

陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征

朱筱敏¹, 陈贺贺², 葛家旺³, 谈明轩⁴, 刘强虎⁵, 张自力⁶, 张亚雄⁷

[1. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083; 3. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 4. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098; 5. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北 武汉 430070; 6. 中国石油 西南油气田分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 7. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083]

摘要: 陆相断陷盆地蕴藏着极为丰富的油气资源, 阐明这类盆地不同构造演化阶段的层序地层构型和砂体发育分布特征是油气资源勘探开发的重要基础。在综述层序地层学发展现状和陆相断陷湖盆地质特征的基础上, 依据断陷盆地构造演化的4个阶段, 表征层序构型及砂体成因分布特征: ① 盆地初始断陷期, 边界断裂开始活动, 准层序垂向加积叠置, 发育近源粗粒的冲积扇、分支河流和扇三角洲等沉积体系; ② 盆地强烈断陷期, 断层活动强烈, 在不同构造带和体系域中, 准层序发育多种叠置样式, 沉积体系主要为河流、三角洲以及重力流; ③ 盆地断-拗转换期, 断层活动减弱, 准层序进积、加积垂向叠置, 发育长轴向河流和三角洲沉积体系; ④ 盆地拗陷沉降期, 断裂活动趋于停止, 盆地沉积充填整体处于过补偿状态, 以河流-浅水三角洲沉积体系为特征。结合上述分析, 指出了陆相断陷湖盆层序地层学研究热点并展望未来发展趋势。

关键词: 层序构型; 砂体分布; 构造演化阶段; 沉积体系; 层序地层学; 陆相断陷湖盆

中图分类号: TE121.3 文献标识码: A

Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins

Zhu Xiaomin¹, Chen Hehe², Ge Jiawang³, Tan Mingxuan⁴, Liu Qianghu⁵, Zhang Zili⁶, Zhang Yaxiong⁷

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. College of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 4. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 5. College of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430070, China; 6. Exploration and Production Research Institute, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 7. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China]

Abstract: Efficient oil and gas exploration and development in petrolierous continental rift basins relies heavily on a profound understanding of sequence stratigraphic architectures and sandbody distribution characteristics in different tectonic evolution stages. Based on a review of the development status of sequence stratigraphy and geological characteristics of continental rift basins, this study characterizes the sequence stratigraphic architectures and sandbody distribution according to a four-stage tectonic evolution of the basins: ① During the early syn-rift stage, faulting at basin boundaries starts with parasequences being vertically aggraded and superposed, and with near-source coarse-grained depositional systems including alluvial fan, distributary channel, and fan delta being developed. ② During the main syn-rift stage, faulting intensifies with parasequences showing a variety of overlapping styles in different structural belts and systems tracts, and basins fill mainly with fluvial, delta and gravity flow. ③ During the transition stage from rifting to depression, faulting starts to wean with parasequences being overlapped and dominated by progradation and aggradation, and depositional systems dominated by axial fluvial and deltaic depositional systems being developed. ④ During the post-rift depression and subsidence stage, faulting nearly ends with basins in an overcompens and with the

收稿日期:2022-04-26; 修訂日期:2022-05-01。

第一作者简介: 朱筱敏(1960—), 男, 教授、博士生导师, 沉积地质学和层序地层学。E-mail: xmzhu@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272133, 41902124, 42002117); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB201104); 国家科技重大专项(2011ZX05001-002-01, 2011ZX05009-002-05, 2017ZX05001-002-02)。

fluvial-shallow-water deltas being developed. Current hot topics and future development of sequence stratigraphy in continental rift basins are also discussed based on the above analyses.

Key words: sequence architecture, sandbody distribution, tectonic evolution stage, depositional system, sequence stratigraphy, continental rift basin

引用格式: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. DOI:10.11743/ogg20220402.

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. DOI:10.11743/ogg20220402.

1 层序地层学发展简况

统计表明,广泛分布于世界各地的断陷盆地油气产量占据了已探明巨型油气田油气产量的1/3。随着近海海域、大陆架以及深水区域油气勘探与开发的日益成熟,海相断陷盆地的勘探开发引起了全球广泛关注^[1]。与国外海相断陷盆地为主导的油气勘探开发不同,中国作为陆相盆地产油大国,油气勘探开发多集中于陆相断陷湖盆。陆相与海相断陷盆地具有相似的断陷演化过程和砂体发育分布特征^[2],具备非常大的油气勘探潜力。

当代地球科学研究正在不断地朝着全球化、综合化、信息化和数字化的方向发展,这就要求人们不断地修订并完善传统的地质认识,充分且创新性地利用多种信息,促进众多地学分支学科相互交叉渗透,产生新的边缘学科,以满足或适应地球科学的迅速发展。20世纪80年代末期诞生并被人们广为接受的层序地层学正是顺应了地球科学发展的历史潮流,它的出现在

基础地层学、沉积地质学、地球物理学和矿产地质学等相关科学领域引起了极大的震动并产生了深远的影响。层序地层学为沉积岩相关研究提供了一个等时的地层学框架,就像板块构造学说曾经提供一个完整统一的构造概念一样,它改变了人们分析地层记录的基本原则,是地质学的一次革命,开创了探索地球历史的一个新纪元^[3]。

层序地层学是研究以不整合面及其可对比的整合面为边界的、具有成因联系且具旋回性的、地层年代格架内岩石组合、沉积作用的一门地质学科。它提供了一种更准确的年代地层对比框架,通过恢复古地理面貌,确定沉积体系类型及砂体分布规律,预测烃源岩、储盖配置关系、地层岩性圈闭分布区及成藏组合。显然,层序地层学已在地质理论研究和沉积矿产勘探等诸多方面展现出了强大的生命力,已在全球范围内掀起了层序地层学研究热潮(图1)^[4]。

现今国际层序地层学主流学派包括Vail(1988)倡导的以不整合面为层序边界的经典层序地层学、Galloway(1989)提出的以最大海泛面为层序边界的成

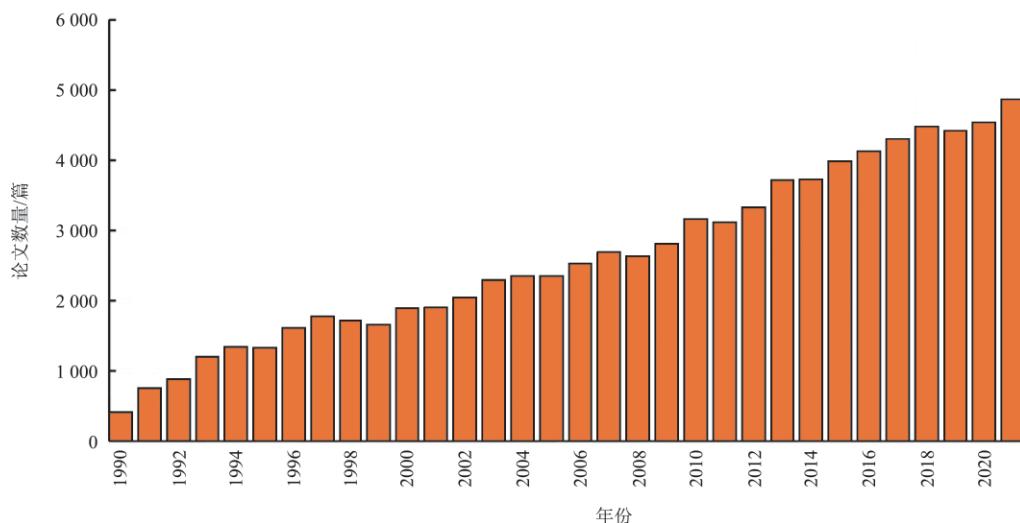


图1 层序地层学近期发表文章统计(基于谷歌学术)

Fig. 1 Statistics of publication for sequence stratigraphy research (based on Google Scholar)

因层序地层学、Embry(1992)发展的以最大海退面或首次海泛面为旋回边界的海侵-海退旋回层序地层学和Cross(1994)创立的以基准面为旋回边界的高分辨率层序地层学^[3-4]。上述层序地层学理论在20世纪90年代先后被引入中国,在沉积地质学和石油工业等领域得到了创新发展,并在实际应用中取得了显著成效。

目前普遍认为,起源于被动大陆边缘海相碎屑岩的经典层序地层学基本原理(Vail,1988)能够应用于陆相湖盆沉积地层研究。根据陆相湖盆构造演化、气候、古地貌、沉积体系发育特征以及多种控制沉积层序形成发育的地质因素,中国地学工作者创新性地将Vail(1988)和Cross(1994)等人倡导的层序地层学理论方法应用到陆相盆地相关研究中,建立了坳陷和断陷湖盆层序地层模式,预测了沉积砂体时空分布,有效指导了岩性圈闭油气勘探^[5-6]。

2 陆相断陷湖盆地质特征

中国中新生代发育了盆地结构各异、大小不等的陆相沉积盆地。按形成机制可划分为伸展类、挠曲类和走滑-伸展类,其中伸展类断陷湖盆具有如下主要地质特征:①断陷湖盆多具箕状结构,半地堑是其最主要的构造样式,形成地貌差异明显的陡坡带、缓坡带以及深洼带沉积背景。②盆地沉积中心往往与沉降中心吻合;近物源、远物源和多物源体系充足供源;陡坡带相带窄,岩相和沉积厚度变化快;缓坡带相带宽,岩相和沉积厚度差异小。③盆地内同沉积断裂活动明显,所形成的断裂坡折带对沉积物路径系统和重力流沉积有着重要控制作用,同沉积断裂差异活动形成的断陷地貌不仅丰富了盆地的物源体系,还控制了体

系域的形成、分布和演化。④断陷湖盆的地质特征受构造和气候作用影响大,表现为多幕次、多断陷及多沉降中心的构造特征;在断陷湖盆发育的早中期,湖盆沉降快、湖水深,深湖区占湖盆总面积的比例较大;在断陷湖盆发育的晚期,由于沉积物充填和区域性抬升活动,盆地内地貌差异变小,湖水变浅,湖盆由断陷向坳陷转化,等等。

区域性构造幕及构造事件是控制湖盆形成与演化的最重要因素,湖平面幕式升降及气候变化主导了陆相断陷湖盆层序地层构型的多样性^[2,7]。在断陷盆地构造演化过程中,同沉积断层活动及其组合样式影响盆地内部断块的沉降或者抬升剥蚀状态,进而控制沉积物搬运通道和沉积体系分布^[8-9]。一个典型陆相断陷盆地存在多种样式的供源水系和沉积物分散路径(图2)^[10]:陡坡带断崖坡度陡且水系长度短,由一系列规模小的线性输入水系组成,在断层下降盘形成小规模的扇体。不同断层段在生长连接过程中,会彼此叠置形成中等坡度的构造转换带,进而发育转换带水系和断块掀斜形成的逆向水系。与此相反,缓坡带和盆地长轴区域地形相对平缓,汇水面积大,易在先存水系基础上发育缓坡带水系与长轴向水系,利于形成大规模的河流-三角洲沉积体系^[9-10]。

3 断陷湖盆层序构型与砂体分布

断陷盆地的层序地层构型、沉积充填特征和砂体分布主要受控于盆地断裂活动、盆地结构、沉降速率、沉积物输入量和气候变化等因素。从构造拉伸影响的尺度来看,断陷盆地结构可细分为3种类型:半地堑型、地堑型和分隔断陷型^[11-12]。从盆地沉降速率来看,

