

济阳坳陷古近系孔店组高频韵律旋回沉积记录及成因

谭先锋^{1,2}, 蒋艳霞³, 李洁^{4,5}, 薛伟伟², 李泽民²

(1. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331; 2. 重庆科技学院 石油与天然气工程学院, 重庆 401331; 3. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 4. 国土资源部页岩气资源勘查重点实验室, 重庆 400042; 5. 重庆市页岩气资源与勘查工程技术研究中心, 重庆 400042)

摘要: 济阳坳陷古近系孔店组发育一套紫红色泥岩、灰色粉砂岩以及膏质泥岩等岩相组合的高频韵律旋回沉积。利用测井资料、录井剖面、岩心观察以及为地球化学元素等手段, 对济阳坳陷古近系孔店组高频韵律旋回沉积机制进行了深入研究。结果表明, 济阳坳陷孔店组旋回沉积记录包括颜色米级旋回、粒度米级旋回和非粒度米级旋回; 发育6种岩相组合类型及23种岩相组合, 共划分出276个米级旋回, 旋回最大厚度为29.6 m, 最小厚度为1.48 m, 平均厚度为6.28 m; 利用Fisher图解和测井曲线频谱分析, 得出岁差周期为19.2~23.4 ka, 斜率周期为39.1~51.4 ka, 偏心率主要周期95.3~403.1 ka。该差值与古近纪超短期旋回、短期旋回和中期旋回的时间差基本一致, 证实了孔店组湖泊相旋回沉积受控于米兰科维奇旋回。除此之外, 旋回发育时期的古气候、沉积水介质的共振震荡、物质供应等沉积动力因素也影响了旋回的发育过程。最后, 建立了济阳坳陷古近系孔店组低水位干旱时期和高水位潮湿时期的旋回沉积动力模型, 探讨了米兰科维奇旋回控制下旋回沉积的原始沉积动力和古环境面貌。

关键词: 高频旋回; 沉积机制; 孔店组; 古近系; 济阳坳陷

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Sedimentary record and origin of high frequency cycles in the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression

Tan Xianfeng^{1,2}, Jiang Yanxia³, Li Jie^{4,5}, Xue Weiwei², Li Zemin²

(1. Chongqing Key Laboratory of Complex Oil and Gas Exploration and Development, Chongqing, 401331, China; 2. College of Oil and Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 3. Earth Sciences faculty, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Land and Resources, Chongqing 400042, China; 5. Chongqing Engineering Research Center for Shale Gas Resource & Exploration, Chongqing 400042, China)

Abstract: There is a set of high frequency cycles with lithological combination of purple red mudstone, grey siltstone and gypsiferous mudstone developing in the Kongdian Formation of Jiyang Depression. By using logging data, well logging, core observation and elemental geochemistry methods, this paper researched the deposition mechanism of high frequency cycles of the Kongdian Formation in Jiyang Depression. The research results show that the cyclic sedimentation record of Kongdian Formation in Jiyang Depression consist of color meter scale cycle, graded meter scale cycle, non-graded meter scale cycle and consist of 6 types of lithofacies assemblages which include 23 kinds of lithology combinations. The cyclic sedimentation record can be divided into 276 cycles, with the maximum thickness being 29.6m, the minimum thickness being 1.48m, and average thickness being 6.28m. Fisher diagrams and the spectrum analysis of logging curves reveal that the precession cycle is 19.2~23.4 ka, slope cycle is 39.1~51.4 ka, and eccentricity cycles is 95.3~403.1 ka. They are consistent with the period of ultra short term cycles, short-term cycle and medium-term cycles, respectively. So it is confirmed that the cyclic sedimentation record was controlled by the Milankovich cycle. In addition, it was also influenced by paleo-climate, sedimentary medium conjugate concussion and material supply. Finally, the cyclic-sedimentation dynamic model during low /high-stand period of Kongdian Formation in Jiyang Depression is established, and the original sedimentary dynamics and ancient environment of the cyclic sedimentation record under the control of Milankovich cycle are discussed.

Key words: high frequency cycle, deposition mechanism, Kongdian Formation, Palaeogene, Jiyang Depression

收稿日期: 2014-11-20; 修订日期: 2014-12-08。

第一作者简介: 谭先锋(1982—), 男, 博士、副教授, 沉积地质与古环境。E-mail: xianfengtan8299@163.com。

通讯作者: 蒋艳霞(1989—), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: 337008167@qq.com。

基金资助: 国家自然科学基金项目(41202043); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1401316); 中国石油科技创新基金项目(2014D-5006-0108); 重庆市自然科学基金项目(cstc2012jjA90007)。

旋回地层学是指研究受天文轨道周期力控制形成的地层序列的地层学分支学科,主要研究保存在地层中的米氏旋回,即地球绕日的轨道变化形成的沉积旋回记录^[1-2]。因此,旋回地层学也称为轨道旋回地层学^[3-4]。近年来,国内外众多学者对该沉积学记录进行大量研究。早期对旋回地层学的研究,众多学者多致力于认识沉积记录中的地层韵律,取得了一定的成果,Schwarzacher W 对碳酸盐台地中的灰岩-页岩韵律层进行研究^[1];Anderson R Y 对二叠纪 Castile 盆地蒸发纹层状膏岩沉积韵律进行研究^[5-6];梅冥相对华北地台中寒武世碳酸盐鲕滩中鲕粒灰岩韵律进行探讨^[7]。纵观国内外当前对韵律旋回研究,主要针对技术指标的选择和旋回周期/频率的确定。野外露头发育较好的旋回剖面,可以进行高精度的地层厚度测算以及岩石磁化率的功率谱分析和小波分析,进而确定米兰科维奇旋回周期^[8];缺乏完整的野外剖面的地区,可以利用测井曲线进行旋回划分以及周期的计算^[9]。当前的研究表明,米兰科维奇旋回在碳酸盐岩和碎屑岩中均有较好的应用。海相碳酸盐岩由于海洋受天文及气候影响,沉积记录较为敏感,一直是国内外学者关注的重点;陆相地层由于沉积范围局限,沉积记录影响因素复杂,研究难度较大。但随着研究的不断深入,不断有学者开始对湖泊沉积记录中的旋回响应进行研究,深入探讨气候变化带来的对湖泊沉积形成旋回效应。如北美东部 Newark 超群的沉积物主要由湖泊的水面升降产生的沉积旋回构成,这些沉积旋回对应着由地球轨道变化控制的周期性气候变化。Van Houten 第一个认识到北美东部 Newark 超群的旋回性,并将其与轨道变化联系起来^[10],对深水沉积的黑色页岩与淡褐色-红色沉积物的交互层用纹层厚度法推测出了周期;Cari L Johnson 也对内蒙古中生代断陷湖盆沉积旋回进行研究^[11];李凤杰等通过对鄂尔多斯盆地延长组湖相碎屑岩进行旋回分析,证实了湖相碎屑岩高频旋回与米兰科维奇旋回周期具有一致性^[12];梁定勇等通过对松辽盆地泉头组进行高频旋回分析,也证实了高频旋回明显受控于米兰科维奇旋回^[13]。这些研究成果中,多从利用不同的技术手段去探索陆相碎屑岩的米兰科维奇控制效应,事实上,在陆相湖泊碎屑岩中,除了受控于天文因素的米兰科维奇旋回之外,还应受到沉积动力学和物质来源所控制,形成所谓的岩性和颜色旋回变化,这种岩性的高频旋回研究由来已久,如 Neil F Humphrey 曾提出共轭地貌系统中的固有振荡是旋回沉积的另一个原因^[14],程日辉对松辽盆地白垩纪进行了岩性旋回叠加方式以及旋回周期的计算^[15]。这些研究中,多数利用数学方法对旋回厚度、旋回周期等进行计算,力图揭示陆相碎屑岩旋回变化的天文因

素,较少将天文因素与沉积因素较好结合的典型实例,尤其是建立旋回沉积记录的沉积动力学模型。本论文选取济阳坳陷为研究对象,其中以东营凹陷为重点,针对古近系孔店组红色-灰色、砂岩-泥岩旋回现象,探讨不同旋回现象的成因机理及构建旋回沉积动力学模型。

