

盆地沉积动力学:研究现状与未来发展趋势

林畅松

[中国地质大学(北京)海洋学院,北京 100083]

摘要:盆地沉积动力学或称盆地沉积充填动力学分析,即强调盆地沉积特征与形成过程的响应关系及控制机制的研究,是沉积盆地分析和油气地质研究的一个前缘领域。文中结合中国沉积盆地的特色和研究实践,阐述了这一领域的研究现状,展望了未来的发展趋势。当前盆地沉积充填动力学分析的主要热点方向包括:①盆地的沉积层序结构、沉积体系(域)构成和演化及其响应机制研究;②盆地构造沉积学或构造地层学分析;③源-汇系统与盆地沉积物分散体系研究;④盆地沉积充填动力学过程的模拟分析等。盆地沉积充填动力学分析将不断为地球动力学系统研究提供高分辨的沉积记录,并继续为难度日益增大的沉积地质资源的勘探和开发提供新的理论支撑。盆地沉积动力学研究预示了深远和广泛的发展前景。

关键词:盆地地层结构;盆地构造-沉积分析;源-汇系统;沉积过程模拟;沉积体系;盆地沉积动力学;沉积盆地分析

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Sedimentary dynamics of basin: Status and trend

Lin Changsong

[School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: Sedimentary dynamics of basin or sediment filling dynamics of basin, a frontier in sedimentary basin analysis and petroleum geologic research, highlights the response relationship between basin filling characteristics and formation processes, as well as its controlling mechanisms. The status and trend of the study were documented considering the geographical features and research practices of sedimentary basins in China. The main themes include: ① sequence architecture of sedimentary basins, as well as structure, evolution and process responses of depositional system tracts; ② tectono-sedimentology or tectono-stratigraphy; ③ “Source-to-Sink” system and sediment dispersal systems in basins; ④ simulation of basin filling processes and so on. Analysis of sedimentary basin filling dynamics will continue to provide high-resolution sedimentary records for geodynamics, and theoretical support for the exploration and development of depositional geological resources, which have become increasingly difficult. The study betokens profound and new prospects.

Key words: basinal stratigraphic architecture, tectonic-sedimentary analysis of basins, “Source-to-Sink” system, depositional process simulation, sedimentary system, sedimentary dynamics of basin, analysis of sedimentary basins

盆地沉积充填的特征、分布、形成演化及控制因素研究是沉积盆地分析的基本内容,也是沉积地质资源,特别是油气资源预测和勘探的重要基础。盆地的地层结构、沉积构成特征和演化是各种控制因素,包括地球内、外动力地质作用的综合结果。Matthews^[1]较早就提出了地层动力学(dynamic stratigraphy)的概念,注重对盆地地层形成的动力学过程的研究。Allen^[2]把对盆地成因地层的识别和解释的研究称为“过程地层学”(process stratigraphy)。这里提到的“盆地沉积动

力学”分析,强调了从盆地形成演化的动力学背景出发,研究盆地的沉积充填特征与形成过程的响应关系及控制机制。这是盆地动力学分析的一个重要的组成部分^[3-4]。盆地的沉积过程和演化是地球表层动力学演化的直接响应。因此,盆地沉积动力学分析是地球动力学研究的一项重要内容。

近一二十年来,围绕着盆地沉积充填动力学分析的研究取得了一系列重要进展,如基于盆地形成和演化动力学背景的盆地沉积模式、构造地层学或构造沉

收稿日期:2018-11-21;修订日期:2019-03-04。

作者简介:林畅松(1958—),男,博士、教授、博士生导师,沉积学与沉积盆地分析。E-mail: lincs@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41130422, 91528301, 91328201)。

积学,层序地层学或成因地层学,以及从沉积物分散体系到“源-汇”系统等方面的研究,都取得令人瞩目的进展,产生了许多新的概念、新的理论和技术方法,成为当前沉积盆地分析及油气地质勘探等领域的研究热点。这些研究进展概括起来主要体现在以下几个方面:①盆地沉积充填的层序结构、沉积体系(域)构成演化与响应机制研究;②盆地的构造沉积学分析;③源-汇系统与沉积物分散体系研究;④盆地沉积充填过程的动力学模拟等。值得指出,越来越多的研究表明,简单地套用经典的地质“模式”已困扰了地质学的深入研究,也难以解释不断深入研究所遇到的各种地质现象。以“地质动力学过程”为主导的研究思想,已被广泛接受。

盆地沉积动力学分析是一个涉及多学科、极其广泛的研究领域。本文拟围绕这一领域,结合作者多年的研究和国内外的相关进展,对盆地沉积充填动力学分析的一些相关的概念和理论进展作讨论,重点阐述盆地的层序结构、沉积充填样式及演化等的控制作用或过程响应分析的理论和分析方法。

1 盆地地层结构、沉积构成与过程响应

1.1 层序单元与盆地的等时地层格架

盆地的沉积充填可看作是由一系列不同级别、不同规模的地质界面所分隔的沉积地质体或沉积旋回所组成的。这些沉积体或地层单元的几何形态、组合关系和界面特征,是构造作用引起的盆地沉降和隆升、沉积物的供给和分散过程以及沉积基准面变化等的综合作用结果。源于被动大陆边缘盆地的层序地层学经历了近40年的发展,已成为较为完善的划分地层单元和建立等时地层格架的理论和方法^[5],尽管推进层序地层模式的标准化还有较多争论,包括层序界面、沉积体系域的划分和术语等问题^[6]。以不整合面及其对应的整合面来划分高级别的层序地层单元(一至三级);而在相对整合的基本层序或三级层序内主要依据水进界面(海或湖泛面)划分次一级的地层单元(四、五级)或体系域,这已取得了广泛的共识(图1)。

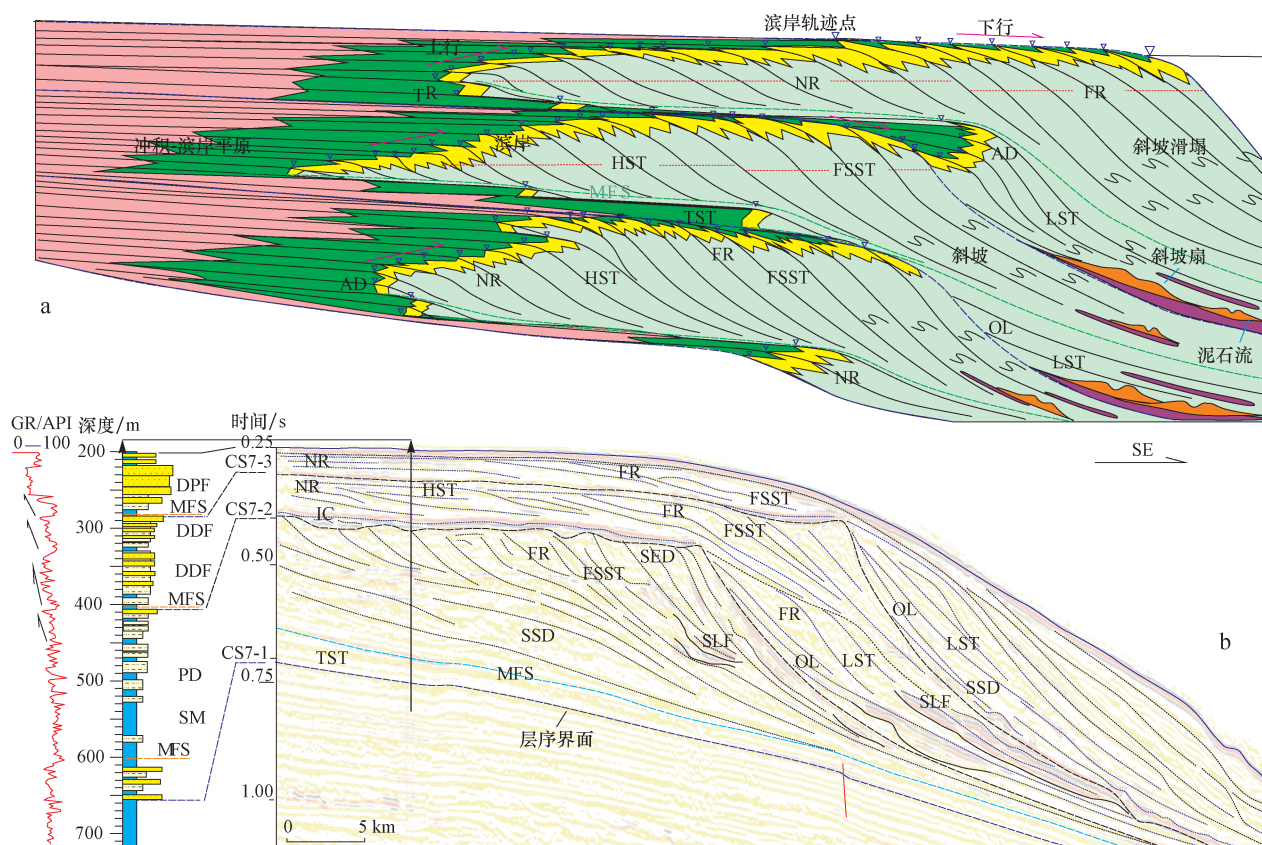


图1 沉积层序内部地层结构(沉积成因单元和体系域)(a)和南海北部陆架边缘第四系沉积层序内部结构分析(b)

Fig.1 Depositional sequence stratigraphic architecture (depositional genetic units and systems tracts)(a) and the sequence architecture of the Quaternary at the northern margin of continental shelf in the South China Sea(b)

NR. 正常水退积;FR. 强制性水退积;TR. 水进沉积;AD. 垂向加积沉积;HST. 高位体系域;TST. 水进体系域;LST. 低位体系域;FSST. 海退体系域;MFS. 最大洪泛面;DPF. 三角洲平原-近端前缘沉积;DDF. 远端三角洲前缘沉积;PD. 前三三角洲沉积;SM. 斜坡泥质沉积;IC. 下切水道充填;SED. 陆架边缘三角洲沉积;SSD. 斜坡滑塌-泥石流沉积;SLF. 斜坡扇(水道)充填