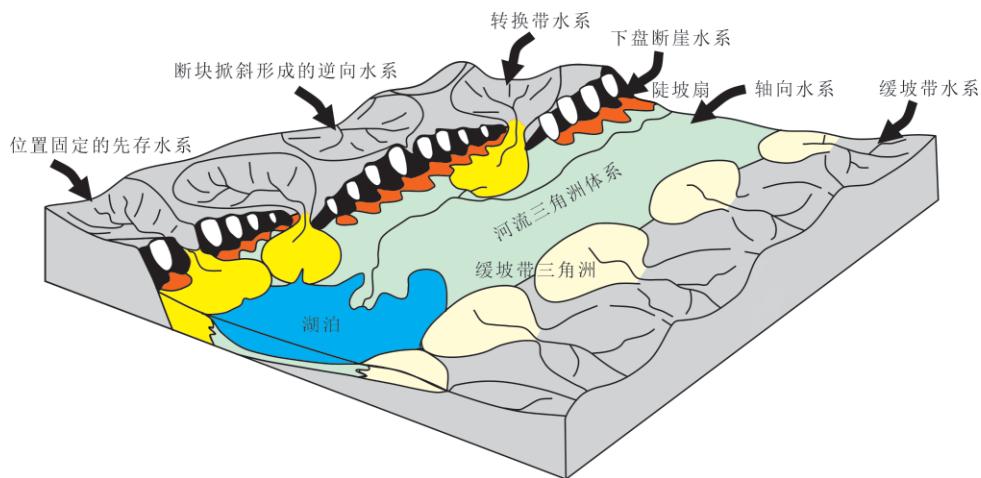


图2 典型箕状断陷湖盆沉积体系和沉积物分散路径示意图^[10]

Fig. 2 The depositional systems and sediment dispersal patterns in a typical continental rift basin^[10]

断陷盆地的演化过程受控于盆缘断层的生长连接过程,可分为初始断陷期、强烈断陷期、断-拗转换期及拗陷沉降期4个阶段^[13-14]。从盆地供源角度来看,断陷盆地的沉积动力学配置主体受长轴向水系和短轴山前水系交互的影响^[15-17](图2)。显然,对上述多种控制因素的耦合分析才能够有效促进对陆相断陷盆地层序构型及砂体分布规律的认识。

3.1 盆地初始断陷期

陆相断陷盆地初始断陷期,边界断裂已具雏形,内部先存基底断层强烈伸展,形成众多规模较小且彼此分隔的、洼-隆相间的构造格局,多以不对称型半地堑盆地结构为特征,盆地内发育多个沉积中心(图3a)。此阶段沉积物主要来源于盆外水系或断层上升盘风化剥蚀,沉积物搬运通道主体继承断陷作用前的先存水

系,但受局部断层破裂和褶皱生长作用相关地貌变化的控制,河流体系可发生局部改道或合并(图4)。盆内水系以短距离、季节性的山间河流为主,发育快速沉积充填,沉积了厚度变化大、近源粗粒的冲积扇、分支河流体系和扇三角洲等,季节性湖泊范围局限且彼此不连通(图3a)。

此阶段盆地地层保存程度相对较差,部分小断层在后续断裂演化过程中停止活动,其形成的小规模沉积中心若靠近盆地控边断层,则多被埋藏保存下来;若靠近断层上升盘的顶部,在后续断陷过程中则多被抬升和下切改造。由于沉积物供给量差异,以及断陷地貌的差异风化作用,每个沉积中心的层序充填特征差异较大。层序底界面多为区域性的不整合界面,受后期断层快速活动控制,断层上升盘层顶界面多为角度不整合或平行不整合。控边断层活动速率的逐渐

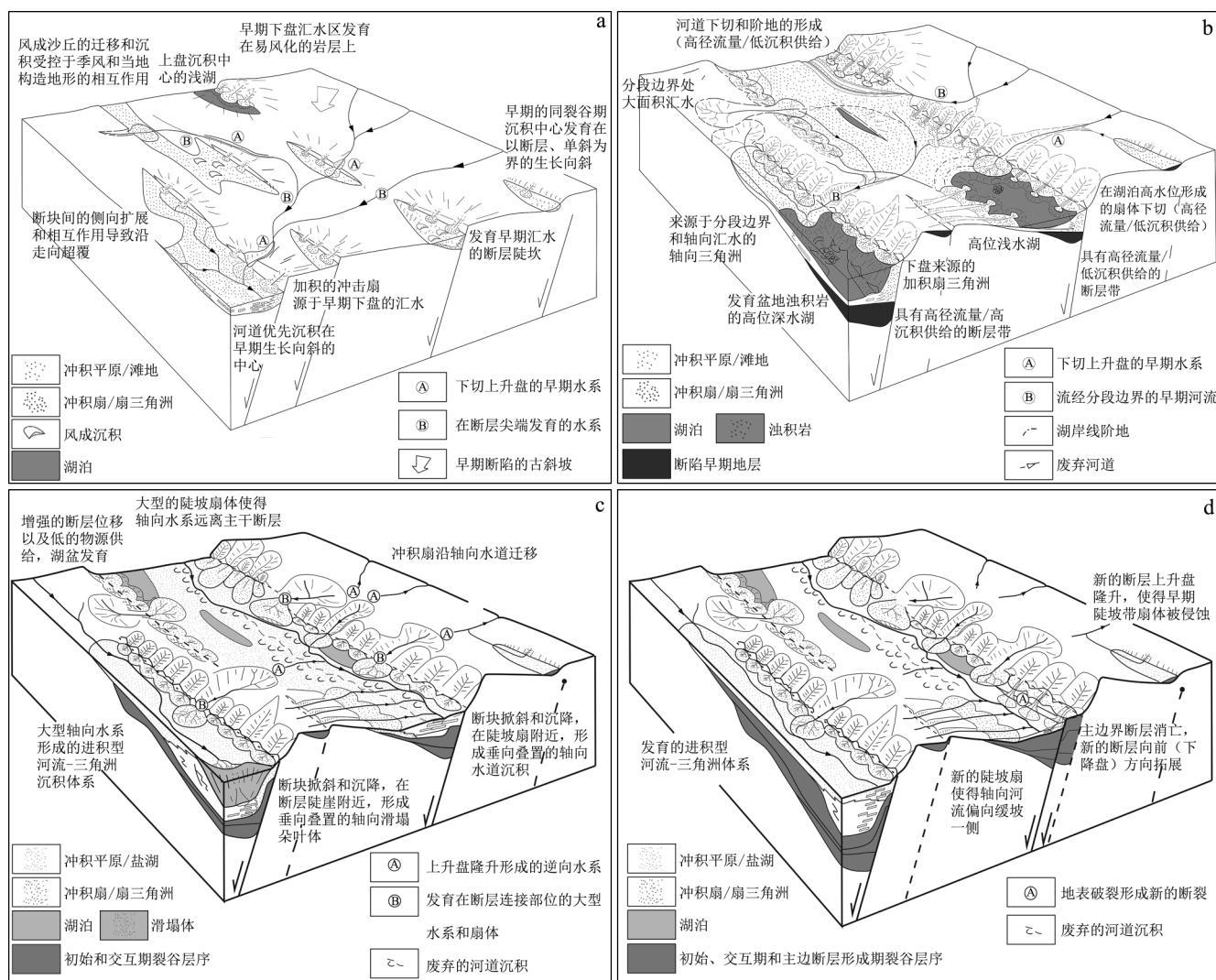


图3 断层演化控制下陆相断陷盆地的构造-沉积特征^[2]

Fig. 3 Tectonic-sedimentary characteristics of continental rift basins controlled by fault evolution^[2]

a. 断层初始期; b. 断层生长连接期; c. 断层断距增长期; d. 断层停滞消亡期

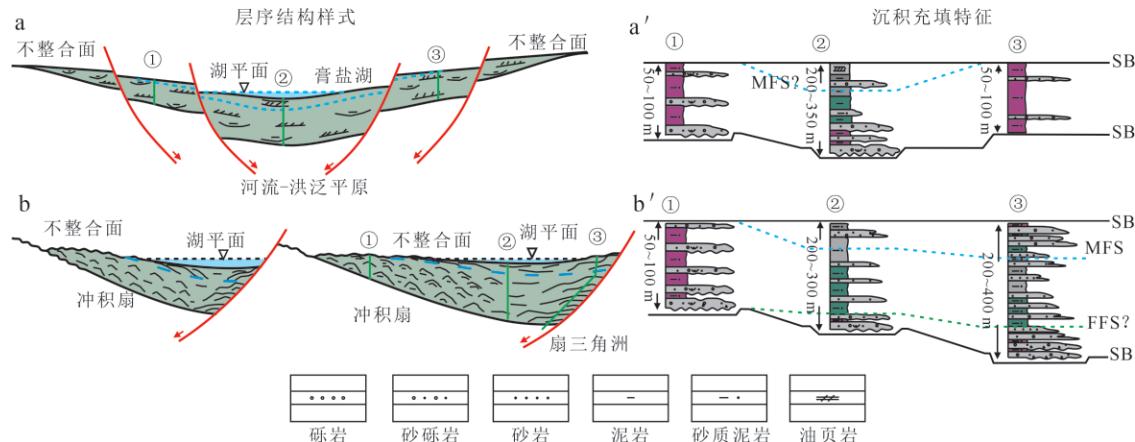


图4 断陷湖盆初始断陷期层序结构样式及沉积充填特征

Fig. 4 Sequence structure patterns and sedimentary filling characteristics of continental rift basins during the initial rifting stage

a, a': 补偿对称断隆型; b, b': 过补偿不对称断隆型

增加使湖平面缓慢上升,层序内部多发育加积型准层序垂向叠加样式(图4)。

3.2 盆地强烈断陷期

盆地强烈断陷早期,在断层段的生长连接过程中,小规模断层的侧向生长和连接最终形成了主断层,在其控制下发育了半地堑型断陷盆地,导致先前发育且彼此独立的小规模沉积中心合并成规模较大的沉积中心(图3b)。

盆地边界断层的形成及强烈的差异伸展活动决定了盆地的层序结构样式。在半地堑型断陷盆地内部,依照盆缘断层与盆内断层形态组合,可划分出顺向多级断阶型、反向多级断阶型和断裂坡折型3种断陷盆地结构,并对应发育3种不同的层序结构样式(图5)。3种层序结构样式整体呈现不规则楔状特征,沉积和沉降中心多位于边界断层下降盘,盆缘断裂陡坡带层序内部充填粗碎屑、快速堆积的近岸水下扇及扇三角洲沉积,向盆地内部延伸距离短,相变剧烈;体系域多呈结构不对称型,垂向多呈退积和加积型准层序叠置(图5)。断裂坡折带处多发育次级沉降中心,坡折带下倾方向可容纳空间增大,有利于发育低位楔状体,具有短轴向延伸距离远、砂体连通性强等特点。受盆地差异沉降影响,缓坡带常遭受剥蚀,可缺少层序早期低位域地层,层序界面多见下切谷,或呈轻微削蚀或出现微角度不整合(图5)。

强烈断陷晚期,控盆断裂以及盆内次级断裂活动强度逐渐减弱,断层断距和延伸距离缓慢增大。在沉积充填作用下,盆地内部由强烈断陷早期形成的洼隆相间地貌被逐渐填平,形成整一的沉积中心(图3c)。基于沉积物供给差异,可形成补偿坡折型和欠补偿坡

折型两种层序结构(图6)。补偿坡折型层序结构样式整体呈现较规则的楔状特征,湖盆陡坡带常以粗碎屑、快速堆积的近岸水下扇及扇三角洲沉积为主,向盆地延伸距离短,呈楔状或叠瓦状结构,构成该层序的沉积和沉降中心(图6a)。补偿坡折型层序体系域呈不对称结构,各体系域内部以多期退积、加积型准层序为主,高位域中晚期可见进积型准层序组垂向叠置。缓坡带三角洲常沿古地形坡折分布,坡折带之上发育下切谷,坡折带下倾端发育低位扇体。湖盆陡坡带与缓坡带之间的深洼区常见大量低位域早期及高位域晚期形成的盆底扇沉积,湖侵域及高位域早期常形成厚层暗色泥岩或油页岩。欠补偿断坡层序结构呈明显楔状特征,沉积沉降中心位于边界断层下降盘(图6b)。陡坡带发育小型近岸水下扇沉积,各体系域内部常常由多期退积型准层序组垂向叠置,各准层序组之间以半深湖泥岩相分隔,仅在高位域晚期出现进积型准层序组叠置。由于缺乏陆源供给,缓坡带仅在高位域中晚期发育小型三角洲沉积,低位域、湖侵域以及盆内大部分地区以深湖-半深湖暗色泥岩、油页岩沉积为主,局部湖湾区域可见滩坝沉积(图6)。