1 区域地质背景

济阳坳陷位于山东省北部,位于渤海湾裂谷盆地东南部,是其次一级构造单元,主要包括惠民凹陷、东营凹陷、沾化坳陷和车镇凹陷4个次级构造单元(图1)。北与埕宁弧形隆起毗邻,南以齐河-广饶断裂与鲁西隆起分界,西与临清坳陷的德州、莘县凹陷接壤,东以垦东青坨子、广饶凸起与渤中、昌潍坳陷相隔。济阳坳陷古近纪孔店期为新生代断陷盆地早期,是发育在中生界之上的断陷湖泊;该时期断裂活动频繁,气候以干旱为主,间歇潮湿。大量的录井资料以及钻井岩心观察表明,孔店组岩性表现出颜色和岩性方面的高频旋回变化的特征,变化形式多变;整个孔店组在纵向上主要表现为紫红-灰色-紫红的沉积旋回,孔(孔店组)三段主要为早期沉积的产物,分布范围局限,主要为紫红色的泥岩和粉砂岩互层;孔二段沉积一套灰色泥岩和粉砂岩互层;孔一段在凹陷内分布较广,在紫红色沉积背景下,多次出现灰色泥岩、紫红色泥岩、灰色砂岩的互层。

2 高频韵律旋回沉积记录

岩性及钻井资料显示,济阳坳陷古近系孔店组发育多种方式高频韵律旋回(图2)。该类旋回主要是指在岩性剖面钻井岩性上能直接识别的、几十厘米至几米厚的地层沉积记录,前人将这种旋回称为米级旋回^[16-17]。该类旋回主要成因机制跟异成因机制控制下的间断-加积作用过程有关^[18-19]。从沉积节律的基本特征来看,这种高频韵律旋回相当于王鸿祯等定义的小层序^[20]以及 Mitchum 等定义的高频层序^[21],也等同于高分辨率层序地层学中的中、短期基准面旋回和超短基准面旋回以及经典层序地层学中定义的准层序^[22-23]。不少学者也直接研究这类岩石地层单位的高频旋回性特征^[15,24]。从这些不同的定义中可以看出,米级旋回研究的基础在于对岩石高精度的认识,研究米兰科维奇旋回特性必须建立在对基本岩石特征的认识上。因此,研究米级旋回特征首先要对岩石的高频叠加方式进行系统研究。本文通过对研究区钻井剖面及岩性观察统计,总结了颜色旋回、岩性旋回的叠加

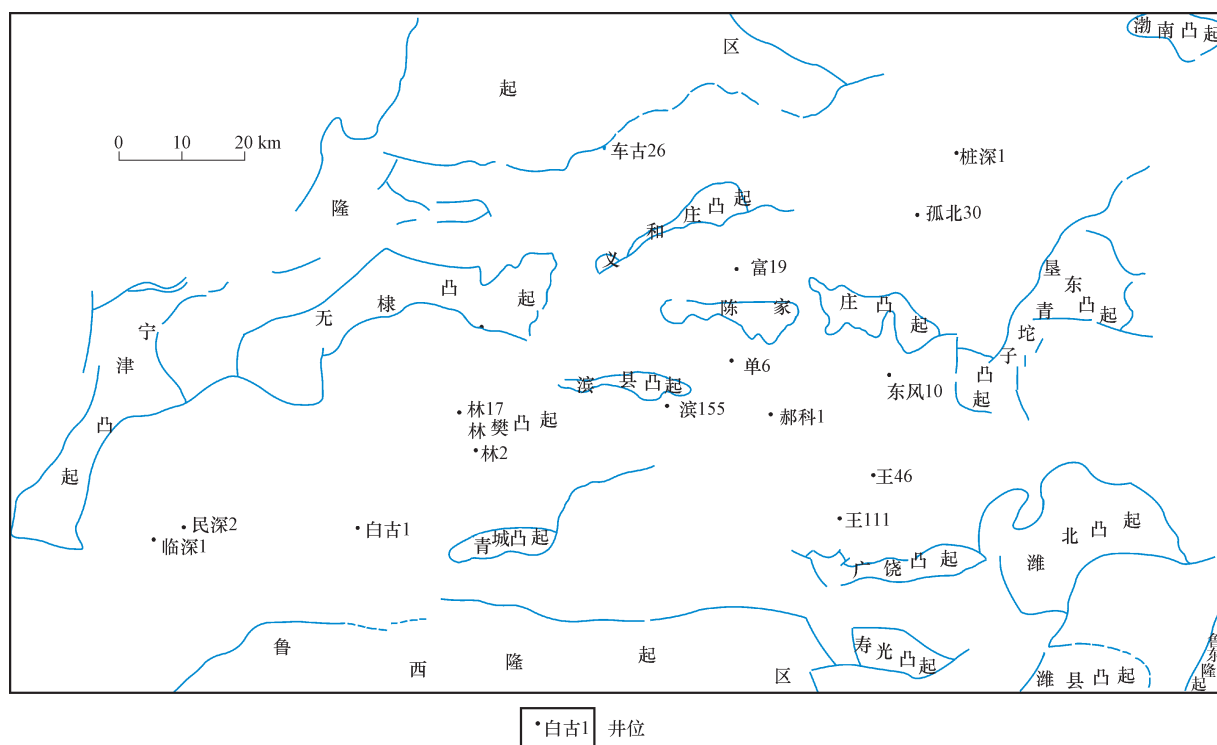


图1 研究区位置及井位分布

Fig. 1 Location of the study area and well site

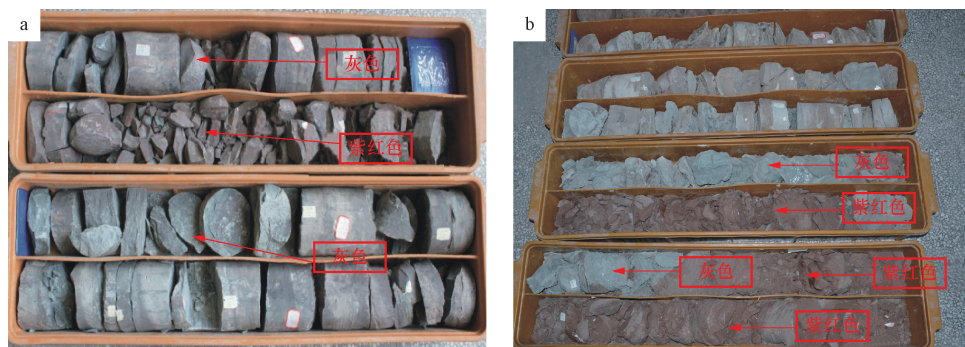


图2 济阳拗陷古近系孔店组钻井岩心高频颜色旋回特征

Fig. 2 High frequency color-cycle characteristics of drilling core from the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression

a. 王46井,埋深2 929.2~2 953.1 m; b. 王100井,埋深1 815.3~1 920.5 m

方式,并通过对典型的钻井剖面王46井进行研究,系统总结了孔店组米级旋回发育特征。

2.1 颜色旋回叠加样式

通过对济阳拗陷大量钻井岩性剖面微观尺度结构研究发现,济阳拗陷孔店组湖盆沉积记录中广泛存在颜色的旋回变化,这种旋回变化结构和样式复杂,多数与岩性具有相互的关系。旋回变化过程中,主要尺度范围在0.1~5 m,典型的颜色变化为灰色与红色的互层,灰色岩性主要为砂岩、粉砂岩及泥岩,红色岩性一般为泥岩、泥质粉砂岩及粉砂岩等;另外还发现有紫红色、紫色与灰色等互层出现、红色与灰色互层出现等颜色微观尺度旋回变化,准确识别这些韵律旋回沉积记录方式具有重要的意义,主要有以下几种颜色旋回方

式(图3)。

1) A型颜色旋回(岩性与颜色同步协调变化)

由岩性本身性质决定,这种旋回在研究区发育较广泛。通过对研究区大量钻井剖面进行总结,主要包括6种A型颜色旋回。A1型表现为灰色砂岩-紫红色泥岩韵律产出;A2型表现为灰色砂岩-紫色泥岩互层产出;A3型表现为红色粉砂岩-紫色泥岩互层产出;A4型表现为灰色砂岩与红色泥岩互层产出;A5型表现为浅紫色粉砂岩-紫色泥岩互层产出;A6型表现为浅灰色泥质粉砂岩-深灰色泥岩互层产出。另外一种变化表现为红色砂岩与灰色泥岩互层规律变化,虽然这类情况表现不多见,但研究区仍然有一定的发现。这种类型的旋回是研究区颜色旋回的主要类型。

