

高精度层序约束下三角洲-滩坝沉积体系精细刻画与 岩性圈闭分布规律

——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为例

刘成龙¹,王艳忠¹,杨怀宇²,操应长¹,王淑萍³,郭超凡¹,郭豪¹,陈兆祥¹,宋林坤¹,黄歆媛¹

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛266580;2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257000;3. 中国石油大学(华东)石油工业训练中心,山东青岛266580]

摘要:为研究断陷盆地斜坡带低位体系域岩性圈闭发育,以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)低位体系域为研究对象,利用岩心、测录井资料,开展了高精度层序划分对比、层序动态演化和沉积微相平面精细刻画研究。研究表明:沙四上亚段低位体系域划分为3个准层序组、9个准层序,发育6种准层序、4种准层序组以及5种体系域地层叠加样式,经历9次准层序级别相对湖平面升降,在相对湖平面下降期物源供给充足,平面上由盆缘进积为主型向盆内进积型过渡分布。主要发育三角洲-滩坝沉积体系,包括扇三角洲、三角洲和滩坝3种沉积相以及7种沉积微相类型。东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域内部以坝主体和滩脊微相尖灭砂体为储集体,以准层序和准层序组底部湖侵泥岩为局部盖层、水进体系域泥岩为区域盖层,形成岩性圈闭。

关键词:岩性圈闭;三角洲-滩坝沉积体系;准层序;低位体系域;断陷盆地斜坡带;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Fine characterization and lithologic trap distribution patterns of delta-beach bar sedimentary system under high-precision sequence constraints: A case study of the upper submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the eastern segment of the southern gentle slope of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

LIU Chenglong¹, WANG Yanzhong¹, YANG Huaiyu², CAO Yingchang¹, WANG Shuping³, GUO Chaofan¹, GUO Hao¹, CHEN Zhaoxiang¹, SONG Linkun¹, HUANG Xinyuan¹

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 3. Petroleum Industry Training Center, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: The study aims at revealing the development of lithologic traps in the lowstand systems tract (LST) in the slope zone in a downfaulted basin, and investigates the LST in the upper submember of the 4th member of the Shahejie Formation (the Sha 4 Member) in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag, Jiyang Depression, in the Bohai Bay Basin (the study area). Using data from cores and logs, we examine the high-precision division, comparison, and dynamic evolution of sequences and perform the fine characterization of sedimentary microfacies in the planar view. The results indicate that the LST in the upper submember of the Sha 4 Member can be divided into three parasequence sets composed of nine parasequences, presenting six, four, and five stratigraphic superposition patterns at the parasequence, parasequence set, and systems tract levels, respectively. The LST in the study area experienced nine relative lake-level fluctuations at the parasequence level, receiving sufficient sediment supply during the relative lake level falls. This led to a planar distribution characterized by predominant basin-margin

收稿日期:2024-01-21;修回日期:2024-07-16。

第一作者简介:刘成龙(2000—),男,博士研究生,沉积学与层序地层学。E-mail: liuchenglongupc@163.com。

通信作者简介:王艳忠(1980—),男,教授、博士研究生导师,沉积学与层序地层学。E-mail: wyzh@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42272165,42372157)。

progradation transitioning to intrabasinal progradation. The LST contains a delta-beach bar sedimentary system comprising three sedimentary facies, namely the fan delta, delta, and beach bar facies, which can be further divided into seven sedimentary microfacies. Lithologic traps have been formed within the LST, with sand bodies pinching out in beach bars' main bodies and beach ridge microfacies as reservoirs, mudstones formed by lacustrine transgression at the bottom of parasequences and parasequence sets as local seals, and mudstones in the transgressive systems tract (TST) as regional seals.

Key words: lithologic trap, delta-beach bar sedimentary system, parasequence, lowstand systems tract (LST), slope zone of a downfaulted basin, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:刘成龙,王艳忠,杨怀宇,等.高精度层序约束下三角洲-滩坝沉积体系精细刻画与岩性圈闭分布规律——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为例[J].石油与天然气地质,2024,45(4):1121-1141. DOI:10.11743/ogg20240416.

LIU Chenglong, WANG Yanzhong, YANG Huaiyu, et al. Fine characterization and lithologic trap distribution patterns of delta-beach bar sedimentary system under high-precision sequence constraints: A case study of the upper submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the eastern segment of the southern gentle slope of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1121-1141. DOI:10.11743/ogg20240416.

目前,中国东部含油气盆地已进入复杂隐蔽油气藏勘探阶段,并出现了回头转向富集高产区带精细落实的趋势,精细勘探已成为成熟探区的必然要求^[1-7]。斜坡带层序特征对砂体分布和油气成藏起着重要的控制作用^[8-13],其中,以体系域构成模式为基础的低位域控砂控藏理论已逐渐被海相和陆相盆地油气勘探实例所证实^[9, 13-15]。在基于Vail经典层序地层学理论的体系域层序划分中,分布在水进体系域厚层泥岩之下的低位体系域进积或加积砂体发育区,是岩性圈闭勘探的有利区带^[1, 9, 16-17]。

断陷盆地斜坡带发育的低位体系域受构造活动、古地貌、湖平面变化与多变的物源体系等因素综合影响,具有复杂的地层叠加样式与盆地充填特征^[18-24],导致低位体系域内部岩性圈闭的精细识别困难、分布规律不清。对层序地层、沉积微相特征与演化等方面开展高精度研究是精细刻画岩性圈闭形成和分布的关键^[2, 5-6, 25-33],但受限于地震分辨率,目前此类研究大都止步于体系域级别。随着层序地层学理论不断发展,国内外学者不断致力于海相与陆相、高频与低频等不同层序的相关概念、分析方法与程序的标准化^[18-24, 34],这为开展体系域内部的层序精细研究提供了理论和方法支撑;同时,精细化的沉积构型研究^[25-34]、细分小层的研究方法^[33-34]也不断应用于不同沉积相的精细刻画、分布规律研究^[30-34],为油气勘探提供了有效指导。

渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷南坡东段为典型的断陷盆地缓坡带,在沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)低位体系域发育三角洲-滩坝沉积体系,具备形成岩性圈闭的前提条件。研究区井网密集,有钻井265口,取心640余米,相关资料丰富,是开展低位体系域

内部岩性圈闭精细识别与分布规律研究的有利地区。但是,由于研究区内层序地层划分和沉积微相研究主要以体系域为基本单元,在频繁的相对湖平面升降背景下,三角洲与滩坝主体在横向和垂向上相互叠置,难以明确区分,导致平面和剖面上岩性圈闭无法精准识别,从而严重制约了研究区岩性圈闭的精细勘探。参考岩性圈闭研究的各种实例^[2, 5-6, 25-33],结合缓坡背景下准层序向湖盆内部尖灭、向湖盆边缘上超的发育规律^[35-36],综合考虑开展准层序研究的条件(①平面可控面积约2 600 km²,研究区面积约900 km²^[37-40],②需要足够多的平面控制点,研究区有260余口钻井^[41]),系统地开展了针对研究区低位体系域内部岩性圈闭的精细研究。本文通过建立东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域内部的高精度层序地层格架,综合分析构造活动、相对湖平面变化和物源供给等影响因素,揭示了层序动态演化过程与形成机制,明确了岩性圈闭成因、发育与富集位置;通过精细至准层序单元的平面编图,消除了平面优势相的影响,明确区分了垂向相互叠置的三角洲与滩坝主体,阐明了准层序单元内沉积微相展布与演化规律,使岩性圈闭平面分布预测更为清晰,并进一步阐明了其发育规律。中国陆相盆地众多,研究成果和研究方法对深入认识断陷湖盆缓坡带沉积过程具有促进意义,同时,对推动已进入高成熟勘探阶段陆相盆地的有利相带岩性圈闭预测、后期圈闭成藏等研究工作的深入开展,以及同类型地区的精细勘探具有指导意义。

1 地质概况

东营凹陷是渤海湾盆地济阳坳陷东南部一个二级

构造单元,可划分为北部陡坡带、中部洼陷带和南部缓坡带^[42-43]。其中,南部缓坡带东段作为本文研究区,在构造位置上北邻牛庄洼陷和青坨子凸起,南接广饶凸起,西起纯化草桥鼻状构造带,东至羊角沟油田^[42-48](图1a)。勘探至今,东营凹陷南坡东段纯下次亚段的

滩坝及三角洲主体勘探程度较高,近期获多口完钻并解释油层,揭示了较大的勘探潜力,但由于层序、沉积等研究不够精细,无法进一步有效指导勘探。

东营凹陷纯下次亚段(Cx)位于沙四上亚段底部,自下而上可细分为纯下3砂组(Cx3)、纯下2砂组

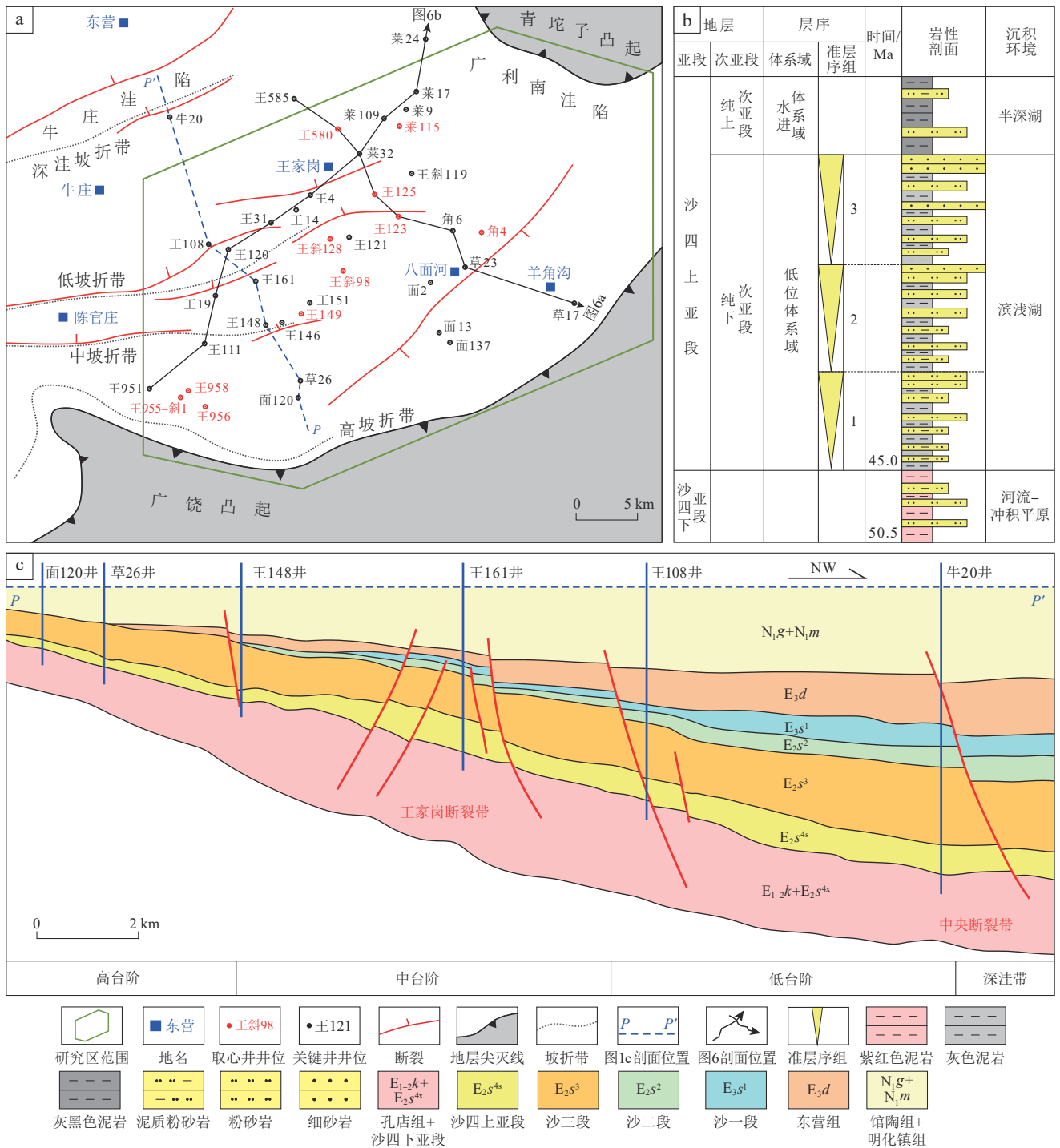


图1 东营凹陷南部缓坡带东段构造位置及地层特征

Fig. 1 Tectonic location and stratigraphic characteristics of the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag in the Bohai Bay Basin

a. 东营凹陷南部缓坡带及研究区构造位置与古地貌(据文献[47]修改); b. 东营凹陷南部缓坡带沙四上亚段纯下次亚段层序地层特征(据文献[45]修改); c. 东营凹陷南部缓坡带南北向剖面特征(据文献[47]地震剖面修改)

