

文章编号: 1000-0550(2007)04-0505-06

旋回性沉积序列的形成机理分析

陶明华 韩春元 陶亮

(华北石油勘探开发研究院 河北任丘 062552)

摘要 旋回性特征是沉积岩层最为重要的属性之一,尤其在对于区域地质背景波动做出敏感响应的陆相盆地沉积序列当中更是如此。沉积岩层的韵律性或旋回性特征由岩层的岩石学性质在纵向上的(随时间的)有规律变化所决定,这些变化主要由以下方面所体现,包括:组分变化、粒度变化、颜色变化、沉积补偿强度变化、氧化还原强度变化,以及化石群性质变化等。研究表明,沉积岩层的韵律性或旋回性特征在一定程度上受海(湖)平面变化影响,但从更加广泛的意义上来看,应是沉积过程对于区域地质背景波动的响应,其主控因素是构造波动。

关键词 韵律 沉积旋回 构造活动 气候变化 主控因素 沉积响应

第一作者简介 陶明华 男 1955 年出生 高级工程师 沉积学 E-mail yj_tmh@petrochina.com.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

对于陆相断陷盆地碎屑岩为主的沉积建造类型而言,沉积组分特征、粒度特征、颜色特征、电测井曲线特征,以及岩层的其它显性或隐性特征的纵向变化,致使沉积层序呈现出明显的韵律性或旋回性。按照习惯性理解,沉积韵律指小尺度的岩石学特征的有规律变化,而沉积旋回指大尺度的岩石学特征的有规律变化。对于前者,这种变化过程所经历的时间片段相对短暂(一般限于 0.1 Ma 之内),在沉积序列中的延续厚度相对有限(一般限于 20 m 之内)。对于后者而言,岩石学特征的有规律变化过程所经历的时间片段之长,在沉积序列中的延续厚度之大,很难给出一个公认的上限。当代盆地地层学研究的一个意外收获是,沉积旋回不仅仅体现于单一的地层剖面当中,而且往往贯穿于整个盆地,大规模的沉积旋回甚至可以在全球范围内加以对比。此外,有关沉积旋回在时间尺度和空间尺度上的周期性、等距性特征已为部分研究者所关注^[1]。

1 问题的提出

在以往的研究当中,对于沉积序列中的旋回性特征,更多的仅仅从沉积学的视角加以理解,譬如将岩性的粗细或颜色的红暗变化与海(湖)平面变化直接联系起来。限于这种理解,尽管在针对某一条具体剖面的局部片段进行分析时可以得出近似合理的解释,但对于一条完整剖面的分析则时常陷于困惑,尤其面对大量剖面时,不可避免地陷于分析工作的混乱。内

陆盆地中一种常见沉积序列(见图 1)所揭示的现象,更是当前沉积学及其他相应理论所较少涉及的。图 1 为河北任丘一带沙河街组三段中亚段至一段下亚段的地层片断,岩性、电性纵向变化显示了清晰的旋回性特征。为描述工作方便起见,进一步区分出 A 段到 J 段十个岩性小段。如图所示, A 段至 B 段范围内,粒度变化、颜色变化,以及物质组成自下而上均构成一个典型的单向(正旋回状)沉积序列。自 C 段底部至 E 段顶部,同样为一个粗碎屑岩逐渐减少、泥质岩陆续增加的沉积序列,粒度变化特征与 A 至 B 段相似(由粗到细),显示为“正旋回状”。但从沉积物颜色变化趋势来看, C 至 E 段由暗变红,显示为沉积回返状态。F 段显示了另外一种特色,自下而上粒度由细到粗,呈“反旋回状”;颜色由红变暗,显示为水进特征。G 段为一过渡段,自下而上砂质成分逐渐消失;H 段由大段开阔湖泊相碳酸盐岩、油页岩,以及深灰色泥岩组成,为广泛湖侵期沉积产物,层序结构上显示为 G 段的继续。