3.3 盆地断-拗转换期

盆地断-拗转换期,盆缘断裂活动强度较强烈断陷期弱,盆内大部分断层已停止活动,仅少量断层活动造成沉积体系配置发生变化(图3d)。此阶段,沉积物源以盆外长轴向物源体系为主,侧缘沉积物仍来源于断层上升盘剥蚀作用,沉积物搬运通道以长轴向河道及侧向断面下切沟谷为主,盆内沉积体系以长轴向河流-三角洲沉积、侧向三角洲及扇三角洲沉积为主。

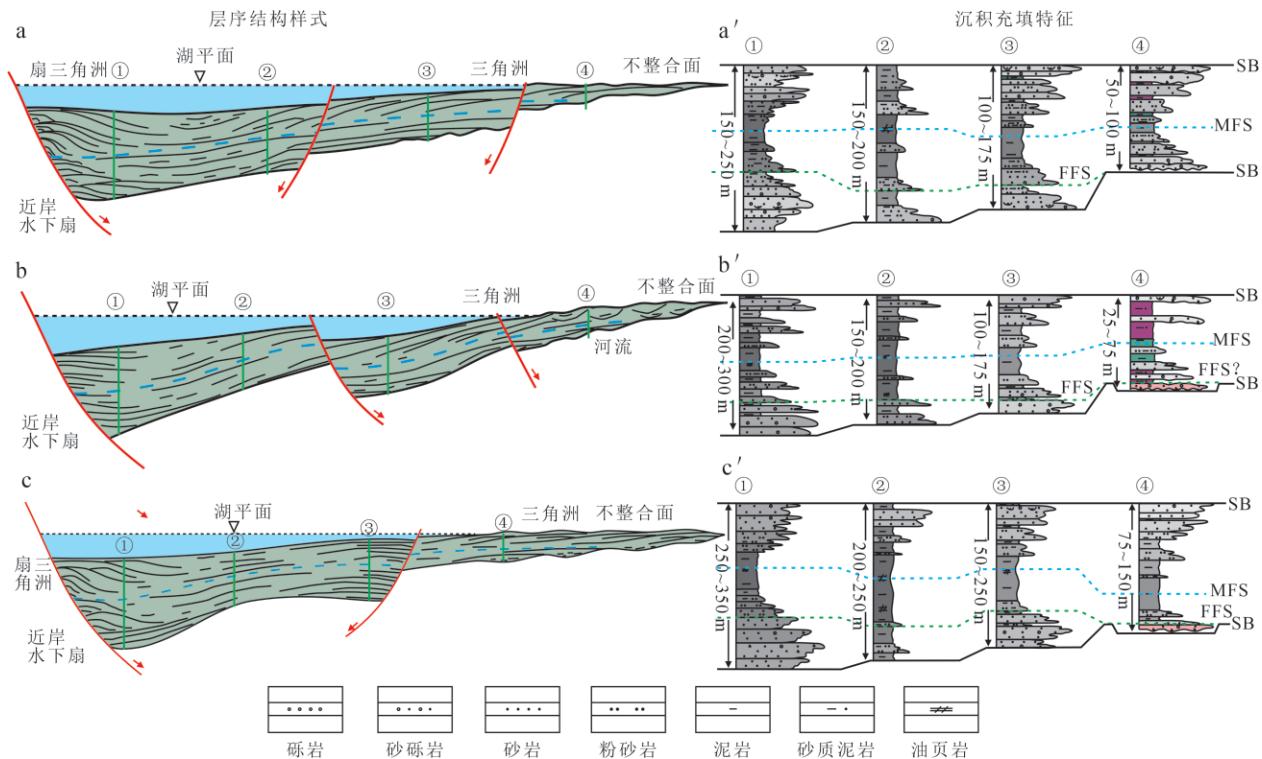


图5 断陷湖盆强烈断陷早期层序结构样式及沉积充填特征

Fig. 5 Sequence structure patterns and sedimentary filling characteristics of continental rift basins during the early strong rifting stage
 a, a'. 补偿顺向多级断阶型; b, b'. 欠补偿反向多级断阶型; c, c'. 补偿断裂坡折型

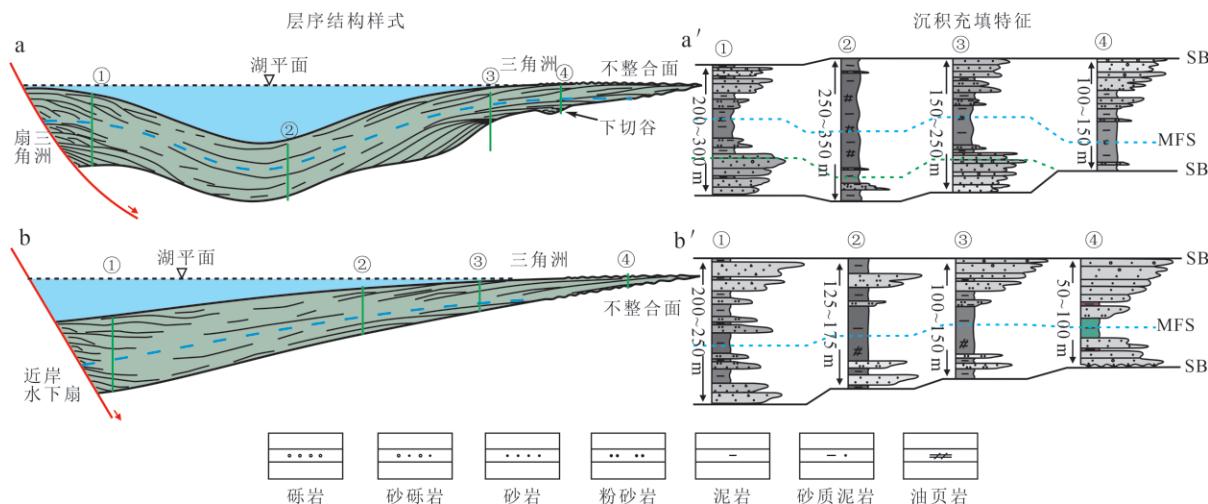


图6 断陷湖盆强烈断陷晚期层序结构样式及沉积充填特征

Fig. 6 Sequence structure patterns and sedimentary filling characteristics of continental rift basins during the late strong rifting stage
 a, a'. 补偿坡折型; b, b'. 欠补偿断坡型

由于可容纳空间急剧缩小,湖相区仅分布于湖盆陡坡带等处。受盆地差异沉降和物源供给影响,可细分为断裂坡折型和断裂弯折型两种层序结构(图7)。断裂坡折型层序结构多发育于盆地回返初期,可容纳空间迅速减小,物源供给相对增强,盆地处于过补偿状态,层序厚度虽然不大但呈现满盆富砂特征(图7a)。湖盆陡坡带以扇三角洲沉积为主,各体系域内准层序

组为进积、加积型垂向叠置,呈现出叠瓦状结构和楔状外形。缓坡带发育向湖盆内低角度强烈进积的辫状河三角洲沉积,垂向上为多个进积型准层序组相互叠置,砂体横向连通性强。断裂弯折型层序结构多是由盆地差异沉降、在斜坡内带沉降速率增大,导致地层弯折形成的,层序厚度向斜坡带上倾端逐渐减薄(图7b)。在盆地回返末期,可容纳空间进一步缩小,地貌差异减

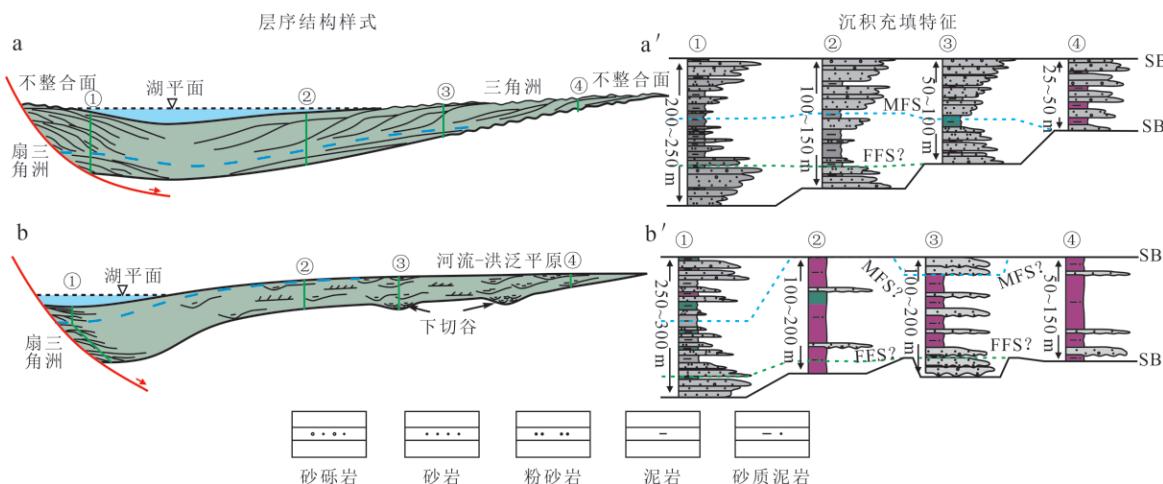


图7 断陷湖盆断-拗转换期层序结构样式及沉积充填特征

Fig. 7 Sequence structure patterns and sedimentary filling characteristics of continental rift basins during the rifting-to-depression transition stage
a, a'. 过补偿断裂弯折型; b, b'. 近补偿断裂弯折型

小,沉积物供给能力减弱,盆地内河流相广布,仅在湖盆陡坡带等局部区域发育小型近源加积型扇三角洲,湖盆缓坡带形成厚层广布泥质沉积,粗碎屑多分布于物源注入口附近区域。该层序结构与下伏地层多呈轻微角度不整合接触,后期抬升剥蚀造成与上覆地层角度不整合接触(图7)。

3.4 盆地拗陷沉降期

在湖盆拗陷沉降期,断裂活动几乎停止,湖盆整体处于过补偿状态,以河流-浅水三角洲沉积体系发育为特征。由于湖盆整体以构造热沉降为主,地貌整体趋缓,关键层序界面在地震剖面上常缺乏显著的地震反射终止特征。

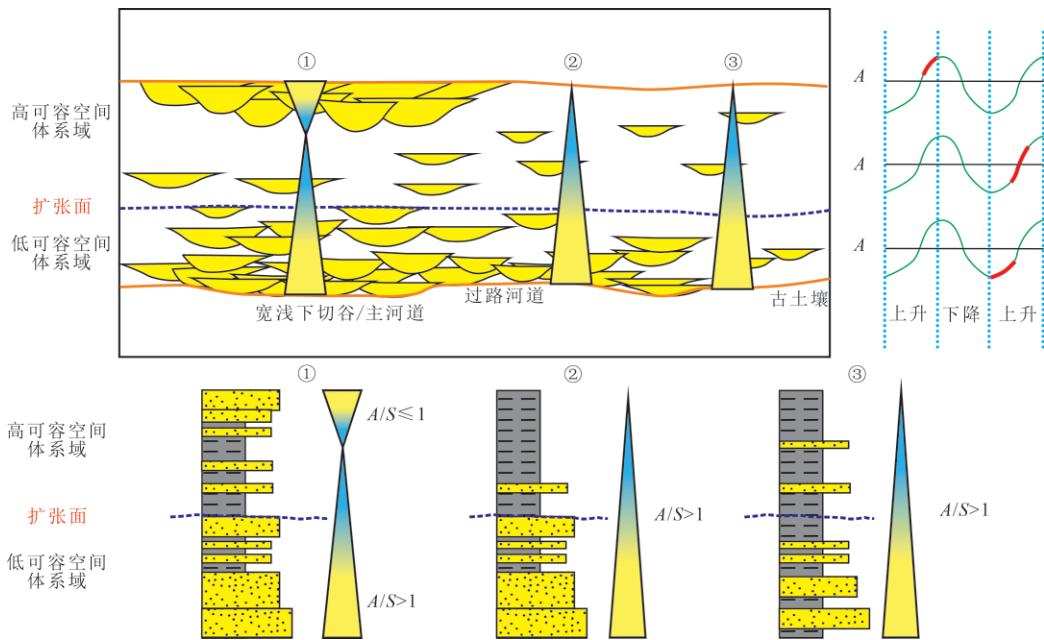
研究表明,该时期大部分湖盆已处于萎缩阶段,通常不太发育常态化湖泊;河流、浅水三角洲和季节性浅水湖泊已成为该时期主要沉积相类型^[18]。大部分远离滨岸的河流层序受控于构造沉降与气候变化,未必与湖平面变化保持良好的一致性^[19-20]。因此,传统意义上基于湖平面变化的层序研究方法并不完全适用于断陷湖盆拗陷期及其之后构造演化阶段的层序地层学研究。因此,考虑沉积环境特点开展层序地层学研究显得尤为重要。

