

文章编号: 0253-2697(2023)08-1382-17 DOI:10.7623/syxb202308013

综述

陆相层序地层学研究进展及发展关注

朱筱敏¹ 王华² 朱红涛² 邵龙义³ 纪友亮¹

(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(武汉)资源学院 湖北武汉 430070;
3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院 北京 100083)

摘要:层序地层学不仅为盆地分析提供了等时地层格架,也为沉积古地理研究和沉积矿产勘探开发提供了地质综合构型,在学术界和工业界受到广泛欢迎。30多年来,层序地层学得到快速发展,特别是在陆相盆地层序形成控制作用,断陷、拗陷和前陆湖盆层序地层构型与砂体分布,陆相湖盆层序地层研究方法等方面取得了显著进展。未来陆相湖盆层序地层学应该重点关注不同类型沉积盆地层序地层构型、陆相湖盆层序地层学研究标准化、研究程序规范化、层序与源-汇系统关系、层序与滨线迁移轨迹关系、不同地层叠加样式与滨线轨迹关系、深水层序地层学、层序构型与数值模拟等发展方向,以更好指导能源勘探开发应用研究。

关键词:层序地层学;研究进展;层序构型;砂体分布;发展关注

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Research progress and development focuses of continental sequence stratigraphy

Zhu Xiaomin¹ Wang Hua² Zhu Hongtao² Shao Longyi³ Ji Youliang¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. School of Earth Resources, China University of Geoscience, Hubei Wuhan 430070, China;

3. School of Geosciences & Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Sequence stratigraphy provides not only isochronous framework for basin analysis, but also comprehensive geologic structure models for sedimentary paleogeography research as well as exploration and development of mineral deposits, and thus has been paid much attention in both academic and industry communities. Sequence stratigraphy has made rapid development in recent 30 years, especially achieving great progress in sequence formation and relevant controlled factors of continental basin, sequence stratigraphic architecture and sandbody distribution in fault depression, depression and foreland lake basin, as well as research methods of sequence stratigraphy in continental lake basin. In future, the continental lake basin stratigraphy should focus on sequence stratigraphic architecture in different types of sedimentary basins, standardized research of continental lake basin, the relations between sequence and source-sink system and shoreline migration trajectory, the relation between stratigraphic pattern and shoreline trajectory, deep sequence stratigraphy, sequence architecture, as well as numerical modelling, so as to better guide the application research on energy exploration and development.

Key words: sequence stratigraphy; research progress; sequence architecture; sandbody distribution; development focus

引用:朱筱敏,王华,朱红涛,邵龙义,纪友亮.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.

Cite:ZHU Xiaomin,WANG Hua,ZHU Hongtao,SHAO Longyi,JI Youliang. Research progress and development focuses of continental sequence stratigraphy[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(8):1382-1398.

1 层序地层学发展简介

层序地层学是分析基准面变化的沉积响应、研究沉积盆地充填成因和内部结构以及可容纳空间与沉积作用相互影响的一门地质学科。层序地层学在全球性或区域性沉积盆地地层单元、沉积体系时空分布和沉积矿产预测等研究中表现出创新性地质思维、多学科交叉融

合、多种资料综合利用、科学预见性强的特点,在学术界和沉积矿产勘探开发领域得到了高度重视^[1-3]。

层序地层学的发展历程大体可划分为4个阶段:①概念萌芽时阶(1949—1976年),以 Sloss 等^[4]提出以不整合面为界的地层单元的“层序”概念为标志;②地震地层学发展时段(1977—1987年),以 Vail 等^[5]创建地震地层学为标志,认为海平面变化是形成沉积层

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41272133)、国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB201104)和国家科技重大专项(2011ZX05001-002-01,2011ZX05009-002-05,2017ZX05001-002-02)资助。

第一作者:朱筱敏,男,1960年6月生,1990年获石油大学博士学位,现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师,主要从事沉积地质学和层序地层学教学与科研工作。Email: xnzhu@cup.edu.cn

通信作者:王华,男,1964年9月生,1991年获法国 DIJON 大学博士学位,现为中国地质大学(武汉)教授、博士生导师,主要从事应用沉积学和层序地层学教学与科研工作。Email: wanghua@cug.edu.cn

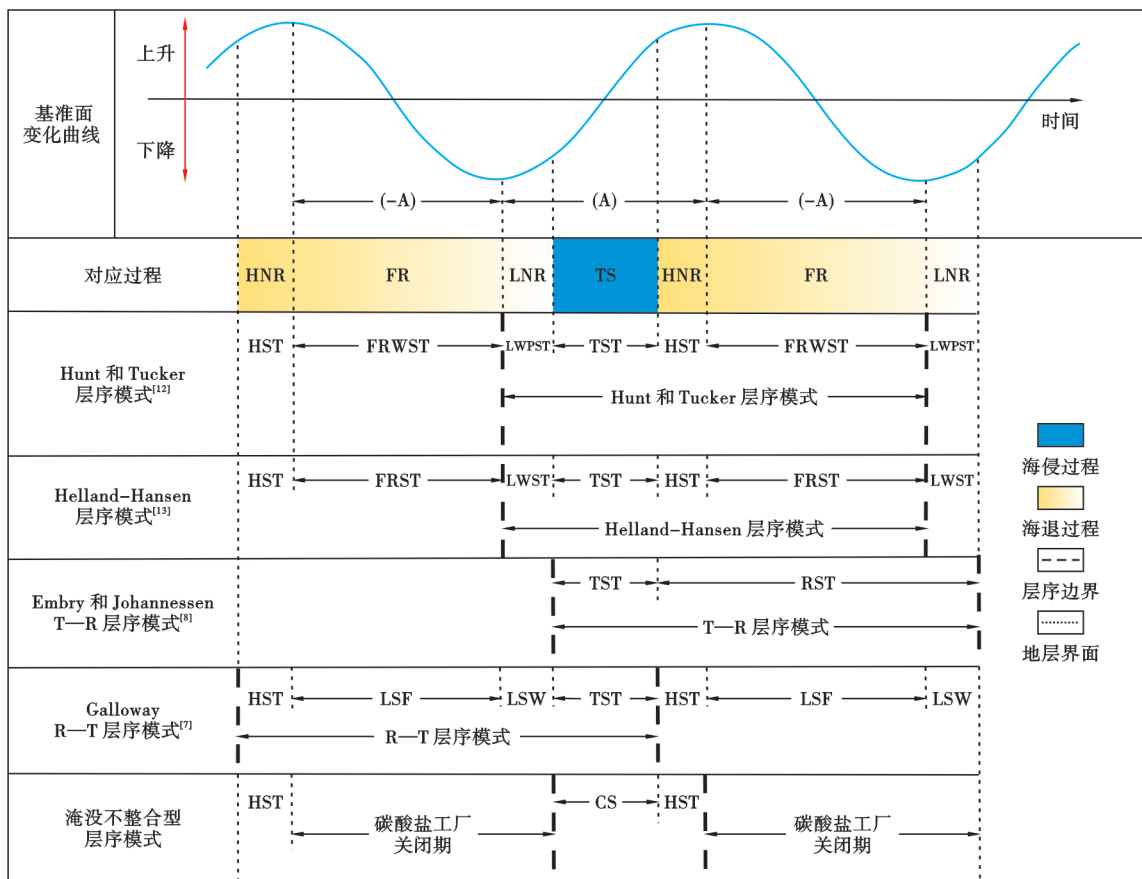
序的主要驱动力;③层序地层学形成发展时段(1988—2008年),以 Van Wagoner 等^[6]建立的经典层序地层学、Galloway^[7]倡导的成因层序地层学、Embry 和 Johannessen^[8]提出的 T-R 旋回层序地层学、Cross^[9]建立的高分辨率层序地层学流派共存为标志,从不同角度阐明了层序地层学的基本理论、关键术语、层序地层构型、解释程序和工作步骤;④层序地层学综合发展时段(2009 年至今),以 Catuneanu 等^[10]提出层序地层学标准化和多种类型层序构型为标志。

需要强调的是,Posamentier 等^[11]、Hunt 和 Tucker^[12]、Helland-Hansen 等^[13]、Catuneanu^[14]深入讨论了层序边界类型,建议废除 Vail 等^[5]提出的 I、II 型层序边界,提出强制海退体系域、下降(期)体系域等概念,并将 Vail 等^[5]提出的“三分”(低位体系域、海侵体系域和高位体系域)层序构型修订为“四分”(下降体系域、低位体系域、海侵体系域和高位体系域)层序构型。“四分”层序构型认为一个基准面的上升、下降旋回包含

海侵和海退 2 个阶段,基准面变化与沉积物供给共同作用,形成了地层序列中的 4 类体系域,进而建立了不同体系域类型与海平面升降变化、特定沉积成因单元以及地层叠置样式之间的关系,相关理论与方法在地学界和能源工业界得到认可和广泛应用(图 1)^[11-15]。

层序地层学的发展得益于对层序发育控制因素的深入理解、地层分辨率识别技术的提高、层序地层概念和研究方法的标准化,其中,研究方法由早期的构型驱动研究逐渐转为资料驱动研究,后者可建立区域等时地层格架和层序构型^[16]。

Vail 等^[17]认为,“层序地层学概念在沉积岩中的应用有可能提供一个完整统一的地层学概念,就像板块构造曾经提供了一个完整统一的构造概念一样。层序地层学改变了分析世界地层纪录的基本原则,因此,可能是地质学中的一次革命,开创了解地球历史的一个新阶段”。Miall^[18]将层序地层学称为沉积地质学的第三次革命。



注:A—可容纳空间;HNR—高位正常海退;LNR—低位正常海退;TS—海侵;FR—强制海退;LWPST—低位沉积楔体系域;FRWST—强制海退楔体系域;LST—低位体系域;TST—海侵体系域;HST—高位体系域;RST—海退体系域;ELAT—早期低位体系域;LLST—晚期低位体系域;LSF—低位扇;LSW—低位楔;LWST—低位楔体系域;CS—凝缩段。

图 1 国际层序地层学主流学派及其层序构成(据文献^[15])

Fig. 1 International currents of sequence stratigraphy and sequence architectures

层序地层学的基本原理适用于各种沉积盆地不同尺度沉积区域、不同类型沉积环境研究,可以不考虑盆地沉积相变而开展同时代地层单元对比研究,目前主流层序构型在特定情况下使用效果良好,但没有一种层序构型能适用于所有不同类型沉积盆地沉积记录的地质解释。Catuneanu等^[10]认为不同层序地层构型均基于对特定地质特征的理解,均有在特定地质背景下存在的理由,但其表示的层序边界的位置存在明显差异,进而导致层序内部体系域的划分显著不同(图1)。可容空间和沉积物供给相互作用决定了层序成因单元及其叠置样式,因此,倡导层序地层学基本概念、层序边界和层序构型应以标准化为发展方向^[10]。

2 陆相层序地层学理论基础与盆地类型

陆相盆地层序地层学是中国学者对国际层序地层学理论和方法技术做出突出贡献的领域,研究对象涉及陆相盆地冲积扇、河流、三角洲、滩坝、湖泊以及深水沉积等。

陆相盆地层序地层学研究的核心是层序形成机制问题。前人研究认为,起源于被动大陆边缘盆地的海相层序地层学基本原理和方法能够应用于陆相湖盆层序地层学研究^[1-3,10,14],这是由于湖泊等陆相沉积环境的异旋回沉积作用与受控于海平面相对变化的海相盆地沉积作用具有相似性。但是,陆相湖盆的地质特征与海相沉积盆地明显不同,如其受构造和气候作用影响大、盆地类型和结构复杂、湖盆水域浅小、近物源和多物源供源方式、湖平面升降变化频繁、沉积体系类型多且相变快、湖盆缺少明显的地形坡折带等,因此,海平面升降变化曲线对湖泊层序研究无指导意义,控制陆相盆地层序构型的主要地质因素是构造活动和气候变化。显然,要想在陆相地层层序研究中成功运用起源于海相沉积盆地的层序地层学基本理论,就必须对陆相盆地的构造活动、气候变化、基准面和沉积物供给进行全面综合研究,探索陆相盆地层序地层发育特征和规律,建立反映陆相盆地地质特征的层序地层构型。