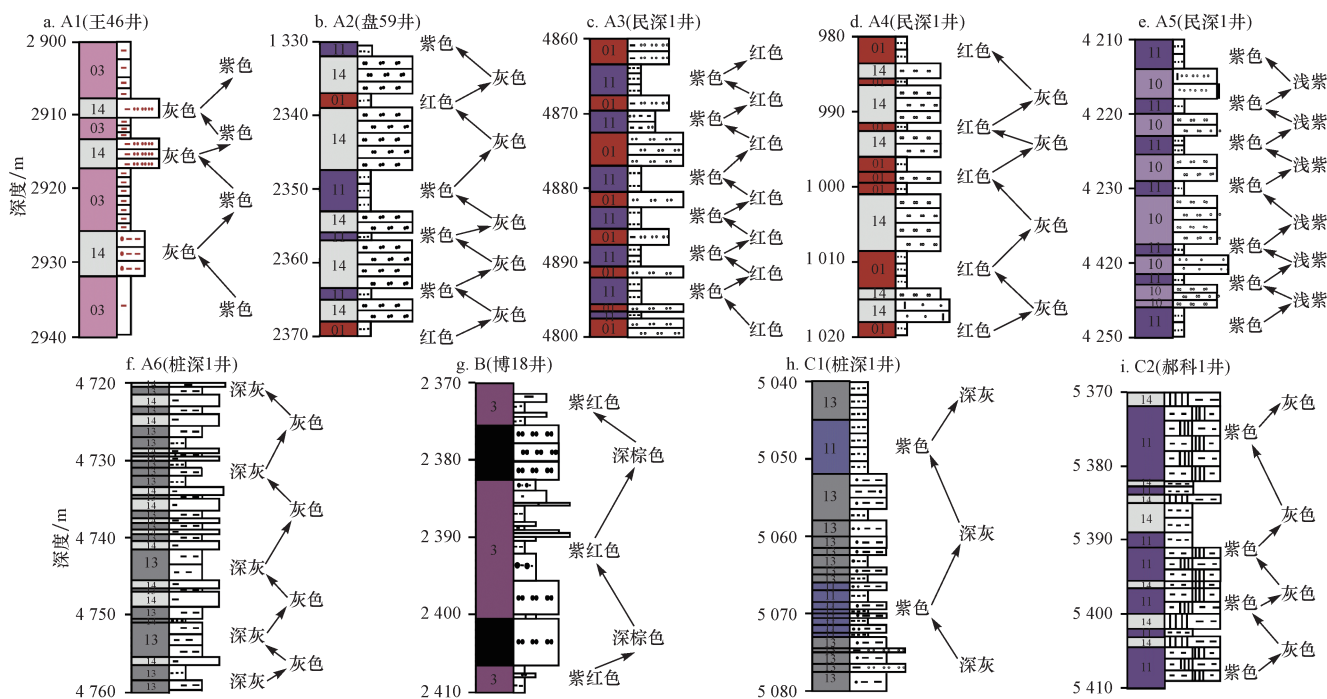


图3 济阳坳陷古近系孔店组高频颜色旋回叠加样式

Fig. 3 Overlay styles of high frequency color-cycles of the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression

2) B 型颜色旋回(跨越多种岩性的颜色旋回变化)

这种旋回变化主要叠加方式与岩性无关,而是跟自身的颜色旋回变化有关,主要表现为颜色自身纵向变化呈现旋回性。图3中博18井颜色纵向上表现为深棕色-紫红色的交替出现,同种颜色类型纵向上包含了多种岩石类型,这类旋回变化在研究区也表现比较突出,既有灰色地层中的泥岩砂岩互层,也有紫红色地层中同时出现砂岩和泥岩互层。另外,研究区还出现红色与灰色的纵向交替出现,包含了粉砂岩和泥岩的岩石类型,这种旋回变化具有典型的气候效应。

3) C 型颜色旋回(相同岩性的颜色自旋回变化)

此类旋回变化主要表现为岩性纵向上出现颜色的突变,呈完整的过渡,这类旋回变化在研究区也比较普遍,多出现在水体安静的环境中。C1型表现为紫色泥岩-灰色泥岩的韵律互层产出;C2型表现为紫色膏质泥岩与灰色膏质泥岩互层产出。少数情况下,还有一种为红色砂岩和灰色砂岩的岩性变化,这类旋回变化并不多见,主要体现了典型的气候变化效应。

2.2 高频岩性旋回叠加样式

通过对济阳坳陷大量钻井岩性剖面进行观察,孔店组存在大量厘米-米级的岩性旋回叠加,这种旋回叠加在空间上具有一定的组合形式,不同的组合类型反应了不同的成因。从形式上看,这种岩性旋回叠加表现为两种方式。

1) 粒序米级旋回

研究区主要粒序旋回沉积类型包括湖盆边缘的冲积扇-三角洲沉积-湖泊沉积体系,也包括湖泊-三角洲-浊积扇沉积体系。粒序旋回通常表现为正粒序和反粒序两种类型(图4)。正粒序主要表现为冲积扇-泛滥平原的正旋回沉积、三角洲分流河道-河口坝-分流间湾正旋回沉积、三角洲前缘河口坝-浅湖正旋回沉积、退积型河口坝正旋回沉积;反粒序主要表现为浅湖-河口坝反旋回沉积、分流间湾-河口坝-分流河道反旋回沉积、分流间湾-河口坝反旋回沉积、前三三角洲泥质沉积-前缘河口坝反旋回沉积、前三三角洲泥-滑塌浊积扇反旋回沉积。这些粒序旋回厚度变化较大,既包含低频的粒度旋回,可达几十米以上,也包含高频的粒度旋回,可以小于1m,高频粒度旋回反应了在空间上的频繁变化。

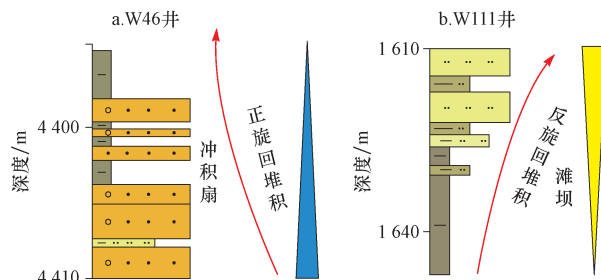


图4 济阳坳陷古近系孔店组粒序米级旋回类型

Fig. 4 Types of grain-order meter scale cycles of the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression

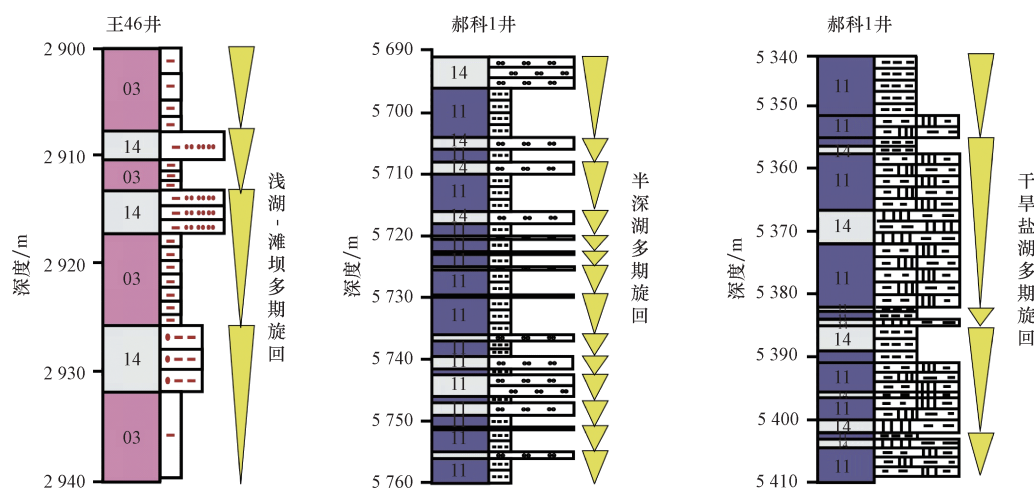


图5 济阳拗陷古近系孔店组非粒序米级旋回类型

Fig. 5 Types of non-grain order meter scale cycles of the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression

2) 非粒序米级旋回

非粒序米级旋回主要包括砂岩和泥岩的互层出现、泥岩和膏岩的互层出现,旋回厚度几十厘米至几米不等,其显著特征是厚度不大,岩相变化频繁,旋回特征明显(图5)。主要出现在滨浅湖、深湖—半深湖和盐湖环境中,这种旋回与海相潮汐旋回极其相似,明显受到天文因素影响。①砂岩—泥岩韵律互层,这种韵律旋回既可以出现在颜色旋回引起的灰色砂岩与红色泥岩中,也可以出现在红色砂岩(粉砂岩)与红色泥岩、灰色砂岩(粉砂岩)与灰色泥岩互层中(图5)。这种现象的发生,主要跟潮汐作用和物质供给和沉积共轭体系的自振荡有关^[4],即相同沉积背景可以同时形成砂岩和泥岩的互层,研究中发现这种岩性的转化特别普遍(图5)。②膏质泥岩与泥岩韵律互层:此类旋回主要发生在盆地中央地带以及干旱盐湖环境中,表现为膏质泥岩与泥岩互层(图5),岩相变化频繁^[25]。非粒序米级旋回在湖泊环境中是一种典型的高频韵律旋回,特征比较明显。