沉积盆地充填中,高级别的地层单元,如巨层序(一级)和超层序(二级)常常是由区域性的构造不整合面为界,因而也称“构造层序”,可在盆地中跨不同构造带对比,包括在古隆起、古斜坡及坳陷带上的追踪对比。这种界面往往也是重要的海退面或气候突变面,有些可能具有全球对比意义。在构造演化复杂的大型沉积盆地或叠合盆地中,这些界面常常分隔着盆地不同构造演化阶段或不同原型盆地的沉积充填。追踪这些界面建立的盆地区域性等时地层格架,对揭示盆地的地质结构特征极其重要,可为盆地构造-古地理再造、油气聚集区带和勘探战略性研究等提供宏观的等时地层对比基础。中等尺度的地层单元,即层序或沉积层序(三级)是由局部不整合(盆地的边缘或相对隆起带)及其对应的整合面(如水进-水退转换面、沉积相突变面等)所限定的一个较完整的沉积旋回所组成,是盆内可以追踪对比的基本的等时地层单元。追踪这一级别的地层单元建立的层序地层格架为沉积体系和沉积相分析等提供地层对比框架。层序内低级别的地层单元主要是依据水进面等划分和追踪对比的,如四、五级的层序地层单元(沉积旋回)和体系域等。重点划分和追踪这些地层单元所建立的地层格架可称之为高精度的层序地层格架^[7]。在盆地内重点区带建立这种精细的地层对比格架,可为沉积体系和沉积相以及储集体等的精细研究提供基础。高精度层序地层格架的建立需要依赖于测井、露头、岩心等资料的综合分析,特别是高分辨三维地震资料和密集的钻井控制。

盆地的沉积充填序列一般都可划分出5个与沉积旋回相对应的层序地层单元,但不同盆地、不同地质年代的沉积层序有较大的差异^[8]。尽管许多学者提出过不少有关层序级别及其时限的划分方案,但在层序的时限范围上是很不统一的。另外,各级层序单元界面的绝对年龄和层序的时限范围往往是难以确定的。因此,在实际的研究中可采用两级的层序划分方案,即复合层序(composite sequence)和层序(sequence)。前者是由区域性的不整合面所限定的;而后者则是次一级的、由局部的不整合面及其对应的整合面所限定的。复合层序可以看作是一个二级层序,其内可划分出若干层序。复合层序一般构成总体从水进到水退的沉积序列(succession)或层序组(sequence sets),因此也存在一个最大的水进期。层序作为一个基本的地层单元,其内部构成最明显的特征是可划分出一定范围内可追踪对比的各种沉积体系域或沉积成因单元。这种划分方法得到了较为广泛的使用^[9-12]。当层序的界面年龄得到约束时,则可建立等时的年代-层序地层

格架。如在南海北部大陆边缘盆地的层序界面由于得到连续的海相超微钙化石带、有孔虫化石带以及连续取心井的古地磁绝对年龄,可建立精度达0.5~1.0 Ma的年代-层序地层格架^[12-13]。作为层序界面的不整合规模和分布范围,有时可对层序的级次作定性的界定。如盆地范围分布的角度不整合常常构成一级层序界面或原型盆地沉积充填的顶、底界面;盆地区域上分布的角度或微角度不整合多构成二级层序界面;而盆地边缘或局部分布的微角度或平行不整合往往是三级层序的限定界面。海侵面或海泛面的规模、分布范围同样也是各级沉积旋回、体系域单元界定的重要标志。

盆地充填序列中不同级别的地层不整合、海侵或水进界面的构造、气候的高分辨沉积记录及其跨构造域的对比,是当前盆地分析和沉积地质学研究的一个前缘性课题。在高频沉积旋回与Milankewitch气候周期的关系方面的研究取得了许多重要的进展,并为高频沉积旋回的地层定年提供了重要手段。

1.2 沉积体系域与成因沉积单元

沉积体系域是指同一时期发育的、在成因上有联系的沉积体系的组合^[14]。在经典的层序地层模式中,沉积体系域的概念被予以了解释的含义,用于描述一个沉积层序内、形成于海平面、处于相对低位、海侵或高位期的沉积体系组合。围绕沉积层序内体系域的划分,一直存在较多的争论,这也促进了研究的深入。目前,一般可依据相对海平面变化(沉积基准面变化)划分出低位体系域、水进或海侵体系域、下降体系域以及高位体系域^[15-17]。然而,持争议的一些学者认为最初依据海平面变化划分沉积体系域的方法,已成为了一种把解释与描述相混淆的“行业术语”广泛使用,有碍于沉积层序内部构成的深入研究。为此,一些学者提出依据地层的叠置结构样式划分层序内的沉积单元,如“沉积成因类型”(genetic types of deposits)、“可容纳空间序列”(accommodation succession)^[6,9]或应用“坡折点轨迹”(trajectory)等分析层序内的沉积体系。

盆地沉积充填中的沉积旋回结构主要表现在水退-水进演变序列中形成的地层叠置样式的变化上。沉积层序内依据地层叠置样式可划分出“正常水退”(normal regressive deposits)、“强制性水退”(forced regressive deposits)、“水进”(transgressive deposits)及“垂向加积”(aggradational deposits)等成因沉积单元(图1)。这种依据地层叠置样式进行层序内沉积成因单元的划分,被认为比低位、水进和高位等依据沉积基准面变化的划分方法更为客观,也可能是推进层序地层标

准化的努力方向^[6]。Neal 和 Abreu 等也提出了相似的分析方法^[9],即依据可容纳空间与沉积物供给量的比值变化导致的前积、退积和加积等地层叠置样式划分层序内沉积体系组合或沉积单元,把相对应于低位、水进和高位-下降体系域的沉积充填划分为“前积-加积沉积”、“退积沉积”及“加积-前积-下降沉积”,并认为可应用于不同尺度的可容纳空间序列,以避免层序的级次难以确定和资料分辨率变化所带来的困扰。然而,依据沉积基准面变化划分体系域的方法仍然是广泛接受和使用的方法。沉积成因单元、可容纳空间变化及坡折轨迹等分析可作为层序内部结构更进一步的精细解剖。

对于湖泊沉积层序的体系域划分同样可依据湖平面变化划分出低位、水进、高位及下降体系域^[10,18]。湖盆中的物源方向多变,沉积相构成复杂,受地形、地貌及局部构造影响明显,层序内的沉积体系域构成和时空分布显得更为复杂。在湖盆沉积序列中区分低位域和水进体系域一般是困难的,因为初始湖泛面的确定往往缺少地貌参照。作者曾在构造较活动的陆相盆地中提出过构造坡折带的概念,由于断裂等构造活动可形成盆地斜坡边缘与盆地洼陷区的地貌坡折带,在盆地发育演化的一定阶段控制着重要的沉积环境和地貌分界,构成了低位域识别的重要地貌标志^[19-20]。构造(断裂)坡折带的概念在我国得到了广泛的应用,文后有进一步的讨论。

在层序地层格架中,沉积体系的沉积构成特征随沉积基准面升降变化的研究也颇为人们所关注。这在含油气盆地分析中涉及到了有利储层的精确预测。如三角洲体系的成因类型可按河流的类型及河流与波浪和潮汐作用的相对强弱等划分^[21-24];但三角洲体系在沉积基准面的升降旋回中还受到水体深度和发育部位的地貌变化等的明显影响^[25-29],如在高水位体系域中三角洲体系可经历从高水位早期的湾头三角洲、中期的内陆架-陆架(浅水)三角洲到晚期的外陆架-陆架边缘三角洲的演化。在水进体系域中,多发育受波浪或潮汐改造的三角洲体系^[27,30]。另外,各个体系域中,看来都可发育斜坡扇或盆底扇^[31-32],但相对富砂的斜坡扇或盆底扇常与陆架边缘三角洲体系的发育有关。研究表明,推进到陆架边缘的三角洲前缘与大陆边缘斜坡复合可形成高角度前积体,沿这种斜坡易发生大规模的滑塌作用或发育下切谷,这为富砂的斜坡或盆底扇的发育提供了条件^[12,29]。陆架边缘三角洲体系推进到陆架边缘主要与海平面的下降有关,但大量的沉积物供给也是发育广泛分布的陆架边缘三角

洲体系的重要条件。近期的一些研究还表明,气候条件(如季风、暖室和冰室气候等)对物源供给具有重要影响,从而对陆架边缘三角洲体系的发育演化产生重要的影响^[12,30,33]。

1.3 前积体-坡折带与坡折点迁移轨迹

近年来有关斜坡前积体(clinoform)和坡折点迁移轨迹(trajec-tory)分析方法引起了人们的关注。前积体或前积层事实上是较早就被注意到的沉积单元。20世纪70—80年代发展起来的地震地层学研究中,前积体被作为一种地震相单元进行过详细的描述和研究^[34]。然而,把前积体作为一种重要的沉积地貌单元,研究其地层几何形态,追踪其发育演化与层序结构、沉积成因类型等的关系,则是近些年来才得到广泛关注的。

盆地沉积充填中发育的前积体按其成因可划分为滨岸或三角洲前积体、水下三角洲前积体、陆架边缘前积体以及大陆边缘前积体等类型^[35]。相应地形成有滨岸或三角洲前缘坡折带、水下三角洲坡折带、陆架边缘坡折带以及大陆边缘坡折带等。滨岸坡折带和陆架边缘坡折带是对沉积地貌、沉积相及沉积过程变化具有重要意义的地貌单元。前者构成陆相的河流、冲积平原与滨、浅海沉积-地貌区的分界;后者则分隔着以牵引流沉积为主的浅海陆架区与以重力流沉积为主的陆架边缘斜坡-深海平原沉积地貌区。它们还是从大陆物源区到深海盆地“源-汇”系统中最重要沉积物输送枢纽带。陆架内的滨岸-三角洲前缘坡折带前积体形成的水深一般小于200 m,Steel 和 Olsen 认为陆架内的三角洲前缘前积体一般为数十米或小于150 m^[36]。大陆斜坡边缘坡折带前积体形成的水深一般大于200 m,直至1 000~2 000 m。但在海平面明显下降时可能接近海平面,此时三角洲可推进到陆架边缘形成陆架边缘三角洲体系。在陆架内一些特殊的条件下,如高能的背景下,在三角洲前缘以外可发育水下三角洲前积体(subaqueous delta clinoform),多由细粒沉积物所组成,厚度可达数百米^[37-39]。

追踪滨岸(线)和陆架边缘地貌坡折点迁移轨迹可客观地描述沉积体系随时间的迁移变化,揭示伴随着地貌坡折点迁移的沉积作用和沉积物或沉积相的变化。国际上围绕这一科学问题开展过多次学术讨论会。通过追踪坡折点迁移轨迹分析层序内的沉积体系会比仅仅是依赖沉积体系域分析层序的方法要明显优越。这种分析方法是在一个连续的水进或水退过程中对沉积体系进行分析的,而不是把沉积体系划分成孤立的沉积体系域进行分析,因而可更细致地分析沉积