陆相盆地层序形成的动力学机制源于全球构造事件导致的区域构造应力场、地幔隆升产生的岩石圈拉伸伸展而导致的不同级别的幕式构造运动和由构造、冰川消融作用、地球旋转产生的气候旋回与湖平面变化,这些驱动要素与相对海平面变化在控制层序形成方面具有相似的机制^[19]。

地质学家长期关注陆相湖盆成因机制、盆地分类和盆地演化史研究,不仅从大地构造角度来研究盆地的成因机制,而且结合沉积地质学和层序地层学研究成果,利用地壳均衡补偿原理来阐述盆地的形成过程,

提出了多种陆相湖盆成因机制。如前人研究认为:岩石圈内部物质重新分配造成岩石圈弯曲变形形成盆地;岩石圈温度变化造成岩石体积变化及岩石圈变形形成盆地;沉积物负载作用形成盆地等^[20]。

中国陆相湖盆主要发育于中生代—新生代。印支运动后,受太平洋板块向西推动力、印度洋板块向北推动力、西伯利亚板块向南推动力相互作用的影响,中国陆块古生代以来EW向构造格局发生改变,发育了大小不等、盆地结构不同的沉积盆地。中国陆相盆地类型多样,按形成机制可划分为伸展类(断陷与拗陷类)、挠曲类(前陆类)和走滑-伸展类(过渡类)盆地(图2)^[20]。

伸展类盆地形成于岩石圈拉伸和减薄背景,主要受深部地幔动力过程控制。该类盆地主要分布于中国东部及海域,包括松辽、渤海湾等大型裂谷盆地和以断陷(半地堑或地堑)盆地群形式存在的、规模较小的伸展类盆地(如二连盆地群和海拉尔盆地群)。中国东部的伸展类盆地内基底断裂发育,盆地均以正断层为界,经历了燕山期、喜马拉雅期构造演化过程,发育明显的“断陷—拗陷”双层结构。盆地内部正断层的差异活动造成盆地一侧为陡坡,另一侧为缓坡,盆地内部可发育中央隆起带。伸展类盆地物源补给充分,普遍存在近物源和多物源特征,造成岩相变化的复杂性。半地堑是该类盆地最主要的构造样式,造成陡坡带、缓坡带及中央深洼带的沉积条件存在明显差异。凹陷内同沉积断裂形成的坡折带对沉积物路径系统和砂体分布具有重要控制作用。盆地在裂后期形成了构造平缓的广阔拗陷,为大型湖泊和三角洲的发育提供了条件,如松辽盆地在青山口组沉积期和嫩江组沉积期发育的大型湖泊及大型三角洲体系,渤海湾盆地在新近纪形成的广阔冲积平原。

挠曲类盆地主要分布于中国中西部地区,如准噶尔、塔里木、四川和鄂尔多斯等盆地。这些盆地中生代—新生代的演化与相邻造山带的造山运动具有耦合关系,以晚三叠世演化最为典型,该时期造山带隆升的同时向盆地方向推覆,挤压和负载效应导致了前陆式拗陷的形成。如鄂尔多斯盆地西南部在晚三叠世前陆充填过程中,旁侧挤压作用强弱交替,在构造作用强化阶段沉积充填加速,边缘碎屑沉积体系向湖盆推进;在构造活动强度衰减阶段则物源补给减少,碎屑沉积体系后退,从而控制了旋回式层序地层序列的形成。前陆盆地发育后,由于挠曲作用减弱,可发育构造较稳定、大型平缓的上叠拗陷,发育大型浅水内陆湖盆及其周缘三角洲,如鄂尔多斯盆地在侏罗纪的沉积体系。

走滑—伸展类盆地以狭长的形态直接发育于走滑断裂带处,如广西百色盆地和吉林伊舒断陷盆地。古

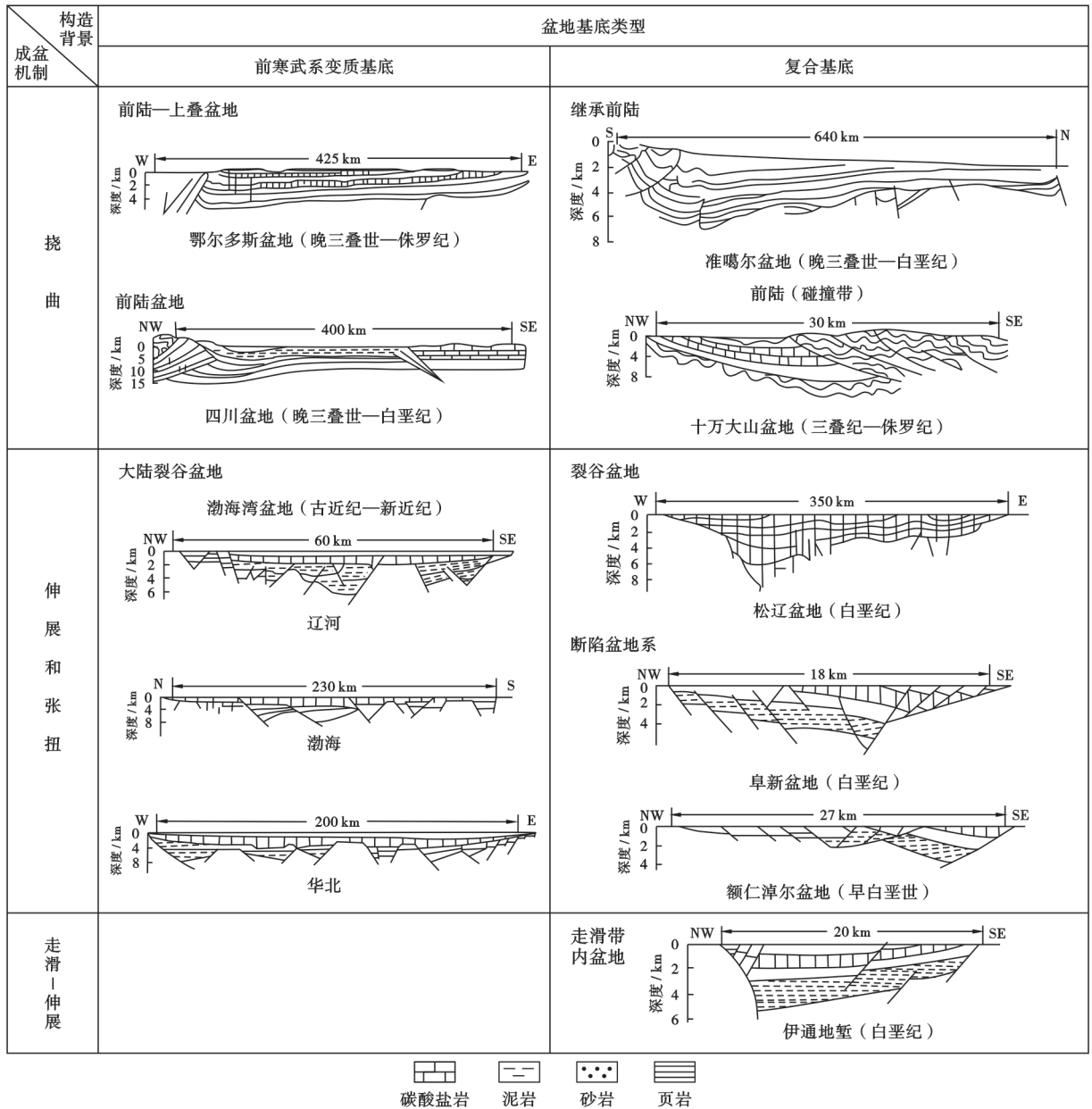


图 2 中国中生代—新生代陆相盆地类型划分(据文献[20])

Fig. 2 Types of the Chinese Meso-Cenozoic continental basins

近系—新近系充填期,盆地发育主要受控于盆地伸展构造,也受到伴生走滑运动的影响,在沉积后期走滑运动常常强化。伸展与走滑联合作用,造成断裂两侧沉积充填的不对称性和沉积、沉降中心沿盆地轴向的迁移。在断裂发生转折的部位发生拉分效应,使盆地快速沉降,对充填的影响机制类似于伸展盆地。

构造作用对中国中生代—新生代陆相盆地发育具有显著影响。需要说明的是,目前对中国陆相盆地的成因认识尚不完全统一,部分学者^[20-22]根据盆地构造成因将沉积盆地划分成挤压型或前陆型沉积盆地、拉张型(断陷与坳陷)沉积盆地和过渡型盆地 3 类,塔里木、准噶尔和柴达木等位于贺兰山和六盘山以西的盆地为挤压型沉积盆地,松辽、渤海湾和珠江口等位

于贺兰山和六盘山以东的盆地为拉张型沉积盆地,两类盆地之间四川盆地和鄂尔多斯盆地为过渡型盆地。

3 陆相湖盆层序地层学研究现状与进展

复杂的构造格局、幕式的构造作用和不同频次的气候变化导致了陆相沉积盆地层序构型的多样性和层序构成的复杂性,其中,相较于气候变化,构造对陆相湖盆层序形成的影响更大、范围更广,是陆相湖盆层序地层形成的主控因素。低频湖盆层序和低频体系域的发育主要受控于构造沉降旋回,高频层序和高频体系域旋回的发育主要受控于气候控制的蒸发量与降雨量关系的变化。湖平面相对变化是构造沉降、气候变化、沉积物供给等因素的综合反映。

近年来,地质学家不仅探讨了陆相盆地层序地层形成演化的主控因素,也根据不同盆地类型沉积特点和层序结构的差异,分别建立了陆相断陷盆地、坳陷湖盆和陆内前陆盆地的层序构型。陆相盆地层序构型主要受控于可容空间与沉积物供给之间的相对平衡过程,其中,低频层序的发育往往对应构造幕式旋回,反映了盆地发育、壮大、萎缩直至灭亡的演化过程。

