

# 大型内陆拗陷湖盆层序结构充填特征及其分布规律 ——以鄂尔多斯盆地延长组为例\*

赵俊兴<sup>1,2</sup> 申赵军<sup>1,2</sup> 李良<sup>3</sup> 王峻<sup>1,2</sup> 王峰<sup>1,2</sup> 曹志松<sup>1,2</sup>

ZHAO JunXing<sup>1,2</sup>, SHEN ZhaoJun<sup>1,2</sup>, LI Liang<sup>3</sup>, WANG Jun<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>1,2</sup> and CAO ZhiSong<sup>1,2</sup>

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都理工大学, 成都 610059

2. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

3. 中石化华北分公司勘探开发研究院, 郑州 450006

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, CDUT, Chengdu 610059, China

2. Institute of Sedimentary Geology, CDUT, Chengdu 610059, China

3. Exploration and Development Institute, North-China Branch Company, SINOPEC, Zhengzhou 450006, China

2011-01-05 收稿, 2011-06-18 改回.

Zhao JX, Shen ZJ, Li L, Wang J, Wang F and Cao ZS. 2011. Sequence filling characteristics and distribution laws of large continental depressed lake basin: A case study of Yanchang Formation, Ordos basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2318 – 2326

**Abstract** The development of sequence stratigraphy in recent years provides new approach for us to perform basin analysis. We divided the Yanchang Formation of Late Triassic in Ordos basin into 4 long-term and 22 medium-term base level cycles using sedimentology and high-resolution sequence stratigraphy methods. In Yanchang Stage, the deposit-sequence-structure evolution of Ordos basin can be summarized as the following: the structure subsided initially in LSC1 and lakes were formed; the lake basins downwarped quickly in LSC2 and was most active in the late period; in LSC3 the circumjacent structures tended to be stable, with basin filling commenced and the lakes became shallow; in LSC4 fluvial deposition increased, and the basin turned into extra-compensation stage, with the lakes silted and turned into residual lacustrine deposit. This paper also put forward and defined the concept of sequence structure dynamics, which is considered as a subject that researches on the control and effect of tectonic movement, sea level fluctuation, source supply, climate and sedimentation on sequence structure development and its distribution laws during sequence filling process. Based on the comprehensive division of the Yanchang Formation sequence stratigraphy, the sequence structure was classified into 5 types (A, B1, B2, B3 and C) according to the sequence structure variation features formed in a datum variation cycle. Then we detailedly analyzed the sequence filling structure features, structure types, sequence filling dynamics process, developing types of sequence structure and filling process with respect of various locations and deposit system units of the Yanchang Formation, Ordos basin, and discussed the sequence structure dynamics characteristics of large continental depressed lake basins. Then we brought forward the “sequence structure distribution laws” for the first time, and constructed the sequence structure distribution pattern of large continental depressed lake basins of Yangchang formation, Ordos basin. It was considered that without important structural event or paroxysmal deposit event, only the type of adjacent sequence structures may distributed with superimposition.

**Key words** Ordos basin; Large continental depressed lake basin; Yanchang Formation; Accommodation space; Sequence structure dynamics; Sequence structure distribution laws

**摘要** 近年来层序地层学的发展为我们进行盆地分析提供了新思路,应用沉积学和高分辨率层序地层研究方法,将盆地晚三叠世延长组划分出4个长期、22个中期基准面旋回。整个盆地在延长期的“沉积-层序-构造”演化史表现为:LSC1构造初

\* 本文受国家自然科学基金青年基金项目(40602012)和四川省重点学科“构造地质学”建设基金项目(SZD0408)联合资助。

第一作者简介: 赵俊兴,男,1972 出生,博士,教授,沉积学与层序地层学专业, E-mail: zhaojx@cdut.edu.cn

始沉降、湖泊形成;LSC2 湖盆快速拗陷,晚期湖泊进入鼎盛期;进入 LSC3,盆地周缘构造趋于稳定、盆地开始填平补齐期,湖泊开始充填淤浅;LSC4 期河流沉积作用增强,盆地进入超补偿沉积阶段,湖泊被淤塞并进入残余湖泊沉积期。提出并定义了层序结构动力学概念,认为层序结构动力学是在研究层序充填过程中由于构造运动、海平面变化、物源供给、气候、沉积作用等因素控制影响层序结构发育特征及其分布规律的一门学科。在对鄂尔多斯盆地延长组层序地层综合划分基础上,根据一个基准面变化周期中所形成的层序结构变化特征,将层序结构划分出 5 种基本层序结构单元类型,即 A 型、B1 型、B2 型、B3 型和 C 型等 5 种。针对对鄂尔多斯盆地延长组不同地理位置、不同沉积体系单元具体分析了层序充填结构特征、结构类型、层序充填动力学过程,层序结构发育类型及充填过程,探讨了大型内陆拗陷湖盆层序结构动力学特征。首次提出了“层序结构分布律”,建立了鄂尔多斯盆地延长组大型内陆拗陷湖盆层序结构分布模式,认为在没有重大构造事件、突发沉积事件发生的情况下,只有那些相邻的层序结构类型才能相互重叠地分布。

**关键词** 鄂尔多斯盆地;大型内陆拗陷湖盆;延长组;可容纳空间;层序结构动力学;层序结构分布律

**中图法分类号** P512.2

在沉积学研究发展历史中,“层序”(Sequence)作为一种以不整合界面的地层单位概念,早在 1948 年就由 Sloss 提出来。Vail 教授于 20 世纪 70 年代末对层序地层的基本概念、定义和关键术语首次作了明确、系统的说明,标志着层序地层学的正式诞生(Galloway, 1989;陈洪德等,1994)。此后十几年中,该理论在 Vail、Sloss、Einsele 等的推动下得到不断的完善和发展,形成了系统的理论体系,同时在国外广泛分布的海相含油气盆地的研究得到充分的应用,取得了空前的经济效益和显著的理论成果(Petty, 2010; Cummings *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2011; Jeffery *et al.*, 2011; Antia and Fielding, 2011)。在我国,在王鸿祯、刘宝珺、徐怀大等老一辈著名地质学家的主持和推动下,于 20 世纪 80 年代末、90 年代初,迅速掀起了一股研究层序地层学的热潮。近些年来,层序地层学在不断发展和应用过程中产生了多个分支,其中尤以 Cross 为首提出了利用可容纳空间与沉积物供给量比值(A/S 值)和基准面旋回进行地层划分的方法,这为我们进行地层精细对比提供了新思路,即高分辨率层序地层学(high-resolution sequence stratigraphy)(刘宝珺,1992;邓宏文,1995;Cross and Lessenger,1996)。