(Cx2)和纯下1砂组(Cx1)^[42-48]。依据 Vail 经典层序地层学理论,沙四上亚段为1个完整的三级层序,纯下次亚段相当于低位体系域,发育3个准层序组,依次对应3个砂组^[42-48](图1b)。

沙四上亚段纯下次亚段沉积时期,东营凹陷处于断陷扩张早期,气候由干热向湿润转变^[48-51],南部位于断陷盆地的掀斜一端,是典型的缓坡坡折带,水体较浅,受控于构造活动和潮湿气候形成低位体系域^[45, 49]。这一时期由于盆地应力场的转变,在早期的东西向控盆断层的基础上,开始发育NE向和EW向的同沉积断层,将南坡东段缓坡自南向北分成高、中、低3个台阶与1个深洼带^[47](图1a, c)。由于断层活动速率较慢^[47],基底沉降速率与沉积速率较为一致^[52-53],研究区整体呈低角度(0.5°~2.0°)的缓坡古地貌背景^[42, 47, 51](图1c),西部为无明显落差的阶梯状微古地貌,东部较为平缓^[47](图1a, c)。前期研究表明,研究区发育东部三角洲、东南部扇三角洲和东北部扇三角洲3大物源体系,由于东部古地貌平缓,物源推进远,以东部物源为主^[54]。

2 高精度层序地层特征及动态演化

由于体系域(或四级层序)级别以下的层序受到多种异旋回和自旋回因素或机制的共同影响,自旋回、异旋回机制均可形成相应的层序地层及界面,难以进行有效区分^[18-20, 55-63]。在缓坡带由于地形影响,沉积物可远距离推进,自旋回因素对层序形成影响更大^[20, 60-63],尤其是可以改变岸线形态的自旋回机制(例如河流改道、三角洲朵叶体迁移等),其影响范围在横向可达100 km^[20, 60-63]。随着层序地层学理论的不断发展和应用,不断有学者发现并指出准层序的概念存在缺陷,并尝试对其进行补充及修正^[55-59]:前人在基于现代沉积露头的层序地层研究中陆续指出^[18-24, 64-66],层序应只由具有层序地层意义的相关界面界定,其地层叠加样式并不唯一^[18, 20, 55-56]。因此,此次划分中,以根据垂向地层叠加样式识别的具有层序意义的界面为划分原则,综合研究区缓坡古地形与三角洲-滩坝沉积体系背景,结合准层序的平面可控范围与对比条件^[35-41],在前期准层序组划分的基础上,进行精细至准层序级别的高精度层序地层划分对比^[20, 25]。与传统定义不同,此次划分的准层序组、准层序仅代表由层序地层界面界定的地层单元,其地层叠加样式的形成过程有独立的解释。

前人研究表明,GR曲线能较好地反映泥质含量的变化,db5小波重构曲线波动反映岩性突变面,时频色

谱收敛点是有意义的层序界面^[67-68]。运用MATLAB软件对GR曲线进行db5小波变换,综合利用测井曲线垂向变化趋势、特殊岩性(如碳酸盐岩)、9次分解后得到的d1小波系数重构曲线与时频色谱开展层序地层研究,对不同级别的层序界面和地层叠加样式进行识别,明确了东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域的层序地层界面特征,划分了准层序和准层序组,恢复了准层序、准层序组和低位体系域的动态演化过程,建立了研究区高精度层序地层格架。

2.1 层序地层界面、特征及划分

东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域内部共识别出2个体系域界面、2个准层序组界面和8个准层序界面,划分为3个准层序组和9个准层序(图2a)。

2.1.1 体系域界面、特征及划分

低位体系域的底界面为最大剥蚀面,是一个二级层序界面,在盆地内可进行追踪对比。界面之下为沙四下亚段或孔店组的氧化色泥岩,测井表现为高GR值;界面之上为灰色泥岩,测井曲线由高GR值突变为低GR值,代表了沉积环境的突变(图2a)。低位体系域顶界面为初始湖泛面,界面之下岩性为大套砂岩或者碳酸盐岩,测井表现为低GR值;界面之上在湖盆边缘为初始湖泛泥岩、在湖盆内部多为油页岩(图2c₁, c₂),测井曲线达到低位体系域GR最低值,开始向高GR值转变,GR曲线、GR-d1小波重构曲线的包络线整体呈钟型;低位体系域顶底界面之间的GR曲线、GR-d1小波重构曲线的包络线整体呈漏斗形(图2a)。

2.1.2 准层序界面、特征及划分

研究区低位体系域中共识别出8个准层序界面,划分出9个准层序(图2a)。准层序界面在岩性上对应着砂岩与泥岩的突变面(图2c₄, c₅, c₆),测井上对应着漏斗形GR曲线的顶部、GR-d1小波重构曲线的大幅波动处、时频色谱图的收敛处;界面之下往往是一套反粒序粉砂岩、砂岩或碳酸盐岩,GR曲线数值相对低;界面之上岩性一般突变为泥岩,GR曲线数值突然变高;界面之间GR曲线、GR-d1小波重构曲线的包络线形态整体呈漏斗形(图2a)。受A/S(可容空间变化速率/物源供给变化速率)影响不同,准层序厚5~20 m不等。

2.1.3 准层序组界面、特征及划分

准层序组是若干准层序的叠加^[25, 34-40, 70],准层序

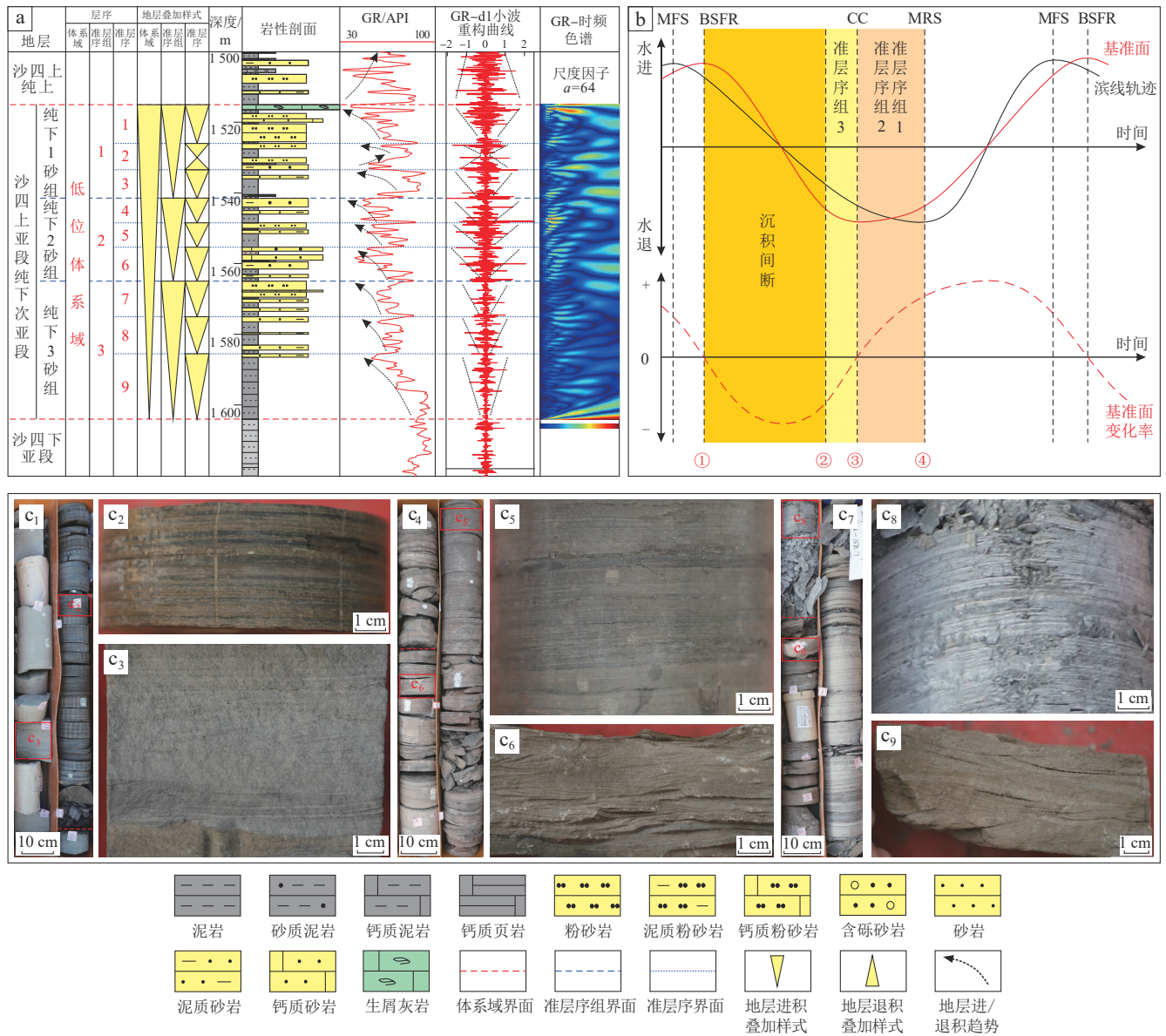


图2 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域内部准层序组、准层序界面特征及划分

Fig. 2 Boundaries, characteristics, and division of parasequence sets and parasequences within the LST of the upper submember of the Sha

4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin

a. 面2井层序地层划分; b. 沉积过程、低位体系域与基准面升降关系(①—④: Vail等^[67-69]定义的低位体系域; ①—②: 强制水退阶段, 沉积间断; ②—③: 强制水退阶段, 基准面下降速率减慢; ③—④: 正常水退阶段, 基准面上升且速率不断加快; MFS: 最大水进面; BSFR: 强制水退底面, 基准面最高; CC: 相对对应整合面, 基准面最低; MRS: 最大水退面); c₁. 低位体系域界面, 莱115井, 埋深2 885.88~2 887.65 m, 岩心照片; c₂. 莱115井, 埋深2 886.18 m, 灰褐色油泥岩, 岩心照片; c₃. 莱115井, 埋深2 887.43 m, 浪成砂纹交错层理细砂岩, 岩心照片; c₄. 准层序界面, 王580井, 埋深3 174.00~3 175.80 m, 岩心照片; c₅. 王580井, 埋深3 173.00 m, 黑色水平层理泥岩, 岩心照片; c₆. 王580井, 埋深3 175.45 m, 浪成砂纹交错层理粉砂岩, 岩心照片; c₇. 准层序组界面, 王149井, 埋深1 678.00~1 679.90 m, 岩心照片; c₈. 王149井, 埋深1 679.05 m, 灰色水平层理泥岩, 岩心照片; c₉. 王149井, 埋深1 679.40 m, 浪成砂纹交错层理粉砂岩-细砂岩, 岩心照片

组界面是若干准层序组合对应的界面。研究区低位体系域中共识别出2个准层序组界面, 划分出3个准层序组, 每个准层序组由3个准层序组成(图2a)。准层序组界面在岩性上同样对应着砂岩与泥岩的突变面, 测井上对应着3个漏斗形GR曲线叠加的顶部、GR-d1小波重构曲线的大幅波动处, 时频色谱图的收敛处; 相比

于准层序界面, 准层序组界面上下GR-d1小波重构曲线波动幅度更大, 反映了沉积趋势的突变程度更大。界面之下往往是多期反粒序砂岩或碳酸盐岩的叠加组合, GR曲线数值低; 界面之上岩性突变为泥岩(图2c₇, c₈, c₉), GR曲线突变为高值; 界面之间GR曲线、GR-d1小波重构曲线的包络线形态呈漏斗形的叠加(图2a)。

准层序组厚度在20~30 m。

严格来讲,由于湖盆斜坡带缺少坡折地貌,这导致湖盆的低位体系域缺少明确的参考标志,只能说是基准面在较低位置时的沉积体的总和,但这并不影响低位体系域时基准面的变化过程。而层序地层划分结果表明,研究区垂向特征与低位体系域基准面升降有良好的对应关系:准层序组3垂向表现为强烈的进积特征(图2a),对应低位体系域初期,基准面下降速率减慢,沉积物大幅进积;准层序组2和准层序组1垂向表现为进积特征,但幅度小于准层序组3(图2a),对应基准面开始上升至最大水退面的正常湖退阶段,基准面上升速率加快,抑制沉积物向盆内进积的趋势(图2a,b)。