过程的响应关系。滨岸或陆架边缘坡折点迁移轨迹可划分为“上行水退”(ascending regressive)、“下行水退”(descending regressive)、“水进”(transgressive)和“静止”(stationary)等类型^[40](图1)。不同沉积成因单元的迁移轨迹变化对沉积相带的发育和保存具有明显的影响。如具有高角度滨岸迁移轨迹的上行水退沉积具有明显加厚的沉积相带,缺少横向、广泛的侵蚀面,有利于滨岸沉积体系的保存;相反,具有低角度的下行水退沉积则沉积相带变窄或缺失,有利于发育广泛的侵蚀面,而不利滨岸沉积体系的保存。上行的大陆斜坡坡折轨迹常常伴生着较厚的滨岸舌状体沉积,缺少侵蚀面,输送到深水盆地的沉积物少;而下行的大陆斜坡坡折轨迹预示着较薄的滨岸沉积,存在明显的侵蚀面,大量沉积物可能输送到深水盆地形成盆地扇体系。最近,Paumard对澳大利亚西北部大陆架边缘的沉积充填研究识别出5种地层的叠置样式^[41],揭示了从裂陷末期到裂后早期构造沉降、海平面变化以及沉积物供给变化对陆架边缘沉积充填演化的控制作用。在南海被动大陆边缘的研究表明,沉积层序内的成因沉积结构所反映的沉积基准面旋回变化并不是呈单一趋势匀速变化的,如在海侵体系域中可包含有海退沉积,而在高位域中可发育水进沉积,岸线迁移轨迹在各个体系域中显示出多种样式的变化。识别这些变化显然有利于对层序内沉积体系和沉积相的时空分布作出精确的预测。

1.4 沉积层序发育演化的控制因素

盆地的沉积充填特征和演化是各种盆地过程,包括盆地构造作用、海-湖平面变化、气候变化、物源供给变化、各种搬运作用及水-盆地动能综合作用的结果。但盆地的沉积充填演化首先受到盆地构造作用的总体控制。盆地的形成、演化到最后的衰亡是构造沉降到抬升的结果。不同成因的盆地具有不同的构造成因,也具有不同的沉积充填模式。盆地中区域性的沉积旋回往往是多期次或多旋回性地球表层构造作用的响应。因此,盆地充填中高级别的一、二级层序的形成多与区域性构造升降作用有关,层序界面往往是构造作用产生的构造不整合面或古构造运动面。从全球构造体制上,大陆板块的裂解、海底扩张、板块的聚合和造山作用等被看作是导致巨旋回或超旋回(一、二级层序)的沉积基准面或海平面变化的主要原因。这些区域性构造过程可导致大区域的沉降或隆升,引起盆地或洋盆体积和形态的明显变化,对沉积基准面或海平面区域性长周期的变化产生重要影响;而区域板块构

造轨道驱动作用和盆地构造的脉冲作用等也可导致中、高频的旋回变化^[42]。在构造相对活动的盆地中,构造沉降速率的变化往往是沉积基准面或盆地基底升降的最重要的控制因素,因此也是可容纳空间的最直接的控制因素^[10,12]。由于盆地的构造-古地理及气候背景是随盆地的演化而不断变化的,不同盆地演化阶段的沉积充填样式或沉积体系域配置等也随之发生变化,这导致了层序地层模式的多样化。因此,层序地层模式的建立,必须考虑盆地不同构造演化阶段的构造格架和构造作用。如在裂陷湖盆形成的初期,以发育冲积-浅湖盆型沉积层序为特征;裂陷中期,盆内断裂和次级凹陷连通,发育半深湖-深湖盆层序;裂后晚期,盆地沉降减慢,主要发育冲积-浅湖盆型层序^[10-11](图2)。近年来,对我国南海北部被动大陆边缘盆地的研究表明,从裂陷的不同裂陷幕的沉积层序,到裂陷与漂移过渡期的破裂层序、漂移期(裂后晚期)层序及后海底扩张期层序等构造-沉积演化阶段发育的沉积层序均具有明显不同的沉积体系域模式^[12,43]。在渐新世末破裂期形成的破裂层序,显示出一个区域性的水进-水退旋回,并以发育大规模的陆架边缘三角洲为特征^[12](图2)。这种破裂层序大体上可与大西洋的破裂层序相类比^[44]。同沉积构造作用和构造地貌等对层序发育的控制作用,在文后将进一步讨论。

自Vail等试图以全球性海平面变化周期来解释沉积层序发育机制以来^[5],已经历了近半个世纪的探讨和争论。海平面变化的研究一直在进行并不断取得新的进展^[45]。尽管全球海平面变化仍然是一个广泛关注的科学问题,对于沉积层序或沉积旋回的制约因素更多是考虑其与相对海平面变化的联系。不同区域或盆地中的海平面变化记录受到了构造作用的叠加;同时,沉积物的供给变化还会导致局部地区海侵-海退的变化。研究表明,低级别的层序或高频沉积旋回往往与Haq等^[45]建立的全球海平面变化周期有较好的可比性,表明它们的形成受到了全球海平面变化的控制;而高级别或区域性的沉积旋回或复合层序常常受到了构造抬升或沉降作用的叠加或控制。如对塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩台地的层序地层和海平面变化研究及对南海被动大陆边缘盆地晚渐新世以来的沉积层序研究均表明,三级和部分四级层序所反映的沉积旋回与Haq的海平面变化周期基本可以对比,而复合层序(3~10 Ma)明显受到构造沉降速率变化的制约^[11,46]。另外,对于湖盆来说,湖平面变化对沉积相的分布和沉积旋回具有与海平面相似的控制机制。许多湖盆的沉积旋回变化都显示出较稳定的湖平面变化周

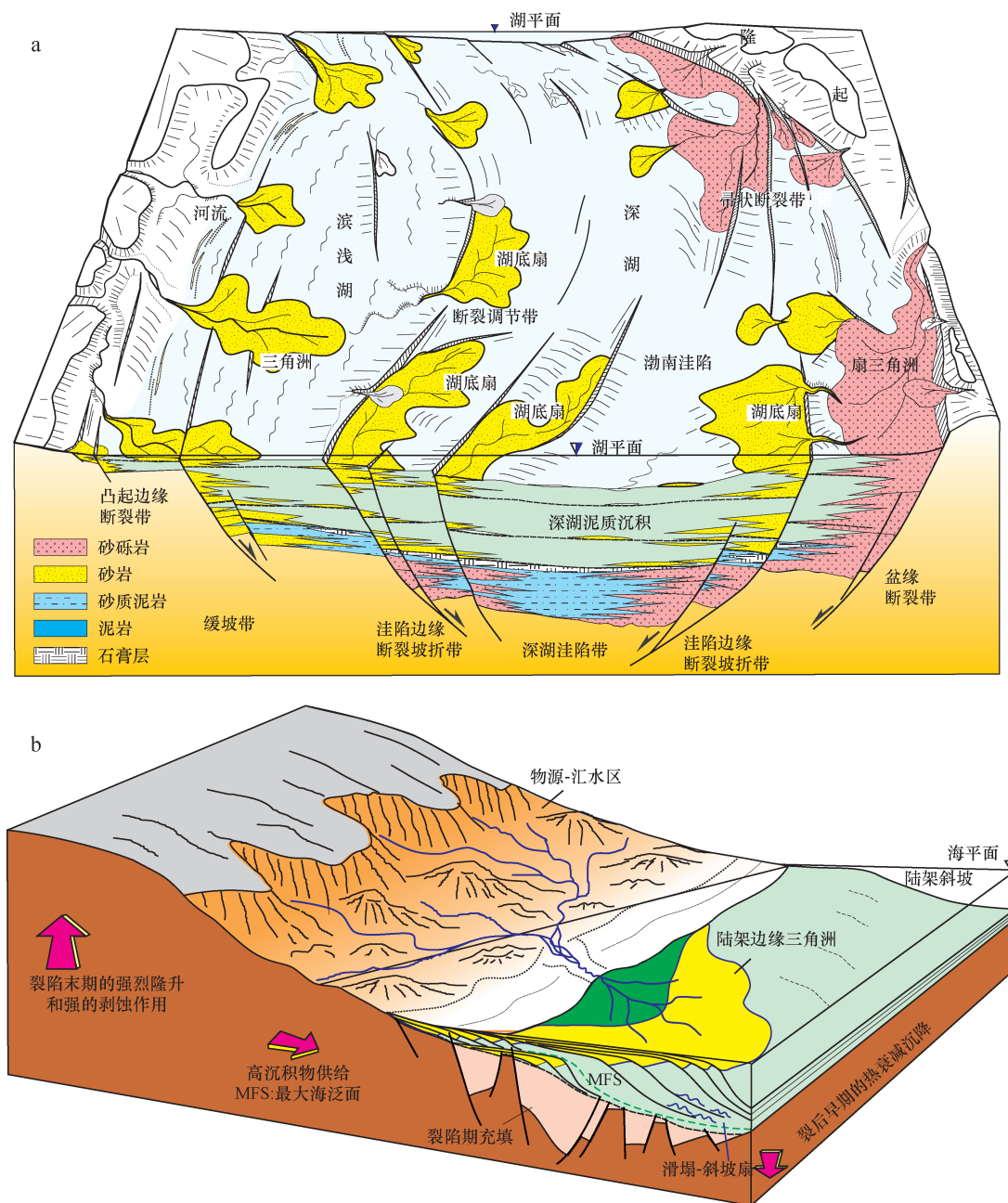


图2 (a)断陷湖盆沉积充填样式及物源和断裂坡折带(构造古地貌)对沉积物分散体系的控制示意图;

(b)以南海北部大陆边缘为例建立的破裂层序的沉积模式及其形成背景(据林畅松等修改,2004,2018)

Fig.2 (a) Schematic diagram showing the sedimentary filling pattern of lacustrine fault depression basin and the control of provenances and fault slope breakzone (tectonic palaeogeomorphology) on sediment dispersal systems; (b) the sedimentary pattern and forming setting of the breaking sequences—a case study of the northern margin of the continental shelf in South China Sea (modified after Lin Changsong, et al., 2004, 2018)

期。但湖平面的变化相对要复杂,高频的旋回变化不稳定。在进行高频湖泊层序对比时,必须在较多钻井和高分辨地震资料的约束下进行。湖平面变化是否受到海平面变化的影响或存在联系,还存在争议。难以获得层序界面的精确定年使得这一问题目前还不能解决。

气候变化是海或湖平面变化的重要控制因素。全球气候变化可引起冰盖的消长,从而导致海水体积和

海平面的变化。由于湖泊受气候变化的影响远比海洋大,湖面变化的频率可能比海平面变化的频率还高,幅度也很大。米兰科维奇天文周期变化引起的地球日照量的周期性变化,被认为是引起气候高频周期性变化的重要因素。这种周期性的气候变化引起极地冰盖层的消长,从而导致海水体积和海平面的周期性变化。许多海或湖盆沉积中识别出的四级(0.08~0.5 Ma)和五