对于上述所揭示的几种沉积序列及其叠加关系,无论传统的盆地分析理论,或者近年来流行的一些理论,有关的成因解释始终不能给出令人满意的答案。对于 A 至 B 段,剖面显示为典型的正旋回状,但某些研究却刻意去为其寻找一个高位体系域。对于 C 至 E 段所显示的趋势,传统的盆地分析或近年来的有关研究,一般倾向于在 C 段与 B 段之间,或者 D 段与 C 段之间设定一个根本就不存在“不整合”界面^[2,3];或

者因具体剖面而异,在 C 至 E 段范围内的某一位置设定一个人为界面,笼统地将偏下部层系归为湖泊体系,将偏上部层系归为非湖泊体系,而回避 C 至 E 段作为一个客观且完整的沉积序列这一事实。对于 F 段至 H 段所展示的情况,流行研究思路所面临的困难更为突出,尤其对于 F 段而言,粒度变化趋势所显示出的“反旋回状”,与沉积补偿趋势所显示出的“正

旋回状”无论如何难以达成有效的统一。

由此可见,有关旋回状沉积序列的成因研究不仅是个纯粹的地质学基础理论问题,而且深刻地影响到生产实践的多个环节。一个科学的成因解释,可以为盆地结构、地层结构、构造演化、沉积演化、乃至盆地综合石油地质特征研究等后续性研究提供一把便捷有效的钥匙,否则有可能将后续工作引入歧途。