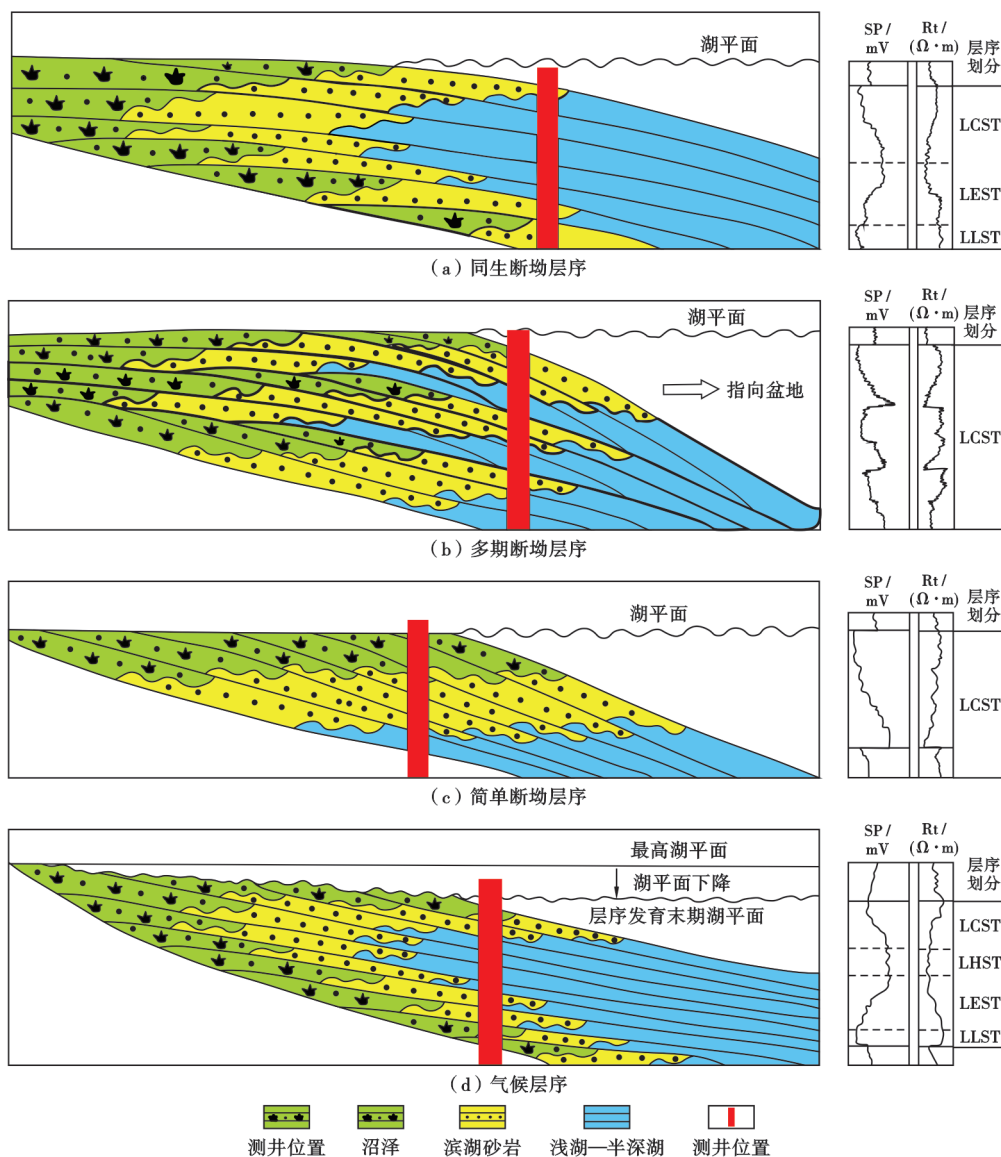
3.1 陆相湖盆层序形成控制作用

陆相湖盆层序形成的主控因素与海相盆地具有很大差异。陆相盆地层序的发育明显受构造运动、气候、沉积物供给、湖平面升降等因素控制,相对湖平面变化是这些控制因素综合作用的表现形式。构造活动是陆相层序发育的首要控制因素,构造沉降产生可容空间,提供了沉积物堆积的场所;构造抬升引起地层变形,形

成层序边界不整合面。古气候背景主要影响沉积物类型,气候变化可引起可容空间的短暂波动。沉积物供给条件是影响可容空间消亡快慢的重要因素,对砂体规模、沉积相带展布、地层叠置样式具有重要影响。在特定的地质背景下,某个或多个地质因素共同作用,控制了湖盆层序的形成、发展和消亡。

(1) 构造运动对层序发育的控制作用

在陆相湖盆中,区域构造运动控制着一级、二级及部分三级层序的发育,构造运动方式对层序构型具有明显控制作用。断陷盆地边界断层的活动方式不同可形成不同的可容空间变化,与沉积物供应共同作用形成不同的层序构型。张性断裂活动可表现为一次性强烈断裂、同生(同沉积)断裂或多期性断裂,分别可产生简单断坳层序、同生断坳层序和多期断坳层序等层序构型(图3)^[23]。



注:LLST—晚期低位域;LEST—晚期湖扩域;LHST—晚期高位域;LCST—晚期凝缩段。

图3 湖盆层序与体系域组成、准层序及测井响应(据文献[23])

Fig. 3 Components of sequence and systems tract, parasequence and well logging response for the lacustrine basins

在闭流湖盆中,湖平面低于盆地基准面,因此,相对湖平面变化不受基底整体构造沉降的影响,仅受气候的影响;在敞流湖盆中,气候变化影响着沉积物的供应量和沉积相类型。当沉积物供应速度大于盆地基底的构造沉降速度

时,形成湖泊收缩体系域;反之则形成湖泊扩张体系域。

气候通过影响降雨量、蒸发水量引起湖平面变化,而湖平面上升和下降控制了层序形成和地层叠置样式^[23](图 4)。

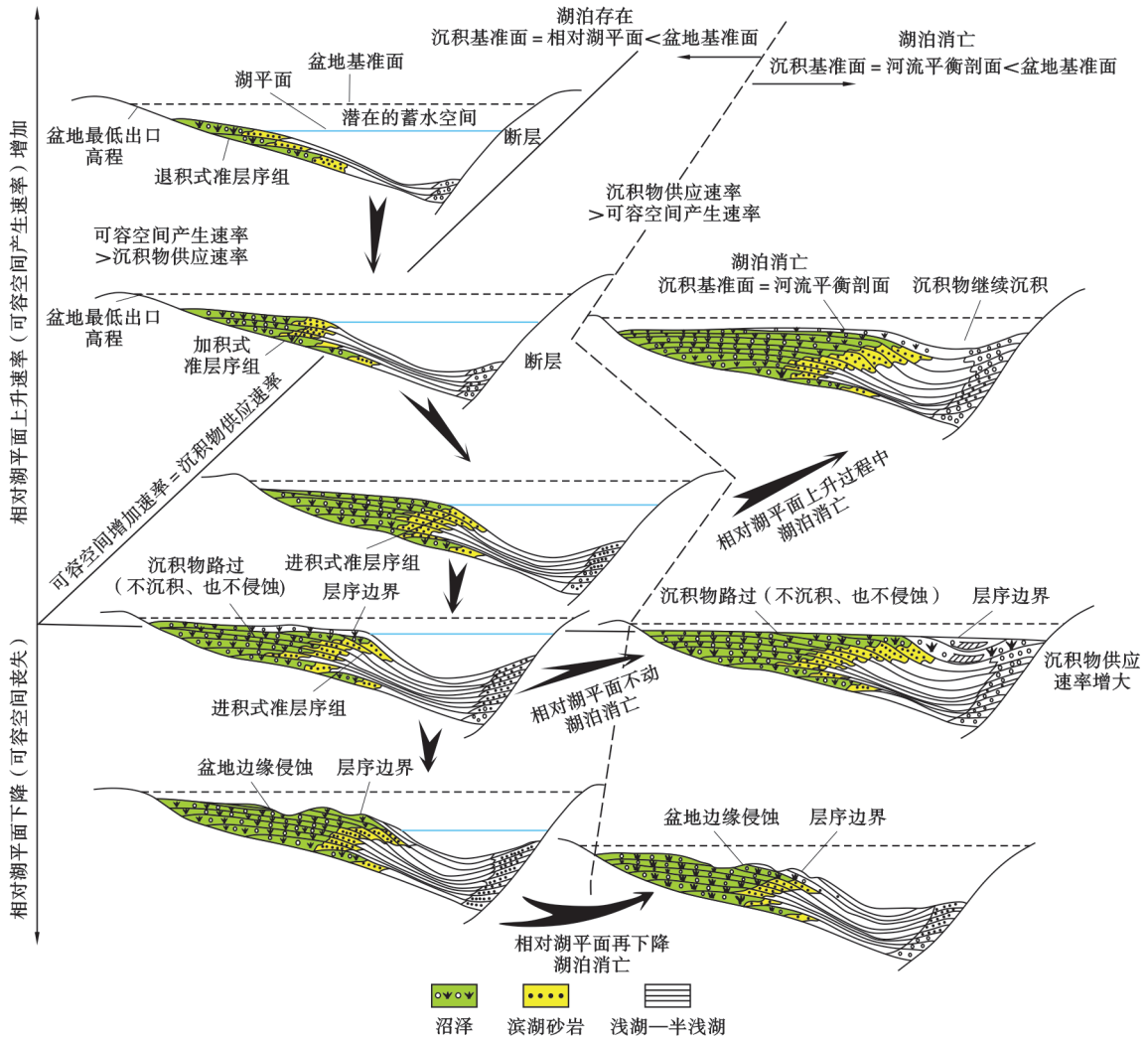


图 4 闭流湖盆中湖平面变化与层序发育的关系(据文献[23])

Fig. 4 Relationship between the lake level and development of sequence in close lacustrine basins

(3) 沉积物供给对层序发育的控制作用

沉积物供给与其他因素共同起作用,影响着陆相层序的规模及其内部各体系域特征。一般而言,多物源和近物源是陆相湖盆物源供给的重要特色。根据盆地的长轴分布和物源方向,盆地周缘物源可划分为轴向物源体系和侧向物源体系。在不同构造演化阶段,不同方向沉积物供应速率发生变化,明显影响着层序结构。

(4) 古地貌—构造坡折带对层序发育的控制作用

研究发现,在陆相断陷盆地中,规模较大的同沉积断裂常常形成构造古地貌上的突变带或坡折带,分割了不同的古地貌构造单元。这些坡折带的存在制约着盆地可容空间的变化,控制着低位体系域、高位体系域

三角洲一岸线体系的发育部位,对沉积体系的发育和砂体分布起着重要的控制作用^[20,23]。

在同沉积背斜—坡折构造背景下,陆相湖盆层序体系域的构成表现为:低位体系域在坡折带之下发育低位扇三角洲、浊积扇,在坡折带之上主要发育下切河谷充填砂体;湖侵体系域在坡折带之下主要发育深湖、半深湖沉积,在坡折带之上主要发育滨—浅湖沉积;高位体系域主要发育进积型河流三角洲沉积。

在同沉积断裂坡折背景下,陆相湖盆层序体系域构成表现为:断裂坡折带之上的层序厚度较薄,断裂坡折带之下的层序较厚。断裂坡折带之上的层序低位体系域不发育或只发育下切水道充填,而断裂坡折带之下的层序低位体系域普遍发育低位三角洲、水下扇或

浊积扇。湖侵体系域在断裂坡折带之下主要为一套稳定的深湖泥岩、油页岩沉积；在陡坡断裂坡折带之上主要发育湖进型扇三角洲或砂质滨岸沉积，在缓坡断裂坡折带之上主要发育滨—浅湖或湖进型三角洲沉积。高位体系域在陡坡主要发育扇三角洲体系，在缓坡轴向主要发育河流—三角洲沉积体系。