级(0.03~0.08 Ma)高频沉积旋回,被认为与米兰科维奇天文气候周期变化有关。这方面的研究已成为国际地质研究的一个热点,并不断取得许多重要的进展。

2 沉积物分散体系与源-汇系统分析

沉积盆地分析一直重视对盆地沉积物来源、搬运及沉积过程的研究。在最早的盆地分析经典著作《盆地与古流分析》中就强调了盆地研究中沉积物搬运古水流方向分析的重要性^[47]。Galloway 把相当于沉积体系域的成因地层单元看作是同一时期沉积物分散体系的沉积^[48]。沉积物分散体系(sediment dispersal systems)是指盆地中沉积物被搬运、分散和堆积的路径及过程,也就是说沉积体系中沉积物的搬运和堆积过程。沉积物注入盆地后,其搬运路径或分散过程是极其复杂的,与盆地古构造、古地貌及盆内的沉积动能等因素密切相关。在某一特定沉积体系域形成期,沉积物分散体系的格局受控于盆地的构造作用、海或湖平面变化或沉积基准面变化^[17]。

尽管沉积盆地分析一直重视对沉积物源及分散体系的研究,但从来没有像今天这样深刻认识到从“源”到“汇”整个系统的研究对揭示地球表层演化历史的重要性。“源-汇系统”把从物源区形成的物源最终搬运到深海盆地沉积下来的整个过程作为地球表层的动力学系统加以研究。许多重大的国际地球科学计划

设立了有关源-汇系统的长期性研究计划。如美国国家自然科学基金会和联合海洋学协会组织的“大陆边缘科学计划(Margins Program Science Plans 2004)”,把从造山带到深海的源-汇系统列为地球科学的一个重要研究领域。源-汇系统中保存下来的地质信息,是沉积物从物源区到最终沉积区整个地球表层动力学过程的记录,也是岩石圈深部与地球表层物理、化学、生物及气候条件等相互作用的结果。因此,源-汇系统的研究是地球动力学系统研究的重要组成部分。现代高精度的测试技术、高分辨率的地球物理探测及模拟技术使概念性的理论分析变成可行的工作思路和研究方案。“源-汇系统”的研究将深刻影响地球动力学研究的发展趋势和方向。

2.1 源-汇系统的类型、规模与地貌构成

从剥蚀区形成的物源,包括风化剥落的颗粒沉积物和溶解物,搬运到沉积区或汇水盆地中最终沉积下来,这一过程被称之为源-汇系统^[49-50]。地球表层事实上存在着不同类型、不同规模的“源-汇系统”,具有特定的剥蚀和沉积地貌的构成特征。

现今从大陆到深海平原的源-汇系统构成地球表面一级的源-汇系统。这一源-汇系统包括了从汇水(剥蚀)区、冲积-滨海平原区、浅海陆架区、大陆斜坡区及深海盆地区等多个区域性的剥蚀-沉积地貌单元(图3)。源-汇系统分析需要对这些不同的地貌区带

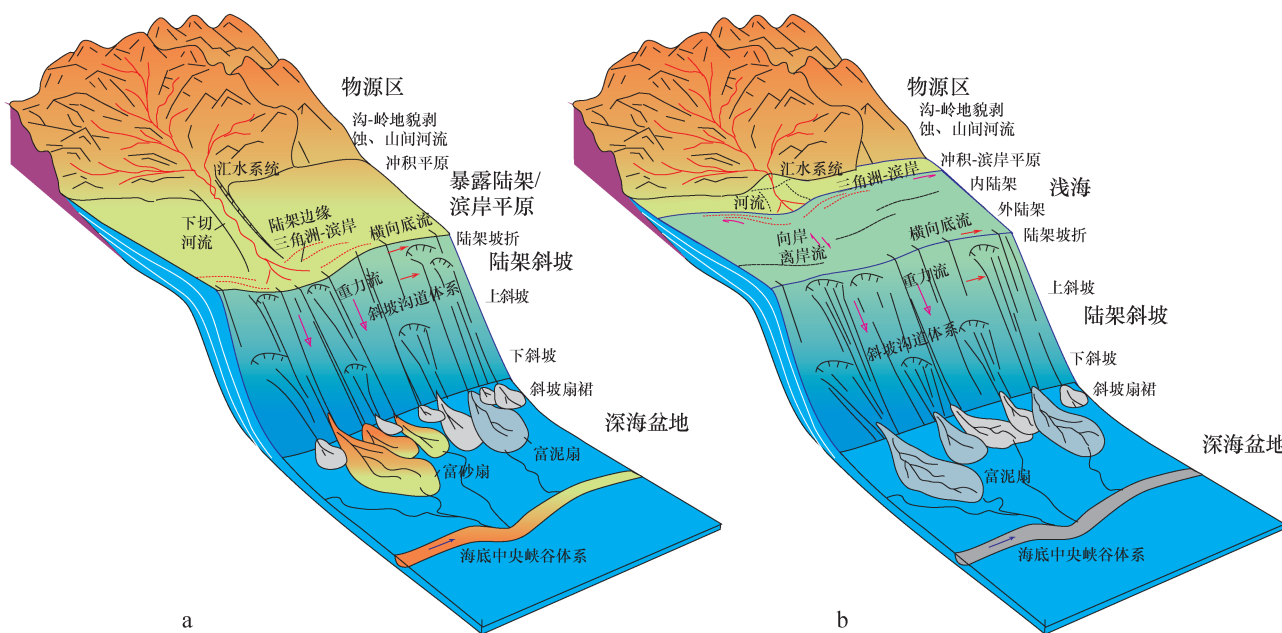


图3 从物源区到深水盆地低水位期(a)和高水位期(b)的源-汇系统示意图

Fig.3 Schematic map showing the “Source-to-Sink” systems from drainage area to deepwater basin during highstand(b) and lowstand(a) periods

发育的地形、水道或沟谷地貌以及沉积体系开展定量或半定量的描述,探讨包括物理、生物和化学作用的剥蚀、搬运及沉积的动力学过程并进行过程模拟分析^[50-51]。

许多陆内大型湖盆周边为造山带或长期隆起区所围限,也存在一个从物源区、冲积平原到滨-浅湖、最后为深湖的多级地貌单元组成的源-汇系统^[52](图2a)。在我国中、新生代以来发育了许多大型陆内湖盆。这些盆地周边物源区的形成与陆内的造山作用、断块隆升或古老隆起区的隆升作用等有关。盆地的类型和构造背景决定着盆地地貌和源-汇系统的基本特征。如陆内前陆盆地、断陷盆地等构造活动盆地,其物源体系近且方向多、汇水盆地相对小、沉积物类型多且对气候变化响应敏感;而大型的内陆拗陷盆地,物源体系相对稳定、沉积相带宽、水系发育且气候变化对沉积旋回影响十分明显。构造活动性、气候条件及湖平面变化等共同控制着不同地貌带和沉积相带的发育及宽、窄的变化^[52]。

从剥蚀区到大陆边缘、盆地深水区的“源-汇”系统概念事实上是一个理想化的、总体上的“源-汇”概念,而忽视了盆地内或次一级的源-汇关系或沉积物搬运、分散过程与沉积体系发育的关系。后者研究恰恰是对沉积环境或沉积相、沉积砂体分布预测的关键。首先,盆地可能接受来自不同汇水区的沉积物供给。如在中国东部的中、新生代断陷盆地中,都发育有盆地陡坡背景的横向的近物源体系、盆地轴向的远源体系以及盆地缓坡背景的近源或远源体系,分别形成陡坡冲积扇或扇三角洲沉积体系、缓坡的河流-河流三角洲体相带及轴向或纵向的河流三角洲体体系,盆地中部的深湖浊积体系可接受多方向的物源供给。在海洋盆地中,同样存在不同的源-汇体系,Schattner 和 Lazar 等^[53]在研究地中海东部的源-汇系统时划分出“主要的轴向源-汇系统”和“次要的轴向源-汇系统”,横向的洋流活动可提供这些源-汇体系之间的次级的物源。这些源-汇系统对海平面变化的响应是不同的,受到构造、地貌等明显影响。事实上,各类盆地都具有相当复杂的物源-沉积物分散-沉积充填系统。

盆地沉积充填中,沉积物分散体系(搬运通道,如河道、重力流水道等)及其沉积体的源-汇关系可看作是更次一级的“源-汇系统”。如山间沟道与冲积扇或扇三角洲、分流河道与三角洲朵体、大陆斜坡边缘下切峡谷与斜坡扇或海底扇等的源-汇关系。追踪沉积物搬运通道及其沉积体在含油气盆地的有利储集砂体的分布预测具有重要意义。具有高分辨率的地震地貌和地震沉积学分析技术为这些研究提供了新的有效手

段。在我国含油气盆地的分析中,储层沉积学者较早就注意到了“源、沟、扇”成因关系的分析并应用于砂岩油气藏的预测中。在这些盆地的沉积充填研究中还深刻地认识到,同沉积构造、特别是同沉积断裂活动对沉积物分散路径及其最终的沉积充填和分布等具有重要控制作用^[20]。

2.2 剥蚀区地貌与物源分析

从沉积记录追索母岩性质、来源及物源区的构造事件或背景,已有很长的研究历史。沉积物源的性质、供给量变化等与物源区的母岩组成、构造作用及气候条件等密切相关。山区的剥蚀地貌是由构造运动与气候驱动的剥蚀动力学过程所决定的。造山带的构造作用具有强大的破坏力,构造的挤压、碰撞或构造-热隆升导致岩层的破坏、崩塌,可产生大量的沉积物源;风化、侵蚀又在很大程度上依赖于气候因素。长期的剥蚀作用把剥蚀区雕刻成纵横交错的山谷地貌。在地质记录中恢复古剥蚀区地貌是极其困难的。被淹没的古隆起的顶面形态是一个最终的、残余的状态。高分辨的三维地震数据为这项研究提供了较可靠的手段。当前,国际上广泛开展对现代剥蚀作用及其与沉积物形成的关系及制约因素等的研究。这不仅对认识近代环境变化有重要意义,也有助于对古代剥蚀过程和物源条件的分析和类比。

沉积层(岩)的岩矿组分和矿物岩石地球化学等被广泛用于判别物源的构造背景和母岩性质^[54-55],如 Dickinson 的物源三角图解,当前仍然是物源性质及物源区背景分析最有用的方法之一。重矿物组合类型和稳定系数是分析母岩性质和来源方向的重要依据。这些方法使用简便,但常常提供有关物源母岩及构造背景分析的重要信息。气候条件对物源区的影响已开展过不少的研究,但试图从沉积岩特征上完整提取物源区的气候信息,还任重道远。近些年来,一些地球化学分析方法在物源区分析中的应用发展迅猛,如碎屑锆石年代分析^[56-57],可提供物源的精确定年和构造背景的信息,是当前国际上的研究热点。物源的供给量取决于物源区的剥蚀速度和汇水面积,而供给量的变化对盆地的沉积充填具有十分重要的控制作用。值得指出,从源于剥蚀区的沉积物可能经历了多次的沉积、剥蚀再搬运、再沉积的过程。部分沉积物最终堆积到深水盆地,部分可能沉积到盆地的其他部位。河流的再冲刷作用,各种洋流、波浪、滑塌和重力流等的再搬运和再沉积作用,使得沉积物源的追踪分析变得十分复杂。