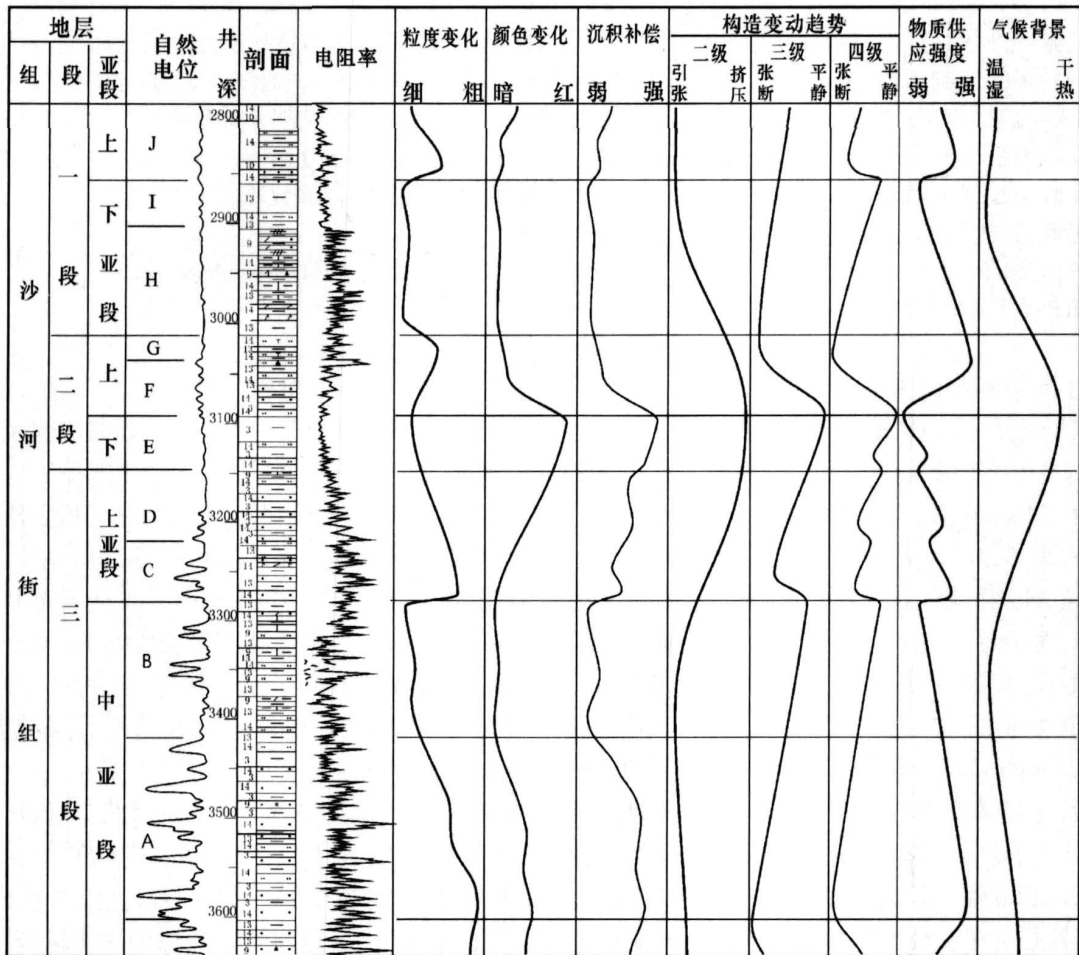


图 1 冀中饶阳凹陷任 92 井沙三段中亚段—沙一段沉积特征与地质背景分析
 Fig 1 Depositional character and the geologic background of 3rd to 1st Member of Shahejie Formation in Raoyang Sag Jizhong Depression

2 来自于现代沉积的启示

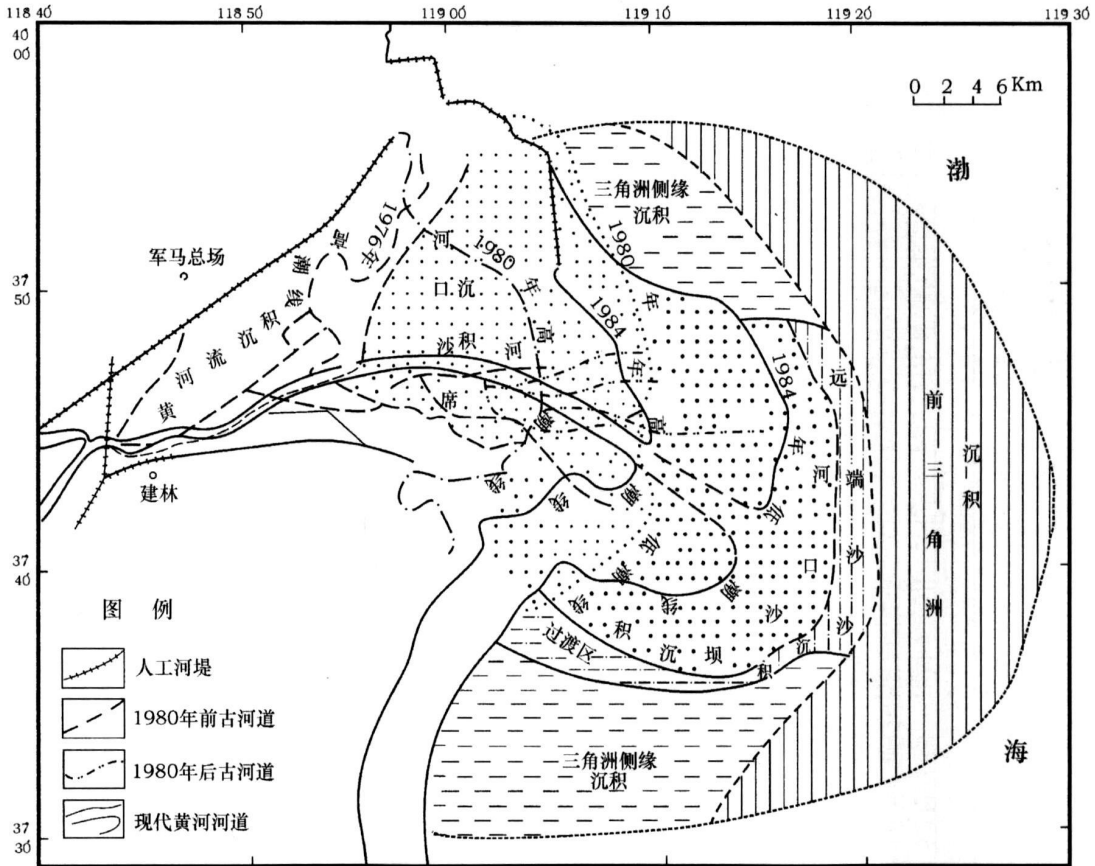
在研究工作中,之所以不能简单地将剖面所显示的岩层物理化学性质的变化与海(湖)平面波动直接加以联系,原因是多方面的。譬如,对于一个具规模的水盆地而言,在枯水季节,河流等地表水系输送碎屑物质的能力有限,水盆地内表层沉积更多的以细粒物质为主,甚至出现化学沉积。在洪水季节,急剧增强的地表水系强烈荡涤和冲刷着一切可以携带的物