针对拗陷期大型断陷湖盆滨浅湖相广泛发育的情况,可依据坡折带是否发育进行体系域二分或三分研究^[6]。在河流与三角洲主导的沉积层序样式中,低位和高位体系域河流相较为发育,湖侵体系域发育浅水三角洲及浅水湖泊相,因此可借助相关地质与地球物理资料识别出首次和最大湖泛面,进行体系域三分研究^[6]。

在河流体系主导的沉积层序样式研究中,应当充分考虑可容空间(A)与沉积物供给量(S)变化关系(即 A/S 值)^[21]。在基准面明显下降阶段(A/S 为负值),盆地沉积区以沉积过路河道、下切河道及宽浅下切河谷为主;在基准面初始上升阶段,可容空间相对较小(低可容空间体系域, $A/S \leq 1$),垂向上主河道区域含砂率较高,表现为河道垂向叠置、侧向拼接特征;在远离主河道的泛滥平原区域,垂向上含砂率相对较低,表现为低砂体叠置样式(图8)。在基准面上升阶段(高可容空间体系域),可容空间相对较大,存在两种不同的地层叠置样式:①基准面上升速率增加,河流供源能力相对较弱($A/S > 1$),岩性组合表现为低砂体叠置样式(图8);②基准面上升速率减缓,河流供源较为充足($A/S \leq 1$),岩性组合表现为高砂体叠置样式^[21]。

3.5 断陷湖盆层序结构样式与砂体分布主控因素

陆相断陷盆地同沉积断层活动和不同阶段构造演化过程是控制层序结构、沉积充填样式和砂体分布的主要因素。断陷湖盆构造活动包含断层幕式运动、构造掀斜和差异构造沉降等方面^[14,22-25]。在某些湖盆中,湖平面波动幅度和频率要比海相盆地更为显著。高频湖平面波动叠加构造沉降是产生三级或者四级层序边界的主要驱动力^[3,25]。尽管湖平面的波动能够在一定程度上对层序结构样式产生影响,但在中长期时间尺度上,构造活动性盆地中受构造作用控制的可容纳空间及其沉积物供给这两个因素对盆地层序充填的影响是最为主要的^[26-27]。陆相断陷盆地中强烈活动的各级断层是新增可容纳空间的主要营造者,不

图8 断陷湖盆拗陷期可容空间变化的河流相层序叠置样式^[21]Fig. 8 Fluvial sequence superimposing patterns in continental rift basins with changing accommodation space during the post-rifting depression stage^[21]

仅控制着层序内部体系域的发育样式和沉积体系类型,还控制着湖平面升降变化及砂体分散范围,体现在地层厚度及分布、沉积体系和砂体空间配置差异性、层序结构完整性和对称性等方面。

在不同构造演化阶段,不同类型沉积物及其组合特征反映了特定的盆地结构和盆地演化阶段特征。断陷湖盆层序结构、沉积物组合、叠置样式和砂体分布主要受控于构造沉降和沉积物供给配置关系,对应于不同的可容纳空间与沉积物供给量比值(A/S)^[28-30],进而梳理出以下4类9种层序充填样式(表1)。

表1 陆相断陷盆地层序结构特征对比

Table 1 Characteristic comparison of sequence structure in continental rift basins

盆地演化阶段	砂体类型	控制因素	层序结构
初始裂陷	河流、辫状河	A 大, S 大, $A/S \approx 1$	补偿对称断隆型
	三角洲	A 中, S 大, $A/S \leq 1$	过补偿不对称断隆型
强烈断陷	辫状河三角洲、下切谷、河流	A 大, S 大, $A/S \leq 1$	补偿顺向多级断阶型
		A 大, S 中, $A/S \geq 1$	欠补偿反向多级断阶型
稳定断陷	辫状河三角洲	A 中, S 中, $A/S \approx 1$	补偿断裂坡折型
	扇三角洲、盆底扇、下切谷	A 中, S 小, $A/S > 1$	欠补偿坡折型
	河流、辫状河	A 中, S 大, $A/S < 1$	过补偿断裂弯折型
回返	三角洲、扇三角洲	A 中, S 小, $A/S \leq 1$	补偿断裂弯折型

注: A 为可容空间; S 为沉积物供给量。

4 断陷湖盆层序研究方法与实例

4.1 断陷湖盆层序研究方法

1) 井-震结合层序分析方法

通常情况下,地质学家常采用多种类型资料相结合的方法对研究区沉积序列进行层序地层的综合研究。如何将覆盖区钻测井层序划分方案与地震层序划分方案进行对比,同时赋予地震层序地质年代意义是一项十分重要的基础工作。在利用古生物学、同位素年代学、古地磁学及旋回地层学等方法确定钻测井资料所划分的沉积层序地质年代之后^[31],通常采用垂直地震剖面(VSP)和人工合成地震记录对已划分的地震层序进行地质年代标定,建立单井和多井钻测井资料沉积层序与地震层序的对应关系,并最终厘清地震层序对应的绝对地层年代。多年实践证明,井-震结合开展层序分析是断陷湖盆层序地层学最为有效的研究方法。

2) 高频层序划分

天文轨道驱动所引起的气候变化及海(湖)平面变化是形成高频层序重要的成因机制^[32-33]。在米氏旋回周期理论体系下,四级层序可能受控于405 kyr长偏心率周期,五级层序可能受控于100 kyr短偏心率周期,六级层序可能受控于40 kyr斜率与20 kyr岁差周

期^[32]。由于断陷湖盆的湖平面变化受到构造和气候的双重控制,在很多情况下连续的河湖相地层记录了完整的气候演变及天文旋回的信息,因此能够通过旋回地层学方法对高频层序单元进行识别和划分。测井曲线载有连续的地层沉积旋回信息,对预处理(插值、去趋势、去极值)后的测井数据进行频谱分析,识别地层中天文轨道周期信号,再通过滤波方法划分不同级别的层序。上述研究方法在中国东部中-新生代断陷湖盆研究中取得了显著成效^[34-35]。

此外,小波变换、时频分析及INPEFA等多种技术手段在关键层序界面识别及高频层序划分方面亦具有一定的辅助作用,并在陆相断陷湖盆层序研究中得到了广泛应用^[36-37]。

3) 湖平面变化研究方法

断陷湖盆相对湖平面变化受控于构造沉降和气候变化,对于阐明可容空间变化特征具有重要意义。湖平面变化重建方法包括地球物理学、地球化学、古生物学及旋回地层学等多种理论方法。其中,地球物理学方法最为常见,主要基于地震反射中的滨岸上超点、滨线迁移轨迹确定相对湖平面变化^[38-39];地球化学方法主要基于稳定同位素、总有机碳及主微量元素,恢复相对湖平面变化趋势;古生物学方法主要利用藻类、介形虫及遗迹化石估算古水深,进而恢复相对湖平面变化;旋回地层学方法主要是基于旋回厚度变化建立断陷湖盆的Fischer图解^[40],进而确定可容空间垂向变化特征。在实际研究过程中,常常将地球物理学、地球化学、古生物学和旋回地层学等多种方法结合起来,重建断陷湖盆相对湖平面变化^[41-42]。

4.2 渤海湾盆地层序实例分析

渤海湾盆地中新生代发育典型陆相断陷盆地,可根据盆地边界断层空间组合形态和裂陷活动期次构建构造-层序-沉积响应模式^[6,14,43-56]。下文综合解剖渤海湾盆地典型断陷湖盆相关层序-沉积发育特征。

1) 断陷湖盆陡坡带——沙垒田凸起西段沙河街组三段层序解剖

渤海湾盆地海域沙垒田凸起西段沙河街组三段(沙三段)沉积时期发育完整的受断裂陡坡带控制的层序格架和源-汇系统。基于最新的岩心、测井和三维地震资料,精细刻画了沙垒田凸起西段沙三段(E_s^3)层序地层格架下源-汇系统基本特征及其耦合关系^[57-58](图9)。

沙垒田凸起西段母岩区主要岩性为混合花岗岩^[57-58]。根据沙三段古地貌恢复,可将母岩区划分为4个三级流域单元并定量拾取垂向集水高差(R)与流域

面积(A)参数,拾取古沟谷与断槽物源通道(V_1-V_4)的分布及规模,应用地震沉积学精细刻画沙三段层序单元内的扇三角洲(A—D)沉积时空展布及演化(图9a—c)。一个完整裂陷幕内扇三角洲发育规模受控于基准面变化旋回,在基准面下降阶段(E_s^{3L}),扇体快速向盆地方向推进,范围扩大,发育较大厚度、中等规模进积叠置型富砂砾扇三角洲(图9a);在基准面快速上升阶段(E_s^{3M}),扇体向物源方向迁移、萎缩,发育厚度较薄、小规模退积的孤立型富泥扇三角洲(图9b);在基准面缓慢上升至下降阶段(E_s^{3U}),扇体再次向盆地中心扩张、迁移,沉积范围明显增大,发育中等厚度、大规模进积叠置型富砂扇三角洲(图9c)。陡坡带完整裂陷幕内源-汇系统各要素关系研究表明^[54,58],流域单元面积与垂向集水高差是沉积扇体发育规模的主控因素,进而构建了断裂陡坡带控制下的花岗变质岩-古沟谷或断槽与断面组合的物源通道-近源粗粒扇三角洲-浊积扇-湖泊体系耦合的沉积层序模式(图9d)。

2) 断陷湖盆缓坡带——沾化凹陷三合村洼陷沙三段层序解剖

沾化凹陷三合村洼陷缓坡带沙三段作为重要含油气层段,勘探潜力巨大,在三级层序地层格架下表征其物源体系、物源通道与沉积体系,利用地震属性与地层切片精细表征“源-汇”配置及时空演化关系,可综合指导有利勘探区带预测(图10)。

渤海湾盆地沾化凹陷三合村洼陷缓坡带古近系沙三段(E_s^3)自下而上可划分为3个三级层序,即 E_s^{3L} 、 E_s^{3M} 和 E_s^{3U} ^[52-53]。地震沉积学分析表明,沙三段物源体系顺陈家庄凸起南部的6个下切谷搬运,其中Ⅰ和Ⅱ号沟槽(宽深比大)处于西南单斜带,Ⅲ—Ⅳ号沟谷(宽深比小)处于南部坡折带(图10a);沙三段沉积体系包括 E_s^{3L} 层序(湖平面整体下降)的中等规模富砂砾型扇三角洲-浊积岩沉积体系、 E_s^{3M} 层序(湖平面整体上升)的小规模富泥型扇三角洲-浊积岩、 E_s^{3U} 层序(湖平面整体明显下降)的大规模砂泥混合型扇三角洲体系;沉积体系规模和粒度受控于湖平面升降与地形坡度。湖平面下降阶段形成的扇体规模较大,上升阶段形成的扇体规模较小;西南单斜带地形相对较缓($2^\circ \sim 3^\circ$),相对富砾;南部坡折带地形较陡(约 5°),相对富砂(图10)。总体上,缓坡带地貌特征、物源供给及湖平面变化共同控制了层序地层样式和沉积砂体展布特征。