2.3 米级旋回叠置样式

米级旋回在野外露头和岩性剖面上进行划分的时候有两点值得注意:①旋回界面均为岩性的突变界面,界面上下为较深水的沉积物直接覆盖在较浅水沉积物之上;②旋回内部通可以明显划分出两个沉积单元,下部单元水体环境较深,为海平面迅速上升阶段的产物,而上部单元属于稳定沉积环境的产物,水体环境较下部变浅^[26]。本次研究对王46井进行了米级旋回划分,并详细研究了其叠置关系。王46井位于济阳拗陷南部缓坡带滨湖环境中,沉积物质供应变化频繁,以灰色粉砂岩—红色泥岩—灰色泥岩为主的滨浅湖沉积,沉积水体比较稳定,沉积速率均匀变化,是研究米兰科维奇旋回的代表井位。

通过对岩性组构的详细识别和划分(图6),在王46井孔店组划分出23种类型的岩相组合,共6种岩相类型:①强水动力石英砂岩粒序型,这种岩相主要发育在孔店组底部,与中生界地层分界,砂岩呈向上变细的正粒序;②滨湖潮下进积型滩坝砂体组合,这种岩相组合多以下部为粉砂、泥质粉砂等粗碎屑为主,上部为砂纸泥岩、泥岩等细粒碎屑物质为主;③滨湖潮下退积型滩坝砂体组合,这种与进积型刚好相反,类型下部为泥岩、砂纸泥岩等细粒碎屑物质,上部为粉砂岩、泥质粉砂岩等粗碎屑物质;④潮下泥岩—钙质泥岩坪,这种岩相组合多呈现泥岩的多旋回叠置、泥岩和砂纸泥岩、泥岩与钙质泥岩的多旋回叠置,受潮汐作用影响较大;⑤潮下膏岩坪,这种岩相组合在孔店组普遍发育,尤其是在湖盆中央,多以膏质泥岩与泥岩的多旋回互层产出,代表了旋回的发育特征;⑥滨湖潮上泥坪,这种岩相组合多以紫红色的泥岩为主,偶夹少量砂纸泥岩等岩性组合。这6中岩相组合代表了孔店组沉积岩相组合基本特征,进一步可以划分为23种不同的岩相组合特征。

通过对王46井进行高频旋回划分,共划分出高频旋回276个(图6,图7),这些不同的旋回在垂向上构成了孔店组的旋回叠置样式。整个旋回发育过程中,厚度最小为1.48 m,发育在第246个旋回中;厚度最大为29.6 m,发育在第49个旋回中,旋回平均厚度为6.28 m。从旋回厚度分布图上看,多数旋回分布在1~6 m的范围内,超过6 m的旋回数量占少数。

2.4 高频等时地层格架及充填样式

孔店期,济阳拗陷处于干旱—湿润的间歇转化过程,沉积体系类型比较丰富,层序发育过程中,沉积充填效应一定程度上反映了当时的湖平面变化和充填过程。孔三段沉积时期,该时期为孔店组二级层序低位体系域时期,济阳拗陷主要在邻近的昌维地区广泛发

育,

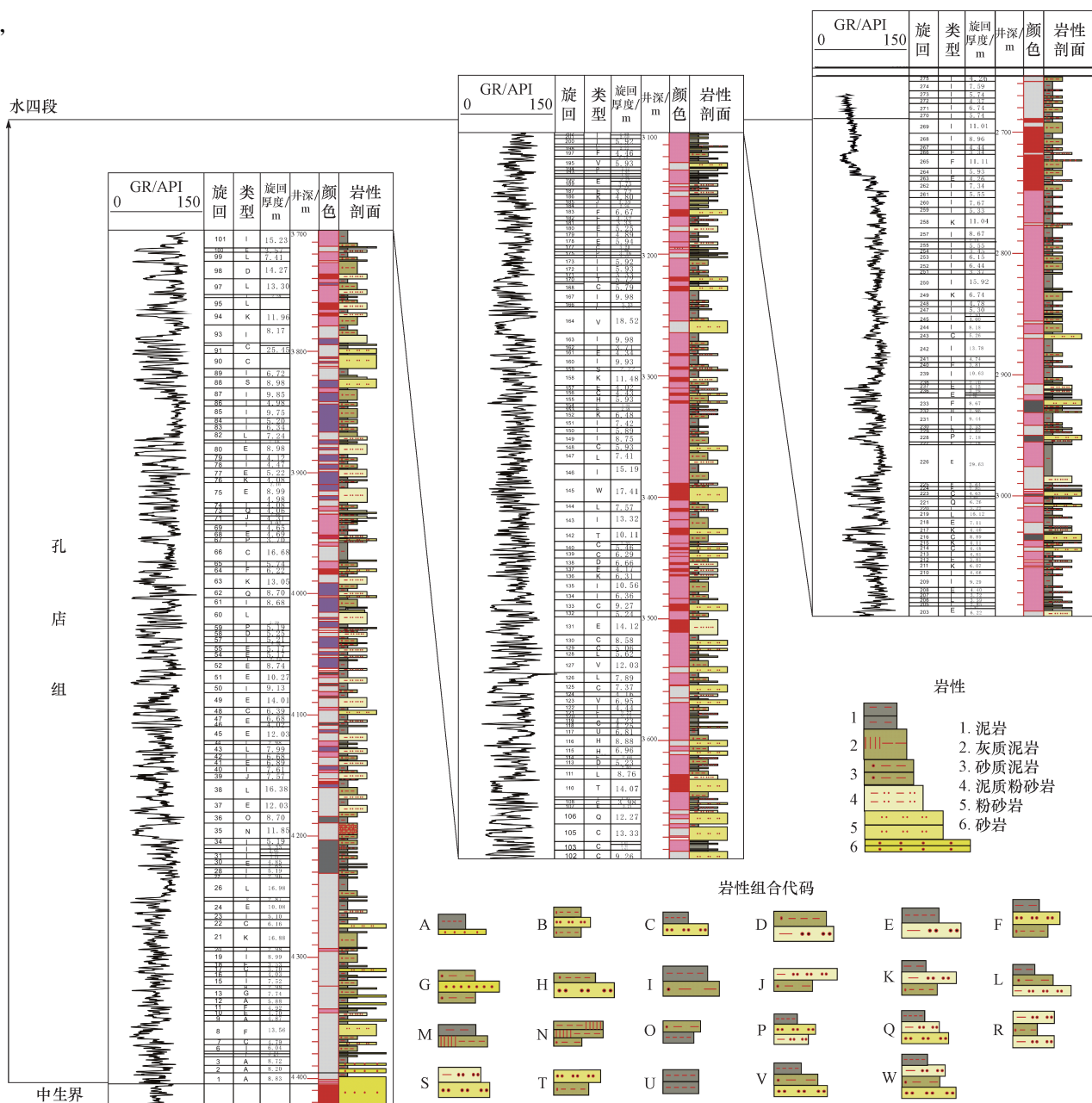


图6 济阳拗陷古近系孔店组岩性组合特征及旋回叠加样式(王46井)

Fig. 6 Features of the lithologic association and cycle stacking patterns of the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression(W46)

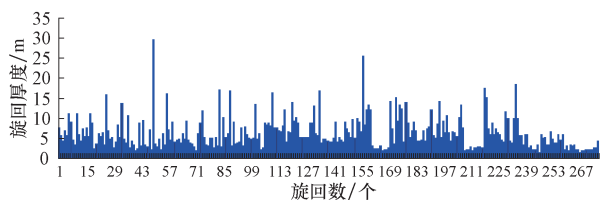


图7 济阳拗陷古近系孔店组旋回厚度分布(王46井)

Fig. 7 Cycle thickness distribution map of the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression(W46)

他地区基本上为无沉积状态,该时期沉积了一套红色的泥岩夹粉砂岩类;孔二段时期为孔店组二级层序的湖盆扩张体系域时期,东营-惠民凹陷开始接受沉积,凹陷活动加强,沉积了一套紫色与灰色互层的泥岩和粉砂岩层,局部地方充填了砂砾岩;孔一段水体下降,