鄂尔多斯盆地是西伯利亚-蒙古大陆板块和华北-塔里木大陆陆缘区在海西晚期对接拼合之后至印支运动,才从中国北部大陆及陆缘构造域中分化出来,为一重力负荷补偿作用形成的大型拗陷盆地(王鸿祯,1985)。在大地构造属性上,鄂尔多斯盆地处于中国东部稳定区和西部活动带之间的结合部位,是一个中生代盆地叠加在古生代盆地之上的复合盆地。晚三叠世延长组鄂尔多斯盆地是典型的大型内陆拗陷湖盆发育时期,气候温暖潮湿,陆相湖盆十分发育。本文主要通过通过对鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组大型内陆拗陷湖盆沉积高分辨率层序地层划分、层序结构分类、不同沉积环境主要层序结构类型分布特征研究的基础上,探讨层序结构在大型内陆拗陷湖盆不同沉积单元中的类型变化、时空分布规律等,提出了层序结构动力学概念,一方面能从理论上探讨控制层序单元的形成过程机理与分布规律,另一方面对于进一步指导能源资源勘探具有重要理论和实际意义。

## 1 沉积层序划分及其内外动力耦合关系

晚三叠世印支运动幕期间,扬子板块与华北板块直接碰撞,秦祁洋从东到西逐渐消失,中国古大陆内开始了秦岭造山带内陆造山阶段的演化,使得鄂尔多斯盆地周缘大地构造动力场发生变化,其西南边缘一带已具前陆挠曲性质。盆地在三叠系延长组发育了一套内陆盆地沉积,周缘发育了冲积扇-河流体系,盆地内部主要为三角洲-湖泊沉积(何自新,2003)。根据露头、钻井层序地层学原理及工作方法,在对盆地延长组的关键性层序界面特划分的各种标志研究的基础上,以高分辨率层序地层研究方法为指导,将鄂尔多斯盆地三叠系延长组层序基准面旋回划分出 4 个长期基准面旋回(即 LSC1 ~ LSC4),其中 LSC1 时限大致相当于长 10-长 9 沉积期,LSC2 基本上相当于长 8-长 7 沉积期,LSC3 相当于长 6-长 4 + 5 沉积期,LSC4 相当于长 3-长 1 沉积期。在层序的发育过程受到了基准面变化的控制,而基准面的变化归根结底受控于盆地内外动力的共同作用。在盆地发展演化的不同发展阶段,不同地区发育的不同沉积体系中,由于盆地周边构造、沉积物供应、以及盆地自身发展的不平衡性,导致了各沉积时期的沉积相、亚相及微相的纵横配置及层序地层特征也发生了相应规律的变化(表 1)。

根据鄂尔多斯盆地延长组沉积和高分辨率层序地层发育特征,盆地中共有 4 次大的构造沉降旋回,分别对应了 4 个长期基准面旋回(LSC1、LSC2、LSC3 和 LSC4)。在 LSC1 期陆内造山开始,盆地西南缘逆冲使得盆地开始沉降,开始了延长组沉积充填史,层序底界区域不整合面,在层序内部具体表现为盆地西南部发育冲积扇-辫状河及辫状河三角洲沉积,粒度粗、厚度大;盆地东北部发育曲流河及曲流河三角洲沉积,盆地地内部发生拗陷,湖泊初始形成。到了 LSC2,构造作用加强,湖盆强烈拗陷,湖泊面积增大,三角洲逆源后退,沉积物整体有变细趋势,在湖盆中心一带形成了延长组主力烃源岩(张家滩页岩)。LSC3 构造作用区域平和,湖盆开始收缩,西南、东北两大物源形成的沉积体系向沉积中心推进,三角洲进积明显。LSC4 则是受后期盆地周缘区域性

表1 鄂尔多斯盆地延长期盆地动力地质作用与层序发育、充填耦合关系

Table 1 The coupling relationship between dynamic geological process and development, filling of sequence during Yanchang Stage in Ordos basin

地层系统				充填演化阶段	外动力地质作用	内动力地质作用	基准面旋回层序		基准面变化曲线			
系	统	组	段				中期	长期	降←	→升		
J	下统	富县组										
三	上	延	长 <sub>1</sub>	湖盆淤浅,冲积扇、曲流河充填阶段	冲积扇-河流-残余湖泊体系	构造减弱湖盆消失	MSC22	LSC4				
			长 <sub>2</sub>				MSC21					
			长 <sub>3</sub>				MSC20					
			长 <sub>4+5</sub>				MSC19					
			长 <sub>6</sub>				MSC18					
			叠	长	组	长 <sub>7</sub>	盆地稳定拗陷,三角洲充填阶段	河流-三角洲-湖泊体系		构造稳定湖盆收缩	MSC17	LSC3
						长 <sub>8</sub>					MSC16	
						长 <sub>9</sub>					MSC15	
						长 <sub>10</sub>					MSC14	
						长 <sub>11</sub>					MSC13	
系	中统	纸坊组				长 <sub>12</sub>	盆地强烈拗陷,湖泊、三角洲充填阶段	河流-三角洲-湖泊体系	构造强烈湖盆扩张	MSC12	LSC2	
						长 <sub>13</sub>				MSC11		
						长 <sub>14</sub>				MSC10		
						长 <sub>15</sub>				MSC9		
						长 <sub>16</sub>				MSC8		
			系	下统	纸坊组	长 <sub>17</sub>	盆地初始拗陷,辫状河、三角洲充填阶段	冲积扇-辫状河-三角洲-湖泊体系	构造沉降湖盆形成	MSC7	LSC1	
						长 <sub>18</sub>				MSC6		
						长 <sub>19</sub>				MSC5		
						长 <sub>20</sub>				MSC4		
						长 <sub>21</sub>				MSC3		
长 <sub>22</sub>	MSC2											
长 <sub>23</sub>	MSC1											