质,汇集到河流,并最终带入水盆地内部。此时,水盆地湖平面显著上升,同时湖底形成一套相对较粗的表层沉积。洪水季节过后,随着地表水系通量的下降,湖底沉积物逐渐变细,最终恢复到初始状态,整个过程所保留下来的是一个微型的沉积韵律。与此相比较,不同沉积韵律之间,变化是截然的,瞬时的。值得着重关注的是,构造活动,尤其是张断型构造活动,以其瞬间的活动期及相对漫长的稳定期为特征,对于关注新构造活动的地质人员是不言而喻的。张断型构

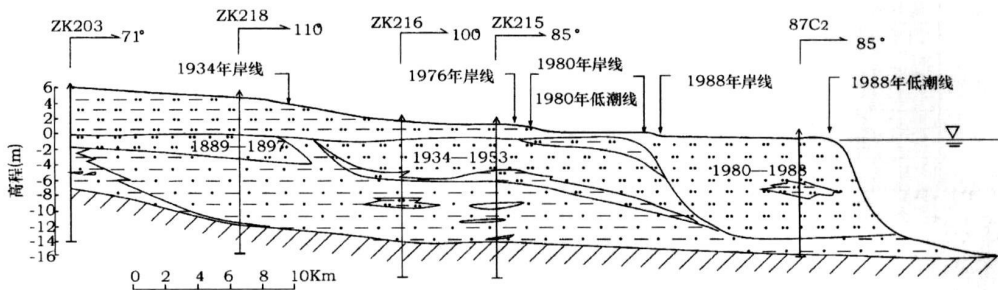
造活动对于盆地建造过程的影响在于两个方面。其一, 为物源区域的强烈剥蚀作用催生; 其二, 通过相对短暂的过程, 增强源—汇系统的“势”, 显著地提升物质输送通道的承载能力。

另一方面, 现代环境与表层沉积分布的系统考察表明, 尽管构造环境和气候环境相似, 不同地点表层沉积细节也是千差万别。现代河口进积演化及三角洲体系的发育过程表明, 其沉积和建造过程受着许多客观因素的制约, 三角洲向海洋方向的推进速率、单

一体系所涉及的垂向范围, 与盆地可容空间变化幅度、物源供给强度、洋流或潮流作用强度等直接相关。图 2(上图)是黄河三角洲展布及逐渐生长的平面形态图示^[4], 1976—1984 年的 8 年期间, 高潮线向海洋方向推进了 20.76 km 推进速率大约为 2.6 km/y。图 2(下图)是现代黄河三角洲的纵剖面, 从图中可以看到, 三角洲复合层垂向范围大体在 10~15m 左右, 而单一三角洲叶状体的垂向厚度则约在 6~13m 范围内。



黄河三角洲生长叶瓣(清水沟中瓣)的沉积类型图



黄河三角洲纵剖面图

图 2 黄河口三角洲发育及展布特征 (据成国栋等, 1993)

Fig 2 Growth and outspread of Delta of Yellow River (after from Cheng Guodong et al., 1993)