该时期为孔店组二级层序的高位体系域时期,由于水体变浅,该时期充填了一套红色的泥岩、砂岩层,与上覆沙四段地层呈平行不整合接触。

图8显示了济阳拗陷东营凹陷层序格架内沉积充填方式,该时期东营地区只有局部地方发育了低位体系域和湖盆扩张体系域,所选取的剖面没有穿过这些局部地区,主要为高位时期的沉积充填,从图中可以看出该时期主要沉积充填方式,北部郑家庄地区充填各种砂砾岩体,如扇三角洲、近岸水下扇等具有砂砾岩体沉积特征的沉积充填方式,湖盆中央的郝科1井区,主要沉积了巨厚的泥页岩夹膏岩层,南部王111井区,值得注意的是发育有一层岩浆岩体,说明该地区除了受南部三角洲扇体影响外,深部

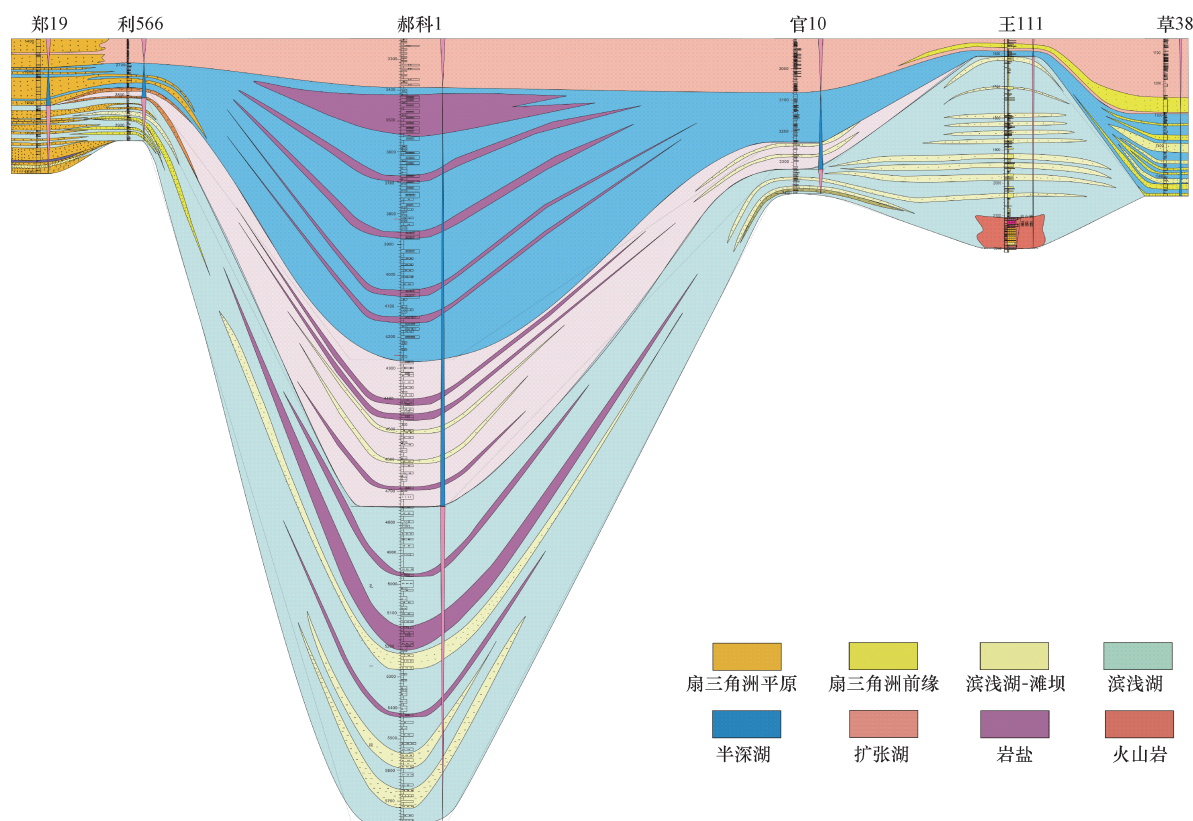


图8 东营凹陷层序地层格架及充填

Fig. 8 Sequence stratigraphic framework and filling pattern in the Dongying Sag

岩浆作用也影响了该地区的沉积充填。南部的地区基本不发育孔店组地层,说明该时期,南部大部分地区处于剥蚀状态。通过对等时地层格架进行对比,济阳拗陷旋回沉积可以在全区进行对比,但是旋回发育个数存在较大的差异。

3 高频韵律旋回成因

3.1 米兰科维奇旋回驱动作用

米兰科维奇旋回是南斯拉夫学者米兰科维奇提出的气候与地球轨道定量关系的理论^[27]。该理论认为,地球轨道三要素即偏心率、地轴倾角和岁差的周期性变化将引起太阳照射到地球的光照量变化,从而引起周期性气候的变化^[15]。这种周期性的气候变化将对地球产生重要影响,引起地球海平面或者湖平面的周期性变化以及地表生物、岩石风化、沉积水介质等的周期性变化,这种变化必然体现在古代沉积记录当中。判断地层旋回时候受米兰科维奇旋回控制,有3点值得注意:①推算地层旋回是否符合米兰科维奇旋回的周期;②旋回的沉积记录、古生物特征以及化学元素组成与米兰科维奇的气候效应有内在的关联;③由于区域气候效应,旋回特征应该具有区域性和代表性^[12]。如果旋回沉积记录满足这3点,可以判断受控于米兰科维奇旋回。

具体来讲,在某一地质历史时期,米兰科维奇旋回具有相对的稳定性,岁差、黄赤夹角和偏心率周期之间的比值也具有一定的稳定性,如果能在旋回地层中找到与米氏旋回周期比值相等或相近的关系,就可以据此判断该时期的高频旋回受控于米兰科维奇旋回^[26]。济阳拗陷古近系孔店组旋回沉积是否满足这样的堆积原则呢?济阳拗陷古近系孔店组目前还缺乏系统的测年数据,只有依靠间接地方法求取。本次研究根据Berger计算的地质历史时期米兰科维奇旋回周期的变化^[28],付文钊、余继峰等利用测井资料提取米氏旋回信息,对古生代—新生代地层进行了米兰科维奇旋回信息的提取,分别计算了岁差、黄赤夹角和偏心率周期在多套地层中的响应厚度及其变化特征。其中,新生代地层中岁差旋回层厚度的变化范围为7~11 m,优势旋回厚度为10 m;地轴倾角旋回层的厚度变化为14~26 m,优势厚度为21 m;偏心率旋回层的厚度变化为40~60 m,优势旋回层厚度51 m^[29]。徐伟等通过新生代对沙河街组进行研究,计算出古近系岁差周期则均为19~23 ka,斜率周期主要为38~51 ka,而偏心率主要周期为96~405 ka^[30]。这些研究从不同方式证实了济阳拗陷新生代地层米氏旋回周期信息保存很好,旋回较稳定,明显受米兰科维奇旋回的控制。

通过对济阳拗陷孔店组不同沉积周期的叠加旋回进行数学变换,记录成频谱分布曲线,通过自然伽马曲

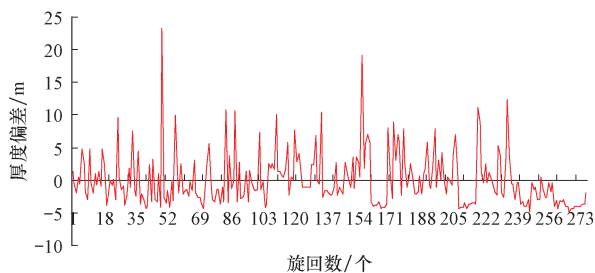


图9 济阳坳陷古近系孔店组旋回厚度偏差分布(王46井)

Fig.9 Cycle thickness deviation distribution map of the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression (W46)

线计算旋回厚度及厚度偏差(图9),进而利用 Fisher 图解进行数学推算,得出了相应的时间周期。分析表明,孔店组旋回厚度偏差出现多旋回变化,说明可容纳空间变化频繁,高频气候旋回变化对湖泊的影响较大;另外,厚度增加最大的在第52个旋回处,说明该时期可容纳空间的增加较大,沉积物堆积速率最高;利用 Fisher 图解进一步进行计算,得出古近系孔店组岁差周期则为 19.2 ~ 23.4 ka,斜率周期主要为 39.1 ~ 51.4 ka,而偏心率主要周期为 95.3 ~ 403.1 ka。该差值与古近纪超短期旋回、短期旋回和中期旋回的时间差基本一致,证实了孔店组湖泊相沉积旋回受控于米兰科维奇旋回。