构造抬升末期影响(印支运动 I 幕趋于结束),河流作用增强,三角洲强烈进积,湖泊淤填,西南、东北 2 大沉积体系交叉,湖泊已演化为残余湖阶段。在 4 次大的旋回内又可分为 22 个次一级的构造升降旋回,分别对应了 22 个中期基准面升降旋回(MSC1 ~ MSC22),由于延长组顶部受印支运动主幕影响致使局部地区中期基准面发育不全。

整个盆地在延长期的“沉积-层序-构造”演化史表现为:LSC1 构造初始沉降、湖泊形成,河流及三角洲充填开始(MSC1 ~ MSC5);LSC2 构造强烈,湖盆快速拗陷,早期(MSC6 ~ MSC8)为构造沉降由慢向快的转换期,湖域面积逐渐增大,周缘三角洲发育,晚期(MSC9 ~ MSC11)由于构造沉降达到最大,湖泊进入鼎盛期,沉积体系逆源后退;进入 LSC3(MSC12 ~ MSC16),盆地周缘构造趋于稳定、盆地开始填平补齐期,湖泊开始充填淤浅;进入 LSC4 期,即 MSC17 ~

MSC22 期印支运动 I 幕趋于结束,河流沉积作用增强,东北部沉积体系持续向西南推进,盆地进入超补偿沉积阶段,湖泊开始被淤塞,进入残余湖泊沉积期。

## 2 层序结构发育类型划分与层序结构动力学定义

层序地层的理论和方法是在沉积盆地分析中首先建立等时地层格架,并将沉积相和沉积体系的研究置于构造沉降、海(湖)平面升降和沉积物供给等控制因素的复合制约和整体的统一格架中。通过对层序发育影响控制因素与层序结构发育类型及其分布的关系研究,有利于对 1 个沉积盆地从整体上把握其形成演化规律。

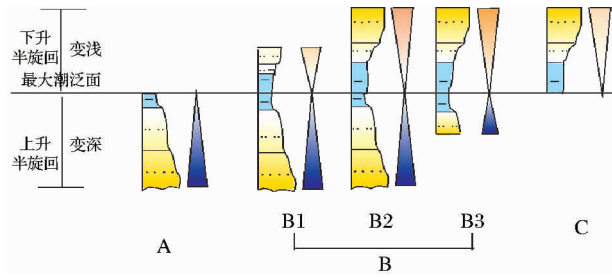


图1 层序结构发育类型划分

Fig. 1 The development of sequence structure types are classified

在对鄂尔多斯盆地延长组层序地层综合划分基础上,根据不同地区的1个基准面变化周期中所形成的层序结构变化特征,这里可以将层序结构大致地划分出5种基本层序结构单元类型(图1),即:(1)A型;(2)B1型;(3)B2型;(4)B3型;(5)C型。A型为非对称基准面旋回结构,往往表现为仅保留了向上变深基准面旋回结构;B1型为非对称基准面旋回结构,层序结构主体为向上变深基准面旋回大于向上变浅旋回;B2型为对称基准面旋回结构,层序结构表现为基准面向上变深旋回和向上变浅旋回相等或近似相等;B3型为非对称基准面旋回结构,层序结构主体为向上变深基准面旋回小于向上变浅旋回;C型为非对称基准面旋回结构,层序结构表现为紧保留向上变浅基准面旋回。除B2型为对称旋回结构,其余的均为非对称旋回结构。这五种结构类型在不同类型的盆地中都存在,只是在不同地区,其分布优势、发育厚度等有所不同。

前人曾对盆地内短期基准面旋回层序叠加动力学过程进行了探讨(郑荣才等,2000;赵俊兴等,2003),目前还没有对层序结构动力学给予具体地定义。对于层序结构动力学的具体定义,作者认为层序结构动力学是在研究层序充填过程中由于构造运动、海(湖)平面变化、物源供给、气候、沉积作用等因素控制影响层序结构发育特征及其分布规律的一门学科。每个层序发育过程中,因受构造作用、气候条件等变化引起的物源供给情况变化及可容纳空间的影响,表现出每个层序发育演化的不同时期在不同的沉积微相组合、不同类型的沉积物及沉积叠置样式、储层发育情况也存在差异。通过对鄂尔多斯盆地延长组大型内陆拗陷湖盆层序结构发育类型与分布规律的研究,探究其一般规律特点,一方面能丰富层序地层学内容,另一方面可以反过来指导我们进行沉积盆地分析,更好地进行等时地层对比研究,展现盆地充填演化规律并进一步指导盆地油气勘探。

### 3 不同沉积单元层序结构特征及其充填动力学过程

鄂尔多斯盆地在晚三叠世延长期时期发育了一套陆相

沉积,周边水系发育,延伸入湖,形成一系列向盆地中心发育的河湖三角洲裙。其沉积相单元发育了冲积扇、河流、三角洲、深湖-半深湖及浊流等沉积,其中,河流-三角洲-湖泊为盆地主体沉积。基准面旋回是记录了1个可容纳空间由增加到减少的变化过程中形成的一套成因上有联系的岩相所构成的地层旋回响应过程,属于受可容纳空间与沉积物供给量比值(A/S值)变化和地层自旋回过程双重因素控制的韵律性沉积产物。