4.3 珠江口盆地陆丰凹陷层序实例分析

陆丰凹陷位于珠江口盆地珠江东北部,南北分别被东沙隆起和北部隆起带所围限,东西两侧分别

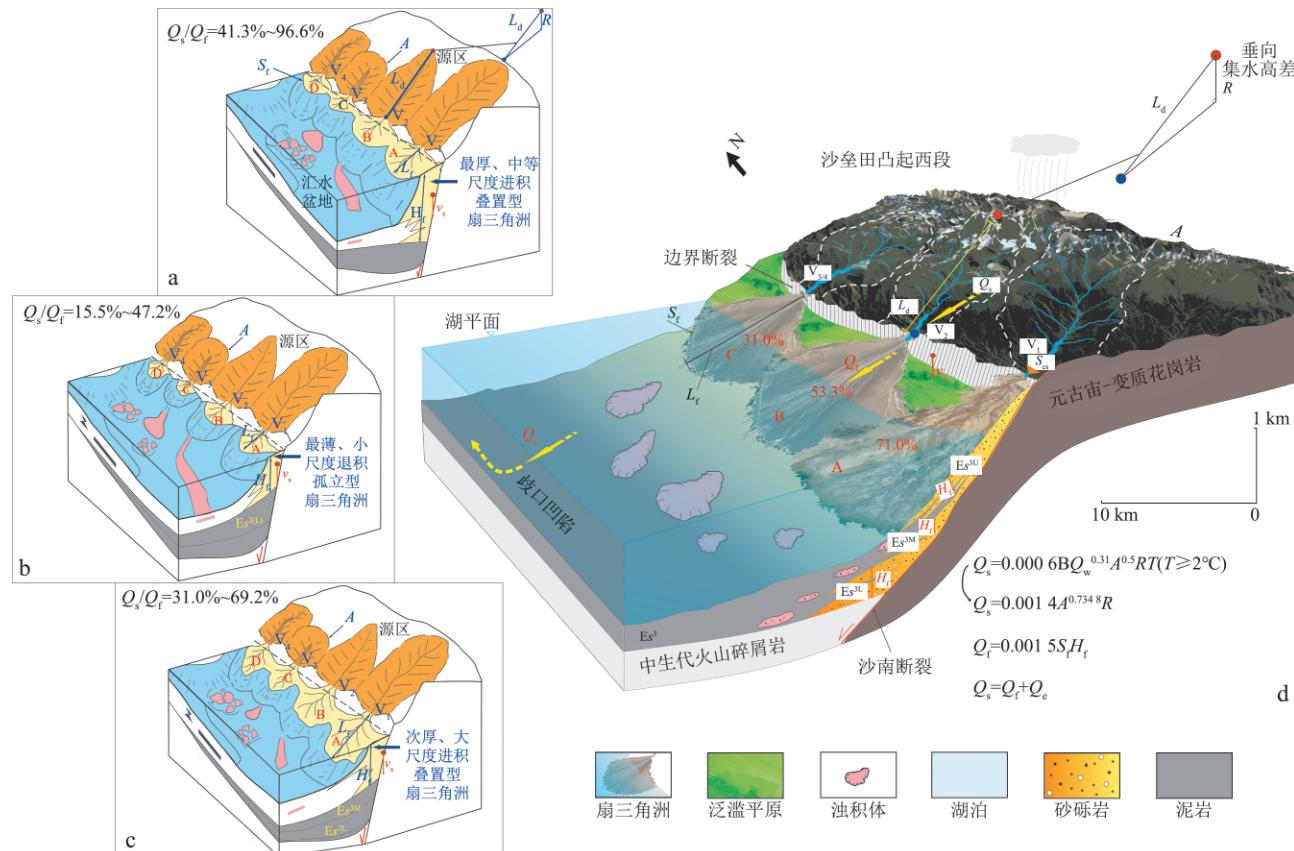


图9 渤海湾盆地沙垒田凸起西段沙三段陡坡带完整裂陷幕不同层序单元源-汇配置关系(a—c, Es^{3L} — Es^{3U})及耦合沉积层序模式(d)

Fig. 9 Source-to-sink configurations of different sequence units (a—c, Es^{3L} — Es^{3U}) and coupling sedimentary sequence model (d) for the whole rifting episode on a steep slope in the third member of Eocene Shahejie Formation, western Shahejie high, Bohai Bay Basin
 Q_s . 总沉积物通量; Q_f . 扇三角洲沉积物通量; Q_w . 水流通量; Q_e . 湖泊深部沉积通量; B . 人类世冰期剥蚀因子; T . 汇水盆地平均温度; A . 流域面积;
 L_d . 汇水盆地长度; R . 汇水盆地落差; v_s . 构造沉降速率; $A/B/C/D$. 扇体编号; H_f . 扇体厚度; S_f . 地形坡度; L_f . 扇长度; V_1 — V_4 . 古沟谷与断槽物源通道

与陆丰中低凸起和惠陆低凸起相接。由于陆丰中低凸起和惠陆低凸起分别向陆丰凹陷内部延伸,将凹陷分隔为陆丰凹陷南部(陆丰南)和北部(陆丰北)两部分。作为典型的陆相断陷湖盆沉积层序,陆丰凹陷古近系文昌组(47.8~38.0 Ma)是油气勘探的重点层段。通过三维地震和测录井资料,建立了陆丰凹陷文昌组地震层序与钻测井地质特征统一的层序界面。文昌组底、顶由地震标志层 T_g 和 T_s^0 界面所限定,内部 T_g^s , T_g^4 , T_g^3 和 T_g^2 界面将文昌组划分为5个三级层序(WSQ₁—WSQ₅)^[55-56]。根据不整合面的分布、主干断裂的活动、剖面构造样式、洼陷结构和层序厚度等特征,可将文昌组的构造演化划分为初始断陷(WSQ₁₋₂)、强烈断陷(WSQ₃₋₄)和断陷晚期(WSQ₅)等3个阶段。在不同构造演化阶段,断裂活动控制形成了独特的层序结构样式(图11)。

1) 初始断陷期层序结构(WSQ₁₋₂)

初始断陷期发育沉积厚度较小、剖面呈楔状分布

的WSQ₁和WSQ₂两个三级层序,被地震反射标志层 T_g 和 T_s^4 界面所围限,对应断陷演化的初始裂陷阶段。

初始裂陷早期 WSQ₁ 沉积时期(图11),湖盆规模小、水体浅并呈孤立状,气候较为干燥,被冲积平原、扇三角洲砂砾岩及火山物质快速充填,薄层泥岩多呈红褐色,整体呈现过补偿盆地特征(图12)。

初始断陷晚期湖盆沉积范围迅速扩大,发育 WSQ₂ 层序;层序顶界面可见削截和顶超现象,层序底界面缓坡带地震上超和下超较为明显,WSQ₂ 内地震反射同相轴连续性和成层性明显比 WSQ₁ 好(图11),以大面积的辫状河三角洲(缓坡带)-滨浅湖(湖中心)沉积为主,而深湖沉积局限或者缺失(图11,图12)。在地震剖面上,陡坡带主要发育楔状前积地震反射,缓坡带则表现为S型前积地震反射(图11)。岩性主要为含砾粗砂岩、中砂岩和粉砂岩夹薄层灰色泥岩,测井曲线多表现为箱形或钟形(图12)。尽管湖盆面积扩大,但物源供给依然能够匹配可容纳空间的

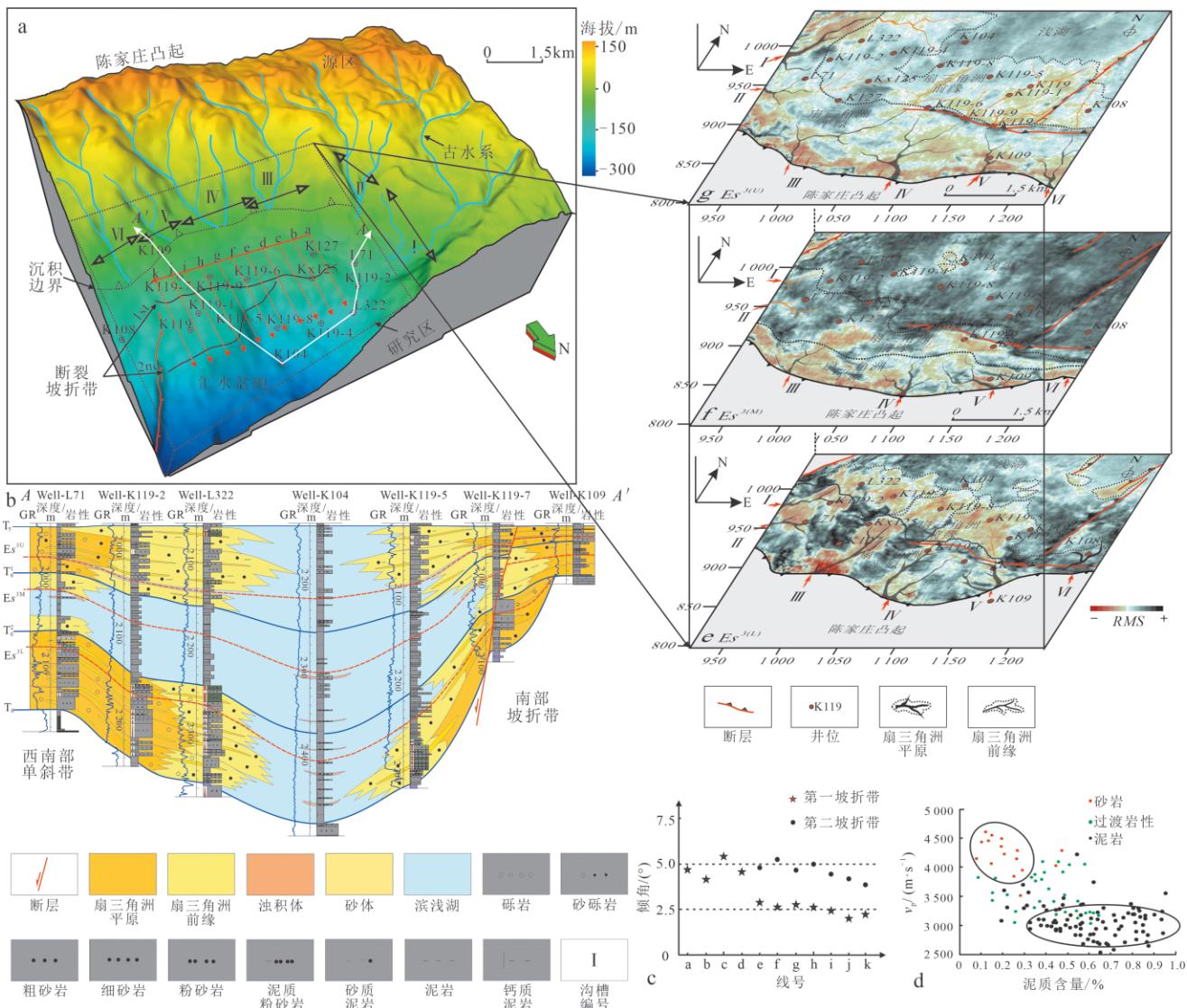


图10 渤海湾盆地沾化凹陷三合村洼陷缓坡带沙三段沉积古地貌格局(a)、西南部单斜带至南部坡折带连井地层对比剖面(b)、地形坡折(c)与岩-电关系(d)统计及 $E s^{3L}$ 至 $E s^{3U}$ 三级层序内富砂砾型(e)-富泥型(f)-砂、泥型(g)扇体均方根振幅地层切片特征
Fig. 10 Palaeogeomorphology of the third member of Shahejie Formation ($E s^3$) in the southern slope (a), stratigraphic correlation from the southwestern gentle slope area to the southern slope break area (b), slope break statistics (c) and lithology-electrical properly relationship statistics (d) in the $E s^3$, RMS slices showing gravel- or sand-rich fan-delta in $E s^{3L}$ (e), mud-rich fan-deltas in $E s^{3M}$ (f), and mixed sand-mud fan-deltas in $E s^{3U}$ (g), Sanhecun low, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