2.3 斜坡沟谷地貌与斜坡扇、盆底扇体系

盆地中的坡折带是最易形成下切沟谷和重力滑塌再搬运的地貌带。陆架边缘斜坡或坡折带是从陆架区向深海区过渡的地貌突变带^[58]。由于这一区带是形成重要油气藏的有利区带, 长期以来还受到石油地质研究和油气工业勘探的高度重视。在相对高水位期, 来自剥蚀区的沉积物主要堆积于广阔的陆架区; 而在低水位期, 沉积物越过大陆斜坡边缘坡折带搬运到下斜坡至深海平原堆积(图3)。因此, 该带是浅海陆架区与深海盆地之间的物源输送的枢纽带, 成为源-汇系统研究的一个重点区。陆架坡折带下切沟谷、峡谷的发育和重力滑塌等与斜坡扇或海底扇体系发育的关系是研究的一个聚焦点。在我国南海珠江口盆地, 大量地震、钻井资料的综合研究表明, 陆架边缘三角洲体系与前三角洲斜坡-陆架边缘的富砂斜坡扇沉积具有密切的源-汇关系^[12]。源于大陆边缘斜坡泥质的上斜坡滑塌或沟谷化侵蚀的物源形成以泥质为主的斜坡扇, 斜坡沟谷在海平面上升期主要由泥质沉积物所充填。深切陆架斜坡并延伸到深海区的一些大型海底峡谷的发育, 不仅与海平面的下降有关, 也可能与物源区的构造强烈隆升有联系。如在琼东南盆地上新世以来发育的大型下切沟道-海底扇体的研究发现, 大量的物源供给与河流的源头区, 即青藏高原的隆升有关^[10]。

有些斜坡水道的沉积充填具有单向迁移的特点, 成为一种特定的、由海洋底流与重力流联合作用的斜坡水道沉积模式。最为壮观的这类斜坡水道体系是发育在我国南海北部晚中新世以来的斜坡沟道体系^[12, 43, 59]。这些沟谷的宽窄不一, 几百米到千余米; 单个水道为“V”型, 并呈侧向或斜向多个水道叠置。“V”型斜坡沟谷主要源于外陆架-上斜坡区, 被认为主要是在海平面处于低水位期形成的重力流水道, 而水道主要是由沿斜坡走向的底流形成的前积层充填的。这种由底流沿横向搬运细粒沉积物充填重力流在低水位期侵蚀形成的斜坡水道, 在被重力流水道侵蚀顺坡搬运沉积物供给斜坡扇或海底扇堆积, 形成了一种特殊的源-汇体系。显然, 揭示不同源-汇系统的形成演化的控制机制, 即构造、气候及海-湖平面变化等因素相互作用的地表地球动力过程的约束, 是建立具有预测或类比意义的源-汇模式的关键。

2.4 盆内古隆起的局部源-汇系统

盆内古隆起发育期遭受剥蚀可提供盆地充填的局部物源。识别古隆起及其伴生的物源体系, 对正确恢

复盆地古地貌和古地理再造十分重要。近年来, 在对渤海湾盆地的研究揭示了与盆内古隆起有关的源-汇过程。在同裂陷期, 广泛发育有盆内古隆起或断隆构造, 不同古隆起形成多方向的、近距离的源-汇体系。依据不同的古隆起物源与相应的沉积体系, 可划分出盆内不同古隆起的源-汇体系。古隆起边缘的同沉积断裂或构造古地貌特征对沉积物分散体系、层序结构及砂体分布具有重要的控制作用。裂后期, 盆内的古隆起被逐渐淹没和超覆, 随着这一过程被超覆于盆内的局部物源形成的砂质沉积体系, 具有良好的成藏条件, 油气勘探已证实可形成十分重要的油气藏。对大型的、经历了长期地质演化和多期构造变革的沉积盆地或叠合盆地, 盆内常常发育有多个古隆起, 它们遭受剥蚀形成的源-汇系统的识别和恢复对盆地古地理再造和沉积充填历史的研究具有重要意义。

从盆地的形成到衰亡, 是一个漫长的地质演化历史。盆地的构造背景、古地理格局、气候条件及海-湖平面的升降等都经历过重大变化, 源-汇系统也发生过深刻变化。在等时的地层格架中恢复不同盆地演化阶段的源-汇体系, 重塑包含有源-汇概念的盆地沉积充填演化史, 应是盆地沉积充填分析的一个重要的发展方向。

3 盆地构造沉积学分析

构造地层学 (tectonostratigraphy) 或构造沉积学 (tectonosedimentology) 的概念由来已久, 人们早期更多是强调大地构造沉积学研究, 把大地构造或板块构造作用与沉积充填相结合进行分析。然而, 近20年来, 大量的研究成果来自盆地尺度的构造地层或构造沉积分析^[7, 60-62]。构造沉积分析已成为涉及到从大地构造沉积学到盆地中同沉积构造或构造古地貌对沉积充填控制分析的一个广泛的研究领域。这里讨论的盆地构造沉积学分析, 主要强调把盆地的沉积充填过程与盆地的构造作用相结合的分析方法。近年来, 在构造相对活动的沉积盆地中, 结合盆地构造作用与盆地古地貌、沉积物分散体系以及沉积充填样式的成因分析, 取得了许多显著的进展。在陆内含油气盆地中的大量研究表明, 把盆地构造作用与沉积充填过程相结合分析是揭示沉积层序和沉积体系分布, 以及建立生、储、盖的时空配置并建立有效预测模式的重要基础。我国沉积地质学者近20余年来在裂陷盆地、陆内前陆盆地以及大型叠合盆地等的构造沉积学分析研究中, 不断获得创新成果, 并为指导油气勘探提供了基础。以下

对一些重要的盆地构造作用的沉积响应作简要分析。

3.1 盆地阶段性、多幕性构造演化过程的沉积充填响应

盆地形成演化过程中的构造作用,如盆地构造演化的多旋回性或阶段性、盆地构造格架样式的演化和隆-坳格局的变迁以及同沉积构造(断裂)活动等的沉积充填响应研究,是沉积盆地沉积充填分析的中心内容。前面已指出,盆地构造阶段性或多旋回性的演化,常常控制着盆地区域性沉积旋回的发育。它们多为构造作用产生的不整合面所分隔,构成了盆内高级别的成因地层单元,并显示出特定的源-汇体系配置或沉积体系域样式^[19,61]。

在裂谷型盆地中,幕式的裂陷作用往往是形成同裂陷期区域性沉积旋回的直接因素^[10,42,63]。我国东部滨太平洋构造域中、新生代的断陷或裂谷型盆地的形成演化都表现出多幕的裂陷过程。这种过程可应用定量的数值模拟方法加以再现^[64-65],松辽、二连、渤海湾、东海和南海等裂陷或裂谷盆地的区域性沉积旋回,包括一、二级层序或复合层序,一般都属构造控制的构造层序。这种成因的联系主要体现在:①分隔区域性沉积旋回的不整合界面往往是具有角度或微角度接触关系的古构造运动面,包括盆地基底不整合、分隔不同裂陷幕沉积充填的裂陷幕不整合、裂后或破裂不整合、破裂末不整合以及拗陷期的构造反转不整合等;②区域性沉积旋回与幕式的构造沉降速率变化具有较好的对应关系;③由同沉积断裂生长系数或活动速率反映出不同裂陷幕的断裂活动强度具有明显变化;④不同裂陷幕的盆地构造格架发生明显变化,如隆-坳格局或同沉积断裂展布方向的变化等;⑤沉积物源和沉积体系的发育和分布样式的变化等。分隔不同裂陷幕的不整合面的形成与每一裂陷幕末期的构造抬升和下一裂陷幕开始的构造变动有关。裂后或破裂不整合和破裂末不整合的形成则主要与裂后的热隆起及破裂期和破裂末期的构造作用有关^[12,44]。拗陷期的构造反转主要是由区域构造应力场变化引起的构造反转或隆起事件,如挤压或走滑挤压作用,形成拗陷期的构造不整合界面,这也常表现出幕式或多期次的特点。

在前陆构造背景中,盆-山耦合过程的沉积响应机制是被广泛接受的构造-沉积响应模式。前陆逆冲造成的岩石圈挠曲沉降过程也具有明显的阶段性或多幕性的特点,控制着区域性沉积旋回的发育演化。我国中西部分布有中、新生代众多的陆内前陆盆地。这些盆地的物源体系和沉积充填过程受到了盆-山构造作用的明显控制。造山带剥蚀作用与盆地沉积充填的

响应关系研究一直是这一领域研究的一个热点。在塔里木盆地库车前陆坳陷的研究表明,在强烈逆冲和造山作用期,形成了山前带巨厚的、同逆冲构造期扇或扇三角洲沉积;随之是快速挠曲沉降导致了区域性的水进。后期逆冲造山作用的减弱,应力松弛和剥蚀导致回弹隆起,盆地沉降变缓至抬升,结束一个区域性沉积旋回的发育过程。这种过程是多期次的,控制着来自前陆逆冲带、前隆斜坡带及轴向物源-沉积物分散体系和沉积体系域的时空配置和演化^[20,65]。沿前陆斜坡发育的、横向广泛分布的辫状河和辫状河三角洲沉积体系,是前陆斜坡带发育的一种典型的沉积体系^[66-68]。这些辫状河和辫状河三角洲的横向迁移形成大面积分布的砂体,可形成重要的油气储层。应用回剥分析法恢复的前陆挤压挠曲构造沉降曲线和沉降速率的变化可为这种机制的解释提供重要的佐证^[20]。

我国诸多规模较大的沉积盆地,如塔里木盆地、鄂尔多斯盆地及四川盆地等均经历过漫长的、多期次的构造变革,具有极其复杂的、多旋回的构造-沉积演化和独特的油气聚集过程。这些盆地多期次的构造变革形成了多个区域性的或盆地范围分布的构造不整合面。这些重要不整合面分隔着单一原型盆地的沉积充填。这种界面上、下的盆地古构造、古地理以及海、陆、源区分布发生了重大变化。以这些不整合为标志的盆地变革期的古构造、古地理、古气候等往往发育突变;而每一原型盆地发育过程中的构造古地理背景是相似的,或是渐变的。盆内重要油气藏的形成和分布、再调整或重新配置与这些重要的变革密切相关^[67]。研究盆地关键变革期的构造-古地理的演变,即重要不整合面上、下构造-古地理的变化,是一个十分值得关注的重要课题。如塔里木盆地中奥陶世末至晚奥陶世早期的构造变革,导致了盆地大型碳酸盐岩台地的分异,改变了隆-坳格局和古地理展布,形成了近东西向展布的中央(塔中)隆起带、沿东南缘分布的塘古巴孜斯坳陷以及北部坳陷带^[69]。这期盆地变革主要与南部北昆仑洋的闭合、碰撞导致的向北挤压作用有关,此时盆地发生了从被动边缘-克拉通台地向聚敛构造背景的重大转化^[46]。晚奥陶世,盆地出现了大规模海侵,形成了盆地范围的深水盆地环境,以发育深水浊积体系、深水陆棚及混积浅海-半深海体系为特征。分布于满加尔坳陷北缘的大规模的陆源碎屑海底扇可能来源于北缘的隆起带,北缘库鲁克塔格露头剖面上测得的古流方向由北西指向南东;而盆地东部满加尔坳陷东缘的塔东区陆源碎屑浊积扇从砂体展布及岩石组构等特征表明来自东南缘的阿尔金隆起带。受古隆起地