3.2 气候变化对高频岩性旋回的控制

天文因素通过影响气候条件,进而可以对沉积物造成强烈影响。研究区孔店期气候属于干旱与潮湿气候交替的环境,在沉积记录中必然有相应的沉积响应。气候因素可以造成沉积记录的颜色旋回变化。通过对不同颜色旋回岩石地球化学特征及元素比值来分析沉积水介质及气候环境。结果表明:灰色砂岩普遍比红色泥岩 Al, Ca, Fe, Mg 含量低,灰色砂岩 Sr, Ba, Mn 值普遍比红色泥岩低。Mn 的高值说明了红色泥岩沉积水介质盐度较高(图10)。研究表明这类变化主要是因为滨浅湖的反复震荡作用造成,碎屑物质充足条件则形成粉砂岩,物质不充足则形成红色泥岩^[25]。这种情况下,物质的常量元素含量不能完全代表形成的气候环境和盐度。从元素比值来看,灰色砂岩和红色泥岩元素比值相差较小,证实了红色泥岩和灰色砂岩形成的环境非常相似,均属于红色干旱沉积背景。

3.3 沉积水动力共轭震荡对高频岩性旋回的控制

原始沉积水动力条件是控制沉积记录的最直接因素,水体动力条件的变化可以导致沉积物质的改变,进而可以形成不同的沉积物质旋回。一方面,可以形成

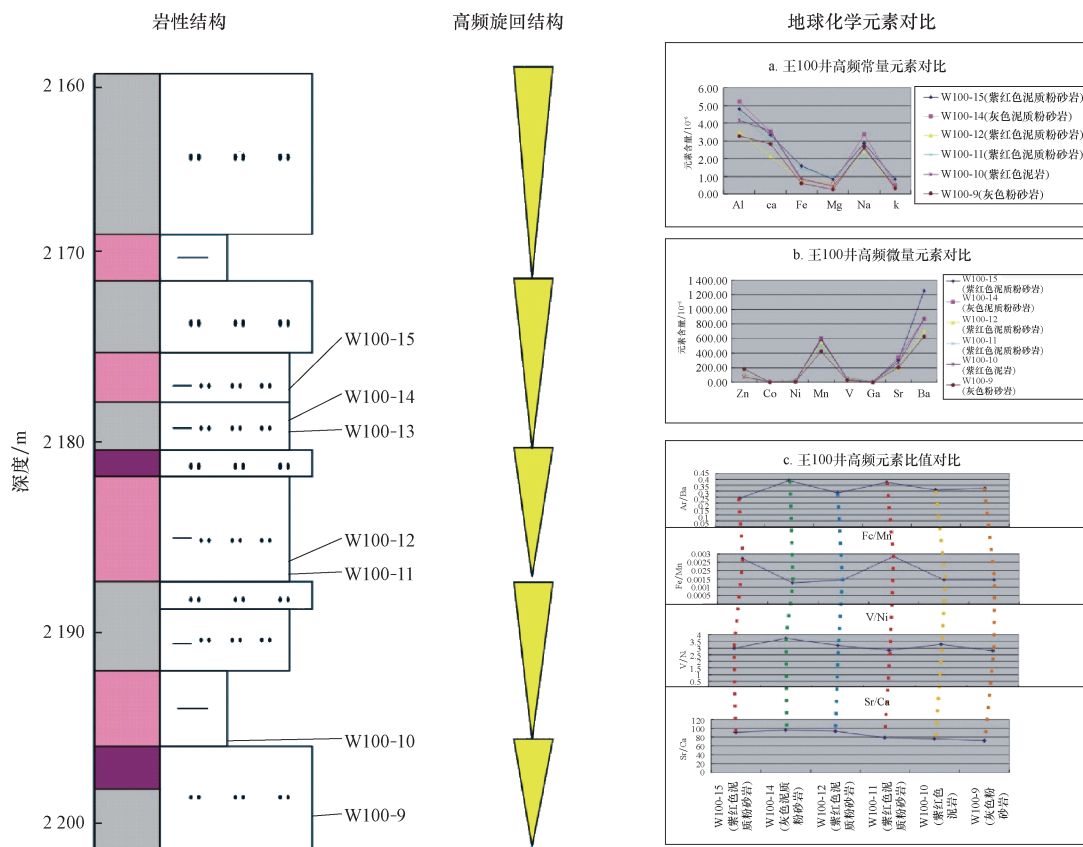


图10 济阳坳陷王100井高频旋回与元素分布规律

Fig10 Distribution of high frequency cycles and elements of Well Wang100 in the Jiyang Depression

砂岩和泥岩的非粒序旋回,主要发育在滨浅湖环境中,这种旋回变化不存在岩性的粒序变化,而是随机的纵向叠置,只是泥岩与砂岩的互层。在受潮汐作用控制明显的碳酸盐潮坪环境中,灰岩和泥质灰岩互层广泛发育,代表潮坪沉积环境或是沉积环境的频繁变化。对于砂岩和泥岩互层规律出现的现象,一般认为跟水体动荡作用和物质来源有着重要的关系^[25]。在平面上,这种旋回变化可以发生在湖泊的任何部位,但滨浅湖当中广泛发育,少量半深湖环境下也会出现相似的旋回。滨浅湖沉积环境由于水体变化快、物质来源不稳定,粒度的粗细会不定时的规律变化,造成粒度上的砂-泥互层出现。另一方面,典型的沉积部位,如湖盆边缘的冲积扇沉积体系、河流、三角洲沉积体系对沉积旋回具有很强的控制作用,这种控制作用实际上体现了原始沉积水动力条件的变化。因此水动力条件的共轭震荡是旋回发育很重要的控制因素。

3.4 物质来源对高频岩性旋回的控制

物质的组成直接决定了岩石的宏观表现,实际上,岩石的旋回沉积记录均反映了物质的构成,也是对气候和环境的间接响应。水体的介质浓度和沉积规律直接决定了物质的组成,形成不同的米级旋回。这种控制作用一方面形成颜色旋回变化,例如颜色旋回中的 B 型旋回,直接反映了当时的沉积水介质条件和古气候条件。图 11 显示,灰色地层和紫红色地层各自包含了丰富的粒度信息,每种颜色均由较多的岩性构成,尽管 W46-5 号样品和 W46-7 号样品岩性均为粉砂岩,但元素分配方式相差却比较大。主要表现在紫红色粉砂岩 Ca 值含量比灰色粉砂岩高;微量元素上表现

出紫红色粉砂岩有较高的 Mn 值,以及较低的 Sr 和 Ba 值;元素比值表现出灰色地层有较高的 Sr/Ca 值。一般认为 Sr/Ca 值越高,盐度越高。陆相盆地中, Sr 的主要来源为陆源 Sr,因此 Sr 值越高,陆源物质提供越多,水体越浅。反之水体越深,陆源物质越少。因此,这种旋回变化跨越不同的岩性,主要跟湖盆水体有关系,动荡的水体强烈改造了沉积物质的。另外一方面,在干旱的盐湖环境下,随着气候和水介质条件的变化,可以形成膏岩与泥岩的互层。这种沉积环境水动力条件相似,但物质供应相差较大。例如郝科 1 井旋回沉积记录,由于该井位于湖盆的中央,物质来源不丰富,缺乏大规模的粗碎屑物质。因此,缺乏砂体的规模沉积,搬运过来的一般为粘土矿物级的碎屑物质。膏岩与泥岩的互层出现其实并非完全的很大差异,很多情况介于两者的过渡类型。因此,旋回变化的膏岩与泥岩代表了盐湖沉积。只是在膏岩沉积时期,水体相对较干旱,浓度较大,泥岩沉积时期,水体较潮湿,盐度较小,沉积泥岩为主。这种尺度的旋回变化代表了湖盆水体的物质供应条件和气候变化规律^[25]。

4 旋回沉积动力学模型

济阳拗陷古近纪孔店期是在中生代地层基础上发育的断陷湖盆,湖盆断陷早期气候总体比较干旱,伴随间歇性的潮湿气候。古气候和湖泊具有几个典型的特点:①湖盆断陷作用活动持续加强,随着断陷活动的加强,湖盆水体不断扩大,整体湖泊可容纳空间处于增加的趋势;②湖泊地形平坦,受海洋气候的影响较大,湖泊明显受到古气候、潮汐作用的影响,形成了一系列的