#### 3.1 冲积体系基准面旋回充填过程及结构特征

盆地冲积体系主要包含冲积扇-河流沉积,延长组冲积体系主要发育期主要分布于盆地周缘地区,其基准面旋回主要表现为以上升半旋回为主(图2、图3)。短期基准面旋回中的结构变化对于由基准面变化所引起的水深、水动力条件、沉积作用强度和方式的变化最为敏感。在冲积体系(冲积扇、河流)发育过程中,所形成的短期基准面旋回结构不完整,往往缺少了基准面下降半旋回沉积,以发育仅保留上升半旋回为特点,即以发育A型层序为主,而且沉积厚度较大。每个旋回基本上都具有粒度向上变细的正粒序结构,旋回的底部伴有底冲刷面,含有河床滞留砾石。整个河流保留沉积厚度要比原始沉积厚度小,这是由于基准面多次下降使得河流曾经发生了多次进积作用造成上一次沉积旋回顶部被冲刷剥蚀的结果(图4),反映了该时期为低可容纳空间时期

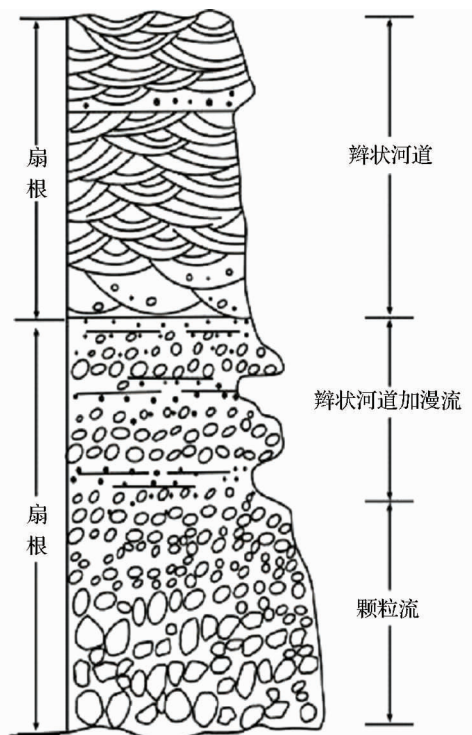


图2 冲积扇剖面结构序列(汝箕沟剖面,延长组)

Fig. 2 The structure sequence of alluvial fan profile (Ruqigou section, Yanchang Formation)

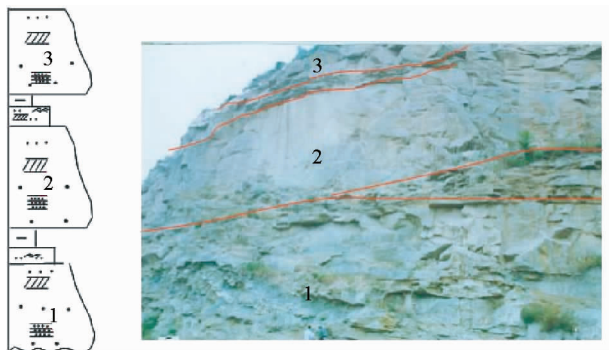


图3 河流体系的短期基准面旋回及叠置特征(延河剖面, 延长组)

Fig. 3 The short term base level cycle and fold features in fluvial system (Yanhe section, Yanchang Formation)

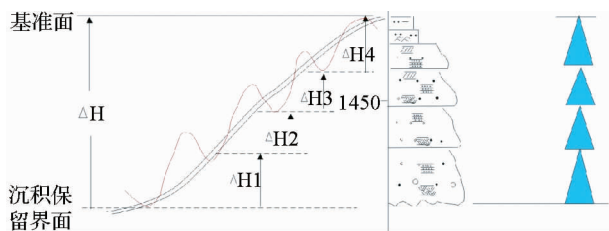


图4 河流体系短期旋回沉积层序充填动力学作用过程 ( $A/S < 1$ )

Fig. 4 The processes of the short term base level cycle filling dynamics sedimentation sequence in the river system

( $A/S < 1$  或  $A/S \ll 1$ )。

在  $A/S$  值的动态变化系统中, 河道类型的改变常常是基准面升降导致的可容纳空间的反映。在  $A/S$  为负值时的情况下, 河流冲刷形成河谷, 沉积物不能够保留, 主要表现为冲刷搬运作用, 负值越大, 搬运的颗粒越粗, 这种情况一般出现在物源区附近; 在  $A/S$  改变为正值时, 冲积扇-河流开始沉

积; 在低  $A/S$  比值条件下, 沉积物供给充足, 但可容纳空间有限, 常常形成一些相互叠置、彼此切割的河道砂, 随着可容纳空间继续增大, 河流相沉积物补给有限, 常常形成一些被平原细碎屑沉积物包围的、各相渐变的透镜状河流砂岩(河流废弃)。

### 3.2 三角沉积体系基准面旋回充填过程及结构特征

鄂尔多斯盆地内部延长组属于一套典型的湖泊-三角洲沉积体系, 湖泊三角洲在湖盆内部十分发育。延长期在盆地湖泊的周围形成了以东北三角洲和西南三角洲为代表的三角洲裙(付金华等, 2005)。三角洲沉积体系作为陆相湖盆的最典型的过渡沉积, 分析其层序结构动力学变化及其分布规律别具意义(陈洪德等, 2007)。

#### 3.2.1 三角洲平原亚相内的短期旋回特征

三角洲平原为三角洲沉积体系的水上部分, 在三角洲平原亚相带内, 其短期旋回叠加基本上与河流体系的冲积平原上的曲流河特征相似, 不同的是反映了可容纳空间增大、 $A/S$  比值增高。从沉积微相类型来看, 三角洲平原亚相主要包括分流河道、天然堤、决口扇、泛滥平原等沉积微相。在三角洲体系中, 三角洲平原亚相处于相对比较低的可容纳空间, 构成短期旋回的上升半旋回由厚度较大的分流河道砂岩组成, 而下降半旋回缺失或极不发育(图5), 若发育则由厚度较薄的天然堤泥岩夹决口扇砂岩所组成。主要的基准面旋回层序结构类型主要表现以 A 型为主, 少数表现为结构 B1, 即上升半旋回的厚度远远大于下降半旋回厚度(B1)型或者仅保留了上升半旋回(A型), 即为不对称或完全不对称旋回结构, 代表了低-中等可容纳空间条件下所形成的短期旋回。在可容纳空间较低条件下, 短期基准面旋回结构主要由一系列叠置分流河道砂体组成, 单个砂体发育向上变细的粒序, 砂体间常以冲刷面分隔, 整个叠置砂体具有向上变细结构特征, 造成这种现象的因素与下一次分河道作用过程对本次沉积物的冲刷程度有关。