2.2 地层叠加样式

沙四上纯下次亚段沉积时期,在湖盆基底沉降的大背景下,掀斜作用使南部缓坡带坡度缓慢增大、沉积物供给逐渐增强,由于沉积物供给速率大于相对湖平面上升速率,形成了低位体系域内沉积物整体进积的趋势^[71-72],所以在准层序组、低位体系域级别未识别出退积的地层叠加样式,但在准层序级别,由于尺度较小,缓坡带受物源影响较大,存在以退积为主的地层叠加样式。此外,低位体系域初期沉积物大幅进积过程中,在湖盆边缘(扇)三角洲相带,底部存在一套向湖盆边缘方向变厚的砂体,覆于沙四下亚段或孔店组的氧化色泥岩之上,之前的研究大都忽略了这一类^[44-48]。此次将其系统识别出来,并在2.3节中对其成因进行了讨论。

东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域共发育3类、6种准层序地层叠加样式(进积型、对称型和退积型),其中,进积型按物源由弱到强分为进积1型、进积2型、进积3型和进积4型(图3a);发育3类、4种准层序组地层叠加样式(进积型、对称型和进积为主型),其中,进积型按物源由弱到强分为进积1型和进积2型(图3b);发育2类、5种体系域地层叠加样式(进积型、进积为主型),其中,进积型按物源强弱分为进积1型、进积2型和进积3型,进积为主型按物源强弱分为进积为主1型和进积为主2型(图3c)。

进积型是研究区典型的地层叠加样式,从准层序至体系域级别均有发育,具下泥、上砂特征,物源弱时顶部发育薄层砂岩或碳酸盐岩,物源越强,进积越明显(图3a)。进积为主型多在准层序组和体系域级别发育,物源持续供给且先强后弱,表现为下部砂/砾、中间泥、上部砂的特征;对称型具有上下砂、中间泥的特征,物源先强后弱;退积为主型仅发育在准层序级别,具有下砂、上泥的特征,表现为沉积初期受强物源影响(图3a)。

2.3 层序主控因素与动态演化

可容空间变化速率(A)和物源供给变化速率(S)关系决定了层序的特征^[18-21, 73-75]。开展层序动态演化研究,是明确其形成过程、分析与之对应的沉积演化规律、总结岩性圈闭发育规律的有效方法。在层序精细划分、样式总结的基础上,充分考虑构造活动、相对湖平面、可容空间变化、沉积物供给等影响层序地层形成、演化的因素,结合T-R旋回(水进-水退旋回)机制,开展典型准层序、准层序组和体系域的动态演化过程分析。

受控于构造作用,湖盆基底缓慢沉降,掀斜作用使缓坡带坡度缓慢增大、沉积物供给增强,导致沉积物供给速率大于相对湖平面上升速率,形成了以进积为主要特征的体系域地层叠加样式,即低位体系域内沉积物进积趋势^[71, 76]。由于这一时期的低角度缓坡古地貌^[43],三角洲砂体推进到湖盆中受波浪改造,最终形成三角洲-滩坝沉积体系^[71-72, 76],主要受控于高频湖平面变化以及物源供给的相互关系而导致的不同 A/S 变化过程,决定了准层序组和准层序不同地层叠加样式的发育。

进积型地层叠加样式在研究区普遍发育(图3a—c),其形成经历了 $A/S \gg 1$ 到 $A/S \leq 1$ 的过程。在相对湖平面快速上升期,绝对可容空间快速增大, $A/S \gg 1$,沉积薄层泥岩;在相对湖平面缓慢下降期,由于可容空间变化速率为负值,同时具备一定物源供给($A/S \leq 1$),形成进积型地层叠加样式(图4a₁—a₄, b₁, b₂, 图5a—c)。随着物源供给变化速率 S 的增大,进积的地层叠加样式会更明显(图4a₁—a₄)。

进积为主型、对称型和退积为主型地层叠加样式主要发育在湖盆边缘,其中,对称型只在准层序、准层序组级别发育,退积为主型只在准层序级别发育(图3)。3者均经历了 $A/S \geq 1$ 到 $A/S \leq 1$ 的过程,在相对湖平面快速上升期,由于 $A/S \geq 1$ 且 S 较大,沉积退积型砂岩或砾岩(图4a₅, a₆, b₃, b₄; 图5d, e);在相对湖平面缓慢下降期, $A/S \leq 1$,具有一定的物源供给,但由于 S 不同,沉积厚度不同: S 较大时,形成进积为主型、对称型地层叠加样式(图4a₅, b₃, b₄, 图5d, e), S 较小时,形成退积为主型地层叠加样式(图4a₆)。此类地层叠加样式的动态演化也解释了低位体系域底部砂体成因,代表了相对湖平面快速上升期的沉积记录。

2.4 层序地层格架

受构造活动、湿润气候、充足物源供给和缓坡带古

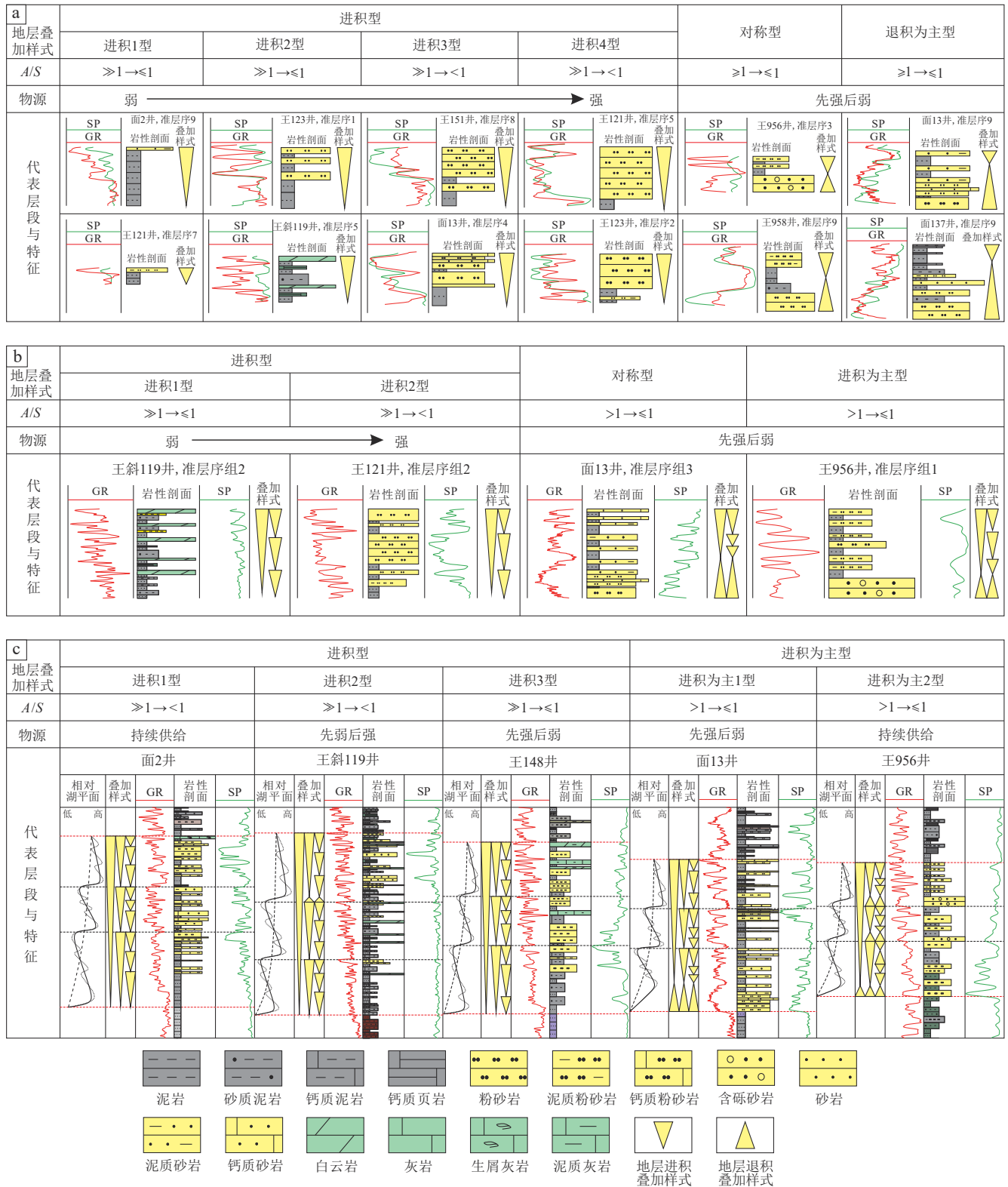


图3 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域地层叠加样式

Fig. 3 Stratigraphic superposition patterns in the LST in the upper submember of the Sha 4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag

a. 准层序; b. 准层序组; c. 体系域

地貌控制, 研究区低位体系域发育全区可对比的准层序组和准层序(图6)。

低位体系域自湖盆边缘向内部由进积为主型向进积型过渡。在顺主要物源方向, 准层序组3自盆地边

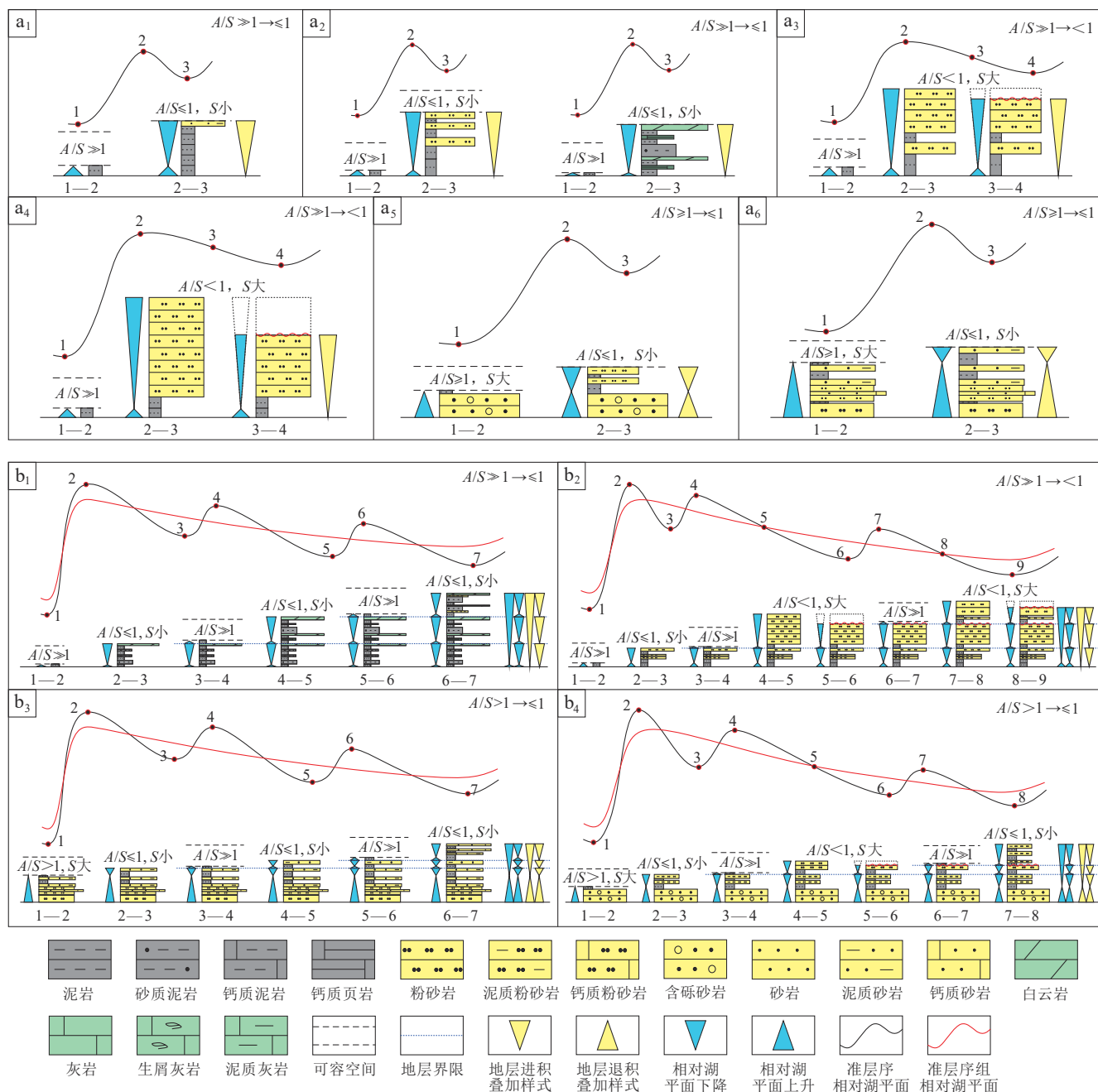


图4 东营凹陷南坡东段沙四上亚段纯下次亚段准层序、准层序组层序动态演化过程

Fig. 4 Dynamic evolutionary processes of parasequences and parasequence sets in the Chunxia interval of the upper submember of the Sha