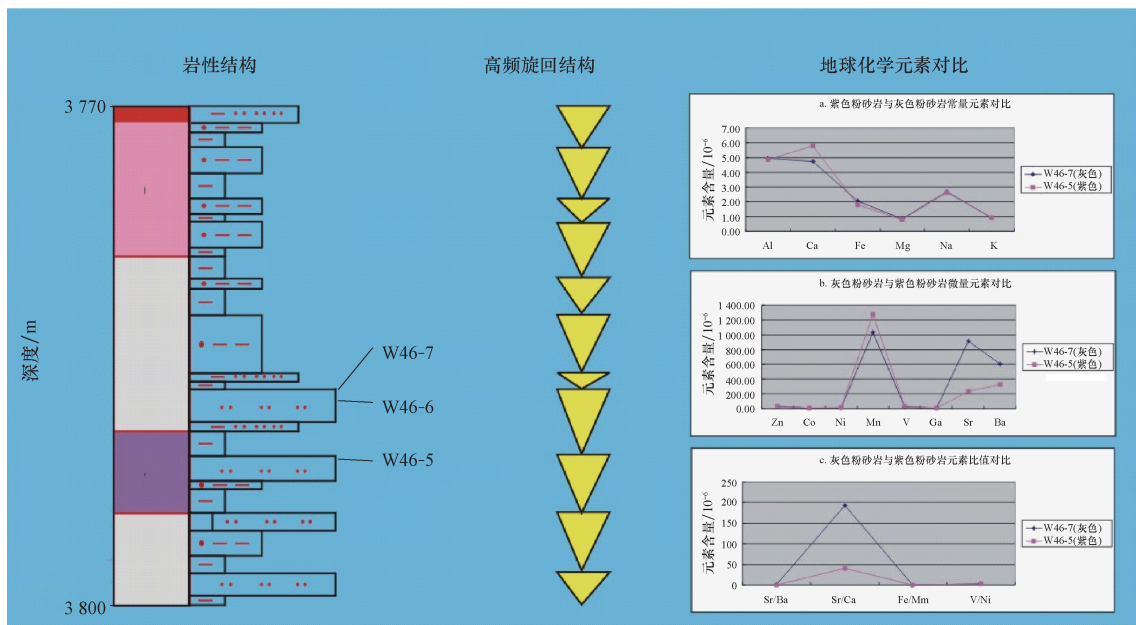


图 11 济阳拗陷王 46 井高频旋回与元素分布规律

Fig11 Distribution of high frequency cycles and elements of Well Wang46 in the JingYang Depression

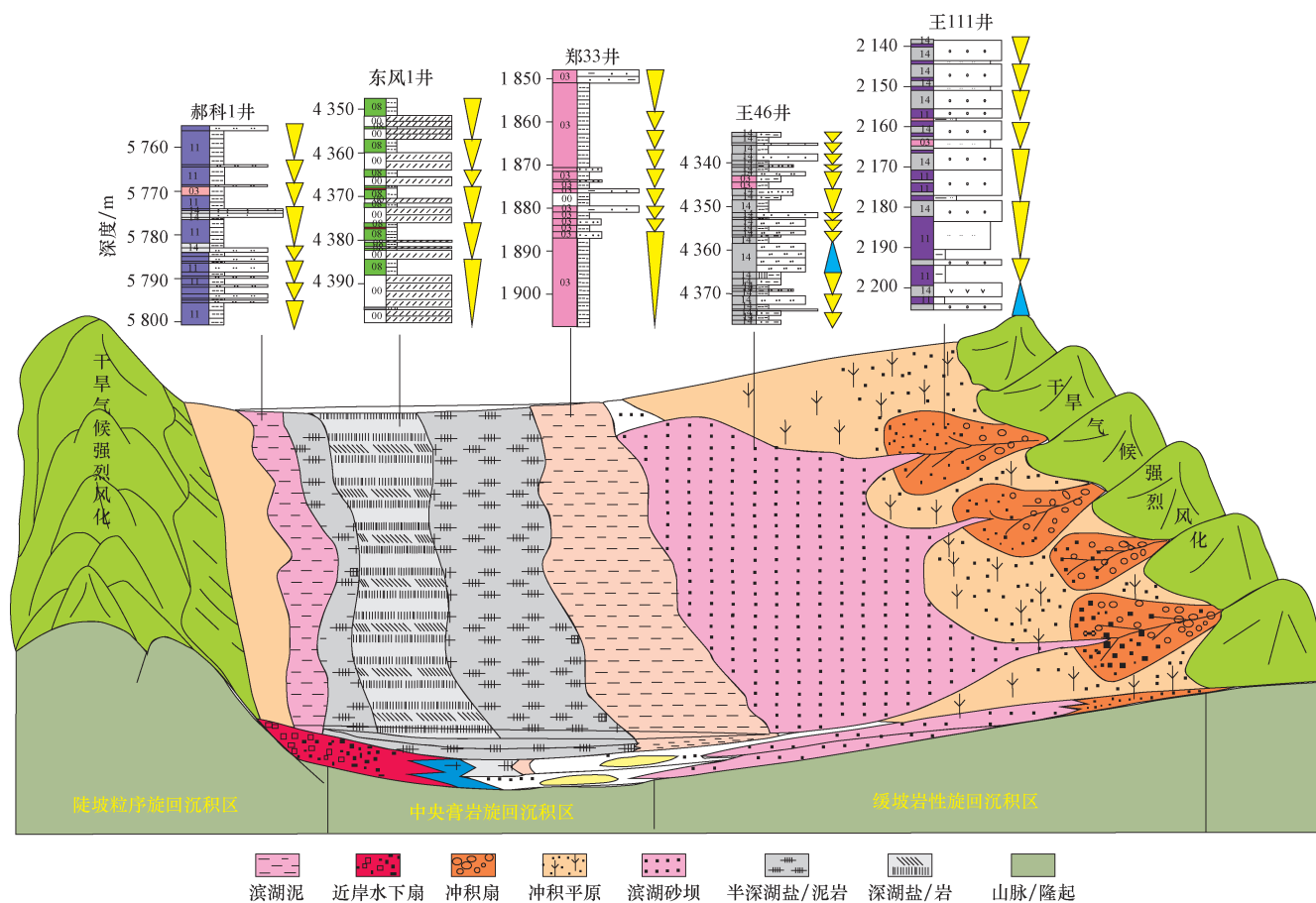


图 12 低水位干旱时期旋回沉积动力学模型

Fig. 12 Cyclic-sedimentation dynamic model during the low-stand dry period

高频旋回沉积响应;③湖泊发育过程中以干旱少雨的气候为主,形成了膏岩、盐岩和泥岩的互层,同时受到断陷作用的控制,湖盆水体不断加深;④湖泊岩浆活动频繁,伴随着断裂活动的进行,在湖泊中出现了岩浆的侵入作用,如王 111 井出现了玄武岩与砂岩互层的产出状态;⑤湖泊物质供给相对充足,在经历了上一个时期的造山运动之后,气候干旱,风化作用比较强烈,明显受控于气候的影响,导致物质沉积主要以干旱的红色物质沉积为主,总体沉积了一套红色的地层,局部地方沉积灰色的岩性。根据上述基本特征,在充分了解构造、沉积背景基础上,提出孔店期湖泊为震荡性干旱湖泊,并且发育明显可以分为干旱期和高位的湿润期。据此,可以建立孔店期的高频旋回沉积动力学模型。

4.1 低水位时期旋回沉积动力学模型

旋回的低水位时期,气候干旱,水体蒸发浓缩,济阳坳陷孔店期较长时间处于低水位干旱期,水体较浅,干旱少雨。发育旋回的红色泥岩和砂岩沉积体(图 12)。湖泊缓坡边缘地带,地形比较平缓,受潮汐作用明显,加之物源的持续供给,在该地区形成了大量的粒序旋回和非粒序旋回,且明显具有颜色旋回变化特性,

是反应米兰科维奇旋回变化的典型地区,沉积响应比较灵敏。在湖泊中央地带,主要沉积一套膏岩层和泥岩的互层,主要取决于沉积物质的供给,由于该时期受气候的影响,风化作用强烈,多以红色的细粒碎屑物质为主,因此多沉积紫红色-紫色的沉积体。湖泊陡坡边缘地带,主要沉积了粒序旋回,如冲积扇旋回、扇三角洲粒序旋回等沉积体。

4.2 高水位时期旋回沉积动力学模型

高水位时期,湖盆水体较深,除了少部分地区为紫红色的岩性之外,大部分地区为灰色地层,也出现灰色的泥岩(图 13),湖水盐度低,沉积物质以粘土矿物为主,形成粘土岩。湖泊缓坡地区,水体加深造成了三角洲的后退,该区域物质供给不足,水体总体比较安静,湖泊处于短暂的还原环境,形成了一些灰色砂岩、泥岩沉积体,物质的供给成为旋回变化的关键因素;湖泊中央地带,尽管水体有一定加深,导致膏岩、岩盐沉积区大规模减少。但是整体来看,仍然有部分区域水流不畅,沉积泥质膏岩等沉积体,这是造成高频旋回中灰色膏岩段沉积记录的重要原因;湖泊陡坡地带,由于水体加深,冲积扇沉积基本过渡为扇三角洲沉积体,具有粒序旋回沉积,多数为正粒序的旋回沉积。