由图 2 所示可以演绎出两个重要的结论:其一,因叶状体展布及叠加差异,在三角洲所涉及范围内的不同地点钻孔,揭露的剖面各具特征;其二,设想若干年之后(数量级 10^3 或 10^4),三角洲进积过程将渤海湾覆盖完毕,将形成一个三角洲复合层,该复合层或者由于区域下沉(或海平面上升)而被另一个三角洲复合层所覆盖,或者长期遭受改造。当三角洲复合层保存为地层的组成部分时,它经过压实成岩,形成一个在垂向上厚约 5~10m 的反韵律,或三度空间上的反韵律复杂叠加。松辽盆地黑帝庙油层及上覆层是无数个三角洲复合层叠加的良好实例(见图 3)。冀中坳陷廊固凹陷西部沙河街组三段上亚段(弹簧段)下部同样具有三角洲复合层依次叠加的典型特征。

(不大于 10^5 年)实现的,作为沉积层系保留下来的是一个厚度有限的地层组成部分(厚度一般在 3~20m,多数不足 10m)。近年来,在不少相关研究中经常见到将三角洲复合层概念作无限推广的例子,如针对山东济阳坳陷、河北黄骅坳陷古近系的研究,有时甚至将整个沙河街组三段(历时近 10Ma)描述为单一的三角洲进积过程的产物。对于如此情形,通过加强对现代沉积体系与环境相互关系的考察,应该是可以避免的。

3 沉积旋回成因机理

地层剖面中所包含的各种信息(化学的、物理的,以及生物的),是沉积层系建造过程对于沉积区域和周边地区地质、地理、水文、气候,以及生物群落等特征及其变化过程的响应。尽管这种响应过程和机理十分复杂,但在研究工作中,只要找准主控因素,实际分析过程仍可加以抽象化和模式化。显而易见,对于盆地建造过程的影响而言,张断型构造活动与洪水作用过程有着等价的效果。两者之间的差异在于,构造波动所经历的时间片段要漫长的多,对于盆地整体而言影响要深刻的多。

区域性构造引张断陷或差异升降运动,是盆地可容空间得以形成和扩充的基础。同时,也正是由于构造引张断陷或差异升降运动所导致的地形地貌反差,才为强势物源的形成奠定了基础。

现代条件下源到汇能量及物质分配系统研究表明^[5],物质输送系统(如河流)运载物质的潜力“ $Q_{\text{输}}$ ”与系统横截面积“ S ”及流速“ V ”相关:

$$\text{则: } Q_{\text{输}} = f(SV)$$

而流速“ V ”又是流域地势“ H ”的函数,故:

$$Q_{\text{输}} = f(SH)$$

物质输送系统运载物质的实际强度“ $Q_{\text{实}}$ ”还与物源区域物质的风化和剥蚀强度有关,而后者又是源区地形、地貌、基岩性质,以及植被覆盖等变量“ X ”的函数。

$$\text{即: } Q_{\text{实}} = f(Q_{\text{输}}, X) = f(SH, X)$$

由此可以看到,地势“ H ”在“源到汇”体系中,始终做为一个举足轻重的控制因素起着作用。由动力地质学原理可知,导致区域呈现地势差异的主控因素非构造活动莫属。故,物质汇集区域(汇)的物理化学特征(包括补偿强度在内)及其随时间的变化,实际上是区域构造活动过程及其强度的间接反映。在陆相断陷盆地及大部分陆源浅海盆地中,绝大多数较