貌的制约,深海重力流盆地充填显示出一种特定的沉积体系配置样式^[11]。

3.2 构造(断裂)坡折带与构造古地貌

同沉积构造,特别是同沉积断裂对沉积充填的控制作用,是沉积盆地分析长期关注的研究内容。同沉积断裂会导致沉积中心和厚度和沉积相等的突变,控制着沉积相带的发育和分布。事实上,同沉积构造对沉积的控制主要体现在对沉积地貌的控制。尤其是明显活动的同沉积断裂,可形成突变的地貌带或斜坡带,对沉积物的搬运流体和沉积过程及沉积体系或沉积相的发育和分布产生重要的影响。

我们曾提出过构造(断裂)坡折带的概念^[70-72]。构造(断裂)坡折带是指盆地中长期活动的同沉积构造,特别是同沉积断裂形成的古地貌突变带或斜坡带。构造坡折带常常控制着特定沉积相带或沉积体系域的发育部位,构成古构造、古地貌、古环境单元以及古水文条件的分界(图2)。在层序地层学分析中,坡折(带)是一个重要的概念。滨岸坡折和陆架边缘坡折是沉积层序分析中两个最重要的地貌特征或标志。在不同类型的盆地中,包括裂陷盆地、前陆盆地和碳酸盐岩台地等,都可发育这些由构造或断裂形成的坡折带,对沉积体系的发育和分布起到重要的控着作用。在我国许多陆相盆地中,规模较大的同沉积断裂或基底断裂的长期活动形成的古地貌斜坡或坡折带,不仅对沉积体系的发育和分布,而且对油气藏的形成和分布都起到了重要的控制作用(图3)。构造坡折带的概念提出后在我国许多盆地的层序地层和沉积充填分析以及砂岩油气藏预测勘探中得到了广泛的应用,取得了重要的经济效益。构造或断裂坡折带从成因类型上可划分出断裂坡折带(断坡带)、断弯坡折带和褶皱弯曲坡折带等^[73-75]。构造坡折带的研究,需要对构造坡折带的构造样式和动力学成因、坡折带古地貌、沉积物分散体系以及层序结构等进行综合分析。围绕这一研究已形成—个涉及沉积学、构造地质学以及油气聚集成藏的综合研究方向。

盆地沉积期相对宏观的地貌、地形变化主要受控于盆地的沉降差异,而沉降差异主要与同沉积构造的活动有关。从区域的或盆地范围,我们把同沉积构造活动所形成的地貌称为构造古地貌^[71,76]。盆内的古构造单元或构造带,事实上构成了盆内不同的地貌单元。盆地的隆—坳格局,即古隆起—古斜坡和古坳陷的发育和分布,是盆地中高级别的地貌单元,决定着盆地的基本地貌特征。盆地中各种同沉积构造活动在规

模和组合样式上是多样化的,可产生复杂的构造古地貌,并受控于构造应力场、先存断裂系再活动及重力调节作用。如在断陷盆地中,不同沉积断裂的活动可造成复杂的地貌变化,常见的如斜列状断裂构成的构造调节带、受主干断裂与其近于垂直的调节断裂构成的“梳状”断裂系、帚状断裂系及叉形相交的同沉积断裂系等形成的构造古地貌。它们对沉积物的搬运或分散路径和沉积相的发育分布起到主导性的控制作用。因此,再造盆地不同时期的构造古地貌是阐明沉积物分散和堆积过程,并对沉积体系或砂体等的分布作出准确预测的基础。沉积盆地的古(构造)地貌是近年来在国际上颇受关注的研究课题。以地震资料为基础的古地貌恢复研究,即“地震古地貌学”,已成为沉积地质和盆地分析领域—个重要的新分支学科。

盆地和山脉地貌的变更或转换,是地球表面地貌对地球动力学过程的直接响应。大陆的裂解、大洋闭合、板块聚合和碰撞造山,是引起地表大尺度地貌变化的动力学成因。盆地地貌演变是对区域构造背景演化的响应。因此,盆地的构造格局及其演化决定着盆地构造地貌的总体变化。盆内的沉积物堆积在不断地改变着盆地的地貌特征,但盆地总体的地貌格局和演化,主要是受到盆地构造格架及其演化的控制的。

3.3 古隆起与不整合分布样式

古隆起是沉积盆地中最重要的构造单元之一。古隆起的形成演化研究长期以来受到广泛重视。古隆起或古隆起带对沉积作用和油气聚集具有重要的控制作用,往往是重要的油气富集带。盆内古隆起可以是基底构造继承发育的,或在盆地某一阶段形成的,与盆地基底的分异或盆地形成演化过程中的各种隆升作用有关。盆内许多规模较大的古隆起都会在隆升期遭受暴露和强烈剥蚀,形成角度或微角度不整合。随后,盆地的沉降使大部分古隆起被淹没,有些保存原有形态,有些则受到后期强烈的改造。古隆起剥蚀区的分布可通过追踪地层削蚀点的分布加以圈定。不整合剥蚀量的估算,可应用声波时差法、镜质体反射率法或其他热演化指标进行估算,但这些方法都受到不整合面埋藏深度和钻井资料的限制。在具备网状地震剖面或连井剖面的约束下,可依据剥蚀面下伏地层结构外延估算剥蚀量。这种方法是进行剥蚀量平面分布追踪和编图的基本方法。被淹没的古隆起地貌可通过拉平古隆起顶面的沉积层来恢复,这需要对拉平面下伏至古隆起面之间的地层厚度进行去压实和古水深的校正^[69]。

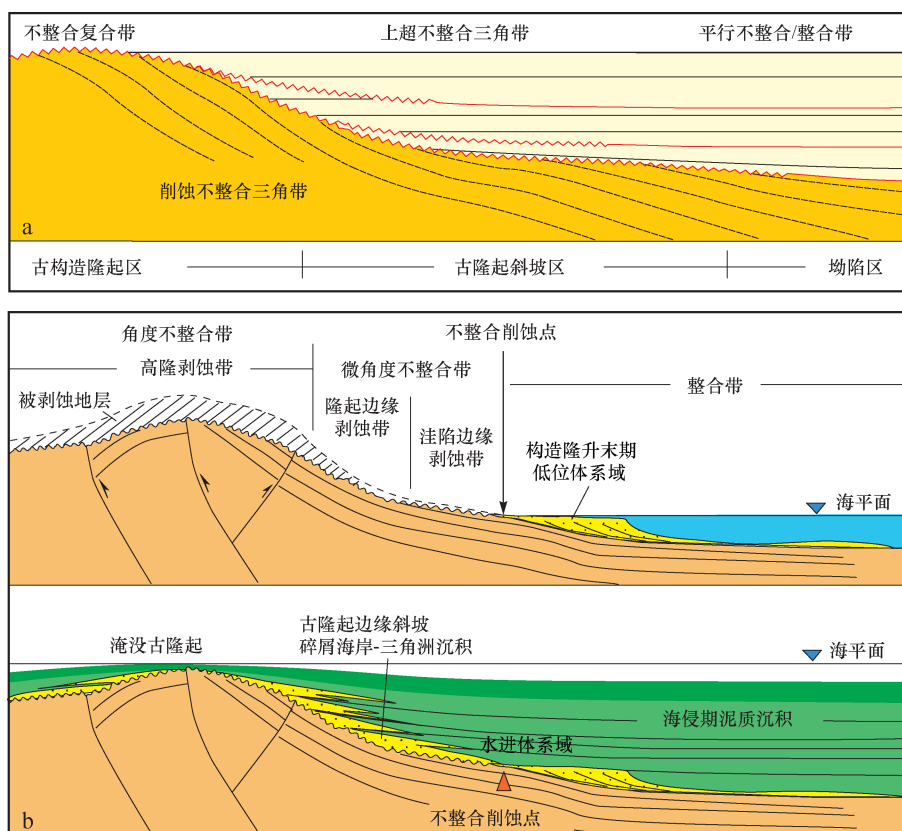


图4 古隆起与不整合分布样式(a)和古隆起形成演化对沉积体系域发育的控制作用示意图(b)

Fig. 4 Paleouplifts and distribution pattern of unconformities(a) and the schematic diagram showing the control of paleouplifts on depositional system tracts(b)

在构造活动的大型盆地中,常常发育多个不整合并显示出复杂的分布和组合样式^[62]。研究发现,通过分析不整合的组合结构特征,可恢复古隆起的原始分布及其地貌特征。主要不整合面的接触关系在不同的构造带上常呈现有序的变化,可从高角度不整合过渡为微角度或平行不整合至整合接触,反映了从高隆剥蚀区到斜坡及拗陷区的古地貌变化。在高隆带,多次的强烈剥蚀常导致多个不整合的合并、复合。从古隆起区向拗陷区,不整合的组合样式可划分出:①不整合复合带,为长期或多次抬升古隆起的高隆带;②不整合削蚀(对下伏地层)三角带或超覆(上覆地层)不整合三角带,代表从古隆起向拗陷区的过渡带或古斜坡带;③微角度到平行不整合带,为古斜坡带向拗陷区过渡的下斜坡带;④平行不整合带,为拗陷的连续沉积区(图4)。不整合三角带是形成大型不整合油气圈闭的有利地带。圈定这些不整合分布带对再造古隆起地貌和预测地层圈闭油气藏的分布等具有重要意义。

4 盆地沉积充填响应过程的动态模拟

地质过程模拟分析,可动态地再现地质演化的过

程、检验地质解释或地质模式,以达到进行准确地质预测的目的。模拟包括物理和数字的过程模拟。数字模拟分析是通过应用定量的描述和分析方法,建立理论模型,借助计算机技术动态模拟或仿真地质过程,以达到检验地质解释和预测的目的。沉积过程的模拟分析,已有很长的发展历史,从交错层理到盆地整体不同尺度的沉积过程的模拟分析,国际上有大量的研究范例。近一二十年来,随着层序地层学和盆地沉积动力学研究的深入,沉积充填模拟研究得到了更广泛的发展。