3.2 断陷湖盆层序地层构型与砂体分布

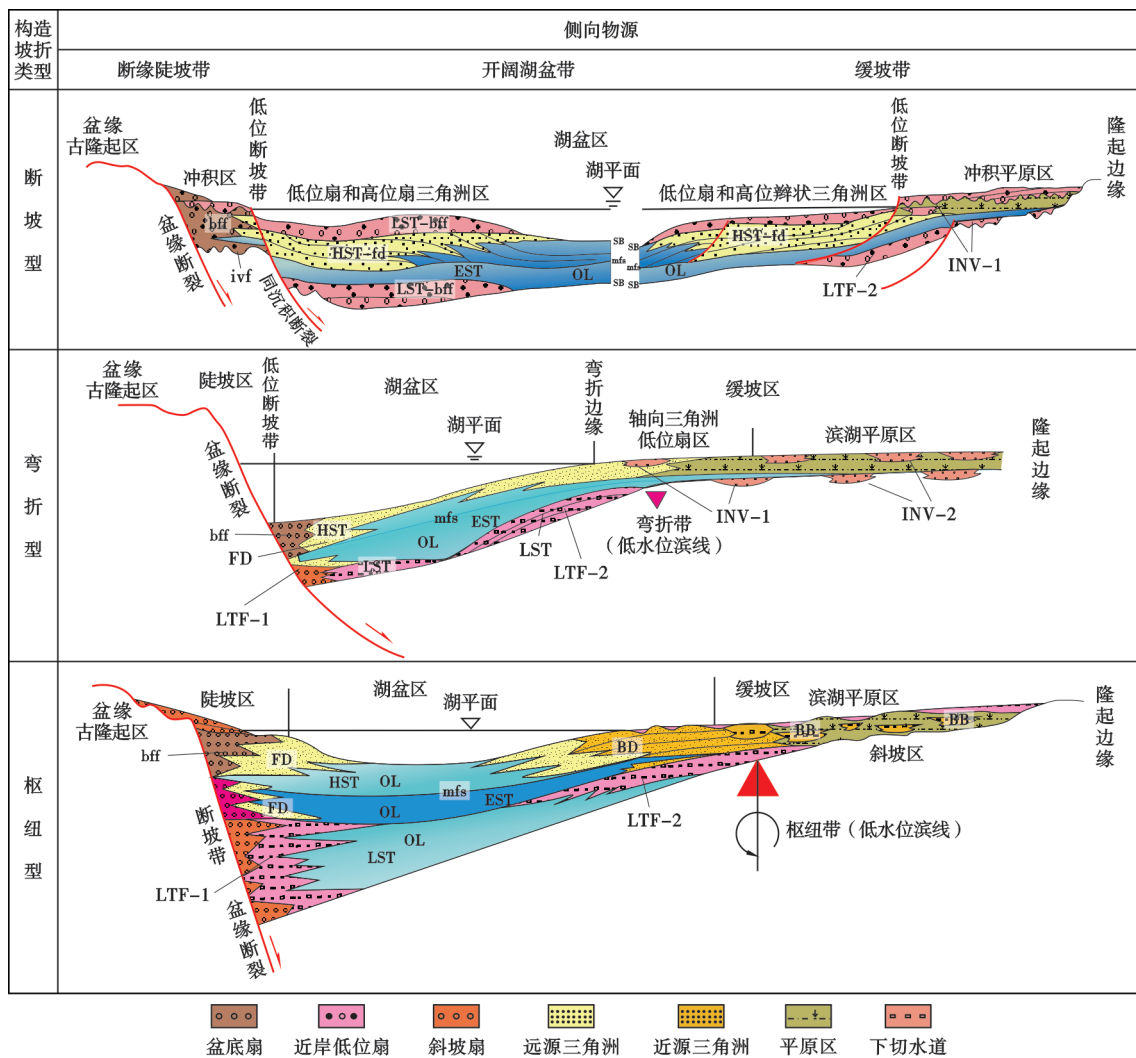
受边界断裂差异活动的控制，断陷湖盆不同二级构造单元的湖平面变化、沉积序列、沉积体系分布模式等都表现出独特性。断陷湖盆常呈不规则长条状，一侧为陡坡，另一侧为缓坡，沉积物分布明显受控于短轴和长轴物源，并形成不同的地层叠置样式。

断陷湖盆层序地层格架和砂体分布主要受控于断裂坡折带，其决定了各层序不同体系域组成和砂体分布^[24-26]。根据控凹断裂形态和坡折带类型，可将断陷

湖盆层序地层格架划分为弯折主控断拗型、断(裂)坡(折)主控断拗型和枢纽带型(或斜坡型,图5)。

3.2.1 弯折主控断拗型层序地层格架与砂体分布

挠曲弯折主控断拗型层序地层格架具有“下断上拗”式的双层结构,位于陡坡带的控凹铲式正断层差异滑动,导致盆地缓坡带挠曲,使沉积斜坡发生明显弯折(包括凸起与斜坡、斜坡与凹陷之间边界地带,不太发育次级断层),湖盆充填沉积受控于沿古背斜枢纽带展布的、构成湖盆缓坡带低位坡折的弯折带。弯折带下倾陡坡带沉降较快、坡陡层厚、沉积旋回增多、相变明显,低位、湖侵和高位体系域发育齐全。低位体系域主要发育在弯折带下倾的深凹斜坡区,形成低位扇或低位斜坡扇。弯折带上倾缓坡带沉降较慢、坡缓层薄,相变不太明显、沉积旋回较少,主要发育湖侵和高位体系域,低位体系域主要发育在暴露剥蚀区或仅局部发育下切水道(图5)。



注:OL—湖盆;LST—低位体系域;HST—高位体系域;EST—湖扩域;SB—层序界面;INV—下切谷;ivf—下切谷充填;HST-fd—高位体系域远源三角洲;LST-bff—低位体系域盆底扇;bff—盆底扇;LTF—近岸低位扇;FD—远源三角洲;BD—近源三角洲;mfs—最大湖泛面;BB—滨湖平原。

图5 断陷湖盆层序构成样式和砂体分布

Fig. 5 Sequence components and sandbodies distribution in faulted lacustrine basins

3.2.2 断坡主控断拗型层序地层格架与砂体分布

断坡主控断拗型层序地层格架形成时,一侧盆缘(通常为陡坡带)为生长深断裂,并构成陡倾的单阶式断坡带,另一侧为发育断裂坡折的缓倾斜坡。层序地层格架同样由“下断上拗”式的双层结构组成:下层为断陷期充填沉积形成的向缓坡上超的半地堑型层序地层格架,体系域分布受控于断裂坡折带;上层充填地层为拗陷期向盆地两侧上超的拗陷型层序地层格架。低位体系域主要分布在低位断坡带内湖盆中,靠近陡坡带主要发育盆底扇、近岸低位扇,靠近缓坡带发育大型的远源低位扇,低位坡折带之上的缓坡区为暴露剥蚀区,可发育大型下切水道。断坡带不仅控制着层序内部低位体系域(或低位扇体)的发育与分布范围,而且控制着湖侵和高位体系域沉积相带变化,陡坡带主要发育扇三角洲,缓坡带常发育大型前积三角洲(图 5)。

3.2.3 枢纽带型层序地层格架与砂体分布

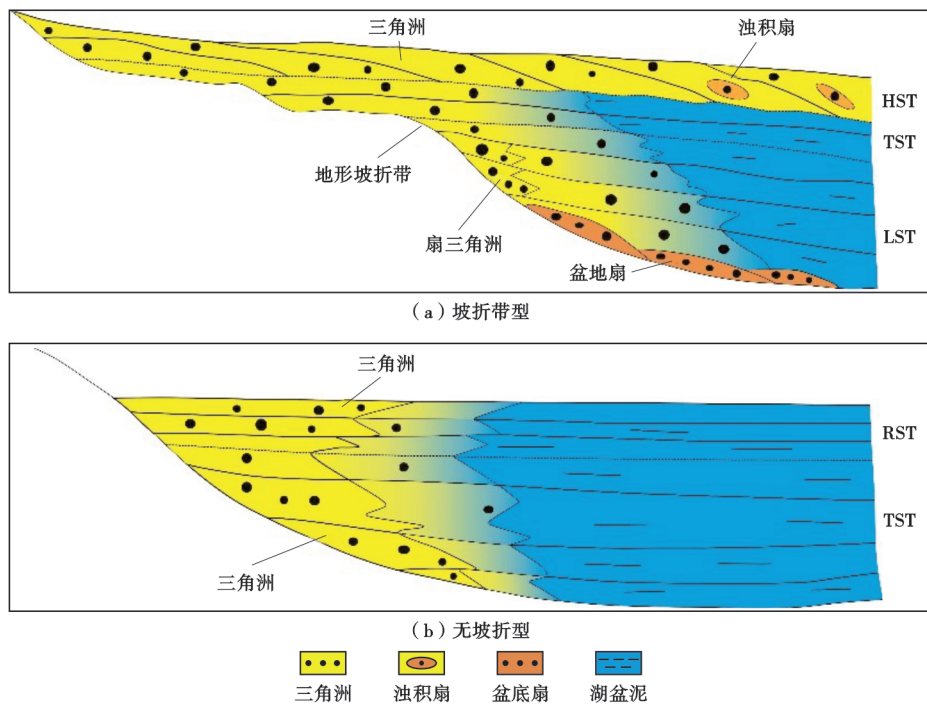
枢纽带型(或斜坡型)层序地层格架边界断层上盘发生了明显的旋转掀斜作用,使断层上盘由水平状态旋转为倾斜状态,形成半地堑式深断陷湖盆。枢纽带向深凹内发育低位、湖侵和高位体系域,枢纽带上倾端斜坡带区沉积旋回明显减少,一般仅发育湖侵和高位体系域。枢纽带控制了湖侵体系域较深湖及高位体系域轴向三角洲沉积区(图 5)。

3.3 拗陷湖盆层序地层构型与砂体分布

拗陷湖盆是陆壳构造活动相对稳定、整体均匀沉降过程中形成的盆地,大量发育于中生代—新生代。盆地宽缓平坦、呈椭圆形或不规则形,在长轴方向主要发育河流和三角洲沉积,在短轴稍陡一侧多为辫状河三角洲沉积,缓坡一侧多为三角洲和河流沉积。

坡折带是拗陷湖盆至关重要的地貌单元,不仅可以反映地形地貌的变化,对沉积体系的发育和演化也起着重要的控制作用,拗陷湖盆可以发育环状坡折带。根据是否发育坡折带,可将拗陷湖盆经典层序构型总结为坡折带型和无坡折带型两类(图 6)。其中,坡折带型是指拗陷湖盆三级层序内部可以识别、确定初始湖泛面和最大湖泛面的位置,进而识别出低位、湖侵和高位 3 个体系域;无坡折带型是指拗陷湖盆因缺少地形(构造)坡折的明显变化及首次湖泛面的识别标志,只能利用最远滨岸上超点确定出最大湖泛面,进而将层序划分成湖侵体系域和湖退体系域^[21-29]。

在拗陷湖盆坡折层序构型框架下,细化体系域要素可知:①低位体系域在盆地缓坡发育冲积扇、河流沉积,可形成下切谷;在低位湖岸线附近可发育小型三角洲或扇三角洲沉积,局部可发育由洪水作用形成的洪水型浊积扇或由三角洲前缘滑塌形成的浊积扇。②湖侵体系域可发育三角洲、滨—浅湖滩坝、浊积扇及广泛



注: TST—湖侵体系域; RST—湖退体系域; LST—低位体系域; HST—高位体系域。

图 6 拗陷湖盆经典层序构型(据文献[21])

Fig. 6 Typical sequence stratigraphic configurations of depression basins

分布的较深水泥岩等沉积体系。③高位体系域发育早期,可容空间较大,携带陆源碎屑物质的洪水入湖后快速沉积,形成浊积扇;高位体系域发育晚期湖平面下降,沉积物不断供给,三角洲快速向湖盆中央推进,在其前方发育由三角洲前缘沉积物向前滑塌形成的浊积扇(图6)。