增长速率,因此湖盆处于平衡补偿状态。 WSQ_2 低位和湖侵体系域岩性为互层的砂岩和泥岩,多呈加积型地层叠置样式,测井曲线以箱形或者钟形为主;高位体系域表现为多个进积型地层叠置样式。整个层序垂向上为不对称结构,最大湖泛面位于层序的中、上部(图11,图12)。

2) 强烈断陷期层序结构(WSQ_{3-4})

强烈断陷期发育 WSQ_3 和 WSQ_4 层序,该时期主断层发生翘倾和旋转并控制形成多个滚动或者复式半地堑结构,断层下降盘的楔形地震反射最为明显(图12)。

WSQ_3 和 WSQ_4 的层序厚度陡然增大(可达800 m)^[55-56],层序顶界面可见削截和顶超终止关系,盆地缓坡带地层上超明显(图11)。该时期湖盆面积达到最大,湖盆进入深水环境,三角洲沉积规模受到抑制。在边界断层下降盘发育以帚状地震反射结构为特征的近岸水下扇或扇三角洲体系,因水体较深,整体表现为沉积厚度大、延伸距离短的特征;湖盆中心发育厚层泥岩夹重力流成因的砂岩或砾岩(图12)。该阶段洼陷沉降幅度最大,形成较大的可容空间,发育大套高有机碳含量(TOC)的泥岩,物源供给速率小于可容纳空间的增长速率,湖盆充填表现为欠补偿特征。

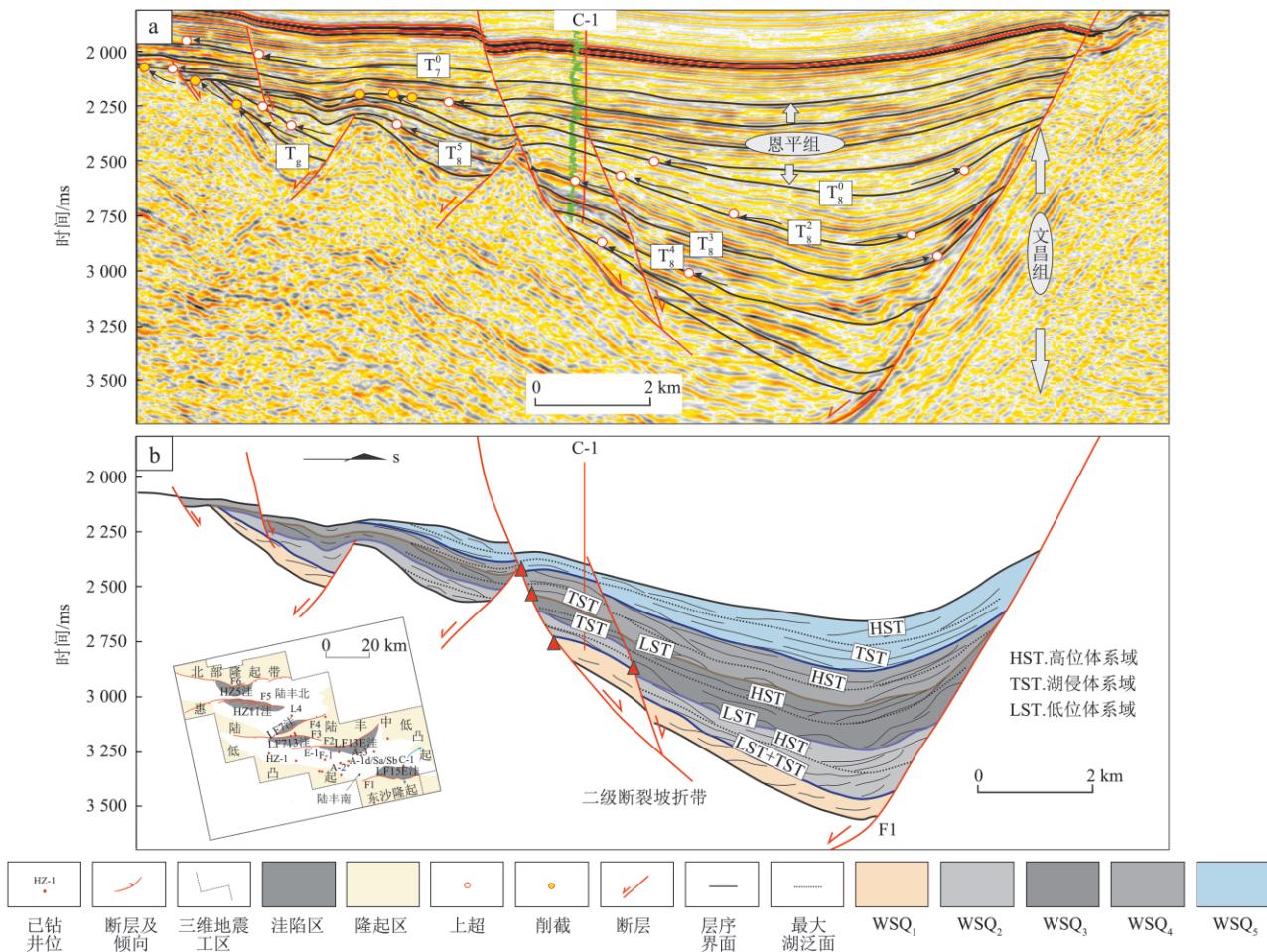


图11 珠江口盆地陆丰凹陷南部文昌组地震反射终止关系(a)及体系域识别(b)

Fig. 11 Terminations of seismic reflections (a) and identification of systems tracts (b), Wenchang Formation, southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin

WSQ₃和WSQ₄整个层序垂向上为不对称结构,最大湖泛面位于层序上部(图11)。低位体系域表现为S型前积地震反射,湖侵体系域发育厚层的深湖泥岩夹滑塌浊积扇,高位体系域多呈进积型准层序组叠置样式(图12)。

3)弱断陷期层序结构(WSQ₅)

弱断陷期对应发育层序 WSQ₅，沉积中心开始远离断层边界，盆地内部沉积地层厚度分布开始逐渐均匀，或者表现为披覆沉积。边界断层的活动性弱，差异沉降和倾斜作用也减弱。在珠琼二幕构造运动控制下，层序顶界面 T₈ 反射层表现出大范围的削截现象（图 11）。

WSQ₅层序内部以辫状河三角洲—滨浅湖沉积组合为特征(图12)。该时期湖盆水体较浅,三角洲能够推进到湖盆中心地带。在地震剖面上,湖盆长轴和缓坡带均发育斜交型地震前积反射(图11)。物源供给速率开始超过可容空间的增长速率,湖盆总体表现为过补偿状态;随着沉积物的不断供给,最后湖盆被填平,

标志着一次裂陷幕充填的结束。WSQ₅层序低位体系域不太发育,湖侵体系域为退积型的泥岩夹薄层砂岩沉积,高位体系域表现为厚层的砂岩夹薄层红褐色泥岩,测井曲线以箱形或者漏斗形为主,表现为多个进积型叠置样式。整个层序垂向上呈不对称结构,最大湖泛面位于层序的下部(图 11,图 12)。

5 讨论与结论

5.1 讨论

1) 层序地层学的标准化

自 Sloss 等(1949)提出以不整合面为边界的层序概念以后,沉积层序概念被广泛使用和拓展,形成了多种层序地层学理论和层序模式。由于层序边界设定和旋回性控制因素差异,造成不同类型盆地研究的层序地层学理论和模型存在明显差异,这一定程度影响了

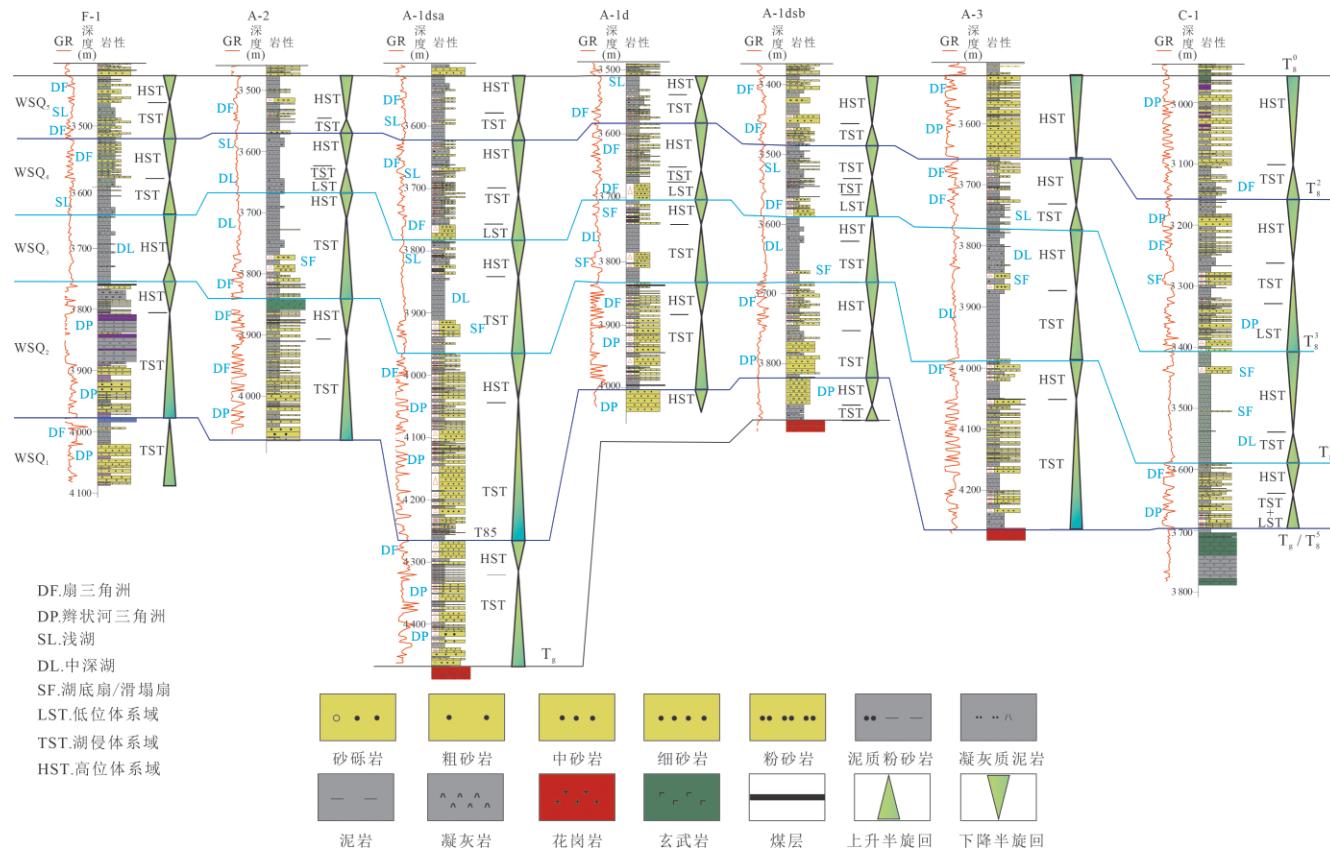


图12 珠江口盆地陆丰凹陷南部文昌组多井对比及层序结构演化

Fig. 12 The stratigraphic correlation and associated sequence architectures in the Wenchang Formation, southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin

层序地层学学术交流和成果应用,因此,有学者提出了层序地层学标准化的建议^[4,19,59-60]。

在 Mitchum(1977)定义沉积层序之后不久,人们试图根据大陆架边缘或滨线处海平面下降与构造沉降的相对幅度,区分Ⅰ型和Ⅱ型层序边界。然而,在岩石记录中难以区分Ⅰ型和Ⅱ型层序边界,故有学者倡导不区分Ⅰ型和Ⅱ型沉积层序^[61]。

“沉积层序”争论焦点在于与浅海强制海退沉积相关的层序边界位置的确定。Wagoner(1988)认为层序边界是强制海退沉积的顶界面,并包括整个陆上不整合面和相对应整合面等^[5,19,62]。Hunt(1992)认为层序边界是强制海退沉积的底界面,并包括一部分陆上不整合面、相对应的整合面和发生海相侵蚀的位置^[63]。

在沉积盆地非海相部分,陆上不整合面是层序边界的最好选择,它对应了层序地层序列中最重要的间断,可将具有成因联系的地层分隔开来。在沉积盆地海相部分,相对应整合面是唯一能代表陆上不整合面在时空上向盆地方向终止的真正层序地层界面。因此,在定义整个沉积盆地的层序边界时,这个界面被作为陆上不整合面的对应部分^[59,63]。

加拿大艾伯塔大学Catuneanu教授认为,需要对层序地层学基本概念和研究方法进行标准化^[19,59],并开始探索独立于不同盆地、不同地质背景、不同尺度、不同模式的层序发育通用基本原理,以实现层序地层学的标准化^[64-65]。但有人认为层序地层学仍在发展过程中,现今不应冻结层序地层学相关理论^[66]。

2) 层序格架与源-汇系统耦合关系

依托现代源-汇系统,综合提取物源区、搬运区及沉积区关键地质时期地层记录,可拓展延伸陆相层序地层学与源-汇系统研究的广度,即通过现今构造单元地貌、沉积卸载以及流域面积等不同参数的研究,可为古代(深时)源-汇系统研究提供对比和指导,进而获取深时沉积记录并揭示深时环境演变过程。具体表现为:①确定高精度层序格架下源-汇系统的形成和演化过程,加强源-汇系统内各地貌学参数间定量关系模型的构建及多维沉积通量与水动力模型的校准,采用正演模拟与反演模拟方法研究沉积过程,量化高频地层格架内地貌形态、沉积通量变化对构造、气候和侵蚀-沉积等作用的响应,建立宏观与微观相结合、定性与定量相结合、静态与动态相结合的源-汇系统理论与

方法体系;②推进方法技术手段定量化、多元化发展,重视研究层序地层单元-体系域在源-汇系统框架内结构、样式及主控因素的差异变化;③实现源-汇系统要素、耦合响应机制及演化序列数据化发展,综合多学科和多方法,开展大科学研究,构建(深-时)源-汇系统数据库,整合全球高精度等时层序地层格架内地表动力学系统演化过程和机制的数据与信息,在大数据驱动下重建地球物质的“构造-气候-层序-沉积”耦合演化过程,进而达到精确重建地球演化历史、厘清全球矿产资源与能源的宏观分布规律。

3) 滨线迁移与砂体成因类型

滨线迁移轨迹是研究层序充填过程中可容空间与沉积物供给关系、预测砂体成因类型和分布的重要参数^[66]。滨线迁移决定了特定沉积趋势下地层单元的外形和堆积模式,即体系域类型、准层序的叠置样式和砂体成因类型。对于断陷湖盆而言,强烈断陷期陡坡带和缓坡带发育的近岸水下扇、扇三角洲或辫状河三角洲的延伸距离相对较短、发育规模有限,轴向辫状河三角洲及断陷晚期部分缓坡带辫状河三角洲具有较为显著的滨线轨迹迁移特征^[67-68]。例如,渤海湾盆地东营凹陷始新统沙三中亚段轴向三角洲在地震剖面表现为典型的S型和斜交型前积地震反射构型,其滨线迁移轨迹表现为平缓型、上升型特征,分别对应于加积型、进积型地层叠置样式,整体反映了相对湖平面先稳定后上升的特征^[39]。

断陷盆地通常具有“隆洼相间”的复杂构造地貌特征,大型轴向三角洲推进距离远,沉积厚度大,其滨线迁移轨迹相对更为复杂。北部湾盆地涠西南凹陷始新统流一段西南部轴向三角洲滨线迁移轨迹在垂向上表现为上升型与平缓型交替发育的特征,相对于平缓陆架上典型的滨线迁移轨迹更为复杂^[69],反映了湖盆的可容空间在垂向上经历了多次“上升-恒定”的交替变化特征。这种复杂滨线迁移轨迹的形成与断陷盆地长轴方向多洼陷、多级挠曲坡折的古地貌格局及同生断裂造成的构造差异沉降作用有密切关系。

4) 层序地层学发展展望

层序地层学理论诞生以后,人们利用地质、地球物理以及地球化学等资料,搭建等时地层格架、建立不同类型沉积盆地和沉积岩性的层序地层模式,并已在油气勘探与开发领域得到广泛应用^[5]。随着沉积盆地构造演化、海(湖)平面升降变化机制和不同级次旋回的精准定年、沉积过程和沉积体系时空分布演化、不同类型沉积盆地沉积矿产的有效勘探以及层序地层研究方法技术的创新发展,未来陆相湖盆层序地层学的发展

应该加强:①沉积盆地构造背景、沉积体系类型和分布、沉积成因机制、旋回成因和主要控制因素等研究,明确不同层序地层学理论基础之间异同之处,确立沉积层序分级、划分标志以及研究方法,推进不同学派层序地层学理论体系、层序地层模型、研究方法标准化并提高层序解释的适用性、准确性和预测性;加强不同级次构造活动对可容空间增减的控制作用以及与其他形成沉积层序主要控制因素之间的耦合关系研究,编制不同构造背景、不同岩石类型陆相盆地不同地质时期湖平面升降变化曲线,在源汇思想指导下,建立多类型、多级次深时层序和体系域层序模式。②明确沉积层序格架中自旋回和异旋回沉积作用特征,分析不同成因旋回的形成机制和主要控制因素,加强河流与深水沉积层序地层学研究,建立能够指导常规和非常规油气资源勘探与开发的多级别层序地层模型,并提高层序地层模型解释的可靠性。③精细表征沉积层序结构单元边界、形成过程和主要控制因素,建立滨线迁移、坡折带轨迹迁移与多种沉积体系或砂体成因类型之间关系模式;应用先进的地震沉积学、地质分析技术、三维可视化技术、数理统计、人工神经网络分析、模式识别、数值模拟和大数据等许多新技术,加强反映沉积层序形成过程和发育机制的物理和数值模拟工作,推进不同尺度、油气勘探开发不同阶段高分辨率层序地层计算机模拟和工作站解释等一系列工作,建立多种控制因素及其相互作用与沉积层序形成、体系域组成和砂体时空分布之间的耦合关系。④讨论不同类型盆地、同一类型盆地不同构造单元和不同构造演化阶段的层序地层构型主控因素,指出不同级别层序周期的嵌套和耦合特征,确定不同周期频率的层序地层与生储盖组合和地层岩性圈闭之间的对应关系,以不同级别的层序为研究单元,开展岩相古地理研究,建立不同类型盆地、不同沉积类型的砂体分布和地层岩性圈闭分布模式,不断提高成藏要素、特别是有效储集体和地层岩性圈闭的预测能力。

5.2 结论

在陆相断陷盆地不同构造演化阶段,层序构型和砂体成因分布表现出明显差异性。盆地初始断陷期,边界断裂开始活动,形成众多规模较小且彼此分隔的沉积中心,准层序加积叠置明显,发育快速堆积、近源粗粒的冲积扇、分支河流体系和扇三角洲等沉积;盆地强烈断陷期,断层活动强烈,先前彼此独立的小规模沉积中心合并成规模较大的沉积中心,在陡坡带、缓坡带和深洼区发育了近岸水下扇、扇三角洲和深水盆底扇

等沉积砂体；盆地断-拗转换期，断裂差异活动并明显减弱，可容纳空间缩小，盆内沉积体系以轴向河流、三角洲沉积为主；在湖盆拗陷沉降期，断裂活动趋于停止，盆地沉积充填整体处于过补偿状态，以河流-浅水三角洲砂体发育为特征。

在陆相断陷盆地演化过程中，层序构成、准层序叠置样式和砂体成因分布最主要的因素是构造活动。在不同构造演化阶段，层序均由反映特定盆地结构和构造演化阶段特征的不同类型沉积物（相）组合而成。受控于构造沉降和沉积物供给配置关系，即对应于不同的盆地可容纳空间速率和沉积物供给速率比值，形成了断陷湖盆不同的层序结构、沉积物组合、叠置样式和砂体分布规律。

层序地层学处于不断发展中，将会在理论上不断创新完善，在实践上不断提高成藏要素和油气藏预测的准确性，以提高油气勘探开发的效率。这是因为层序地层学不仅提出了一套全新的理论概念体系，而且所划分确定的层序和体系域与特定的烃源岩发育、沉积砂体分布、地层岩性圈闭和油气富集地区密切相关。它能提供一种更加准确的年代地层对比框架，通过恢复构造古地理面貌，预测烃源岩、储集层和盖层的组合关系以及成藏组合，有效指导地层岩性油气藏勘探。很显然，层序地层学已展现出了强大的生命力，必将在推动地球科学发展、提高沉积矿产勘探开发效率等方面发挥积极的重要作用。

参考文献

- [1] Mann P, Horn M, Cross I. Emerging trends from 69 giant oil and gas fields discovered from 2000–2006[J]. AAPG Search and Discovery, 2007: 11–45.
- [2] Gawthorpe R L, Leeder M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins[J]. Basin Research, 2000, 12: 195–218.
- [3] 威尔格斯. 层序地层学原理——海平面变化分析[M]. 徐怀大,译. 北京:石油工业出版社, 1993.
- [4] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营:石油大学出版社, 2000.
- [5] 顾家裕. 陆相盆地层序地层学格架概念及模式[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 6–10.
- [6] 朱筱敏, 康安, 王贵文. 陆相拗陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 283–287.
- [7] Noll C A, Hall M. Normal fault growth and its function on the control of sedimentation during basin formation: A case study from field exposures of the Upper Cambrian Owen Conglomerate, West Coast Range, western Tasmania, Australia[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(10): 1609–1630.
- [8] Jackson C A, Leeder M R. Drainage systems and the development of normal faults: an example from Pleasant Valley, Nevada[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 11: 1041–1059.
- [9] Leeder M R, Jackson C A. The interaction between normal faulting and drainage in active extensional basins, with examples from the western United States and central Greece[J]. Basin Research, 1993, 5: 79–102.
- [10] Eliot P P, Gawthorpe R L. Drainage development and sediment supply within rifts, examples from the Sperchios Basin, central Greece[J]. Journal of the Geological Society, 1995, 152: 883–893.
- [11] Gupta S, Davoodi H, Alonso-Terme R. A mechanism to explain rift-related subsidence and stratigraphic patterns through fault-array evolution[J]. Geology, 1998, 26: 1–37.
- [12] Doust H. Rift Basin evolution and petroleum system development [C]// GCSSEPM. 34th Annual Gulf Coast Section SEPM Foundation Perkins-Rosen Research Conference. Texas: GCSSEPM, 2015: 14.
- [13] Kingston D R, Dishroon C P, Williams P A. Global basin classification system[J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(12): 2175–2193.
- [14] Prosser S. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression[J]. Geological Society of London, Special Publications, 1993, 71: 35–66.
- [15] Leeder M R. Tectonic sedimentology: sediment systems deciphering global to local tectonics [J]. Sedimentology, 2011, 58: 2–56.
- [16] Connell S D, Kim W, Paola C. Fluvial morphology and sediment-flux steering of axial-transverse boundaries in an experimental basin[J]. Journal of Sedimentary Research, 2012, 82: 310–325.
- [17] Zhang Z L, Zhu X M, Zhang R F, et al. To establish a sequence stratigraphy in lacustrine rift basin: A 3D seismic case study from Paleogene Baxian Sag in Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 120, 104505.
- [18] Tan M X, Zhu X M, Liu Q H, et al. Multiple fluvial styles in Late Miocene post-rift successions of the offshore Bohai Bay Basin (China): Evidence from a seismic geomorphological study [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104173.
- [19] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [20] 胡光明, 倪超, 王军, 等. 河流层序地层学研究现状与存在的问题[J]. 地质科技情报, 2011, 30(6): 59–63.
- [21] Hu Guangming, Ni Chao, Wang Jun, et al. Review and problems of fluvial sequence stratigraphy[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(6): 59–63.
- [22] 谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等. 断陷盆地拗陷期河流层序样式及其地貌响应: 以渤海湾盆地沙垒田地区凸起区新近系明化镇组明下段为例[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 428–439.
- [23] Tan Mingxuan, Zhu Xiaomin, Zhang Zili, et al. Fluvial sequence pattern and its response of geomorphy in depression phase of rift basin: A case study of the Lower Member of Neogene Minghuazhen Formation in Shaleitian Uplift area, Bohai Bay Basin [J].