盆地沉积充填过程是多种因素叠加、相互作用的一个复杂的过程。这些因素可归纳为两组基本的控制因素:一是控制可容纳空间的产生或消亡的因素,如构造升降、重力均衡作用及沉积物压实等;另一组则是控制沉积物搬运和堆积过程的因素,如水-盆地动能条件、沉积地貌或斜坡及沉积物搬运作用和供给量变化等。这些因素相互作用的结果将反映在沉积层的几何形态和沉积相的分布样式上。沉积盆地充填过程模拟系统需要综合考虑上述两个部分。盆地的沉降可结合回剥法和不同构造沉降的正演模型;而沉积层序或沉积体的形态和分布可考虑各种沉积地质营力一定时期

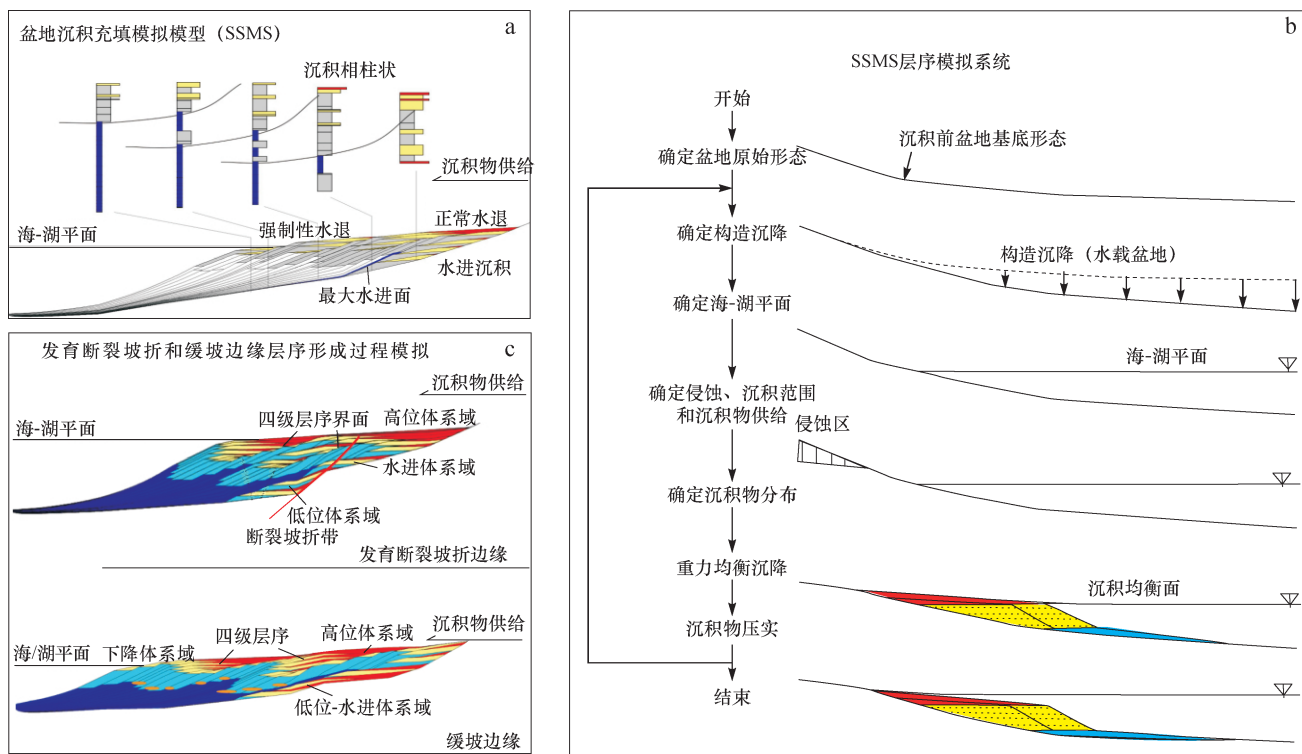


图5 SSMS 模拟系统的概念模型(a)、模拟工作流程(b)及模拟实例(c)

Fig. 5 The conceptual model(a), process modelling(b), and a simulation example(c) of the SSMS system

内相互作用的结果。在达到均衡的条件下,沉积体几何关系和总的岩相格局一般可用所谓的沉积均衡面来描述。沉积均衡面事实上是盆地动能条件与沉积地貌达到均衡的状态。从陆相至海洋沉积环境的沉积均衡面具有一定的变化趋势,与沉积盆地不同部位的能量有关。沉积均衡面的确定,可依据前人对现代环境观察的结果,并结合地震剖面显示的沉积形态加以分析确定(要去压实和消除构造的影响)。不同的沉积域或沉积相域,可用不同的沉积斜坡或曲线来表示。

基于上述原理,我们曾建立了二维沉积充填模拟系统(SSMS),再现各种层序界面的形成过程,揭示沉积体系和沉积相带的迁移及其时空分布样式,探讨构造升降、海平面或湖平面变化等相互作用对盆地沉积充填的控制(图5)。对南海被动大陆边缘沉积层序的模拟研究表明,盆地构造沉降对区域性沉积旋回和海平面总体的变化趋势有明显控制作用,而高频旋回主要与高频的海平面变化有关^[70]。针对构造相对活动盆地,如断陷盆地的沉积充填模拟分析揭示,内陆盆地沉积充填过程中^[10,77],一个拉伸幕从快到慢沉降速率的变化和反转是裂陷期不同裂陷幕复合层序及其界面形成的重要控制因素;而断块掀斜造成的差异沉降与高频湖平面波动的联合作用可能是相对三级或更低级别层序发育的成因。同时,不同湖泊层序类型,如深湖

盆层序、浅湖盆层序及河流-浅湖盆层序的发育,主要受控于沉积物供给量与构造产生的可容纳空间的相对大小。快速的构造沉降、高的湖平面和大量的沉积物供给是形成深水扇三角洲的必要条件;而沉积物的供给量变小及构造沉降量加大有利于形成水下扇或近岸湖底扇。断陷湖盆陡坡边缘断裂形成的古地貌坡折对浊积扇或湖底扇的发育部位具有明显的控制作用。这些认识得到地质观察的佐证。

5 结语

盆地沉积充填动力学分析,是当前沉积盆地分析的一个涉及多学科交叉的前缘领域。层序地层学研究的深化研究、构造-沉积学及源-汇系统等是目前国际上的研究热点。高新技术的不断发展、大量资料的积累和新资料的不断获取,为这一领域的研究提供了重要支持。盆地沉积充填动力学分析不仅可为地球动力学演化提供高分辨的沉积记录,而且不断为难度日益增大的沉积地质资源,特别是能源资源的勘探和开发提供新的理论支撑。盆地沉积充填动力学分析预示了深远的、广泛的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Matthews R K, Robley K. Dynamic stratigraphy: An introduction to

- sedimentation and stratigraphy [M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1974: 1–370.
- [2] Allen P A. Basin analysis: Principles and applications [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2005: 1–549.
- [3] 李思田, 林畅松, 谢习农, 等. 大型陆相盆地层序地层学研究——以鄂尔多斯中生代盆地为例 [J]. 地学前缘, 1995, 2(3–4): 133–136.
- Li Sitian, Lin Changsong, Xie Xinong, et al. Approaches of nonmarine sequence stratigraphy: A case study on the Mesozoic Ordos basin [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3–4): 133–136.
- [4] 解习农, 林畅松, 李忠, 等. 中国盆地动力学研究现状及展望 [J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 877–887.
- Xie Xinong, Lin Changsong, Li Zhong, et al. Research reviews and prospects of sedimentary basin geodynamics in China [J]. Acta Sedimentary Sinica, 2017, 35(5): 877–887.
- [5] Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. Global cycles of relative changes of sea level [C] // Payton C E. Seismic stratigraphy application to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir, 1977, 26: 99–116.
- [6] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence Stratigraphy [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1): 1–33.
- [7] 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析——以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例 [J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 365–374.
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yingzhi, et al. The sequence stratigraphy and tectonic stratigraphy analysis—Example from Mesozoic and Cenozoic tectonic active lacustrine basins of China [J]. Earth Science Frontier, 2005, 12(4): 365–374.
- [8] 林畅松, 刘景彦, 刘丽军, 等. 高精度层序地层分析: 建立沉积相和储层规模的等时地层格架 [J]. 现代地质, 2002, 16(3): 276–281.
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Liu Lijun, et al. High resolution sequence stratigraphy analysis: Construction of chronostratigraphic sequence on facies and reservoir scale [J]. Geoscience, 2002, 16(3): 276–281.
- [9] Neal J, Abreu V. Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method [J]. Geology, 2009, 37(9): 779–782.
- [10] Lin Changsong, Erikson K, Li Sitian, et al. Sequence architecture, depositional systems and controls on development of lacustrine basin fills in part of the Erlian basin, northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(11): 2017–2043.
- [11] Lin Changsong, Liu Jingyan, Eriksson K, et al. Late Ordovician deep-water gravity-flow deposits, palaeogeography and tectonic setting, Tarim Basin, Northwest China [J]. Basin Research, 2014, 26(2): 297–319.
- [12] Lin Changsong, Jiang Jing, Shi Hesheng, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the northern continental slope of the South China Sea: Responses to tectonic processes and changes in sea level [J]. Basin Research, 2018, 30(1): 568–595.
- [13] 秦国权. 微体古生物在珠江口盆地新生代晚期层序地层学研究中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(4): 1–17.
- Qin Guoquan. Application of micropaleontology to the sequence stratigraphic studies of late Cenozoic in the Zhujiang River Mouth basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(4): 1–17.
- [14] Brown L F, Fisher W L. Seismic stratigraphic interpretation of depositional systems: Examples from Brazilian rift and pull-apart basins [J]. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration, 1977, 165: 213–248.
- [15] 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.
- [16] Posamentier H W, Allen G P. Variability of the sequence stratigraphic model: Effects of local basin factors [J]. Sedimentary Geology, 1993, 86(1–2): 91–109.
- [17] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 1–374.
- [18] 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等. 断陷湖盆隐蔽油气藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(5): 593–598.
- Li Sitian, Pang Yuanlin, Lu Yongchao, et al. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: Sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 593–598.
- [19] 林畅松, 刘景彦, 张燕梅, 等. 库车坳陷第三系构造层序的沉积构成及其对前陆构造作用的响应 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, 32(3): 177–183.
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yanmei, et al. Depositional architecture of the Tertiary tectonic sequences and their response to foreland tectonism in the Kuqa depression, the Tarim Basin [J]. Science in China (D Series), 2001, 32(3): 177–183.
- [20] Lin Changsong, Wang Qinghua, Xiao Jianxin, et al. Depositional sequence architecture and filling response model of the Cretaceous in the Kuqa depression, the Tarim basin [J]. Science in China (D Series), 2004, 47(2): 86–96.
- [21] Fisher W L, Brown L F, Scott A J, et al. Delta systems in the exploration for oil and gas [M]. Austin, TX, United States: Publication of Texas University, 1969: 1–78.
- [22] Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [M] // Broussard M L. Deltas: Models for exploration. Houston: Houston Geological Society, 1975: 87–98.
- [23] Dalrymple R W, Choi K. Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 81(3): 135–174.
- [24] Korus J T, Fielding C R. Asymmetry in Holocene river deltas: Patterns, controls, and stratigraphic effects [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 219–242.
- [25] Orton G J, Reading H G. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size [J]. Sedimentology, 1993, 40(3): 475–512.
- [26] Penland S, Boyd R L, Suter J R. Transgressive depositional systems of the mississippi delta plain: A model for barrier shoreline and shelf sand development [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1988, 58(6): 932–949.