近年来,无坡折型层序地层格架及其内部砂体分布备受关注。受坡缓地形约束,小规模湖平面升降波动会导致无坡折型拗陷湖盆大规模水体进退迁移,形成宽广的河湖交互区或水陆过渡带及其交错叠置的沉积组合。基于湖平面迁移形成的最大洪水线—平均水线—最小枯水线的周期性变化,可将浅水拗陷湖盆划分为河控主体区、河湖交互区、湖泊主体区。其中,河控主体区发育骨架水系和河道砂体,沉积物粒度偏粗(含砾),颜色多呈黄褐色等氧化色,具正韵律;河湖交互区砂体类型多样,常见河道砂、朵状砂、湖泥及席状砂等,沉积物粒度中等(富砂),颜色多呈棕黄色、浅灰色等过渡色,具正、反韵律;湖泊主体区发育席状砂或湖泥,沉积物粒度偏细(富泥),颜色多呈灰色等还原色。总体上,浅水湖盆河湖交互沉积具有“高位成湖、低位成河”特征,频繁河湖交互导致河流、浅水三角洲、湖相沉积的单一沉积体系属性(类型、特征、模式)变化或3种沉积类型之间相互转化^[30-31]。

3.4 前陆湖盆层序地层构型与砂体分布

经典的前陆盆地是指位于造山带与克拉通之间的一个狭长状沉积带,是大陆岩石圈受上叠逆冲推覆体加载引起挠曲变形而形成的边缘拗陷湖盆。前陆盆地的形成主要与区域上的构造挤压应力和地貌载荷引起的挠曲作用有关。其二级构造层序常代表了盆地不同成盆期的产物,三级构造是单一成盆期不同发育阶段的产物,层序形成与盆缘造山带区域构造活动、盆内沉积作用和相对湖平面变化有关,反映构造演化史具有多旋回特征。

在邻近造山带的盆地一侧,强烈的构造沉陷造成前陆盆地沉积物表现出厚度大、沉积速度快、成分复杂和变形作用强烈的特点,具有向上由细变粗的层序特征。由造山带前到克拉通边缘,前陆盆地沉积物的粒度逐渐变细。对于陆内前陆盆地,由于冲断带的冲断方式不同,冲断片之间存在叠加方式(前展型、叠加型和后退型)的变化,沉积体之间的组合关系也随之变化。

前陆盆地构造活动对可容空间产生深刻影响,而对盆地充填和层序叠置样式起重要的控制作用。一次逆冲加载将导致挠曲快速沉降,随后逆冲作用变弱

和停止使沉降减慢;此外,剥蚀和应力松弛等造成回弹隆起,形成层序界面,该类层序可称为构造层序(相当于一个二级层序)。逆冲推覆构造活动对盆地的可容空间也具有深刻影响,对盆地充填和层序叠置样式也起着重要控制作用。在逆冲推覆构造活动期和静止期,陆相前陆盆地不同位置形成不同的沉积充填和地层结构特点。

前陆盆地造山带在逆冲构造活动阶段始终处于隆升和被剥蚀状态,向前陆盆地提供物源,不接受沉积;在强烈逆冲活动早期—高峰期,山前带快速挠曲沉降,不断快速产生新的可容空间,但由于沉积物供给充足,能迅速充填新的可容空间,使山前带保持补偿—过补偿沉积状态;在构造活动相对宁静阶段,盆地沉降缓慢,沉积物供给同样充足,保持补偿—过补偿沉积状态。强烈逆冲活动早期—高峰期和相对宁静阶段,强烈逆冲引起前渊带快速挠曲沉降,不断产生新的可容空间形成湖泊。前隆斜坡带和前隆带的剩余可容空间逐渐减小,直至出露地表遭受剥蚀^[32]。

一个构造层序通常由下部水进序列和上部水退序列组成,代表了从逆冲挠曲快速沉降到逆冲减弱、回弹隆起的沉积充填过程(图7)。

在构造活动期,可容空间的增加主要受构造沉降控制。岩石圈最初常以瞬时的弹性变形来响应逆冲负载,此时沉降速率大,可容空间增加,来自造山带的大量粗碎屑物质堆积在山前;同时,由于逆冲体的重力加载引起快速挠曲沉降,导致了区域性的水进,水深持续增加,形成了构造层序下部的水进序列,其充填的层序具明显不对称结构,沉积中心位于逆冲推覆带前陡坡一侧。山前带的层序叠置呈加积或退积结构;斜坡带由于物源供给少,以细粒沉积为主,层序叠置呈退积结构。

在构造相对静止期,可容空间的增加主要受构造活动和气候影响下的湖平面变化共同控制。由于逆冲造山作用减弱,山前高差减小,反映构造明显活动的边缘扇砂砾岩带不发育;由于该阶段逆冲挠曲作用减弱,盆地沉降变缓,以河流和三角洲沉积为主的碎屑体系向盆地推进,形成了构造层序上部的水退序列。山前带发育形成进积式准层序组,随后成为沉积物搬运过路带,形成层序边界。斜坡带有物源供应,早期形成退积式准层序组,后期形成进积式准层序组,之后形成层序边界。前隆带由于岩石圈弹性回跳而隆升,露出水面后遭受剥蚀形成物源区,也向沉积中心发育进积式层序结构。构造相对静止期充填的层序呈明显对称性,具双向物源体系,沉积中心逐渐向缓坡一侧迁移(图7)。

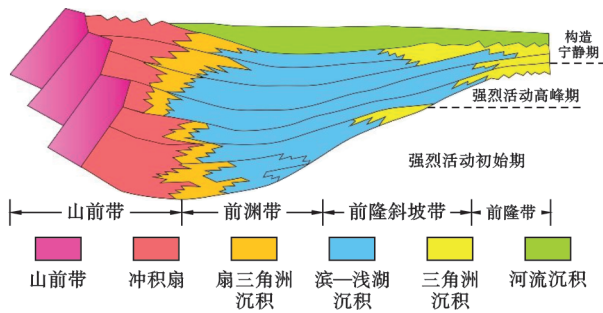


图 7 前陆盆地层序构型(据文献[32])

Fig. 7 Sequence model in foreland basins

3.5 陆相层序地层研究方法

与海相盆地相比,陆相湖盆层序地层学研究更加复杂,因此,相关研究工作需要更加精细和综合,需采用多方法相互验证。目前,常用的研究方法包括露头、钻井、测井地震、古生物、地球化学等资料的层序地层学研究和计算机模拟等^[33]。

露头资料层序地层学研究是最真实、最直观和最详细的研究方法。基于野外露头可识别层序关键界面、体系域和沉积体系特征,进行高分辨率层序地层研究。其建立的层序构型可有效约束基于其他资料的层序地层学研究成果。

钻井和测井资料层序地层学研究是基于对岩心、岩屑、测井曲线等资料的分析化验来进行层序关键界面识别和沉积体系叠置关系研究的一种方法,具有垂直连续性好和分辨率高的特点,可开展准层序(组)地层叠置样式的精细解释。

地震资料层序地层学研究具有地震资料覆盖面积广、空间连续性强的特点。识别地震反射终止方式(削截、顶超、上超、下超)是层序划分最可靠也是最直接的方法,并且不同类型的沉积体系在地震剖面上的反射特征具有明显区别,通过井震标定可以大幅提高层序地层学研究的精度和精确性。

古生物资料层序地层学研究可以保证层序地层定年,各种古生物组合的生态信息也可为识别层序内部沉积特征提供证据。古生物化石丰度、分异度和形态等研究可以为层序地层关键界面的识别和古环境恢复提供关键证据。

地球化学资料层序地层学研究主要分析地层不同地球化学参数的变化趋势,助力层序地层划分,特别是对碳酸盐岩与深湖细粒沉积的层序地层研究具有重要意义。常用的地球化学参数包括总有机碳(TOC)含量、稳定同位素值($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 等)和典型微量元素(V、Mo、Cu等)含量。

层序地层物理与数值模拟是对盆地沉降、湖平面变化、物源供应和沉积压实等过程的定量描述,为深入

揭示层序地层格架及其演化过程、沉积相带的形成提供了新的思路和方法。

4 陆相湖盆层序地层学发展关注

构造沉降、物源供给、古气候及湖平面变化是控制陆相层序发育的主要因素。探讨陆相层序发育过程中不同地质因素及多因素之间的联合效应,有利于层序地层学进入标准化发展阶段和相关前沿研究。

4.1 陆相湖盆层序地层学标准化

层序地层学诞生以来在全球得到广泛应用。由于不同学派的理论基础或层序边界定义不同,故层序地层学表现出概念体系较多、研究方法不协调和层序构型多样化等特点。层序地层构型的多样化体现了科学家对层序地层演化过程的深入认识,但同时也导致了层序地层相关概念和研究流程的混乱。Catuneanu等^[10]倡议,在多种层序地层构型中找到一种不依赖构型的灵活方案,以满足所有的层序地层学研究,即分离层序地层学中构型独立的部分与构型依赖的部分(图 8),对构型独立部分的概念和工作流程进行标准化,在不同层序构型之间达成一致性共识^[10-15]。

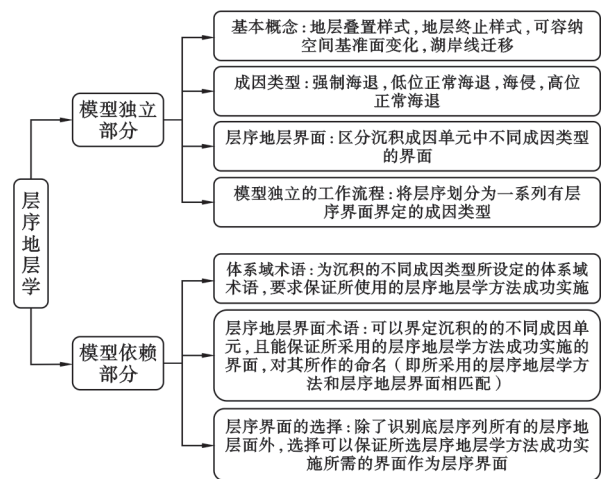


图 8 层序地层学构型独立和构型依赖部分

Fig. 8 Sequence stratigraphy researches of independent and dependent model

独立于构型的层序地层学研究标准化是强调地层叠置样式(成因单元)和岩石记录中的界面研究,而不是强调选用特定的依赖于边界的层序构型,对于每个研究实例,层序地层构型将随着构造和沉积背景的变化而变化,研究资料类别和观察尺度也会造成岩石记录解释的差异。层序地层构型均是可容空间和沉积物供给共同作用的结果,这些构型的识别是层序地层学广泛应用的关键^[10-15]。

Helland-Hansen等^[13]强调地层界面识别、沉积相变化和地层几何形态改变可通过沉积作用速率与基准

面变化速率的共同作用,以地层进积、退积、加积和下切作用来反映层序地层学特有的地层学与沉积学属性。基准面变化曲线中客观存在的进积、退积、加积和下切4个地质过程所反映的沉积趋势变化以及地层界面的形成都是独立于多样化层序地层模式的核心概念,是层序地层学“标准化”的基础^[34]。

不同类型陆相湖盆层序地层形成的主控因素各不相同,尚无一种层序地层构型可以概括所有陆相湖盆,加之不同研究者使用的体系域划分方法、层序地层术语存在差异,因此,实现陆相湖盆层序地层学研究标准化是现今一个重要命题。陆相层序地层学研究也应关注沉积背景、层序地层构型和独立于构型的研究方法标准化^[10,15,21-22]。