4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag

a₁. 准层序进积1型, 面2井, 准层序9; a₂. 准层序进积2型, 王123井、准层序1(左), 王斜119井、准层序5(右); a₃. 准层序进积3型, 王151井, 准层序8; a₄. 准层序进积4型, 王121井, 准层序5; a₅. 准层序对称型, 王956井, 准层序3; a₆. 准层序退积为主型, 面13井, 准层序9; b₁. 准层序组进积1型, 王斜119, 准层序组2; b₂. 准层序组进积2型, 王121井, 准层序组2; b₃. 准层序组对称型, 面13井, 准层序组3; b₄. 准层序组进积为主型, 王956, 准层序组1

缘三角洲沉积区的进积为主型和对称型, 向盆内逐渐过渡为进积型; 准层序组2和准层序组1全盆发育进积型。准层序9自盆地边缘三角洲沉积区的退积为主型和对称型向盆内逐渐过渡为进积型, 准层序8—准层序1全盆发育进积型(图6a)。

在垂直主要物源方向, 准层序组3—准层序组1自盆地边缘扇三角洲沉积区进积为主型、对称型向盆内逐渐过渡为进积型。准层序9—准层序4自盆地边缘扇三角洲沉积区进积为主型、对称型向盆内逐渐过渡为进积型, 准层序3—准层序1在全盆主要发育进积型(图6b)。

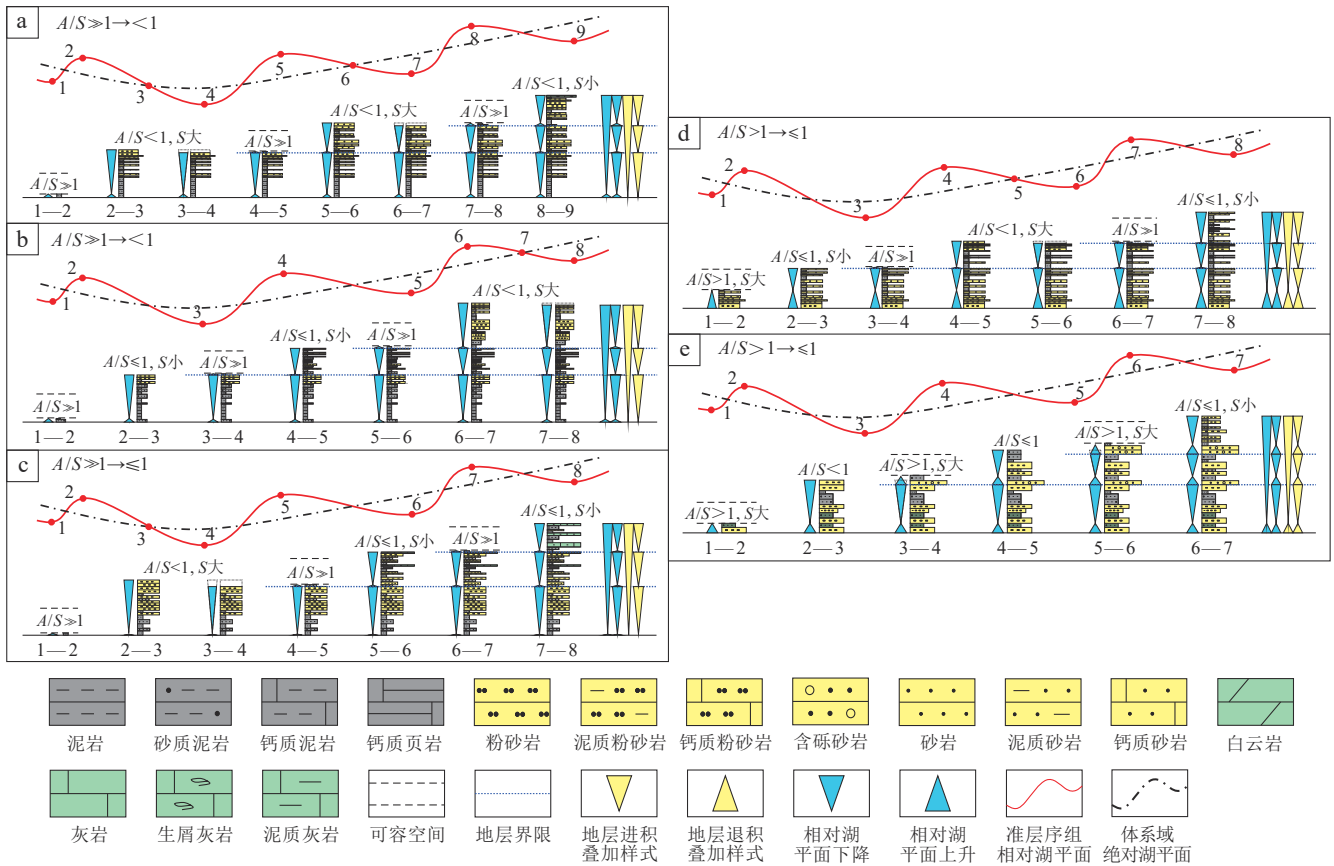


图5 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域层序动态演化过程

Fig. 5 Dynamic evolutionary process of sequences in the LST of the upper submember of the Sha 4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag

a. 进积1型, 面2井; b. 进积2型, 王123井; c. 进积3型, 王151井; d. 进积为主1型, 面13井; e. 进积为主2型, 王956井

3 沉积相特征与演化

由于发育位置、垂向特征相似,三角洲河口坝、远砂坝和席状砂沉积微相与滩坝主体、滩脊和滩席沉积微相的区分在前期存在一定困难,导致了沉积演化规律不清。此次以研究区岩心精细观察为基础,综合岩性、结构、沉积构造、垂向组合和平面形态等特征,在研究区低位体系域中主要识别并区分出了扇三角洲、三角洲和滩坝3种沉积相类型,揭示了准层序级别的平面展布与演化规律。

3.1 沉积相类型及特征

3.1.1 扇三角洲相

据前人计算的断层生长指数、古地貌坡折分级,在缓坡背景下,广饶凸起周围存在小范围相对高坡折带(图1a),导致了小规模扇三角洲的发育^[47]。扇三角洲

主要发育在南部广饶凸起周围,主要识别出前缘水下分流河道微相。岩性主要为灰绿色、分选磨圆差、泥质含量较高的砾岩、含砾杂砂岩和杂砂岩,发育槽状交错层理、块状等沉积构造,垂向以正粒序组合为特征,测井表现为钟形或钟形的叠加(图7a,d)。

3.1.2 三角洲相

三角洲发育在东南部盆缘,主要发育三角洲前缘水下分流河道微相和河口坝微相。水下分流道微相主要发育分选磨圆差-中等的含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩和细砂岩;常见冲刷面、灰绿色泥砾、正粒序、平行层理和槽/楔/板状交错层理等沉积构造,垂向以正粒序组合为特征,粒度概率曲线为二段式,测井表现为钟形或钟形的叠加(图7b,e-h,k),砂/地比大于20%。三角洲前缘河口坝微相主要发育分选磨圆中等-好的粉砂岩、细砂岩,常见反粒序、生物扰动、波状层理、上攀层理、浪成砂纹交错层理等沉积构造;垂向以反粒序、复合粒序的叠置组合为特征,垂向与未被波浪改造完全的分流

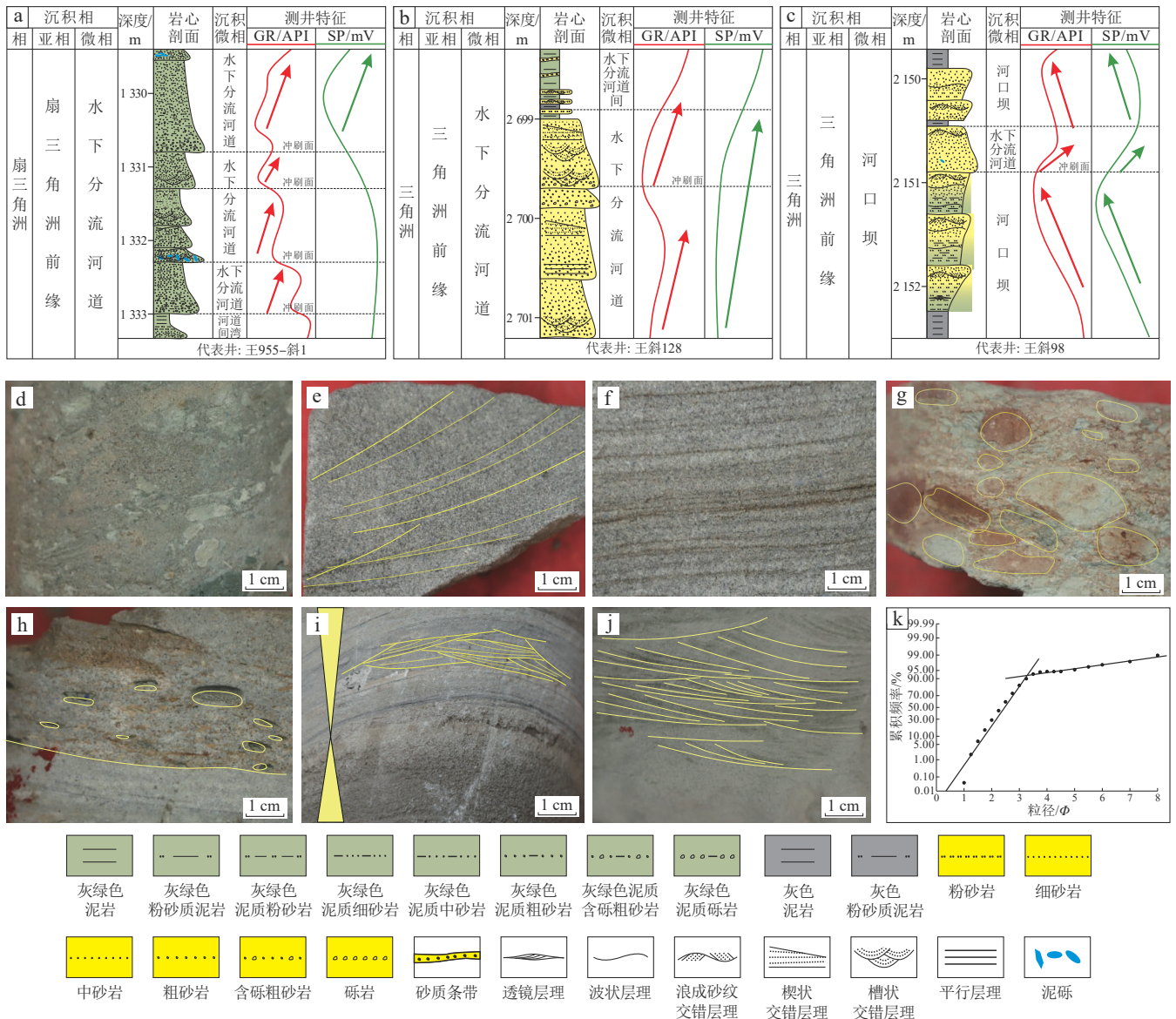


图7 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域(扇)三角洲相特征

Fig. 7 Characteristics of (fan) deltaic facies in the LST of the upper submember of the Sha 4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag

a. 扇三角洲相水下分流河道微相单井沉积学特征,王955-斜1井;b. 三角洲相水下分流河道微相单井沉积学特征,王斜128井;c. 三角洲相河口坝微相单井沉积学特征,王斜98井;d. 王955-斜1井,埋深1 317.00 m,灰绿色含砾杂砂岩,岩心照片;e. 王斜128井,埋深2 699.40 m,槽状交错层理粗砂岩,岩心照片;f. 王斜128井,埋深2 700.60 m,平行层理粗砂岩,岩心照片;g. 角4井,埋深1 828.71 m,灰绿色泥砾岩,岩心照片;h. 角4井,埋深1 840.16 m,泥砾、冲刷面,岩心照片;i. 王斜98井,埋深2 150.50 m,浪成砂纹层理复合粒序细砂岩,岩心照片;j. 角4井,埋深1 847.43 m,流水砂纹层理粉砂岩,岩心照片;k. 王斜128井,埋深2 699.30 m,二段式粒度概率累积曲线

河道共生,测井曲线呈顶部盖状漏斗形(图6a中角6井准层序1—准层序3;图7c,i,j);平面上呈近似垂直岸线分布的形态,呈现未被波浪完全改造的特征,并未完全脱离三角洲,砂/地比大于40%。