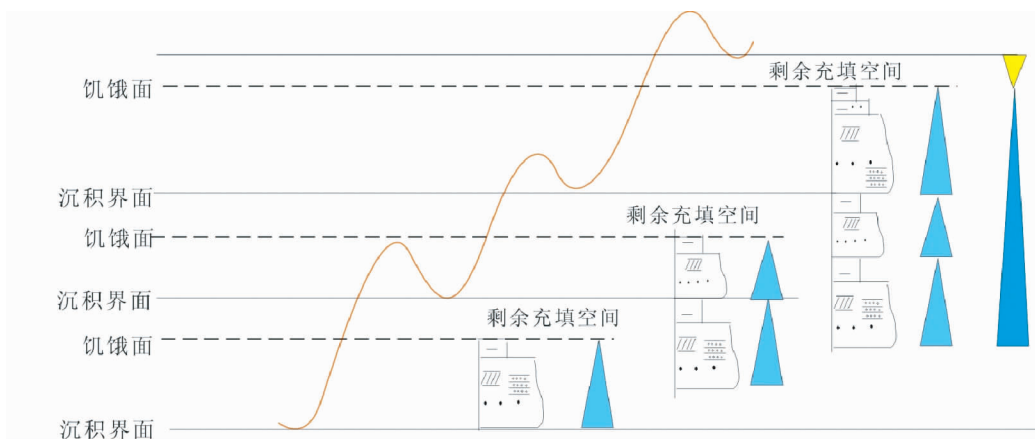


图5 三角洲平原亚相内的短期基准面旋回及叠置过程

Fig. 5 The short term base level cycle and of delta plain and phase



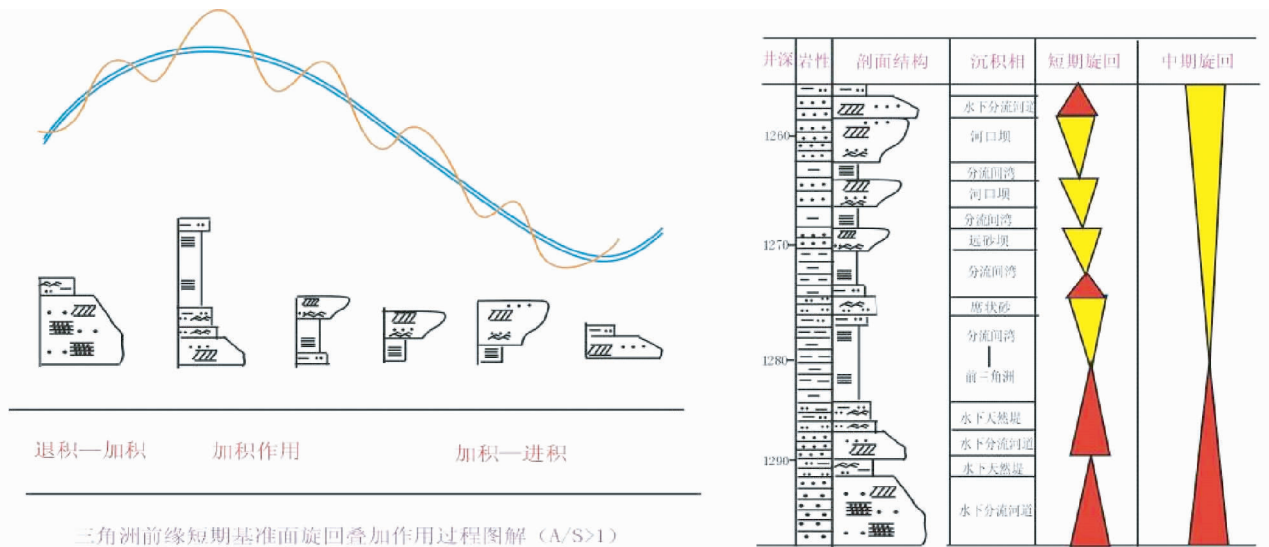


图6 陇东地区三叠系延长组三角洲前缘层序充填过程示意图

Fig.6 The filling process schematic drawing of Triassic Yanchang Formation delta sequence Longdong region

### 3.2.2 三角洲前缘亚相内的短期旋回特征

与三角洲平原亚相相比,三角洲前缘亚相沉积微相类型更加多样化,加上在前缘地带可容纳空间向湖泊方向逐渐增大过程,因而在此环境内所形成的短期基准面旋回组成特征也具有多样性、独特性和完整性。一般在三角洲前缘亚相带  $A/S$  比值大于或者等于 1,可容纳空间向湖泊方向增大, $A/S$  比值也逐渐增加。基准面旋回叠加式样主要有上升半旋回大于下降半旋回型、近对称型和下降半旋回大于上升半旋回型,只是在前缘不同位置基准面叠及样式不同。