- [27] Porebski S J, Steel R J. Delta types and sea level cycle [R]. AAPG Annual Convention June 3–6, 2001, Denver, Colorado.
- [28] Porebski S J, Steel R J. Shelf-margin deltas: Their stratigraphic significance and relation to deepwater sands [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62 (3): 283–326.
- [29] Carvajal C, Steel R, Petter A. Sediment supply: The main driver of shelf-margin growth [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 96 (4): 221–248.
- [30] Lin C S, He M, Steel R, et al. Changes in inner-to outer-shelf delta architecture, Oligocene to Quaternary Pearl River shelf-margin prism, northern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2018, 404: 187–204.
- [31] Kolla V, Macurda Jr D B. Sea-level changes and timing of turbidity-current events in deep-sea fan systems [J]. *SEPM Special Publications*, 1988, 42: 381–392.
- [32] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis (I): Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73 (2): 125–142.
- [33] Gong C, Peakall J, Wang Y, et al. Flow processes and sedimentation in contourite channels on the northwestern South China Sea margin: A joint 3D seismic and oceanographic perspective [J]. *Marine Geology*, 2017, 393: 176–193.
- [34] Mitchum R M J. Seismic stratigraphy and global changes of sea level (Part 1): Glossary of terms used in seismic stratigraphy [C] // Payton C E. *Seismic stratigraphy—Applications to hydrocarbon exploration*. AAPG Memoir, 1977, 26: 205–212.
- [35] Patruno S, Helland-Hansen W. Clinoform systems: Review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelf edges and continental margins [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 202–233.
- [36] Steel R, Olsen T. Clinoforms, clinoform trajectories and deepwater sands [J]. *GCSSEPM Proceedings*, 2002, 22: 367–380.
- [37] Driscoll N W, Karner G D. Three-dimensional quantitative modeling of clinoform development [J]. *Marine Geology*, 1999, 154 (1–4): 383–398.
- [38] Cattaneo A, Correggiari A, Langone L, et al. The Late-Holocene Gargano subaqueous delta, Adriatic shelf: Sediment pathways and supply fluctuations [J]. *Marine Geology*, 2003, 193 (1): 61–91.
- [39] Kuehl S A, Allison M A, Goodbred S L, et al. The Ganges-Brahmaputra delta [C] // Gosian L, Bhattacharya J. *River deltas—Concepts, models, and examples*. SEPM Special Publication, 2005, 83: 413–434.
- [40] Helland-Hansenn W, Hampson G J. Trajectory analysis: Concepts and applications [J]. *Basin Research*, 2009, 21 (5): 454–483.
- [41] Paumard V, Bourget J, Payenberg T, et al. Controls on shelf-margin architecture and sediment partitioning during a syn-rift to post-rift transition: Insights from the Barrow Group (Northern Carnarvon Basin, North West Shelf, Australia) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 643–677.
- [42] Vail P R, Audemard F, Bowman S A, et al. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—An overview [C] // Einsele G, Ricken W, Seilacher A. *Cycles and events in stratigraphy*. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 617–659.
- [43] Jiang J, Shi H, Lin C, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the Late Miocene to quaternary northeastern shelf margin of the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 81: 79–97.
- [44] Soares D M, Alves T M, Terrinha P. The breakup sequence and associated lithospheric breakup surface: Their significance in the context of rifted continental margins (West Iberia and Newfoundland margins, North Atlantic) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 355: 311–326.
- [45] Haq B U, Schutter S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. *Science*, 2008, 322 (5898): 64–68.
- [46] Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the Ordovician carbonate platform margins in the Tarim Basin and its response to tectonism and sea-level change [J]. *Basin Research*, 2012, 24 (5): 559–582.
- [47] Potter P E, Pettijohn F J. *Paleocurrents and basin analysis* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1963: 1–330.
- [48] Galloway W E, Mentemeier S, Rowan M, et al. Plumbing the depths of the Gulf of Mexico: Recent understanding of Cenozoic sand dispersal systems and ultradeep reservoir potential [J]. *The Leading Edge*, 2004, 23 (1): 44–51.
- [49] Meade R H. Sources, sinks, and storage of river sediment in the Atlantic drainage of the United States [J]. *Journal of Geology*, 1982, 90 (3): 235–252.
- [50] Somme T O, Jackson A L, Vaksdal M. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the More-Trøndelag area of southern Norway (Part 1): Depositional setting and fan evolution [J]. *Basin Research*, 2013, 25 (5): 489–511.
- [51] Allen P A. Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems [J]. *Geological Society London Special Publications*, 2008, 296 (1): 7–28.
- [52] 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 地貌演化、源–汇过程与盆地分析 [J]. *地学前缘*, 2015, 22 (1): 9–20.
Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22 (1): 9–20.
- [53] Schattner U, Lazar M. Hierarchy of source-to-sink systems—Example from the Nile distribution across the eastern Mediterranean [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 343: 119–131.
- [54] Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, et al. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94 (2): 222–235.
- [55] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *Journal of Geology*, 1983, 91 (6): 611–627.
- [56] Wysoczanski R J, Gibson G M, Ireland T R. Detrital zircon age patterns and provenance in Late Paleozoic–Early Mesozoic New Zealand terranes and development of the paleo-Pacific Gondwana margin [J]. *Geology*, 1997, 25 (10): 939–942.
- [57] Cawood P A, Nemchin A A. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 134 (3): 209–234.
- [58] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of

- depositional elements in deep-water settings[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 367–388.
- [59] Gong Chenglin, Wang Yingmin, Steel R J, et al. Flow processes and sedimentation in unidirectionally migrating deep-water channels: From a three-dimensional seismic perspective[J]. *Sedimentology*, 2016, 63(3): 645–661.
- [60] Ravnas R, Steel R J. Architecture of marine rift-basin successions[J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(1): 110–146.
- [61] Gawthorpe R L, Leeder M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins[J]. *Basin Research*, 2000, 12(3–4): 195–218.
- [62] 林畅松. 沉积盆地的构造地层分析——以中国构造活动盆地地研究为例[J]. *现代地质*, 2006, 20(2): 185–194.
Lin Changsong. The tectonic stratigraphy analysis of sedimentary basin—Example from tectonic active basins of China[J]. *Geoscience*, 2006, 20(2): 185–194.
- [63] 解习农, 程守田, 陆永潮. 陆相盆地幕式构造旋回与层序构成[J]. *地球科学*, 1996(1): 27–33.
Xie Xinong, Cheng Shoutian, Lu Yongchao. Episodic tectonic cycles and internal architectures of sequences in continental basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1996, 21(1): 27–33.
- [64] Reemst P, Cloetingh S. Polyphase rift evolution of the Vøring margin (Mid-Norway): Constraints from forward tectonostratigraphic modeling[J]. *Tectonics*, 2000, 19(2): 225–240.
- [65] Lin Changsong, Zhang Yanmei, Li Sitian, et al. Quantitatively modeling of multiple stretching of lithosphere and deep thermal history of some tertiary rift basins in East China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(3): 324–330.
- [66] 肖建新, 林畅松, 刘景彦. 乌什凹陷及东部邻区白垩系层序划分与沉积古地理[J]. *地学前缘*, 2008, 15(2): 8–19.
Xiao Jianxin, Lin Changsong, Liu Jingyan. Depositional palaeogeography and division of Cretaceous sequence of Wushi Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 8–19.
- [67] 林畅松, 李思田, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 210–218.
Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim basin during the Paleozoic major evolutionary stages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 210–218.
- [68] 潘荣, 朱筱敏, 刘芬, 等. 新疆库车坳陷克拉苏冲断带白垩系辫状河三角洲沉积特征及其与储集层发育的关系[J]. *古地理学报*, 2013, 15(5): 707–716.
Pan Rong, Zhu Xiaomin, Liu Fen, et al. Sedimentary characteristics of braided delta and relationship to reservoirs in the Cretaceous of Kelasu tectonic zone in Kuqa Depression, Xinjiang[J]. *Journal of Paleogeography*, 2013, 15(5): 707–716.
- [69] Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleostuctural geomorphology of the Paleozoic central uplift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin[J]. *Science in China(Series D): Earth Sciences*, 2009, 52(6): 823–834.
- [70] 林畅松, 刘景彦, 张燕梅. 沉积盆地动力学与模拟研究[J]. *地学前缘*, 1998, 5(增刊): 119–125.
Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yanmei. Geodynamic and modeling of sedimentary basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(S1): 119–125.
- [71] 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: 中国地质大学学报*, 2000, 25(3): 260–266.
Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jianxin, et al. Structural slope break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(3): 260–266.
- [72] 林畅松, 郑和荣, 任建业, 等. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(11): 1025–1036.
Lin Changsong, Zheng Herong, Ren Jianye, et al. Early Tertiary syn-depositional faults control on deposition infilling in Dongying and Zhuanghua Depressions[J]. *Science in China(D Series)*, 2003, 33(11): 1025–1036.
- [73] 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: Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(5): 596–602.
- [74] 王英民, 金武弟, 刘书会, 等. 断陷湖盆多级坡折带的成因类型、展布及其勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(3): 199–203.
Wang Yingmin, Jin Wudi, Liu Shuhui, et al. Genetic types, distribution and exploration significance of multistage slope breaks in rift lacustrine basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 199–203.
- [75] Feng Youliang, Jiang Shu, Hu Suyun, et al. Sequence stratigraphy and importance of syndepositional structural slope-break for architecture of Paleogene syn-rift lacustrine strata, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 69: 183–204.
- [76] 林畅松. 沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 849–863.
Lin Changsong. Sequence and depositional architecture of sedimentary basin and process responses[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 849–862.
- [77] 林畅松, 张艳梅. 盆地的形成和充填过程模拟——以拉伸盆地为例[J]. *地学前缘*, 1999, 6(增刊): 139–146.
Lin Changsong, Zhang Yanmei. Basin formation and filling simulation: A case study of extensional basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(S1): 139–146.