3.1.3 滩坝相

滩坝是湖盆中广阔发育的沉积相类型,主要发育坝主体、坝侧缘、滩脊和滩席微相。

坝主体微相是发育在湖盆内部的独立砂体,砂体厚度大;主要发育薄层泥质粉砂岩、粉砂岩和细砂岩,发育生物扰动、波状层理、上攀层理、浪成砂纹交错层理等沉积构造,垂向以反粒序组合为主要特征,测井曲线呈漏斗形叠加(图6a中王123井准层序2;图8a,d,e);在平面上呈平行或近平行岸线分布,呈现波浪改造较强的特征,独立分布在湖盆中,砂/地比大于40%(图9)。坝侧缘微相主要发育在坝主体的两侧,垂向

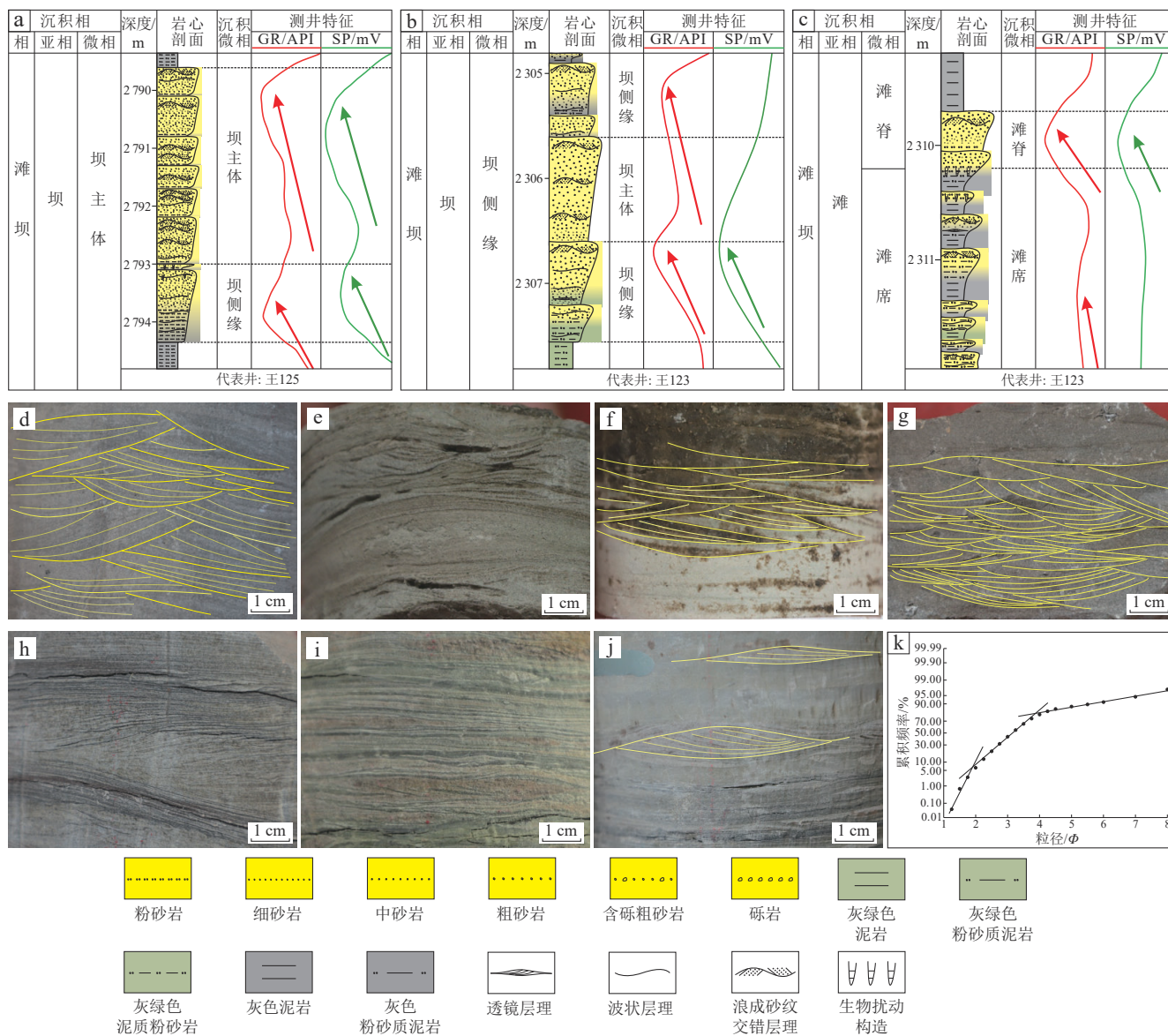


图8 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域滩坝相特征

Fig. 8 Characteristics of beach bar facies in the LST of the upper submember of the Sha 4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag

a. 滩坝相坝主体微相单井沉积学特征,王125井;b. 滩坝相坝侧缘微相单井沉积学特征,王123井;c. 滩坝相滩脊、滩席微相单井沉积学特征,王123井;d. 王125井,埋深2 776.15 m,浪成砂纹层理细砂岩,岩心照片;e. 王斜98井,埋深2 153.40 m,浪成砂纹层理细砂岩,岩心照片;f. 王152-5井,埋深1 537.90 m,浪成砂纹层理粉砂岩,岩心照片;g. 王127井,埋深3 122.14 m,浪成砂纹层理细砂岩,岩心照片;h. 莱115井,埋深2 895.75 m,上攀层理粉砂岩,岩心照片;i. 莱115井,埋深2 903.30 m,波状层理粉砂岩,岩心照片;j. 王123井,埋深2 300.20 m,透镜状层理粉砂岩,岩心照片;k. 王125井,埋深2 784.20 m,三段式粒度概率累积曲线

与之共生,厚度小于坝主体,砂/地比20%~40%(图9);岩性主要为薄层泥质粉砂岩、粉砂岩和细砂岩,发育有生物扰动、波状层理、上攀层理和浪成砂纹交错层理等沉积构造,垂向为反粒序组合特征,粒度概率曲线呈三段式,测井呈漏斗形叠加(图6a中王580井准层序1;图8b,f,k)。

滩脊微相是发育在湖盆内的孤立砂体,砂体厚度小;岩性主要为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉-细砂

岩,主要发育透镜状层理、生物扰动和上攀层理、浪成砂纹交错层理等沉积构造,垂向以反粒序的组合为主要特征,测井呈指形(图8c,g,h);在平面上呈平行或近平行岸线分布,呈现波浪改造较强的特征,独立分布在湖盆中,砂/地比20%~40%(图9)。滩席微相主要发育在滩脊两侧,垂向与之共生,砂体厚度小于滩脊;岩性主要为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩和碳酸盐岩,发育透镜状层理、生物扰动、上攀层理和浪成砂纹

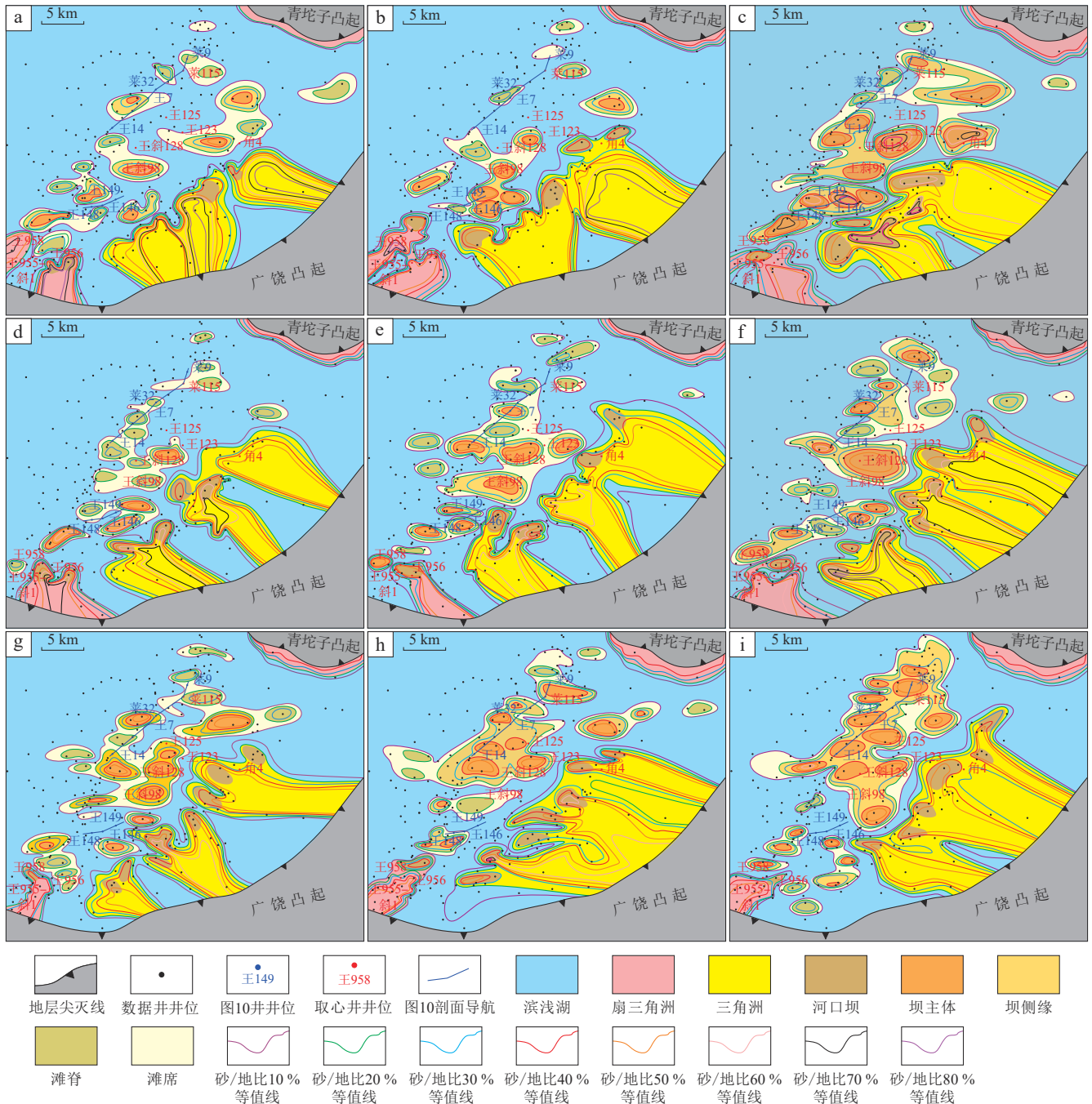


图9 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域沉积相平面分布

Fig. 9 Planar distribution of sedimentary facies in the LST of the upper submember of the Sha 4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag

a. 准层序9; b. 准层序8; c. 准层序7; d. 准层序6; e. 准层序5; f. 准层序4; g. 准层序3; h. 准层序2; i. 准层序1

交错层理等沉积构造,垂向以反粒序组合为主要特征,测井呈指形(图8c, h—j);在平面上呈平行或近平行岸线分布,与滩脊、坝主体共生,独立分布在湖盆中,砂/地比10%~20%(图9)。

3.2 沉积相展布与演化

研究区钻井数量多,取心充足,综合砂地比与砂岩

厚度等值线图、沉积规律、物源方向、沉积相剖面、单井岩性校正、密集井网共同约束,明确了准层序级别的沉积微相展布与演化,演化规律与低位体系域的进积特征有良好的对应关系。

准层序9—准层序7沉积时期,基准面下降速率减慢,物源供给增加,整体 $A/S < 1$,呈明显进积趋势(图5,图9a—c)。西南部、东北部扇三角洲向湖盆推进距离

有限,规模较小(图6,图9a—c)。东南部的三角洲由于受波浪改造强烈,进积不明显,在前端与两侧发育河口坝。三角洲前端受波浪改造强烈,平面上以砂岩含量低值带(<10%)为分隔,在湖盆内部以多个坝主体为中心发育小规模、近东西向展布滩坝,呈进积趋势且面积逐渐增大(图9a—c)。

准层序6—准层序4沉积时期,由于基底沉降导致基准面缓慢上升,掀斜作用导致物源持续增强,整体 $A/S < 1$,形成正常湖退,呈进积趋势(图5,图9d—f)。西南部、东北部扇三角洲规模相对较小,向湖盆推进距离有限,西南部扇三角洲频繁改道(图6,图9d—f)。由于整体 $A/S < 1$,三角洲沉积呈进积趋势,在前端和两侧发育河口坝,前端受波浪改造强烈,平面上以砂岩含量低值带(<10%)为分隔,在湖盆内部以多个坝主体为中心发育一定规模、近东西向展布的滩坝,呈进积趋势,相较于准层序9—准层序7规模变大(图9d—f)。

准层序3—准层序1沉积时期,基准面上升速率不断加快,正常湖退趋势被不断抑制,基准面达到低位体系域最高,物源达到最强,整体 $A/S < 1$,呈进积趋势(图6,图9g—i)。西南部、东北部扇三角洲和东南部三角洲发育规模达到最大。西南部、东北部扇三角洲快速堆积且频繁改道,向湖盆推进距离有限,规模较小(图6,图9g—i)。三角洲物源供给达到最强,规模达到最大,在前端和两侧大面积发育河口坝,前端受波浪改造强烈,以砂岩含量低值带(<10%)为分隔,在湖盆内部以多个坝主体为中心发育大规模、近东西向展布的滩坝,规模达到低位体系域内最大(图9g—i)。