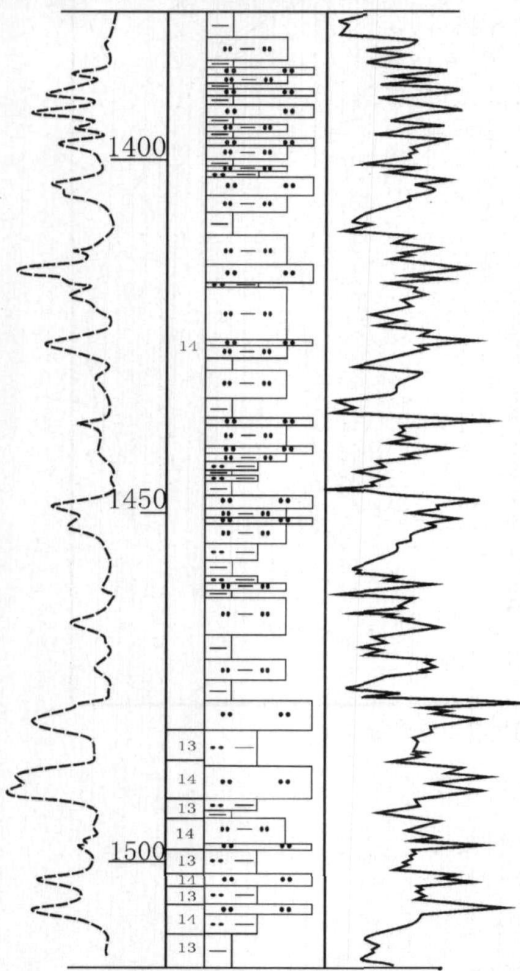


图 3 松辽盆地嫩江组三段下部的一系列三角洲复合层

Fig 3 Delta multiple terranes of 3rd member of Nenjiang Formation in Songliao Basin

在此需要特别指出的是,单一三角洲复合层的进积(或推进)过程是在一个相对短暂的时间片段内

高级别的沉积韵律, 实际上更多体现了沉积作用对于区域构造活动的响应。

按图 4所示, 假设由物源区域至沉积区域的位差“H”降低到足够小的程度, 以至于物源区域与沉积区域均处于“均衡面”或“基准面”附近, 那么, 物源区域提供物质来源的强度, 以及通道输送物质的通量将会急剧下降。同样, 沉积区域的沉积作用速率也会下降到相当低的程度, 并且沉积层属于相对“细”的类型, 或者沉积区可能长期处于“不剥不沉”的状态。

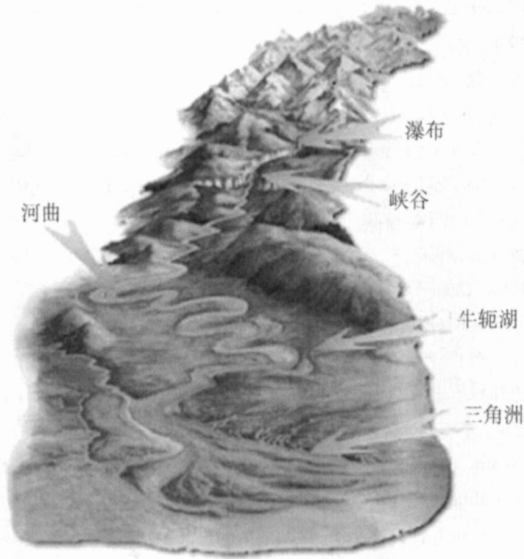


图 4 “源到汇”系统宏观构想模型

Fig 4 Macroscopic imagic model of “Source to sink” system

构造因素对于自然过程的影响涉及到多个方面, 包括物源区域剥蚀强度、物质输送通道性质、水盆地地形地貌特征, 以及沉积盆地可容空间的变化。气候特征对于沉积结构的影响同样是多方面的, 包括物源区域气候背景对于植被覆盖度的影响、年降雨量对于剥蚀强度的影响、水量及季节分布对于输送通道物质通量的影响、沉积区域水平面季节性或长周期波动, 水盆地补充与蒸发平衡等。基于对长周期气候变化趋势及各时期沉积序列宏观趋势的对照研究, 对于地层序列的旋回性而言, 区域气候背景的变化更多的是起着调节或调控的作用。故可以认为, 对于盆地沉积序列的旋回性及其叠加方式而言, 主控因素应归结于构造活动。