为了方便说明,这里将三角洲前缘分为前缘近端、中段和远端进行讨论分析,在同一时期,随着由前缘近端向远端过渡,可容纳空间逐渐增大。在前缘近端, $A/S$  比值相对较小,三角洲主要的沉积微相主要水下分流河道、分流间湾为主,河口坝、远砂坝等不发育,常具有底冲刷现象,构成其基准面旋回与三角洲平原特点相似,主要表现为短期旋回的上升半旋回为主的 A 型和 B1 型,与平原相比较,B1 型结构出现变多;在三角洲前缘中段, $A/S$  比值增加,水下分流河道、前缘河口坝、分流间湾等微相发育,旋回明显的对称性明显增加,在河口坝不发育地区旋回结构主要以 A 型和 B1 型为主,河口坝发育地带则以 B 型为主(包括 B1、B2 和 B3 型),突出特征是近对称的 B2 型旋回结构数量增多,代表了高容纳空间基准面升降速率与沉积物供给速率接近一致条件下所形成的产物;到了前缘远端,水下分流河道变得不再发育,沉积物粒度变细,可容纳空间、 $A/S$  比值大大提高,远砂坝、席状砂、分流间湾和水上平原等微相占据了主要沉积,构成前缘前端的基准面旋回结构类型则以上升半旋回小于下降半旋回的 B3 型和仅保留下降半旋回的 C 型为主。

总体来讲,三角洲前缘沉积层序结构类型发育具有多样化,从 A 到 C 均有所发育(图 6),随着距离岸线越来越远,B3

或者 C 型出现的频率愈来愈多。在  $A/S$  值的动态变化系统中,在低  $A/S$  比值条件下,沉积物供给充足,但可容纳空间有限,常常形成一些相互叠置、彼此切割的河道砂,随着可容纳空间继续增大,沉积物补给有限,常常形成一些被分流间湾、前三角洲细碎屑沉积物包围的、各相渐变的透镜状砂岩。

### 3.2.3 前三角洲亚相、浅湖、半深湖内的短期旋回特征

前三角洲、浅湖沉积物主要由粒度细的粉砂岩和泥岩组成,主要见一些粉砂坪、泥粉坪、泥坪等,沉积区则由于经常处于饥饿状态, $A/S \ll 1$ ,使得其沉积物粒度细、沉积厚度薄,更多的是在基准面下降晚期的三角洲进积作用而带来粒度稍粗的沉积物,保留下来的基准面旋回结构主要由基准面下降半旋回(C 型)组成,或者为下降半旋回远远大于上升半旋回结构(B3 型),而基准面上升半旋回不发育。造成这种现象的原因是由于在基准面上升阶段时,沉积物向陆方向退积,该环境处于欠补偿状态,使得上升阶段沉积物少、粒度细,而在下降阶段,三角洲发生进积,物质供给相对充分,从而造成了以 B3 型和 C 型旋回结构为主,与其他亚相比较,突出特征是 C 型越来越发育。半深湖环境在长 7 发育典型,为 1 套黑色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、炭质泥岩、页岩、油页岩沉积,无论是上升半旋回还是下降半旋回都处于欠补偿沉积状态。在基准面上升期,其主要沉积了 1 套细粒沉积,主要以泥岩、页岩为主,该环境处于高度欠补偿状态;当在基准面下降时期,由于此时三角洲发生进积,在此环境内形成的沉积物粒度有所加粗,主要是粉砂质含量有所增高,在层序结构上则表现出以下降半旋回为主的 B3 型和 C 型结构。

### 3.2.4 浊积扇内的短期基准面旋回特征

盆地长 7 和长 6 沉积期在西南部众多钻井中广泛发育浊积砂体(赵俊兴等,2008)。前面研究表明,研究区浊积岩

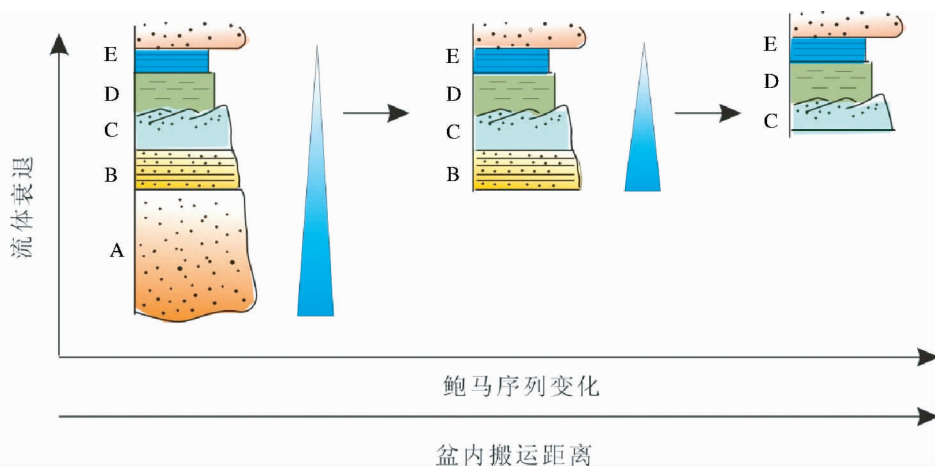


图7 浊流逐渐衰减过程中鲍马层序ABCDE变化与层序结构

Fig.7 In the process of gradual attenuation of turbidity, the changes and stratigraphic structures in Bouma sequence

具有较为典型的浊积岩粒序递变层理,即鲍玛序列,这些鲍玛序列可以是完整的ABCDE组合,而更多的是不完整的鲍玛段组合如ABC组合、BCDE组合、CDE或者DEF、BCE组合,但总体上都表现出了一次浊流沉积作用过程所形成的层内碎屑颗粒由粗变细的粒级递变过程。

同样作为扇体沉积体系,浊流与三角洲不同。浊流作为突发事件,如果不考虑半深湖-深湖沉积情况下,它与在浊流内部一次性沉积作用过程中,无论形成的是薄层浊积岩还是厚层浊积岩,也不论是有完整的鲍马序列还是不完整的鲍马序列,组成浊积岩的基准面旋回结构都为仅保留上升半旋回的A型结构(图7)。旋回底界面为浊流特有的重力流形成的印模构造、火焰构造,界面类型主要是岩型转换面。事实上,浊流在内扇、中扇的辫状水道沉积区,其冲刷作用强,

发育厚度大,其形成的短期基准面旋回主要为上升半旋回沉积记录为主,下降半旋回表现为被侵蚀或无沉积间断,以底部的重力流冲刷或整-界面为界,由钟形测井曲线特征显示向上“变深”的结构,旋回结构为A型。