4 岩性圈闭分布规律

4.1 岩性圈闭特征与识别

在地震分辨率受限情况下,高精度层序与沉积学研究是岩性圈闭精细勘探的有效思路 and 手段,三角洲—滩坝沉积体系中岩性圈闭的识别可归纳为以下步骤:①通过单井垂向准层序划分细化地层单元,将单层厚度控制在20 m左右或更薄(图2a);②以密集井网约束,利用以准层序为单位的平面精细编图,消除地层厚度导致的优势相影响,以砂/地比低值带(<10%)将滩坝与三角洲主体分开(图9);③在脱离三角洲主体的滩坝中识别高砂/地比区域,综合相标志确定有利沉积微相为坝主体、滩脊;④以密集井网约束,以准层序为单位,过单一坝主体、滩脊等有利相带作顺物源、垂直

物源的沉积微相剖面,结合层序动态演化确定准层序内砂体储集层,垂向、侧向盖层特征,实现岩性圈闭识别(图6);⑤与真实油藏剖面对应,确定岩性圈闭类型与识别的正确性(图10)。

三角洲—滩坝沉积体系中岩性圈闭以坝主体、滩脊等独立砂体作为储集体,上覆准层序底部发育的泥岩作为局部盖层,水进体系域厚层泥岩为区域盖层,滩间泥岩或物性较差的滩席为侧向遮挡层,剖面形态呈透镜状,自中心向两侧厚度减薄并逐渐尖灭(图6,图10,图11);平面上,以坝主体、滩脊等沉积微相为中心,向四周渐变为滩席、滩间泥岩。准层序内滩脊圈闭累计厚度5~10 m,面积2~4 km²;坝主体圈闭累计厚度10~15 m,面积可达6~8 km²(图6,图9)。

根据沉积特征与构造匹配关系,研究区主要发育孤立尖灭型坝主体岩性圈闭,如准层序7王149井圈闭(图10a);孤立尖灭型滩脊岩性圈闭,如准层序8王7井圈闭(图10b);断层—上倾尖灭型坝主体岩性圈闭,如准层序7王148井圈闭(图10a)、准层序1莱32井圈闭(图10b);断层—上倾尖灭型滩脊岩性圈闭,如准层序4王148井圈闭(图10a)、准层序7王7井圈闭(图10b)。

4.2 岩性圈闭分布规律

在垂向上,准层序、准层序组和低位体系域的顶部是岩性圈闭形成的有利部位。准层序在准层序组、体系域中的位置不同,岩性圈闭的发育也有差异:在准层序组、体系域底部的准层序往往形成规模较小、彼此分散、各自独立的岩性圈闭,例如准层序9、准层序6和准层序3多形成小型坝主体或滩脊岩性圈闭(图9a,d,g;图11);在准层序组顶部的准层序往往形成规模较大的岩性圈闭,例如准层序7、准层序4和准层序1多形成规模性的相互连接的滩脊、坝主体(图9c,f,i;图11)。

在平面上,每个准层序内,以坝主体岩性圈闭为中心,以滩脊岩性圈闭为环绕,平行于岸线方向排列,发育在三角洲前端,以砂岩含量低值带(<10%)为界,与三角洲分隔开独立发育在湖盆内部(图9,图10,图11c),垂直主要物源方向有“滩脊—坝主体—滩脊”的岩性圈闭发育规律,并不断进积(图6,图9)。

相关成果与勘探实例具有良好的对应关系(图10),可以直接有效指导油气勘探。油藏剖面显示,准层序(组)的顶部有良好的圈闭规模与油气显示:王146井、王148井、王149井、王14井、王7井、莱32井

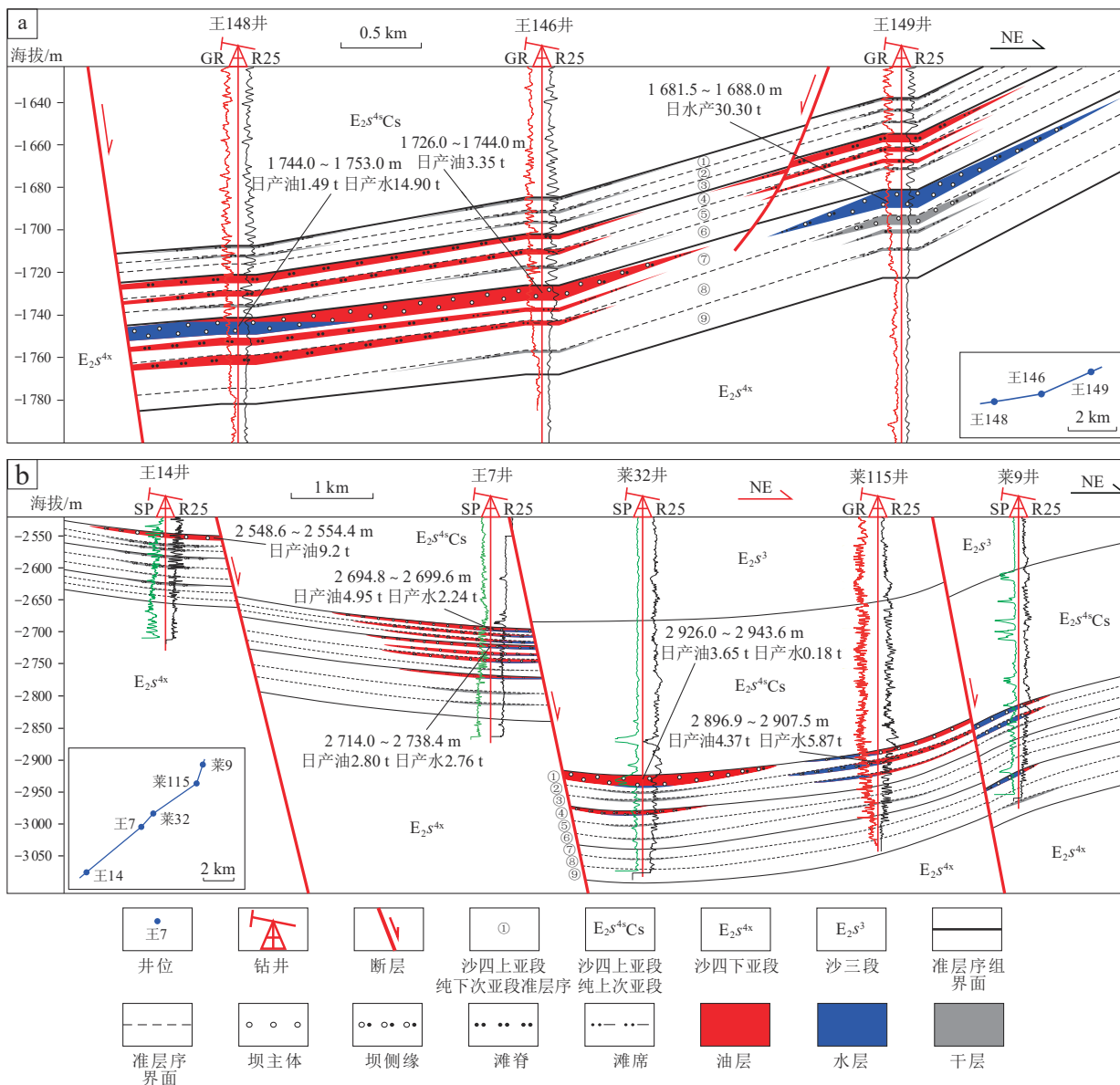


图10 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域内部沉积相-岩性油藏剖面对比

Fig. 10 Profiles showing the correlation of sedimentary facies and lithologic reservoirs within the LST of the upper submember of the Sha 4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag
(①—⑨代表准层序1—准层序9。剖面位置见图9。)

和莱115井等发育一系列构造-岩性圈和岩性圈闭,被断层切割后沟通油气来源形成油气藏,反之显示为水层或干层(图10)。例如,王146井准层序7发育坝主体岩性圈闭,日产油3.35 t(图10a),王14井、王7井、莱32井和莱115井准层序1发育坝主体岩性圈闭,日产油分别为9.20, 4.95, 3.65, 4.37 t(图10b)。2021年,王146井、王152井和王154井共新探明储量 8.55×10^6 t。岩性油藏的垂向分布、发育规律与以准层序为单位的层序演化、平面编图的岩性圈闭分布有良好的对应关系(图4,图9,图10),这有效验证了精细编图的准确性(图9,图10)。

5 结论

1) 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域可划分为3个准层序组、9个准层序;发育6种准层序、4种准层序组以及5种体系域地层叠加样式。这一时期基准面先缓慢下降再缓慢上升,经历了3次准层序组级别、9次准层序级别的相对湖平面升降旋回,物源多在相对湖平面下降期供给充足($A/S < 1$),形成了平面上由盆缘进积为主型向盆内进积型过渡为主要特征的地层叠加样式和分布规律。

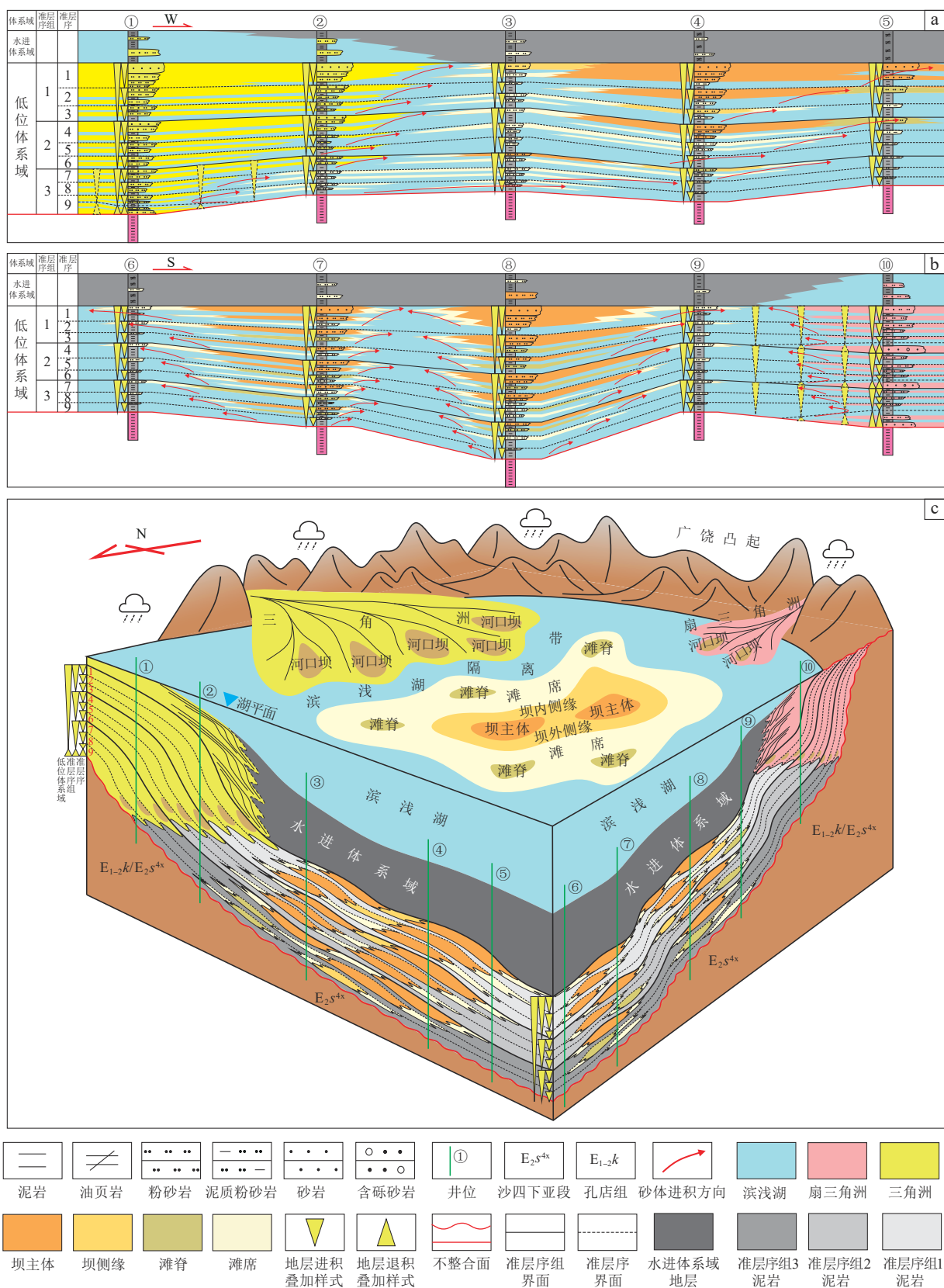


图 11 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域沉积微相与岩性圈闭发育模式

Fig. 11 Developmental models of sedimentary microfacies and lithologic traps in the LST of the upper submember of the Sha 4 Member in the eastern segment of the southern gentle slope zone of the Dongying Sag

a. 顺主要物源方向层序、沉积微相与岩性圈闭剖面发育模式; b. 垂直主要物源方向层序、沉积微相与岩性圈闭剖面发育模式; c. 沉积微相与岩性圈闭发育模式(南北向古地貌据文献[47]修改)