4.2 陆相湖盆层序地层学研究规范

层序地层学研究应坚持地震、钻井、测井、地质资料综合分析的原则,采取宏观控制微观、微观反过来补充或印证宏观的思路,应倡导“点、线、面、体、时”的研究流程:①由区域地质资料及陆相湖盆构造演化史确定构造层序,基于地震反射终止关系划分地震层序;②通过精细的岩心观察、测井分析和地球化学资料研究划分层序、体系域、准层序组及准层序,并建立井、震层序之间关系;③从三维空间开展层序地层地质要素研究,编制相关图件;④建立层序地层格架和层序构型;⑤利用 Fischer 图解法求解相对湖平面变化曲线;⑥讨论可容空间旋回变化规律;⑦采用定量层序地层学计算机模拟和人工智能技术,讨论陆相层序控制因素及陆相层序过程一响应机制;⑧结合沉积矿产勘探开发要素分析,预测和评估有利目标^[33]。

层序地层学工作流程(规范)应该是独立于层序地层构型的,应强调确定沉积成因类型和层序地层界面进而划分地层单元(体系域)。需要说明的是,层序地层学研究流程可能受到构造和沉积背景、资料组合以及研究尺度的影响。

4.3 陆相湖盆层序与源-汇系统

陆相湖盆层序与源-汇系统理论方法体系先进且均得到了广泛应用,二者的内在关联与差异性探讨对地质相关学科、领域协同深入发展意义重大。陆相湖盆层序研究的核心在于建立等时地层格架,揭示沉积充填过程、时空分布序列及成因机制;而源-汇系统分析多维度示踪沉积物剥蚀、搬运、堆积的动态响应动力学过程,厘定沉积物从源到汇全过程的动力驱动机制和原型格局^[35]。

陆相湖盆层序与源-汇系统之间的内在关联性和继承性集中于盆地等时地层格架内剥蚀-沉积响应过程的表征解析及沉积体的定量化预测;差异性主要体

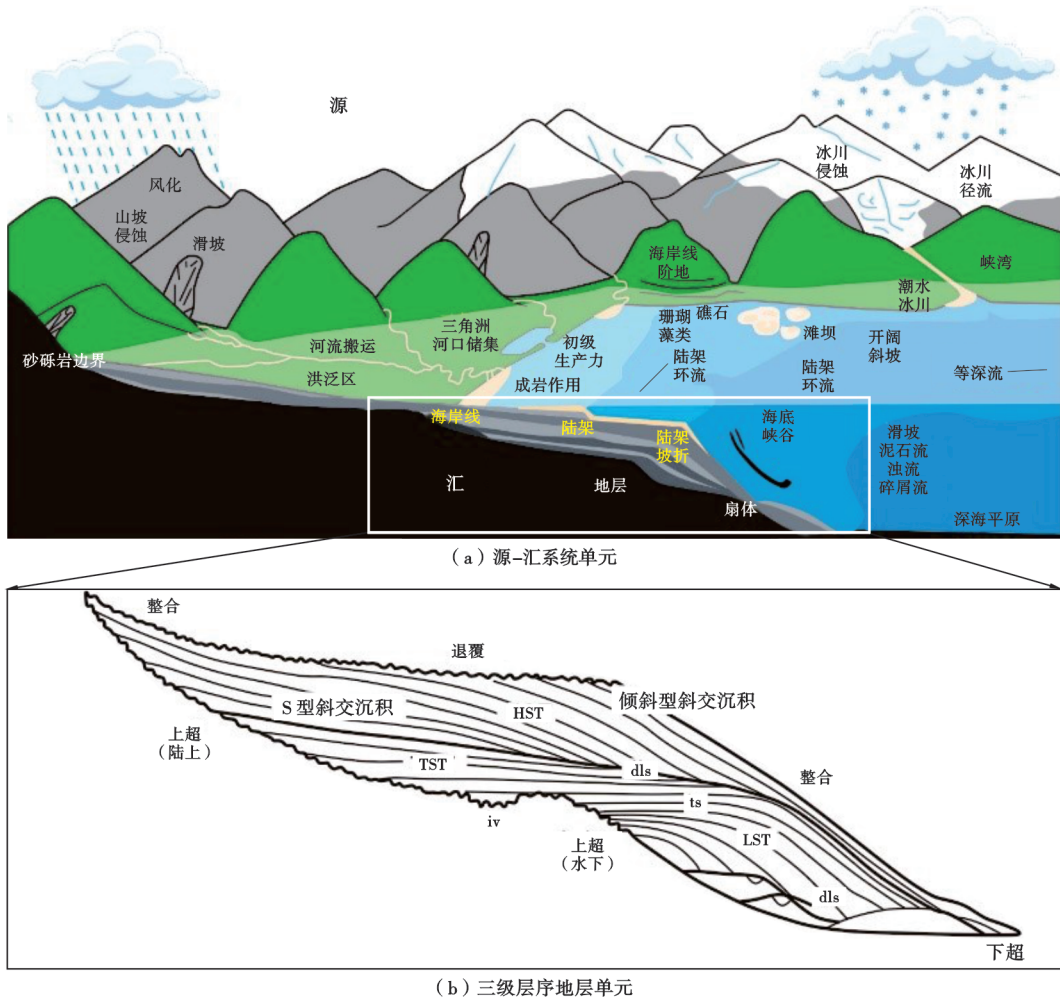
现在刻画表征关键要素和层序内幕单元结构两个方面(图9)。层序地层学为在时间格架内对整个沉积体系的系统研究提供了有效的方法,源-汇系统分析方法是在等时界面控制下分析沉积体系的系统化思维与方法。陆相湖盆层序与源-汇系统分析的核心差异在于对物源区的解读,源-汇系统物源区参数的表征是对层序地层沉积物供给因素的量化。整体而言,层序地层学分析可以解决高精度地层对比、沉积速率、地层间断时间和剥蚀量确定等沉积盆地充填格架及演化的关键问题,而源-汇系统分析可为盆地充填演化、沉积体预测及储层评价提供物源供给信息,解剖物源区、搬运通道及沉积供给可助力厘清砂体沉积机制和分布规律及其控制下的优质储层发育。此外,陆相湖盆层序与源-汇系统理论方法研究有望在应用标准化、古今结合及多学科、多参数定量化分析预测等方面得到快速发展^[36]。

4.4 陆相湖盆层序与滨线迁移轨迹

基准面旋回升降变化对应发生的强制海退开始、强制海退结束、正常海退结束、海侵结束4个主要地质事件均标志着滨线迁移轨迹类型的变化和沉积叠置样式的变化。强制海退的开始标志着由加积向盆内方向的阶步连续进积转变,强制海退的结束意味着下倾方向的加积向连续进积变化,正常海退的结束表明由进积到退积的转变,海侵结束表明了退积(岸线向陆移动)向进积(岸线向盆移动)的变化。上述4个地质事件控制了层序界面和体系域的形成,其相关沉积响应将随着构造背景、沉积背景和资料类型而发生变化。层序地层格架、滨线迁移轨迹与层序成因单元(低位和正常海退、海侵和强制海退)具有成因关系。

滨线迁移轨迹体现了沉积物供给、湖平面变化、构造升降和古地貌背景的综合效应。依据滨线的运动学特征(向上、向下、向前与向后),Helland-Hansen 等^[37]识别出3大类滨线迁移轨迹:下降强制海退型、上升正常海退型和退积海侵型。作为一种新的层序地层学研究手段,滨线迁移轨迹分析方法可更客观地建立滨线迁移与三角洲及其所对应沉积体系发育演化之间的成因关联,进而重建基准面演变历史、预测古环境和岩性分布^[13,37]。滨线迁移轨迹可由地震反射“S”形前积、斜交前积结构反映,该分析方法成败与否的关键在于各沉积单位内滨线坡折点的展布位置的精准厘定。

对于陆相湖盆层序而言,影响其滨线迁移轨迹和沉积物展布的因素与海相盆地有很大的区别。陆相湖盆滨线迁移轨迹与构造沉降、气候或湖平面升降变化密切相关,其类型控制了地层叠置样式和体系域类型。①在高沉降速率区域容易形成上升型滨线迁移轨迹,



注:LST—低位体系域;TST—海侵体系域;HST—高位体系域;iv—下切谷;dls—下超面;ts—海侵面。

图 9 层序地层格架下源-汇系统单元耦合响应关系

Fig. 9 Coupling response of source-to-sink units under the sequence framework

在低沉降速率区域容易形成下降型迁移轨迹。②闭流湖盆的基准面变化受长期构造运动和短期局部气候变化的控制;干旱蒸发环境容易形成平缓和下降型滨线迁移轨迹;潮湿与干旱气候交替变化环境中形成差异性的上升型与平缓或下降型滨线迁移轨迹。③敞流湖盆的滨线迁移轨迹要考虑湖平面升降变化及其与盆外水体基准面之间的关系。因而,陆相湖盆层序的滨线迁移轨迹研究应综合考虑构造沉降、古气候、沉积物供给、可容空间等因素,对有效预测有利砂岩储层发育和分布规律具有重要意义。

4.5 陆相湖盆深水层序地层学

层序地层学理论和方法在深水沉积环境的应用受到挑战,这是由于岸线迁移对应形成的陆上不整合面、湖退侵蚀面等层序地层界面在深水区缺少较为显著的沉积响应。受控于多种自成因和异成因沉积过程相互作用、多向物源供给和多种沉积物搬运方式,深水环境的地层结构和沉积组成复杂,沉积相变仅仅部分响应于可容空间变化、沉积物供给和分散样式,因此,深水

沉积层序地层解释是困难的。

体系域和层序边界的形成时间依赖于滨岸处控制滨线迁移轨迹和盆地内外沉积物供给到深水环境的相对湖平面变化。在深水沉积环境中,可见强制湖退底界面、对应的整合面、最大湖退面和最大洪泛面。可采用沉积、古生物和地球化学标志确定上述界面,如最大湖退面对应颗粒流沉积的结束、最大洪泛面对应浮游生物丰度最高处,在界面确定基础上可进而建立层序地层格架。

深水沉积类型多种多样,反映了可容空间与沉积作用之间的相互关系,其中,重力流沉积与体系域划分密切相关。重力流的组成、类型和体积变化所体现的地层旋回提供了确定层序边界和深水体域的特有依据,地震资料为开展区域范围内不同重力流等时对比研究提供了手段。

深水层序构型可采用下降体系域、低位体系域、湖侵体系域和高位体系域来描述^[12]。在湖平面升降的不同阶段,深水沉积类型发生变化,可依据重力流沉积类型及其相关层序地层边界建立层序地层构型^[38](图 10)。