#### 4 基准面旋回分布规律及盆地层序充填模式

结合鄂尔多斯盆地延长期大型内陆拗陷盆地沉积层序结构特征及其叠加作用过程研究表明,随着从盆地周缘向盆地内部不同地区可容纳空间与沉积通量关系(A/S比值)不同,反映在不同相带中基准面旋回结构特点也不一样,可以看出以下规律:(1)在物原区,A/S为负值,河流冲刷形成河谷,沉积物不能够保留,主要表现为冲刷搬运作用,负值越

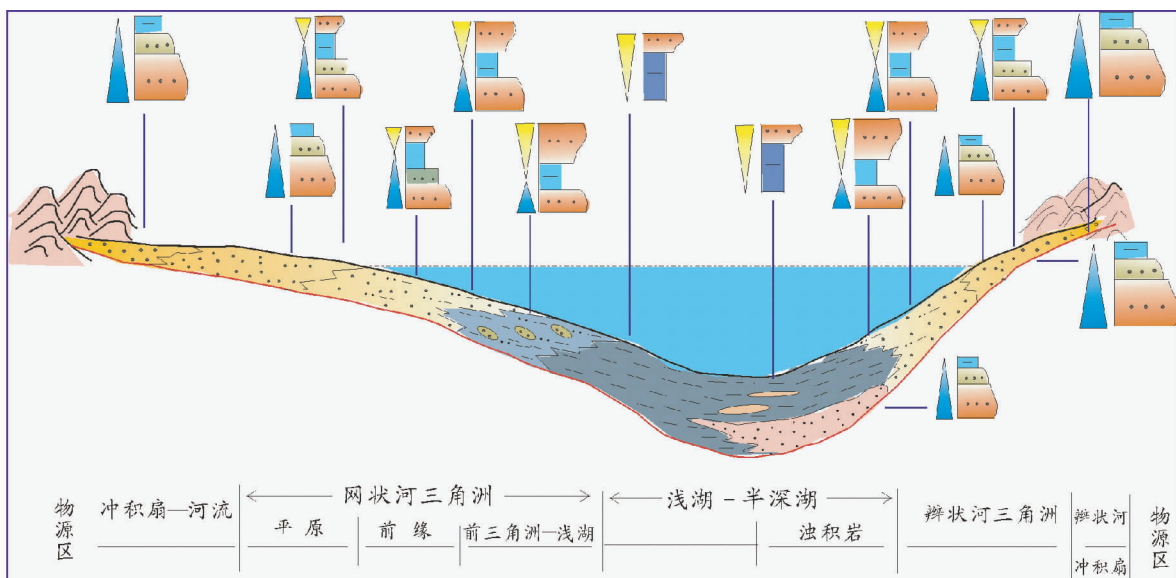


图8 鄂尔多斯盆地中生界延长组层序发育结构分布模式

Fig.8 The sequence development structure of distribution patterns of Mesozoic Yanchang Formation in Ordos basin

大,搬运的颗粒越粗;(2)在 A/S 改变为正值时,冲积扇-河流开始沉积,在冲积体系发育过程中,所形成的短期基准面旋回结构不完整,以发育 A 型层序为主,而且单个基准面旋回沉积厚度较大;(3)随着 A/S 向盆地方向增大,在三角洲平原相带内主要表现类型为 A 型为主,少数为 B1 型;(4)三角洲前缘沉积亚相中,前缘近端基准面旋回与三角洲平原特点相似,主要表现为短期旋回的上升半旋回为主的 A 型和 B1 型,与平原相比较,B1 型结构出现变多;在前缘中部旋回明显的对称性明显增加,基准面旋回结构主要以 B 型为主(包括 B1、B2 和 B3 型),突出特征是近对称的 B2 型旋回结构数量增多;到了前缘远端基准面旋回结构类型则以上升半旋回小于下降半旋回的 B3 型和仅保留下降半旋回的 C 型为主;(5)前三角洲、浅湖、半深湖经常处于饥饿状态, $A/S \ll 1$ ,其沉积物粒度细、厚度薄,保留下来的基准面旋回结构主要由基准面下降半旋回(C 型)组成,或者为下降半旋回远远大于上升半旋回结构(B3 型),与其他亚相相比较,突出特征是 C 型越来越发育。(5)浊流作为半深湖内部突发事件沉积,是浊流内部一次性沉积作用过程中形成了单个层序结构,基准面旋回结构都为仅保留上升半旋回的 A 型结构。结合盆地南北部沉积体系发育特征,鄂尔多斯盆地延长组沉积时期总层序发育结构分布见(图 8)。

显而易见,伴随着基准面变化旋回发生的可容纳空间所在地理位置的迁移,在不同地理位置所形成的层序结构叠加、保存厚度以及层序结构类型的分布是有规律可循的。对于层序结构类型在盆地中分布,我们注意到了层序结构类型在不同沉积相带分布大致有以下特点:在物源区,其保留下来的层序结构类型主要为 A 型为主,随着向湖盆方向变化,层序结构类型表现为向 B 型(B1、B2、B3)、C 型过渡变化。在 19 世纪末,德国人 Walter 在对沉积相展布规律研究时,提出了著名的瓦尔特相律,指出唯有那些相邻发育的相才能相互重叠地产出(刘宝珺和曾允孚,1985)。沿着这条思路,同样我们也可以发现层序结构类型的分布仍存在相似的规律,在这里将其命名为“层序结构分布律”,可以定义为:在没有重大构造事件、突发沉积事件发生的情况下,只有那些相邻的层序结构类型才能相互重叠地分布。需要强调的是,这种规律性变化是建立在比较稳定的构造背景基础上,而且没有重大突发地质事件的发生为前提。

## 5 结论

通过前面对鄂尔多斯盆地延长组这种大型内陆拗陷盆地的层序结构类型划分、层序结构形成的动力学过程分析及层序结构分布规律探讨研究,我们可以得到了以下几点结论认识:

(1) 针对层序发育的结构特征,将层序结构划分出了五种基本层序结构类型。

(2) 提出并定义了层序结构动力学概念,认为层序结构

动力学是在研究层序充填过程中由于构造运动、海平面变化、物源供给、气候、沉积作用等因素控制影响层序结构发育特征及其分布规律的一门学科。

(3) 针对不同地理位置、不同沉积体系单元,具体分析了层序结构发育类型及充填过程,建立了鄂尔多斯盆地延长组大型内陆拗陷湖盆层序结构分布模式。

(4) 总结了层序结构在沉积盆地中的分布规律,首次提出了“层序结构分布律”,丰富了层序地层学理论。当然,对于层序发育本身而言是复杂的过程,单凭理论分析并不能够说明一切实际存在的问题,文章仅提出几个基本概念,相信对层序地层学理论的发展有意义,这里还需要广大地学工作者共同努力来完善这一理论,以更好地用来指导实际工作。

## References

- Antia J and Fielding CR. 2011. Sequence stratigraphy of a condensed low-accommodation succession: Lower Upper Cretaceous Dakota sandstone, Henry Mountains, southeastern Utah. *AAPG Bulletin*, 95(3): 413–447
- Chen HD, Liu WJ, Zheng RC and Qian YZ. 1994. *Theory of Sequence Stratigraphy and Research Methods*. Chengdun: Sichuan Science and Technology Press (in Chinese)
- Chen HD, Zhao JX, Fu ST and Ni XF. 2007. Sequence filling dynamic process of Early-Middle Jurassic in central-south Ordos basin. *Natural Gas Industry*, 27(5): 21–25 (in Chinese with English abstract)
- Cross TA and Lessenger MA. 1996. Sediment volume partitioning: Rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation. Accepted for Publication in Norwegian Petroleum-Forneing Conference Volume July, 1–24
- Cummings DI, Gorrell G, Guilbault JP *et al.* 2011. Sequence stratigraphy of a glaciatic basin fill, with a focus on esker sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 123(78): 1478–1496
- Deng HW. 1995. A new school of thought in sequence stratigraphic studies in U. S.: High-resolution sequence stratigraphy. *Oil & Gas Geology*, 16(2): 89–97 (in Chinese with English abstract)
- Fu JH, Guo ZQ and Deng XM. 2005. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos basin. *Journal of Palaeogeography*, 7(1): 34–43 (in Chinese with English abstract)
- Galloway WE. 1989. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. *AAPG*, 73: 125–142
- He ZX. 2003. *Ordos Basin Evolution and Oil and Gas*. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract)
- Jeffery DL, Bertog JL and Bishop JR. 2011. Sequence stratigraphy of Dinosaur lake: Small scale fluvio-deltatic stratal relationships of a dinosaur accumulation at the Aaron Scott quarry, Morrison formation, San Rafael swell, Utah. *Palaios*, 26(5): 275–283
- Liu BJ and Zeng YF. 1985. *Lithofacies-Paleogeographic Basis and Working Methods*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Liu BJ. 1992. A thinking on the development in sedimentology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(3): 1–9 (in Chinese with English abstract)
- Petty DM. 2010. Sequence stratigraphy and sequence boundary characteristics for upper Tournaisian (Mississippian) strata in the greater Williston basin area: An analysis of a third order cratonic carbonate-evaporite depositional cycle. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 58(4): 375–402



- Wang HZ. 1985. Atlas of the Paleogeography of China. Beijing: Geological Publishing House, 37 - 46 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JX, Chen HD and Xiang F. 2003. The high-resolution sequence stratigraphy feature of Yanan Formation in Yanan area, Ordos basin. Acta Sedimentologica Sinica, 21 (2): 307 - 312 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JX, Li FJ, Shen XL, Luo Y and Fu W. 2008. Sedimentary characteristics and development pattern of turbidity event of Chang 6 and Chang 7 oil reservoirs in the southern Ordos basin. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 389 - 394 (in Chinese with English abstract)
- Zhao WZ, Zuo CN, Chi YL and Zeng HL. 2011. Sequence stratigraphy, seismic sedimentology, and lithostratigraphic plays: Upper Cretaceous, Sifangtuozhi area, southwest Songliao Basin, China. AAPG Bulletin, 95(2): 241 - 265
- Zheng RC, Yi SM and Peng J. 2000. Sedimentary dynamic analysis of sequence structure and stacking pattern of base-level cycle. Acta Sedimentologica Sinica, 18(3): 369 - 375 (in Chinese with English abstract)
- 侏罗世沉积层序充填动力学作用过程. 天然气工业. 27(5): 21 - 25
- 邓宏文. 1995. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学. 石油与天然气地质. 16(2): 89 - 97
- 付金华, 郭正权, 邓秀芹. 2005. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义. 古地理学报. 7(1): 34 - 43
- 何自新. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油工业出版社
- 刘宝珺, 曾允孚. 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社
- 刘宝珺. 1992. 关于沉积学发展的思考. 沉积学报. 10(3): 1 - 9
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 地图出版社, 37 - 46
- 赵俊兴, 陈洪德, 向芳. 2003. 鄂尔多斯盆地中部延安地区中侏罗统延安组高分辨率层序地层研究. 沉积学报, 21(2): 307 - 312
- 赵俊兴, 李凤杰, 申晓莉, 罗媛, 付伟. 2008. 鄂尔多斯盆地南部长6和长7油层浊流事件的沉积特征及发育模式. 石油学报, 29(3): 389 - 394
- 郑荣才, 尹世民, 彭军. 2000. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析. 沉积学报, 18(3): 369 - 375

#### 附中文参考文献

- 陈洪德, 刘文均, 郑荣才, 钱奕中. 1994. 层序地层学理论和研究方法. 成都: 四川科学技术出版社
- 陈洪德, 赵俊兴, 付锁堂, 倪新锋. 2007. 鄂尔多斯盆地中南部早中