2) 东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域发育三角洲-滩坝沉积体系,在低位体系域整体呈进积特征,在准层序组1时期规模达到最大。准层序组3对应基准面下降时期,强制湖退阶段的大幅进积过程,准层序组2和准层序组3对应正常湖退的进积过程。在每个准层序组内,由底部准层序到顶部准层序时期,物源不断增强,三角洲和滩坝不断进积,规模变大,在准层序1时期向湖推进最远,规模最大。

3) 地震分辨率受限情况下,密井网区精细至准层序的层序划分对比及其约束下的层序动态演化、精细沉积微相与平面编图研究,能够消除优势相在平面上的影响,有效识别、区分滩坝和三角洲,进而揭示岩性圈闭的分布规律。东营凹陷南坡东段沙四上亚段低位体系域内形成了以坝主体和滩脊微相砂体为储集体,以准层序、准层序组底部泥岩为局部盖层,以水进体系域厚层泥岩为区域盖层的岩性圈闭。垂向上主要分布在每个准层序、准层序组和低位体系域的中上部,平面上以砂岩含量低值带(<10%)为界与(扇)三角洲分开,独立分布在湖盆中。

4) 精细至准层序的沉积微相平面编图,可以有效识别低位体系域内部岩性圈闭;层序动态演化可以阐明有利微相与岩性圈闭的形成机制,明确岩性圈闭的垂向富集位置。中国陆相断陷湖盆众多,蕴含着丰富的油气资源,高精度层序地层研究对高成熟探区的勘探意义重大,尤其对于已进入复杂隐蔽油气藏勘探阶段的陆相盆地,在地震分辨率受限情况下,精细层序划分对比,以及与之对应的沉积微相精细刻画是岩性圈闭精细勘探的有效方法。

参 考 文 献

- [1] 冯有良,徐秀生. 同沉积构造坡折带对岩性油气藏富集带的控制作用——以渤海湾盆地古近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 22-25, 31.
FENG Youliang, XU Xiusheng. Syndepositional structural slope-break zone controls on lithologic reservoirs—A case from Paleogene Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 22-25, 31.
- [2] 刘克奇,郝雪峰. 成熟探区精细地质评价技术研究进展[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(1): 11-18.
LIU Keqi, HAO Xuefeng. Advances in intensive geological evaluation methods of the mature exploration areas[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(1): 11-18.
- [3] 赵贤正,周立宏,肖敦清,等. 歧口凹陷斜坡区油气成藏与勘探实践[J]. 石油学报, 2016, 37(z2): 1-9.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, XIAO Dunqing, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration practice of slope area in Qikou sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(z2): 1-9.
- [4] 赵贤正,蒲秀刚,王家豪,等. 断陷盆地缓坡区控砂控盐机制与勘探发现——以歧口凹陷歧北缓坡带为例[J]. 石油学报, 2017, 38(7): 729-739.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, WANG Jiahao, et al. Sand and reservoir controlling mechanism and exploration discovery in the gentle slope of fault basin: A case study of Qibei slope in Qikou sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(7): 729-739.
- [5] 宋明水,王永诗,李友强. 成熟探区“层勘探单元”划分与高效勘探[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 520-527.
SONG Mingshui, WANG Yongshi, LI Youqiang. Division of “layer exploration unit” and high-efficiency exploration in mature exploration area [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 520-527.
- [6] 宋明水,李友强. 济阳凹陷油气精细勘探评价及实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 93-101.
SONG Mingshui, LI Youqiang. Evaluation and practice of fine petroleum exploration in the Jiyang depression [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 93-101.
- [7] 张自力,朱筱敏,张锐锋,等. 典型箕状断陷湖盆层序划分及层序结构样式: 以霸县凹陷古近系为例[J]. 地球科学, 2020, 45(11): 4218-4235.
ZHANG Zili, ZHU Xiaomin, ZHANG Ruifeng, et al. Sequence framework and sequence filling style in lacustrine rift basin: Taking Paleogene in Baxian Sag as an example [J]. Earth Science, 2020, 45(11): 4218-4235.
- [8] 任建业,陆永潮,张青林. 断陷盆地构造坡折带形成机制及其对层序发育样式的控制[J]. 地球科学, 2004, 29(5): 596-602.
REN Jianye, LU Yongchao, ZHANG Qinglin. Forming mechanism of structural slope-break and its control on sequence style in faulted basin[J]. Earth Science, 2004, 29(5): 596-602.
- [9] 冯有良,周海民,任建业,等. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(10): 1356-1376.
FENG Youliang, ZHOU Haimin, REN Jianye, et al. Paleogene sequence stratigraphy in the east of the Bohai Bay Basin and its response to structural movement [J]. Science China Earth Sciences, 2010, 40(10): 1356-1376.
- [10] 王任,石万忠,肖丹,等. 北黄海盆地地下白垩统层序构成特点及控制因素[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1531-1542.
WANG Ren, SHI Wanzhong, XIAO Dan, et al. Architecture characteristics and control factors of Lower Cretaceous sequence in North Yellow Sea Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1531-1542.
- [11] 李忠诚,鲍志东,魏兆胜,等. 箕状断陷湖盆初始裂陷期层序地层与沉积充填特征——以松辽盆地梨南洼槽下白垩统火石岭组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 670-681.
LI Zhongcheng, BAO Zhidong, WEI Zhaosheng, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary filling characteristics of a half-graben

- rift lake basin during the initial rifting period: A case study of the 2nd member of Lower Cretaceous Huoshiling Formation, Linan Sag, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 670–681.
- [12] 朱筱敏, 陈贺贺, 葛家旺, 等. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 746–762.
- ZHU Xiaomin, CHEN Hehe, GE Jiawang, et al. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 746–762.
- [13] 陈贺贺, 朱筱敏, 施瑞生, 等. 断陷盆地缓坡带物源转换与沉积响应——以渤海湾盆地饶阳凹陷盐县斜坡古近系源-汇系统为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 689–706.
- CHEN Hehe, ZHU Xiaomin, SHI Ruisheng, et al. Provenance transformation and sedimentary response of ramp facies in downfaulted basins: A case study on the Paleogene source-to-sink system in Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 689–706.
- [14] 邓宏文, 王红亮, 王居峰, 等. 层序地层构成与层序控砂、控藏的自相似特征——以三角洲-浊积扇体系为例[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(5): 491–495.
- DENG Hongwen, WANG Hongliang, WANG Jufeng, et al. Self-similarity of constitution of sequence stratigraphy and distribution of sandbodies and lithologic reservoirs: Taking delta-turbidite fan system as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(5): 491–495.
- [15] 冯有良, 邱以钢. 高精度层序地层学在济阳坳陷下第三系隐蔽油气藏勘探中的应用[J]. *石油学报*, 2003, 24(1): 49–52, 57.
- FENG Youliang, QIU Yigang. Application of high-resolution sequence stratigraphy to exploration of Lower Tertiary subtle reservoirs in Jiyang subbasin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(1): 49–52, 57.
- [16] 宋国奇, 纪友亮, 赵俊青. 不同级别层序界面及体系域的含油气性[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 32–35.
- SONG Guoqi, JI Youliang, ZHAO Junqing. Oil-bearing degree of different-scale sequence boundaries and system tracks [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 32–35.
- [17] 吴因业, 张天舒, 张志杰, 等. 沉积体系域类型、特征及石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2010, 12(1): 69–81.
- WU Yinye, ZHANG Tianshu, ZHANG Zhijie, et al. Types and characteristics of depositional systems tract and its petroleum geological significance [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2010, 12(1): 69–81.
- [18] CATUNEANU O, ABREU V, BHATTACHARYA J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92(1/2): 1–33.
- [19] MARTINS-NETO M A, CATUNEANU O. Rift sequence stratigraphy [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 247–253.
- [20] CATUNEANU O, ZECCHIN M. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves II: Controls on sequence development [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 26–38.
- [21] CATUNEANU O. Model-independent sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 188: 312–388.
- [22] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性与差异性[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 763–776.
- ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 763–776.
- [23] 和子琛, 刘豪, 林鹤鸣, 等. 断陷湖盆坡折带-古沟谷对沉积的控制作用——以珠江口盆地海丰33洼陷古近系文昌组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 441–451.
- HE Zichen, LIU Hao, LIN Heming, et al. Controlling effect of slope-break zone and paleovalley on sedimentation in rifted lake basins: A case study of the Paleogene Wenchang Formation in Haifeng 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 441–451.
- [24] 徐长贵, 龚承林. 从层序地层走向源-汇系统的储层预测之路[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 521–538.
- XU Changgui, GONG Chenglin. Predictive stratigraphy: From sequence stratigraphy to source-to-sink system [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 521–538.
- [25] 林畅松, 张燕梅, 刘景彦, 等. 高精度层序地层学和储层预测[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 111–117.
- LIN Changsong, ZHANG Yanmei, LIU Jingyan, et al. High resolution sequence stratigraphy and reservoir prediction [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 111–117.
- [26] 杨会东, 王书平, 马玉天, 等. 高精度层序地层技术在松辽盆地南部隐蔽油藏勘探中的应用[J]. *石油学报*, 2005, 26(3): 40–43.
- YANG Huidong, WANG Shuping, MA Yutian, et al. Application of high-resolution sequence stratigraphy to exploration of subtle reservoir in the southern Songliao Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(3): 40–43.
- [27] 赵爱文, 王振奇, 叶春, 等. 春光区块沙湾组沉积相类型及岩性圈闭发育模式[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(2): 58–66.
- ZHAO Aiwen, WANG Zhenqi, YE Chun, et al. Types of sedimentary facies and development patterns of lithologic traps in Shawan Formation, Chunguang block [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(2): 58–66.
- [28] 冉怀江, 林畅松, 代一丁, 等. 珠江口盆地番禺天然气区东南缘坡折带韩江组中段沉积层序与岩性地层圈闭研究[J]. *沉积学报*, 2013, 31(6): 1081–1087.
- RAN Huaijiang, LIN Changsong, DAI Yiding, et al. Sedimentary sequence and lithologic-stratigraphic trap of the middle segment of Hanjiang Formation in the shelf break zone in southeast Panyu natural gas area, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 1081–1087.
- [29] 陈彬滔, 史忠生, 马凤良, 等. 南苏丹 Melut 盆地 Ruman 凹陷