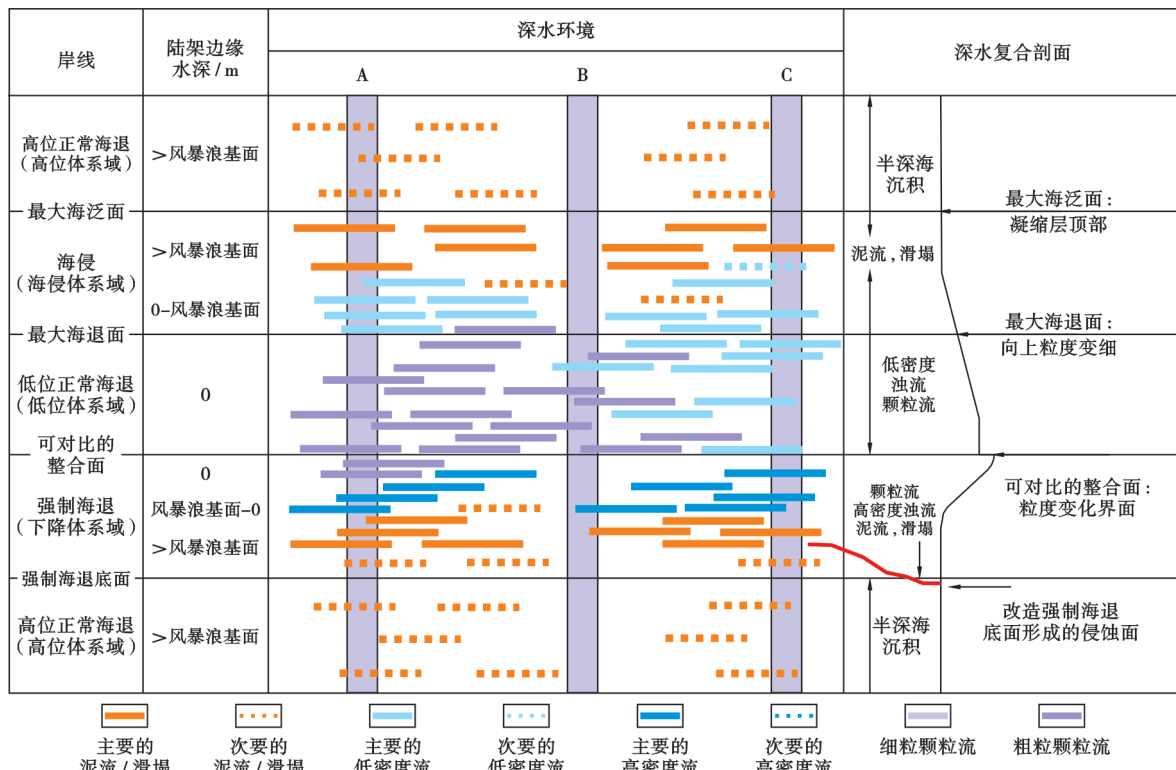


图 10 深水层序地层构型与重力流沉积关系(据文献[16])

Fig. 10 Relationship between the deep sequence architecture and the gravity flow deposits

4.6 陆相湖盆层序构型与数值模拟

陆相湖盆层序地层构型研究的核心内容包括确定层序及其体系域界面、描述体系域构成及其形态、阐明层序地层形成机制及主控因素。

在不同类型的陆相湖盆层序地层学研究过程中,层序构型是指三级层序内不同体系域地层单元的时间—空间组成配置关系,可分为L型、T型、TH型、H型(包括E—H型和L—H型)4种类型^[39]。

随着陆相层序地层学和计算机软件的发展,沉积层序数值模拟和人工智能已成为陆相层序地层学研究新方向。数值模拟和人工智能在克服地学研究中大尺度、长时间复杂问题上具有显著优势。通过变换模拟参数,可更精确地研究陆相层序的形成、沉积组合、主控因素、层序构型,了解沉积过程和盆地充填史、促使层序地层学由定性向定量方向发展。

地质模拟是通过逻辑或数学描述方法来预测地质系统和地质过程的综合研究。层序地层学模拟根据模拟尺度、模拟空间、模拟方向、模拟手段可划分为不同种类。目前,采用较多的层序地层模拟方法是正演模拟。正演模拟是建立在假定过程参数和地层响应之间相互依存基础上的,通过调试不同过程参数的相互作用所产生的地层响应来模拟真实的地层属性。正演模拟的输出结果包括地层的几何形态、岩相、粒度分布、

伪测井曲线和伪地震剖面、岩石属性及生物相等。

层序地层计算机模拟软件采用的算法主要有扩散算法、流体流动算法、几何控制沉积算法、经验数值逼近算法、沉积物搬运的构造校正算法,对应的主流层序模拟软件有SEDPACK、SEDSIM、DIONISOS和SED-FLUX等。随着“数值模拟技术”的日趋完善丰富,对不同构造背景的层序地层采用不同的模拟方法,是选择合适数值模拟方法的关键。

随着层序数值模拟和人工智能方法的发展,未来将会在更大尺度上对沉积盆地进行建模研究,例如,“源-汇系统研究”将数值模拟的范围扩大到更大的尺度,通过模拟泥沙产生、连接源区和沉积中心的输送系统等,在更大范围内模拟陆相湖盆层序地层的形成演化过程。与此同时,对于高精度定量层序建模方法的开发将成为一种趋势,在保证研究结果精确可靠的前提下,如何让数值模拟方法适应更多类型盆地的模拟将会是重要研究方向。

4.7 陆相湖盆层序地层学研究应用领域拓展

层序地层学为指导沉积矿产勘探开发提供了崭新的思想方法和层序地层构型。在区带预探阶段或低勘探成熟阶段,可建立层序地层格架,确定盆地构造与源-汇系统,初评成藏要素,选择有利勘探区带进行油气勘探;在圈闭评价阶段,主要通过沉积地质学和地震

沉积学综合研究,充分考虑层序边界与坡折带类型,明确井间砂体发育特征和储-盖组合,建立生、储、盖分布概念构型,确定成藏组合和有利圈闭分布;在油气开发阶段,通过精细层序对比,可识别隔夹层,建立储层构型、确定流动单元,估算油气田储量,制定注水驱油和 提高采收率的开发方案,不断提高剩余油采出效率。

在陆相湖盆油气勘探开发中,要特别注意最大湖泛面控制烃源岩、区域盖层和构造转换带(坡折带)控制沉积路径、砂体分布和层序界面控制地层圈闭、不同

体系域地层叠置样式控制岩性圈闭等方面的研究。

层序地层学极大地推动了聚煤作用理论的发展,其与旋回地层学相结合能够为含煤岩系对比提供等时性地层格架,并为解释厚煤层成因提供理论支撑。陆相盆地厚煤层的聚集受到基准面及可容空间变化规律的控制,厚煤层是多期泥炭沼泽叠加的产物。在不同古地理背景下及不同体系域中,可容空间增加速率与泥炭聚集速率的平衡关系是不同的,所形成的煤层在厚度上亦有不同表现(图 11)^[40]。

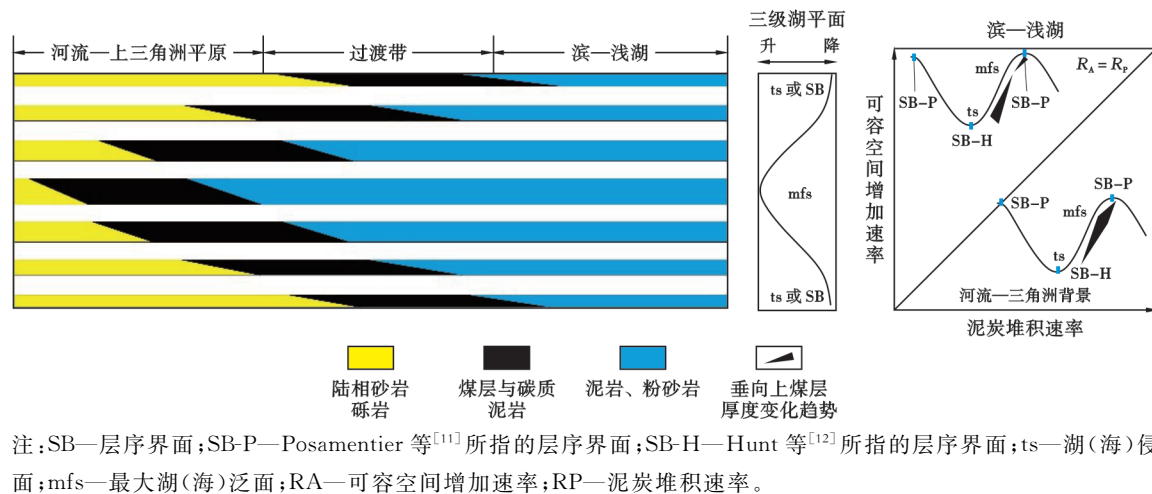


图 11 陆相湖盆背景及近海背景下的厚煤层分布模式及其变化趋势(据文献[40])

Fig. 11 Thickness distribution pattern and variation trend of the thickened coal bed in lacustrine basins and offshore

中国含煤岩系层序地层学研究总体上多集中在对海陆过渡相含煤岩系的研究,对陆相含煤盆地的层序地层学研究尚比较薄弱。可容空间概念如何用于克拉通盆地、前陆盆地、裂谷盆地等不同构造类型含煤盆地,建立不同气候类型、不同构造背景的陆相含煤盆地的层序地层模式还值得深入研究。其次,与米兰科维奇旋回相结合的高分辨率层序地层格架的建立,与“源-汇系统”相结合的不同流域特征以及不同物源供给状态下的层序地层格架与聚煤作用的关系,也是未来的研究方向。

5 讨论与展望

尽管层序地层学的形成发展时间仅 30 多年,但其展现出了旺盛的生命力。层序地层学正处于不断完善和快速发展过程中,这就要求地质学家综合沉积盆地类型、岩性特征、沉积过程和资料类型,识别确定层序界面和地层叠置样式,开展层序地层构型和主控因素分析,以有效指导沉积矿产勘探开发。目前地质学家不断加强下列热点问题的研究:层序地层学概念术语和研究方法的标准化;不同类型沉积盆地层序地层构型及其形成原理;全球海(湖)平面变化的自然周期及

其沉积响应;多级全球海(湖)平面变化的驱动机制及其变化结果的对比性;米兰科维奇地球轨道旋回理论与高频层序之间关系;碎屑岩—碳酸盐岩—蒸发岩混合沉积和细粒沉积的层序构型及其控制因素;陆相湖盆层序形成机制与层序地层构型;层序地层格架与源-汇系统、滨线/陆架边缘迁移轨迹(shelf-edge trajectories)的关系,沉积供给速率和可容空间变化速率共同作用形成的不同地层叠置样式(加积、进积、退积)与滨线迁移轨迹关系;层序及体系域定量划分和识别;基于碳酸盐台地的几何形态及其主要控制因素分析的海相和湖相盆地层序地层构型;基于高精度地球物理和地球化学资料分析的深水层序地层学及其在非常规油气勘探中的应用;层序地层与成岩作用(成岩矿化度旋回);层序地层模拟和建模研究以及层序地层学定量化;基于层序构型发育主要控制因素分析的成藏要素有效预测;露头 and 岩心、地球物理与地球化学、古生物资料、三维可视化、大数据与人工智能等综合运用的层序地层学分析方法技术等。笔者团队认为未来应特别关注以下层序地层学研究重点。

(1) 层序地层研究标准化

层序地层研究标准化是以建立公认的不同类型陆

相盆地的层序发育模式为目标,应主要关注层序地层概念术语的一致性、层序界面和地层叠置样式识别、研究方法的可操作性。基于坡折运动轨迹的滨线迁移轨迹法和基于地层叠置样式的可容空间序列法是开展层序地层学标准化研究行之有效的方法手段^[10,15,41]。

层序地层学研究流程标准化是由构型驱动层序研究向资料驱动层序研究的发展演化。研究流程主要包括以下环节:①明确沉积盆地类型及其构造背景、形成机制;②明确沉积类型和沉积序列特征;③基于资料分辨率和地层叠置样式识别层序界面和体系域类型;④对不同资料的层序划分进行相互对比刻度,建立层序地层格架;⑤古地理要素研究和编图;⑥沉积矿产富集要素研究和有利勘探开发目标预测,指导沉积矿产勘探开发。

(2) 层序构型 3D 空间多变性研究

研究表明,沉积物供给变化是地层叠置样式变化和基准面变化的决定性因素。虽然越来越多的地质学家已经意识到沉积物供给对层序发育演化的重要控制作用,但在层序分析和研究中仍未对沉积物供给变化引起足够重视^[41]。