- Journal of Palaeogeography, 2020, 22(3): 428–439.
- [22] 于兴河, 姜辉, 李胜利, 等. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素—以济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 39–45.
Yu Xinghe, Jiang Hui, Li Shengli, et al. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in eastern China: A case study of Dongying Sag of Jiyang Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(1): 39–45.
- [23] 邓宏文, 郭建宇, 王瑞菊, 等. 陆相断陷盆地的构造层序地层分析[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 1–7.
Deng Hongwen, Guo Jianyu, Wang Ruiju, et al. Tectono-sequence stratigraphic analysis in continental faulted basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 1–7.
- [24] 解习农, 任建业. 沉积盆地分析基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2013.
Xie Xinong, Ren Jianye. *Principles of sedimentary basin analysis* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2013.
- [25] Cohen A S. Tectono-stratigraphic model for sedimentation in Lake Tanganyika, Africa[J]. *AAPG Memoir*, 1990, 50: 137–150.
- [26] Gawthorpe R L, Fraser A J, Collier R E. Sequence stratigraphy in active extensional basins: implications for the interpretation of ancient basin-fills[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1994, 11: 642–658.
- [27] Martins-Neto M A, Catuneanu O. Rift sequence stratigraphy[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27: 247–253.
- [28] 林畅松. 沉积盆地的构造地层分析——以中国构造活动盆地研究为例[J]. 现代地质, 2006, 20(2): 185–194.
Lin Changsong. Tectono-stratigraphy analysis of sedimentary basins: A case study on the inland tectonically active basins in China [J]. *Geoscience*, 2006, 20(2): 185–194.
- [29] Ravnås R, Steel R J. Architecture of marine rift-basin successions [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82: 110–146.
- [30] 王华, 廖远涛, 陆永潮, 等. 中国东部新生代陆相断陷盆地层序的构成样式[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 277–285.
Wang Hua, Liao Yuantao, Lu Yongchao, et al. Sequence architecture styles of Cenozoic continental rift basins in East China [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(1): 277–285.
- [31] 韩志宇, 王非, 师文贝. 沉积岩定年及应用: 问题与展望[J]. 沉积学报. 2022, 40(2): 360–379.
Han Zhiyu, Wang Fei, Shi Wenbei. Dating and application for sedimentary rocks: Problems and prospects [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 360–379.
- [32] 宋翠玉, 吕大炜. 米兰科维奇旋回时间序列分析法研究进展[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 380–395.
Song Cuiyu, Lü Dawei. Advances in time series analysis methods for Milankovitch cycles [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 380–395.
- [33] Boulila S, Brange C, Cruz A M, et al. Astronomical pacing of Late Cretaceous third- and second-order sea-level sequences in the Fozdo Amazonas Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 117: 104382.
- [34] Liu Y, Huang C, Ogg J G, et al. Oscillations of global sea-level elevation during the Paleogene correspond to 1.2-Myr amplitude modulation of orbital obliquity cycles [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 522: 65–78.
- [35] Du W, Ji L Y, Chen G, et al. Cyclostratigraphy and astronomical tuning during the Oligocene in the Jizhong Depression, Bohai Bay Basin, northeastern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 554: 109803.
- [36] 朱剑兵, 纪友亮, 赵培坤, 等. 小波变换在层序地层单元自动划分中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 84–86.
Zhu Jianbing, Ji Youliang, Zhao Peikun, et al. Application of wavelet transform in auto-identify units of stratigraphy sequence [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 84–86.
- [37] 路顺行, 张红贞, 孟恩, 等. 运用INPEFA技术开展层序地层研究[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 703–708.
Lu Shunxing, Zhang Hongzhen, Meng En, et al. Application of INPEFA technique to carry out sequence stratigraphy study [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(6): 703–708.
- [38] 吴伟, 林畅松, 刘景彦, 等. 利用上超点法重建渤海湾盆地辽中凹陷渐新世湖平面变化[J]. 沉积学报, 2011, 29(6): 1115–1121.
Wu Wei, Lin Changsong, Liu Jingyan, et al. Reconstruction of Oligocene lake level change through onlap pointes: A case from Liaozhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(6): 1115–1121.
- [39] 康波, 解习农, 杜学斌, 等. 基于滨线轨迹的古水深定量计算新方法——以古近系沙三段东营三角洲为例[J]. 沉积学报, 2012, 30(3): 443–450.
Kang Bo, Xie Xinong, Du Xuebin, et al. A new paleobathymetric approach based on shoreline trajectory [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(3): 443–450.
- [40] Yang D M, Huang Y J, Guo W, et al. Late Santonian-early Campanian lake-level fluctuations in the Songliao Basin, NE China and their relationship to coeval eustatic changes [J]. *Cretaceous Research*, 2018, 92: 138–149.
- [41] Scholz C A, Johnson T C, Cohen A S, et al. East African megadroughts between 135 and 75 thousand years ago and bearing on early-modern human origins [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(42): 16416–16421.
- [42] Lyons R P, Scholz C A, Buoniconti M R, et al. Late Quaternary stratigraphic analysis of the Lake Malawi Rift, East Africa: An integration of drill-core and seismic-reflection data [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 303 (1–4): 20–37.
- [43] 解习农, 任建业, 焦养泉, 等. 断陷盆地构造作用与层序样式[J]. 地质论评, 1996, 42(3): 239–244.
Xie Xinong, Renjianye, Jiao Yangquan, et al. Tectonism and sequences patterns of down-faulted basin [J]. *Geological Review*, 1996, 42(3): 239–244.
- [44] Streeker U, Steidtmann J R, Smithson S B A. Conceptual tectono-stratigraphic model for seismic facies migrations on a fluvio-lacustrine in extensional basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83 (1): 43–61.
- [45] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”-断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. 地球科学, 2000, 25(3): 260–265.
Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jianxin, et al. Structural slope-break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis

- and petroleum forecasting in fault subsidence basin [J]. *Earth Science*, 2000, 25(3): 260–265.
- [46] Pascucci V, Costantini A, Martini P, et al. Tectono-sedimentary analysis of a complex, extensional, Neogene basin formed on thrust-faulted, Northern Apennines hinterland: Radicofani Basin, Italy [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 183: 71–97.
- [47] 朱红涛, 刘可禹, 朱筱敏, 等. 陆相盆地层序构型多元化体系 [J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 770–785.
- Zhu Hongtao, Liu Keyu, Zhu Xiaomin, et al. Varieties of sequence stratigraphic configurations in continental basins [J]. *Earth Science*, 2018, 43(3): 770–785.
- [48] 张世奇, 纪友亮. 陆相断陷湖盆层序地层学模式探讨 [J]. *石油勘探与开发*, 1996, 23(5): 20–23.
- Zhang Shiqi, Ji Youliang. Approach to the sequence stratigraphic models of the fault–depression lake basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(5): 20–23.
- [49] Wood L J. Chronostratigraphy and tectonostratigraphy of the Columbus Basin, eastern offshore Trinidad [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(14): 1905–1929.
- [50] 杨明慧, 刘池阳. 陆相伸展盆地的层序类型、结构和序列与充填模式——以冀中坳陷下第三系为例 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(2): 222–228.
- Yang Minghui, Liu Chiayang. Types, textures and series of the continental sequences and model of sedimentary basin-fill in rift basin: A case study from Jizhong Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 222–228.
- [51] Masini E, Manatschal G, Mohn G, et al. The tectono-sedimentary evolution of a supra-detachment rift basin at a deep-water magma-poor rifted margin: the example of the Samedan Basin preserved in the Err nappe in SE Switzerland [J]. *Basin Research*, 2011, 23: 652–677.
- [52] Liu Q H, Zhu X M, Yang Y, et al. Sequence stratigraphy and seismic geomorphology application of facies architecture and sediment–dispersal patterns analysis in the third member of Eocene Shahejie Formation, slope system of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 78: 766–784.
- [53] Liu Q H, Zhu X M, Zhu H T, et al. Three-dimensional forward stratigraphic modelling of the gravel-to mud-rich fan-delta in the slope system of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 18–30.
- [54] Liu Q H, Zhu X M, Zeng H L, et al. Source-to-sink analysis in an Eocene rifted lacustrine basin margin of western Shaleitian Uplift area, offshore Bohai Bay Basin, eastern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 41–58.
- [55] 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): 525–539.
- 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): 525–539.
- [56] 葛家旺, 朱筱敏, 张向涛, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷文昌组构造–沉积演化模式 [J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(2): 405–419.
- Ge Jiawang, Zhu Xiaomin, Zhang Xiangtao, et al. Tectono-sedi-
- mentation model of the Eocene Wenchang Formation in the Lufeng depression, Pearl River Mouth basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 405–419.
- [57] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起前古近系基岩分布及源–汇过程 [J]. *地球科学*, 2016, 41(11): 1935–1949.
- Liu Qianghu, Zhu Xiaomin, Li Shunli, et al. Pre-Palaeogene bedrock distribution and source-to-sink system analysis in the Shaleitian Uplift [J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1935–1949.
- [58] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起西部断裂陡坡型源–汇系统 [J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1883–1896.
- Liu Qianghu, Zhu Xiaomin, Li Shunli, et al. Source-to-sink system of the steep slope fault in the Western Shaleitian Uplift [J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1883–1896.
- [59] 薛良清. 层序地层学研究现状、方法与前景 [J]. *石油勘探与开发*, 1995, 22(5): 8–14.
- Xue Liangqing. Current status, methodology and future directions of sequence stratigraphy study [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(5): 8–14.
- [60] 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.
- [61] Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(11): 1687–1709.
- [62] 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]//AAPG. AAPG Methods Exploration. Texas: AAPG, 1990.
- [63] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level' fall [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1–2): 1–9.
- [64] Catuneanu O. Scale in sequence stratigraphy [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 106: 128–159.
- [65] Catuneanu O. Model-independent sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 188: 312–388.
- [66] Helland-Hansen W, Hampson G J. Trajectory analysis: concepts and applications [J]. *Basin Research*, 2009, 21(5): 454–483.
- [67] Xian B Z, Liu J P, Wang J H, et al. Using of stratal slicing in delineating delta-turbidite systems in Eocene Dongying depression, Bohai Bay Basin: Insights for the evolution of multi-source delta-turbidite systems in a fourth order sequence [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 168: 495–506.
- [68] Xu S, Cong F Y, Hao F, et al. Shelf-edge trajectory and sediment dispersal in a lacustrine setting: A case study from Qinnan Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 91: 562–575.
- [69] 秦春雨, 王华, 姜平, 等. 断陷盆地轴向沉积体系空间展布及演化特征 [J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(3): 542–551.
- Qin Chunyu, Wang Hua, Jiang Ping, et al. Spatial distribution and evolution of axial deltaic system in continental rift basin: A case study of Weixinan Sag, Beibuwan Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(3): 542–551.

(编辑 张亚雄)