- 白垩系层序地层级次与砂质滩坝的沉积响应[J]. 古地理学报, 2018, 20(6): 1013-1022.
- CHEN Bintao, SHI Zhongsheng, MA Fengliang, et al. Cretaceous sequence stratigraphic hierarchies and the sedimentary response of sandy beach-bar in Ruman Sag, Melut Basin, South Sudan [J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20 (6): 1013-1022.
- [30] 张向涛, 杜家元, 丁琳, 等. 不同水动力机制下砂体沉积响应及岩性圈闭形成模式[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊1): 105-114.
- ZHANG Xiangtao, DU Jiayuan, DING Lin, et al. Sedimentary response of sand body and formation models of lithologic traps under different hydrodynamic conditions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 105-114.
- [31] 张向涛, 李小平, 玄昌姬, 等. 南海东部浅水区非烃源岩层系岩性油藏勘探实践与方向[J]. 石油学报, 2021, 42(6): 695-707.
- ZHANG Xiangtao, LI Xiaoping, XUAN Changji, et al. Exploration practice and direction of lithologic reservoirs in non-source rock strata in shallow water areas of the eastern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(6): 695-707.
- [32] 包洪平, 杨帆, 白海峰, 等. 细分小层岩相古地理编图的沉积学研究及油气勘探意义——以鄂尔多斯地区中东部奥陶系马家沟组马五段为例[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1094-1106.
- BAO Hongping, YANG Fan, BAI Haifeng, et al. Sedimentology study on sub-member lithofacies paleogeography mapping and its petroleum exploration significance: Taking Ma5 member of Lower Ordovician Majiagou Formation in central-eastern Ordos Basin for example[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1094-1106.
- [33] 黄仁春, 邢凤存, 范小军, 等. 四川盆地元坝地区长兴组—飞仙关组高精度层序地层格架的建立及礁滩储集层预测[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 369-378.
- HUANG Renchun, XING Fengcun, FAN Xiaojun, et al. Establishment of high-precision sequence stratigraphic framework of the Changxing-Feixianguan Formations and prediction of reef-shoal reservoirs in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(2): 369-378.
- [34] 朱筱敏, 王华, 朱红涛, 等. 陆相层序地层学研究进展及发展关注[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1382-1398.
- ZHU Xiaomin, WANG Hua, ZHU Hongtao, et al. Research progress and development focuses of continental sequence stratigraphy[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1382-1398.
- [35] 兰朝利, 杨明慧. 快速水进与缓慢水退: 克拉通盆地典型准层序特征及其对储层发育控制作用[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(7): 6-9.
- LAN Chaoli, YANG Minghui. Rapid water transgression and slow regression: parasequence characteristics and its control on reservoir development in Cratonic Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(7): 6-9.
- [36] 陈留勤. 从准层序到米级旋回——层序地层学与旋回地层学相互交融的纽带[J]. 地层学杂志, 2008, 32(4): 447-454.
- CHEN Liuqin. From parasequences to meter-scale cycles: The connection between sequence stratigraphy and cyclostratigraphy [J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(4): 447-454.
- [37] VAN WAGONER J C, MITCHUM R M, CAMPION K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1990.
- [38] 姜在兴, 李华启. 层序地层学原理及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- JIANG Zaixing, LI Huaqi. Principles and applications of sequence stratigraphy[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [39] 纪友亮, 张世奇. 陆相断陷湖盆层序地层学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- JI Youliang, ZHANG Shiqi. Sequence stratigraphy of continental faulted lake basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [40] 邹才能, 池英柳, 李明, 等. 陆相层序地层学分析技术: 油气勘探工业化应用指南[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- ZOU Caineng, CHI Yingliu, LI Ming, et al. Continental sequence stratigraphy analysis techniques: Guidelines for industrial application of oil and gas exploration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [41] EMBRY A. 实用层序地层学[M]. 邓宏文, 肖毅 王红亮, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- EMBRY A. Practical sequence stratigraphy [M]. DENG Hongwen, XIAO Yi, WANG Hongliang, et al, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [42] 宋国奇, 王延章, 路达, 等. 山东东营凹陷南坡地区沙四段纯下亚段湖相碳酸盐岩滩坝发育的控制因素探讨[J]. 古地理学报, 2012, 14(5): 565-570.
- SONG Guoqi, WANG Yanzhang, LU Da, et al. Controlling factors of carbonate rock beach and bar development in lacustrine facies in the Chunxia submember of member 4 of Shahejie Formation in south slope of Dongying Sag, Shandong Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(5): 565-570.
- [43] 姜在兴, 王俊辉, 张元福, 等. “风-源-盆”三元耦合油气储集体预测方法及其应用——对非主力物源区储集体的解释与预测[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1465-1476.
- JIANG Zaixing, WANG Junhui, ZHANG Yuanfu, et al. Ternary “Windfield-Source-Basin” system for the prediction of hydrocarbon reservoirs: Interpretation and prediction of hydrocarbon reservoirs deviated from the main provenance areas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1465-1476.
- [44] 弭连山, 操应长. 东营凹陷南斜坡东段沙四上段沉积模式及演化[C]//中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会, 中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会, 中国地质学会沉积地质专业委员会, 等. 第九届全国古地理学及沉积学学术会议论文集, 西安, 2006. 西安: 西北大学学报编辑部, 2006: 199-205.
- MI Lianshan, CAO Yingchang. The evolution of depositional

- model and depositional systems in the upper part of the fourth member of Shahejie Formation of east section of south slope of Dongying Depression [C]//Lithofacies Paleogeography Professional Committee of the Chinese Society of Mineral, Rock and Geochemistry, Sedimentology Professional Committee of the Chinese Society of Mineral, Rock and Geochemistry, Sedimentary Geology Professional Committee of the Geological Society of China, et al. Proceedings of the 9th National Conference on Paleogeography and Sedimentology, Xi'an, 2006. Xi'an: Editorial Department of Journal of Northwest University, 2006: 199-205.
- [45] 李国斌, 姜在兴, 王升兰, 等. 薄互层滩坝砂体的定量预测——以东营凹陷古近系沙四上亚段(Es_4^+)为例[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1659-1671.
- LI Guobin, JIANG Zaixing, WANG Shenglan, et al. The quantitative prognosis of thin interbedded beach-bar sandbodies: A case study of the upper 4th submember of the Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag[J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1659-1671.
- [46] 田继军, 姜在兴. 惠民凹陷与东营凹陷沙四上亚段滩坝沉积特征对比与分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 612-623.
- TIAN Jijun, JIANG Zaixing. Comparison and analysis of beach bars sedimentary characteristics of upper Es_4 in Huimin and Dongying Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 612-623.
- [47] 王玉萍, 董春梅, 林承焰, 等. 缓坡坡折带类型与特征及其控沉积作用——以东营凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩沉积为例[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 329-341, 380.
- WANG Yuping, DONG Chunmei, LIN Chengyan, et al. Types and characteristics of slope break belt in the gentle slope and its controlling effect on the deposition: Taking the deposition of lacustrine carbonates in Es_4 s formation in the Dongying sag as an example[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 329-341, 380.
- [48] 操应长, 王健, 刘惠民, 等. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(6): 5-10.
- CAO Yingchang, WANG Jian, LIU Huimin, et al. Sedimentary characteristics and models of beach-bar sandbodies in the upper part of the fourth member of Paleogene in the south slope of Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(6): 5-10.
- [49] 金武弟, 王英民, 刘书会, 等. 东营凹陷下第三系低位域沉积及非构造圈闭[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 249-252.
- JIN Wudi, WANG Yingmin, LIU Shuhui, et al. Paleogene lowstand system tract deposits and nonstructural traps in Dongying Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 249-252.
- [50] 邱贻博, 贾光华, 刘晓峰, 等. 东营凹陷古近系构造转换及其对盆地控制作用[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 50-57.
- QIU Yibo, JIA Guanghua, LIU Xiaofeng, et al. Structural transformation in Paleogene and its controlling effect in Dongying Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 50-57.
- [51] 宋明水, 王永诗, 郝雪峰, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系深层油气成藏系统及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1243-1254.
- SONG Mingshui, WANG Yongshi, HAO Xuefeng, et al. Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1243-1254.
- [52] 董月霞, 王建伟, 刁帆, 等. 陆相断陷湖盆层序构成样式及砂体预测模式——以南堡凹陷东营组为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 96-102.
- DONG Yuexia, WANG Jianwei, DIAO Fan, et al. Sequence stratigraphic patterns and sand body prediction models of fault-depressed lacustrine basins: A case study from the Dongying Formation in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 96-102.
- [53] 葛家旺, 朱筱敏, 黎明, 等. 陆丰凹陷东部缓坡带层序地层样式及控制因素[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 563-577.
- GE Jiawang, ZHU Xiaomin, LI Ming, et al. Sequence architecture and controlling factors of the Wenchang Formation in the gentle slope of eastern Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 563-577.
- [54] 高亮, 孙波, 王延章. 渤海湾盆地东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝沉积特征及控制因素[J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 669-675.
- GAO Liang, SUN Bo, WANG Yanzhang. Sedimentary characteristics and controlling factors of beach-bar sandstones of the upper section of the fourth member of Shahejie Formation on the southern slope of Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(5): 669-675.
- [55] CATUNEANU O, BHATTACHARYA J P, BLUM M D, et al. Sequence stratigraphy: Common ground after three decades of development[J]. First Break, 2010, 28: 21-34.
- [56] CATUNEANU O, GALLOWAY W E, KENDALL C G St C, et al. Sequence stratigraphy: Methodology and nomenclature [J]. Newsletters on Stratigraphy, 2011, 44(3): 173-245.
- [57] ZECCHIN M, CATUNEANU O. High-resolution sequence stratigraphy of elastic shelves I: Units and bounding surfaces [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 39(1): 1-25.
- [58] SPENCE G H, TUCKER M E. A proposed integrated multi-signature model for peritidal cycles in carbonates [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(10): 797-808.
- [59] TUCKER M, GARLAND J. High-frequency cycles and their sequence stratigraphic context: Orbital forcing and tectonic controls on Devonian cyclicity, Belgium [J]. Geologica Belgica, 2010, 13(3): 213-240.

- [60] MUTO T, STEEL R J, SWENSON J B. Autostratigraphy: A framework norm for genetic stratigraphy [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(1): 2-12.
- [61] MUTO T, STEEL R J. Role of autoretreat and A/S changes in the understanding of deltaic shoreline trajectory: A semi-quantitative approach[J]. *Basin Research*, 2002, 14(3): 303-318.
- [62] AMOROSI A, CENTINEO M C, COLALONGO M L, et al. Millennial-scale depositional cycles from the Holocene of the Po Plain, Italy[J]. *Marine Geology*, 2005, 222/223: 7-18.
- [63] STEFANI M, VINCENZI S. The interplay of eustasy, climate and human activity in the Late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system [J]. *Marine Geology*, 2005, 222/223: 19-48.
- [64] KIDWELL S M. Anatomy of extremely thin marine sequences landward of a passive-margin hinge zone; Neogene Calvert Cliffs succession, Maryland, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67(2): 322-340.
- [65] DI CELMA C, RAGAINI L, CANTALAMESSA G, et al. Basin physiography and tectonic influence on sequence architecture and stacking pattern: Pleistocene succession of the Canoa Basin (central Ecuador) [J]. *GSA Bulletin*, 2005, 117(9/10): 1226-1241.
- [66] ZECCHIN M. Relationships between fault-controlled subsidence and preservation of shallow-marine small-scale cycles: Example from the Lower Pliocene of the Croton Basin (Southern Italy) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(2): 300-312.
- [67] 赵伟, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 小波分析在高精度层序单元划分中的应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(2): 18-22.
- ZHAO Wei, QIU Longwei, JIANG Zaixing, et al. Application of wavelet analysis in high-resolution sequence unit division [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33(2): 18-22.
- [68] 王艳忠, 操应长, 远光辉. 小波分析在深水砂砾岩和泥页岩地层层序划分中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 251-258.
- WANG Yanzhong, CAO Yingchang, YUAN Guanghui. Application of wavelet analysis in sequence division of deepwater glutenite and shale layer [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 251-258.
- [69] CATUNEANU O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [70] 梅冥相. 从正常海退与强迫型海退的辨别进行层序界面对比: 层序地层学进展之一[J]. *古地学报*, 2010, 12(5): 549-564.
- MEI Mingxiang. Correlation of sequence boundaries according to discerning between normal and forced regressions: The first advance in sequence stratigraphy [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(5): 549-564.
- [71] BOHACS K M, CARROLL A R, NEAL J E, et al. Lake-Basin type, source potential, and hydrocarbon character: An integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework [M]. AAPG Studies in Geology 46, Tulsa: AAPG, 2000: 3-34.
- [72] 谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等. 构造掀斜主导的断陷湖盆缓坡层序“源—汇”正演模拟定量研究[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.061>.
- TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, ZHANG Zili, et al. Source-to-sink Quantitative Stratigraphic Forward Modeling on the Tilted Hanging-wall Sequence Architecture of a Tectonically-driven Lacustrine Rift Basin [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.061>.
- [73] 梅冥相. 从旋回的有序叠加形式到层序的识别和划分: 层序地层学进展之三[J]. *古地学报*, 2011, 13(1): 37-54.
- MEI Mingxiang. From vertical stacking pattern of cycles to discerning and division of sequences: the third advance in sequence stratigraphy [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(1): 37-54.
- [74] 冯有良, 潘元林, 郑和荣. 东营凹陷中始新统上部—上始新统层序地层模式及其石油地质意义[J]. *沉积学报*, 2000(3): 376-383.
- FENG Youliang, PAN Yuanlin, ZHENG Herong. Sequence Stratigraphic Model and Its Petroleum Geological Significance of Upper Part of Middle Eocene Series and Upper Eocene Series in Dongying Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000(3): 376-383.
- [75] 冯有良, 李思田. 东营凹陷沙河街组三段层序低位域砂体沉积特征[J]. *地质论评*, 2001(3): 278-286.
- FENG Youliang, LI Sitian. Depositional characteristics of lowstand sand bodies of the third member of the Shahejie formation in the Dongying Depression [J]. *Geological Review*, 2001(3): 278-286.
- [76] 李阳, 蔡进功, 刘建民. 东营凹陷下第三系高分辨率层序地层研究[J]. *沉积学报*, 2002(2): 210-216.
- LI Yang, CAI Jingong, LIU Jianmin. High-resolution Sequence Stratigraphy of Paleogene in Dongying Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002(2): 210-216.

(编辑 董奕含)