现在建立的多种层序地层构型往往是顺物源方向的,但在垂直物源方向、盆地边缘的沉积物供给存在差异性,导致在相同基准面升降变化过程中,这些区域形成的地层叠置样式不同。因此,应该加强层序形成动力学机制研究,加强顺物源和垂直物源方向的层序构型 3D 空间多变性研究,建立不同类型盆地的 3D 层序地层构型。

旋回性构造运动是形成陆相沉积盆地沉积层序的根本原因。在陆相盆地特别是陆相断陷盆地中,相同断裂的差异构造活动会造成物源供给、分散路径和沉积体系的不同,不同级别的构造运动幕式旋回形成了不同级别的沉积层序及其沉积体系组合。因此,还要考虑幕式构造运动对不同级次层序地层形成与发育的控制作用。

(3) 陆相层序构型主控因素研究

陆相沉积层序构型明显受控于构造活动和气候变化。建立受构造控制、气候控制以及基准面变化控制的陆相湖盆层序地层构型是开展陆相层序成因机制分析的前提。

在沉积范围远小于海相盆地且缺乏陆棚坡折带的陆相盆地中,未来应该加强陆相层序发育主控因素以及不同因素之间因果关系的研究,以建立层序发育主控因素与层序级次之间的关系,加强陆相层序级别的厘定、不同级次层序界面与界面类型识别及其主导因素分析,确立不同类型盆地层序地层(构造层序与气候

层序)和体系域构型,建立不同构造演化阶段和构造单元的层序地层构型。考虑到不同资料划分层序的分辨率不同,要建立基于多种资料的层序地层构型并根据不同级别层序构型指导沉积矿产勘探开发。

实际上,复杂多变的不同类型陆相盆地沉积层序具体如何响应于异旋回因素,还有许多问题需要更深入的研究才能给出更加接近沉积地质规律的解释。层序地层学定量研究和计算机(数值)模拟是解决上述问题的有效途径。

(4) 多级次层序沉积古地理研究

沉积古地理研究是深入讨论不同类型盆地、同一类型盆地不同构造单元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,建立不同周期频率层序地层格架与沉积矿产富集要素之间关系的基础。

在低精度和高精度层序格架沉积古地理研究中,要充分利用构造运动理论和米兰科维奇地球轨道参数变化控制气候变化的理论,建立受构造运动控制的低频层序格架和受气候变化控制的高频层序格架,进而开展不同级次层序的沉积古地理研究。陆相沉积盆地由于受多物源、近物源、高沉积速率、复杂的古地理环境等条件的影响,层序内部体系域的分布样式和地层叠置形式比海相盆地要复杂得多,岩相侧向相变快,不同岩相与沉积矿产富集要素之间存在不同成因联系。

(5) 指导沉积矿产勘探开发

考虑不同构造背景和不同岩石类型,以不同级别的层序为单元开展沉积古地理研究,建立断陷和坳陷湖盆,近海和内陆盆地,碎屑岩和碳酸盐岩、蒸发岩及煤系地层充填(或混积)的盆地,潮湿和干旱气候带的盆地等不同类型盆地和不同级次的层序地层构型以及沉积体系分布、地层圈闭分布模式,不断提高沉积矿产的预测能力。

在沉积矿产勘探阶段,应关注层序和体系域边界、下切谷和坡折带对沉积矿产富集的控制作用;在沉积矿产开发阶段,应关注砂体构型、储层非均质性及其对剩余矿产资源的控制作用。在充分认识到构造活动和气候作用对层序形成和发育控制作用的基础上,深入讨论不同类型盆地、同一类型盆地不同构造单元的层序地层构型的主控因素,确定不同周期频率的层序地层与沉积矿产富集要素之间的良好对应关系,不断提高沉积矿产勘探和开发效率。

6 结 论

(1) 层序地层学起源于被动大陆边缘盆地,在发展和推广应用过程中,产生了不同学派和不同层序构

型,可指导不同地质背景盆地的油气勘探。

(2) 层序地层学在中国多种类型陆相盆地得到了广泛应用,在层序控制因素、层序构型、砂体分布模式、研究方法等方面取得了陆相盆地独具特色的创新研究成果,丰富、拓展了层序地层学理论体系和方法技术体系。

(3) 陆相湖盆层序地层学未来研究应重点关注不同类型陆相盆地层序地层构型、研究程序标准化与规范化、层序与源-汇系统关系、层序与滨线迁移轨迹关系、不同地层叠加样式与滨线轨迹关系、深水层序地层学、层序沉积过程与数值模拟等发展方向。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
ZHU Xiaomin. Sequence stratigraphy[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000.
- [3] 王华. 层序地层学基本原理、方法与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008.
WANG Hua. The fundamental principle, method and application [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008.
- [4] SLOSS L L, KRUMBEIN W C, DAPPLES E C. Integrated facies analysis[M]//LONGWELL C R, MOORE R C, MCKEE E D, et al. Sedimentary Facies in Geologic History. McLean: Geological Society of America, 1949: 91-124.
- [5] VAIL P R, MITCHUM R M JR, TODD R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level[M]//PAYTON C E. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. McLean: AAPG, 1977: 49-212.
- [6] VAN WAGONER J C, POSAMENTIER H W, MITCHUM R M JR, et al. An overview of sequence stratigraphy and key definitions. In sea level changes—an integrated approach[M]//WILGUS C K, HASTINGS B S, ST C KENDALL C G, et al. SEPM Special Publication 42, 1988: 39-45.
- [7] 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.
- [8] EMBRY A F, JOHANNESSEN E P. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the Uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada[J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 1993, 2: 121-146.
- [9] CROSS T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation[C]//Proceedings of Northwestern European Sequence Stratigraphy Congress. Holland: Elsevier, 1994: 105-123.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] HELLAND-HANSEN W, GJELBERG J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective[J]. Sedimentary Geology, 1994, 92(1/2): 31-52.
- [14] CATUNEANU O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [15] 吴和源. 朝向层序地层学标准化: 层序地层学研究的一个重要科学命题[J]. 沉积学报, 2017, 35(3): 425-435.
WU Heyuan. Towards the standardization of sequence stratigraphy: an important scientific proposition of sequence stratigraphy [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(3): 425-435.
- [16] CATUNEANU O. Sequence stratigraphy in the context of the ‘modeling revolution’ [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 116: 104309.
- [17] VAIL P R, AUDEMARD F, BOWMAN S A. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology: an overview[M]//EISELE G, RIEKEN W, SEILACHER A. Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin: Springer, 1991: 617-659.
- [18] MIALL A D. Whither stratigraphy? [J]. Sedimentary Geology, 1995, 100(1/4): 5-20.
- [19] 冯有良, 李思田, 解习农. 陆相断陷盆地层序形成动力学及层序地层模式[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 119-132.
FENG Youliang, LI Sitian, XIE Xinong. Dynamics of sequence generation and sequence stratigraphic model in continental rift-subsidence basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 119-132.
- [20] 蔡希源, 李思田. 陆相盆地高精度层序地层学[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
CAI Xiyuan, LI Sitian. High resolution sequence stratigraphy of continental basins[M]. Beijing: Geology Press, 2003.
- [21] 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.
ZHU Xiaomin, KANG An, WANG Guiwen. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 283-287.
- [22] 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.
- [23] 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 in continental rifted basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [24] 王家豪, 王华, 赵忠新, 等. 层序地层学应用于古地貌分析——以塔河油田为例[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2003, 28(4): 425-430.

- WANG Jiabao, WANG Hua, ZHAO Zhongxin, et al. Sequence stratigraphy in paleogeomorphology analysis: an example from tahe oilfield[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(4): 425-430.
- [25] WOODCOCK N H. Sequence stratigraphy of the Palaeozoic Welsh Basin[J]. *Journal of the Geological Society*, 1990, 147(3): 537-547.
- [26] WEIMER P, POSAMENTIER H W. Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994.
- [27] 袁选俊, 薛良清, 池英柳, 等. 坳陷型湖盆层序地层特征与隐蔽油气藏勘探——以松辽盆地为例[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 11-15.
YUAN Xuanjun, XUE Liangqing, CHI Yingliu, et al. Sequence stratigraphic and subtle-trap characteristics of lacustrine depression basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 11-15.
- [28] 杜学斌, 解习农, 任建业, 等. 松辽坳陷湖盆环状坡折带发育特征及对沉积过程控制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 157-164.
DU Xuebin, XIE Xinong, REN Jianye, et al. Characteristics of double-circular slope break and the control on sedimentary process in the Songliao Basin, NE China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 157-164.
- [29] 叶茂松, 解习农, 黄灿. 陆相坳陷湖盆斜坡带层序格架下沉积模式及隐蔽圈闭勘探: 以准噶尔盆地车排子凸起春光油田白垩系为例[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(4): 149-158.
YE Maosong, XIE Xinong, HUANG Can. Depositional models and subtle trap exploration under sequence stratigraphic framework in slope belt of continental lacustrine depression basin: an example as Chunguang Cretaceous oilfield in Chepaizi area, Jungger Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(4): 149-158.
- [30] 王军, 杨勇, 张阳, 等. 水位变化对鄱阳湖三角洲分流河道沉积特征的影响[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(1): 1-10.
WANG Jun, YANG Yong, ZHANG Yang, et al. Impact of water level change on sedimentary characteristics of distributary channel in Poyang Lake delta[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2017, 41(1): 1-10.
- [31] 杨超, 朱红涛, 牛成民, 等. 陆相盆地浅水背景河湖交互特征及其模式[J]. *地球科学*, 2021, 46(5): 1771-1782.
YANG Chao, ZHU Hongtao, NIU Chengmin, et al. Characteristics and models of shallow-water environmental river-lake interaction in continental basins[J]. *Earth Science*, 2021, 46(5): 1771-1782.
- [32] 纪友亮, 周勇. 层序地层学[M]. 北京: 中国石化出版社, 2020.
JI Youliang, ZHOU Yong. *Sequence stratigraphy*[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020.
- [33] 王华, 甘华军. 应用层序地层学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
WANG Hua, GAN Huajun. *Applied sequence stratigraphy*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [34] HELLAND-HANSEN W. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 94(1/4): 95-97.
- [35] 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1851-1870.
ZHU Hongtao, XU Changgui, ZHU Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851-1870.
- [36] 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及其差异性[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.
- [37] HELLAND-HANSEN W, HAMPSON G J. Trajectory analysis: concepts and applications[J]. *Basin Research*, 2009, 21(5): 454-483.
- [38] CATUNEANU O. Sequence stratigraphy of deep-water systems[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104238.
- [39] 朱红涛, LIU Keyu, 杨香华, 等. 陆相湖盆层序构型及其岩性预测意义: 以珠江口盆地惠州凹陷为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 32-39.
ZHU Hongtao, LIU Keyu, YANG Xianghua, et al. The sequence stratigraphic architecture of continental lake basin and its significance on lithofacies prediction: taking Huizhou sag in Zhujiangkou Basin as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 32-39.
- [40] 邵龙义, 王学天, 鲁静, 等. 再论中国含煤岩系沉积学研究进展及发展趋势[J]. *沉积学报*, 2017, 35(5): 1016-1031.
SHAO Longyi, WANG Xuetian, LU Jing, et al. A reappraisal on development and prospect of coal sedimentology in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 1016-1031.
- [41] 龚承林, STEEL R J, 彭旸, 等. 深海碎屑岩层序地层学 50 年(1970—2020)重要进展[J]. *沉积学报*, 2022, 40(2): 292-318.
GONG Chenglin, STEEL R J, PENG Yang, et al. Major advances in deep-marine siliciclastic sequence stratigraphy, 1970 to 2020[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 292-318.

(收稿日期 2022-09-26 改回日期 2023-02-10 编辑 肖飞)