, et al. Characteristics and controlling factors of Permian reef beach reservoir in platform-depression margin of eastern Sichuan Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(5):7-13.
- [15] 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.
- [16] 董桂玉, 何幼斌, 陈洪德, 等. 惠民凹陷沙一中湖相碳酸盐与陆源碎屑混合沉积——以山东商河地区为例[J]. *沉积学报*, 2007, 25(3):343-350.
DONG Guiyu, HE Youbin, CHEN Hongde, et al. Mixed sedimentation of carbonates of lagoonal facies and terrigenous clastics of the middle submember of member 1 of Shahejie Formation in Huimin Sag: Taking Shanghe area in Shandong province for an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3):343-350.
- [17] 马伯永, 王根厚, 李尚林, 等. 羌塘盆地东部中侏罗统陆源碎屑与碳酸盐混合沉积成岩特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(5):1310-1321.
MA Boyong, WANG Genhou, LI Shanglin, et al. Characteristics of mixed sedimentations and diagenesis of terrigenous elastic rock and carbonate: The Middle Jurassic in the east Qiangtang Basin, Tibet, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(5):1310-1321.
- [18] 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 Shijiutuo uplift, Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4):491-498.

- [19] 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 Qinbin, 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.
- [20] 李家康,李俊英.渤海海域沙河街组生物碎屑灰岩发育特点及典型构造分析[J].中国海上油气(地质),1999,13(1):23-27.
LI Jiakang, LI Junying. Sedimentary characteristics and case study of bioclastic limestone of Shahejie Formation in Bohai area [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1999, 13(1):23-27.
- [21] 吴磊,徐怀民,季汉成.渤海湾盆地渤中凹陷古近系沉积体系演化及物源分析[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(1):81-88.
WU Lei, XU Huaimin, JI Hancheng. Evolution of sedimentary system and analysis of sedimentary source in Paleogene of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(1):81-88.
- [22] 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.
- [23] 张建民,赵春明,马奎前,等.渤海海域湖相碳酸盐岩储层研究方法——以XX油田深层生屑云岩为例[J].海洋石油,2010,30(4):32-38.
ZHANG Jianmin, ZHAO Chunming, MA Kuiqian, et al. Research method of lacustrine carbonate rock in the Bohai Sea: Taking bioclastic dolomite in XX Oilfield as an example [J]. Offshore Oil, 2010, 30(4):32-38.
- [24] 别旭伟,许赛男,孙藏军,等.利用油田开发资料重新认识生屑云岩展布特征——以沙南凹陷 BZ 油田为例[J].中国海上油气,2018,30(2):90-96.
BIE Xuwei, XU Sainan, SUN Cangjun, et al. Re-recognition on the distribution characteristics of bioclastic dolostone based on oilfield development data: A case study of BZ Oilfield in Shanan Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(2):90-96.
- [25] 李家强.层拉平技术在沉积前古地貌恢复中的应用——以济阳坳陷东营地区为例[J].胜利油田职工大学学报,2008,22(1):31-32,36.
LI Jiaqiang. The application of layer flattening technology in the restoration of paleo-geo-morphology before sedimentation: Taking Dongying area of Jiyang depression as an example [J]. Journal of Shengli Oilfield Staff University, 2008, 22(1):31-32, 36.

(编辑 卞 炜)

(上接第 61 页)

- A case study on well Z in Shunbei Oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(5):554-558.
- [21] 王增林,鲁明晶,张溁源,等.东营凹陷陆相页岩油强化缝网改造生产制度优化研究[J].石油钻探技术,2021,49(4):71-77.
WANG Zenglin, LU Mingjing, ZHANG Liaoyuan, et al. Production system optimization for enhanced fracture network stimulation in continental shale oil reservoirs in the Dongying Sag [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4):71-77.
- [22] WANG J, LIU H Q, WANG L, et al. Apparent permeability for gas transport in nanopores of organic shale reservoirs including multiple effects [J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 152:50-62.
- [23] SHENG G L, JAVADPOUR F, SU Y L, et al. A semi-analytic solution for temporal pressure and production rate in a shale reservoir with nonuniform distribution of induced fractures [J]. SPE Journal, 2019, 24(4):1856-1883.
- [24] SHENG G L, SU Y L, WANG W D, et al. Application of fractal geometry in evaluation of effective stimulated reservoir volume in shale gas reservoirs [J]. Fractals, 2017, 25(4):1740007.

(编辑 卞 炜)