图 5表征了以构造背景为主线对于水盆地沉积作用过程的可能影响, 此处主要衔接点在于输送通道物质通量的“势”。多数情况下, 盆地均衡沉积结构

(一个可度量时间片段内不同地点沉积结构的加权平均值)是盆地对于“势”的直接响应。暂时屏蔽掉气候特征的影响, 那么示意图右侧“沉积韵律”的形成最终可被归结为: 盆地沉积作用对于构造活动的响应。

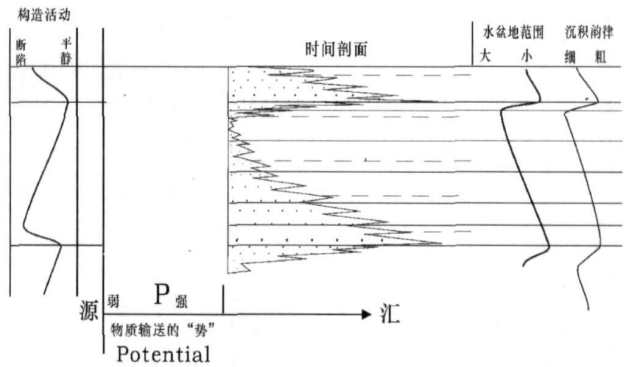


图 5 物质输送通道的“势”与构造波动关系示意图

Fig 5 Sketch map of relationship of potential of matter-routaway to the tectonic fluctuation

综上所述, 可以归纳出以下结论:

沉积旋回 (韵律) = 构造层

并有以下内涵及外延:

1) 通常意义上的沉积旋回 (或韵律) 是盆地沉积作用对于构造旋回 (或波动) 的间接响应。

2) 通常意义上的“相对海平面变化曲线”, 实际上是构造活动强度、盆地可容空间变化幅度、古气候变化幅度、沉积物质供应丰度等多种因素相互叠加后的自然反映。即: 相对海 (湖) 平面变化曲线等价于沉积补偿强度曲线。

3) 短周期沉积旋回的正相序特征更加明显, 或许是区域乃至全球脉动性构造引张一成盆节律的自然反映。

4) 在长周期沉积旋回晚期, 明显的反相序多数是由一系列依次渐退的短周期沉积韵律叠加组成。

5) 长周期沉积旋回不仅与区域乃至全球构造活动相关, 而且还与古气候变化旋回、生物演化旋回呈统计相关^[167], 故长周期沉积旋回可能具有着复杂的天文背景。

6) 由 5) 可进一步推论, 沉积序列的旋回性特征, 有可能成为区域性, 乃至全球性地层系统“等时性”对比的重要基础。

4 沉积序列与盆地演化过程相互关系分析

基于上述, 对图 1所展示的沉积序列成因机理系

统分析如下:以 F 段 /E 段界线为界,上、下序列分属不同次级成盆周期沉积产物。B 段发育时期,冀中拗陷,乃至整个渤海湾盆地处于湖盆发育极盛时期,形成一套典型开阔湖相沉积层系。最大湖侵期过后,盆地进入二级成盆周期回返阶段,在此基础上,叠加了一期(三级)引张断陷活动,致使盆地可容空间稍有扩大。与此同时,在三级引张断陷活动影响之下,物质供应强度急剧增加,形成一套湖相背景下的粗碎屑沉积。随着时间延续,区域构造活动趋于平静,早期构造活动所导致的地形地貌反差因持续的剥蚀作用而显著下降,物源区域剥蚀强度及物质供应强度陆续下降,盆地内部沉积层系逐渐变细。

受二级成盆周期回返阶段宏观背景影响,构造环境呈现区域挤压隆起特征,盆地趋于抬升,水体逐渐萎缩,沉积区域逐渐封闭。同时由于区域性古气候背景的逐渐干热化,致使水盆地干枯咸化。正是在此背景之下,发育了遍及整个冀中拗陷的(含石膏)红色泥质岩沉积(D 段及 E 段),同时在 F 段 /E 段界线处,形成一个区域性沉积间断面。

区域性回返顶峰期过后,盆地进入一个新的二级成盆周期。在成盆周期之初,盆地继承了期前隆起封闭的古地理和古气候背景,沉积物仍以强氧化环境下的红色泥质岩类为主(F 段底部)。随时间推移,降雨量的增加致使地表水系活动逐渐增强,沉积环境逐渐由封闭环境下的弱动力状态转变为开放环境下的强动力状态,红色泥质岩类逐渐减少,暗色砂泥岩类逐渐增多,沉积物粒度由细渐粗,至 F 段顶部附近,达到强动力状态顶峰。随着成盆作用的持续增强,水盆地范围迅速扩展,沉积环境逐渐由开放环境下的强动力状态转变为深水弱动力状态,以暗色泥岩、碳酸盐

岩、油页岩为主的生油建造开始广泛发育(G 段顶部至 H 段)。

参考文献 (References)

- 1 陶明华. 地球圈层长周期演化旋回基本特征. 同济大学学报, 2003 (12): 1415-1420 [Tao Minghua Basic characters of long periodic cycles of geo-sphere Journal of Tongji University 2003 (12): 1415-1420]
- 2 纪友亮, 张世奇, 等. 陆相断陷湖盆层序地层学. 北京: 石油工业出版社, 1996 [Ji Youliang Zhang Shiqi et al Sequence Stratigraphy of Continental Fault Depression Beijing Petroleum Industry Press 1996]
- 3 蔡希源, 李思田. 陆相盆地高精度层序地层学——隐蔽油气藏勘探基础、方法与实践. 北京: 地质出版社, 2004 [Cai Xiyuan Li Sitian High Resolution Sequence Stratigraphy of Continental Basins Basic Ideas Methodology and Practice for Exploring Subtle Oil Pools Beijing Geological Publishing House 2004.]
- 4 成国栋, 薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学. 北京: 地质出版社, 1993 [Cheng Guodong Xue Chunding Depositional Geology of the Yellow River Delta Beijing Geological Publishing House 1993]
- 5 李铁刚, 曹奇原, 李安春, 秦蕴珊. 从源到汇: 大陆边缘的沉积作用. 地球科学进展 2003 18(5): 713-721 [Li Tiegang Cao Qiyuan Li Anchun Qin Yunshan Source to sink sedimentation in the continental margin Advance in Earth Sciences 2003 18(5): 713-721]
- 6 Tao Minghua The enrichment pattern of diatoms and palaeoclimate change in Eastern China since Carboniferous Acta Micropalaeontologica Sinica 2004 (1): 85-99]
- 7 陶明华, 王海潮, 崔周旗, 等. 冀中拗陷古近纪地质背景演化与层序划分. 见: 匡立春, 顾家裕, 等主编. 油气层序地层学新进展. 北京: 石油工业出版社, 2006. 297-310 [Tao Minghua Wang Haichao Cui Zhouqi et al Evolution of geological backdrop and the dividing of sequence in Paleogene in Jizhong Depression In Kuang Lichun Gu Jiayu et al. eds New Advances in Petroliferous Sequence Stratigraphy Beijing Petroleum Industry Press 2006 297-310]

Analysis on the Formational Mechanism of Depositional Cycles

TAO Ming-hua HAN Chun-yuan TAO Liang

(Institute of Huabei Oilfield Renqiu Hebei 062552)

Abstract Cyclic character is one of the most important attributes of depositional strata and it takes more important in the terrestrial sediments. Rhythmicity or periodicity of the depositional strata is materialized by the transformations of lithological characters in strata ordinarily and it is incarnated by the transformations of ingredient, granularity, color, intensity of the depositional compensation, intensity of oxidation-deoxidation, and the character of biome. Rhythmicity or periodicity of the depositional strata is influenced by the fluctuation of sea-level to a certain extent but it must be the response of depositional course to the structural activity in extensive significance.

Key words rhythm, depositional cycle, tectonic activity, climatic fluctuation, main control factor, depositional response.