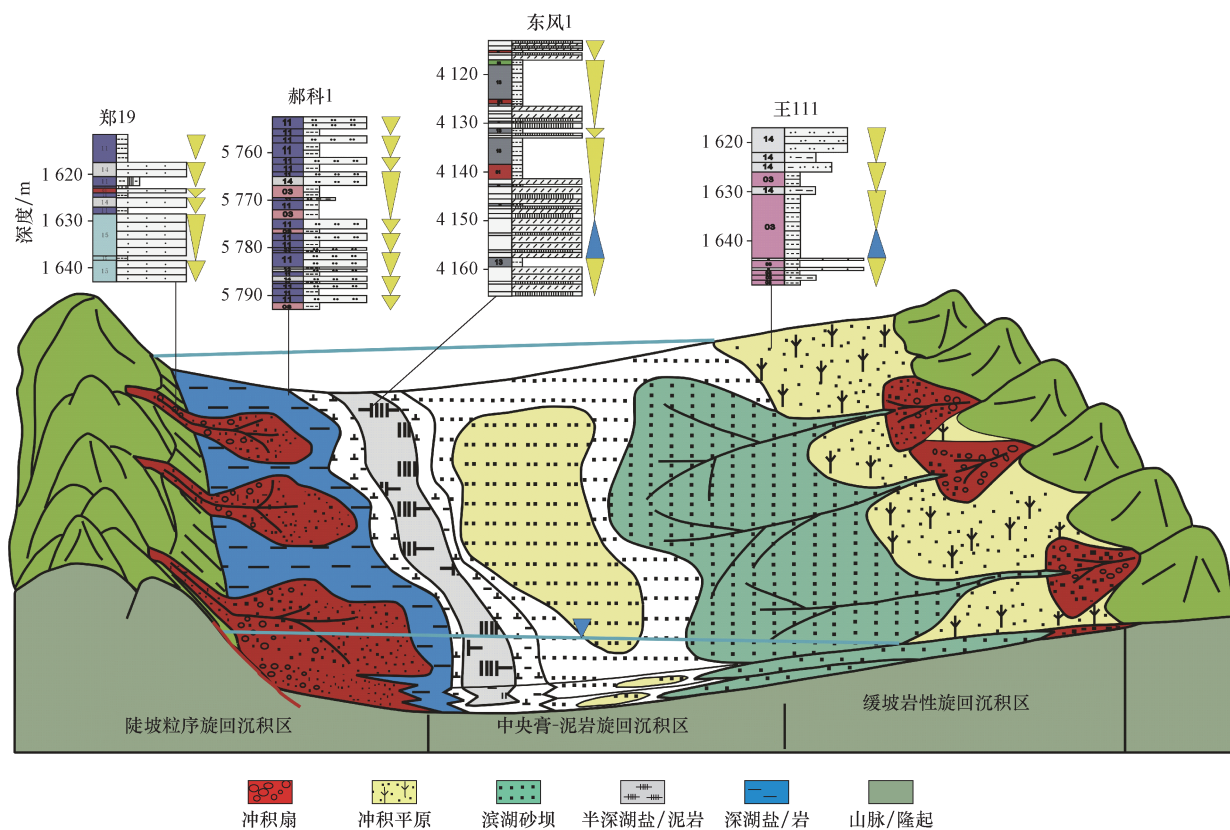


图13 高水位潮湿环境旋回沉积动力学模型

Fig. 13 Cyclic-sedimentation dynamic model during the high-stand humid period

5 结论

1) 济阳拗陷古近系发育颜色米级旋回、粒序米级旋回和非粒序米级旋回等3种高频旋回类型。其中,颜色米级旋回可以进一步划分为岩性与颜色同步协调变化、跨越多种岩性的颜色旋回变化和相同岩性的颜色自旋回变化等3种类型;粒序米级旋回主要发育在河流、三角洲和滩坝沉积环境中,可以分为正粒序旋回和反粒序旋回;非粒序旋回主要发育在滨湖潮上带和朝下带环境中,也可以发育在深湖-半深湖潮下带环境中。

2) 孔店组共发育6类岩相组合类型及23种岩相组合,共划分出276个米级旋回,旋回最大厚度29.6 m,最小厚度1.48 m,平均6.28 m;岁差周期为19.2~23.4 ka,斜率周期主要为39.1~51.4 ka,而偏心率主要周期为95.3~403.1 ka。该差值与古近纪超短期旋回、短期旋回和中期旋回的时间差基本一致,证实了孔店组湖泊相旋回沉积受控于米兰科维奇旋回。

3) 济阳拗陷孔店组旋回沉积明显受到古气候、沉积动力学的共轭震荡、物质供应等条件也影响,共同决定了旋回沉积的发育过程。综合各种因素,建立了济阳拗陷古近系孔店组低水位干旱时期和高水位潮湿时期的旋回沉积动力模型,深入探讨了米兰科维奇旋回

控制下旋回沉积的原始沉积条件和古环境面貌。低水位干旱时期,以咸化湖盆的旋回沉积为主,沉积粒序旋回、红色泥岩-膏质泥岩等旋回沉积;高水位潮湿时期,以发育滨湖潮上带及潮下带的泥质-砂质旋回沉积为主以及粒序旋回沉积。

参考文献

- [1] Schwarzacher W. Cyclostratigraphy and the milankovitch theory, Amsterdam, London, New York [M]. Tokyo: Elsevier, 1993.
- [2] Doyle P, Bennett M R. Unlocking the stratigraphical record: advances in modern stratigraphy [J]. Chichester, 1998, 2(3): 1-5.
- [3] Gong Y M, Li B H, Wang C Y, et al. Orbital cyclostratigraphy of the Devonian Frasnian-Famenian transition in South China [J]. Palaeogeograph, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 168(3-4): 237-248.
- [4] Buonocunto F P, D'Argenio B, Ferreri V, et al. Orbital ennsyl ratigraphy and sequence stratigraphy of Upper Cretaceous platform carbonates at Monte Sant' Erasmo, southern Apennines, Italy [J]. Cretaceous Research, 1999, 20(1): 81-95.
- [5] Anderson R Y A long geoclimatic record from the Permian [J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87: 7285-7294.
- [7] 梅冥相, 徐德斌, 周洪瑞. 米级旋回层序的成因类型及其相序结构特征 [J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 43-49.
Mei Mingxiang, Xu Debin, Zhou Hongrui. Genetic types of meter-scale cyclic sequences and their fabric features of facies-succession [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 43-49.
- [8] 郭刚, 童金南, 张世红, 等. 安徽巢湖早三叠世印度期旋回地层研

- 究[J]. 中国科学, 2007, 37(12): 1571-1578
- Guo Gang, Tong Jinnan, Zhang Shihong, et al. Cyclostratigraphy of the Induan (Early Triassic) in West Pingdingshan Section, Chao-hu, Anhui Province [J]. Science in China, 2007, 37 (12): 1571-1578.
- [9] 伊海生. 测井曲线旋回分析在碳酸盐岩层序地层研究中的应用[J]. 古地学报, 2011, 13(4): 456-466.
- Yi Haisheng. Application of well log cycle analysis in studies of sequence stratigraphy of carbonate rocks [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 456-466.
- [10] John C, Tipper. Research articles patterns of stratigraphic cyclicity [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(6): 1262-1279.
- [11] Cari L, Johnson, Stephan A, et al. Cycles in Perilacustrine facies of Late Mesozoic rift basins, Southeastern Mongolia [J]. Journal of Sedimentary Research, 2004, 74(6): 786-804.
- [12] 李凤杰, 郑荣才, 赵俊兴. 鄂尔多斯盆地米兰科维奇旋回在延长组发育的一致性 [J]. 西安石油大学学报, 2008, 23(5): 1-5.
- Li Fengjie, Zheng Rongcai, Zhao Junxing. Uniformity of the Milankovitch cycle developed in the Yanchang Formation in east Gansu with the Milankovitch cycle developed in other areas in Ordos Basin [J]. Journal of Xican Shiyou University, 2008, 23(5): 1-5.
- [13] 梁定勇, 伊海生, 邱余波, 等. 松辽盆地东岭地区泉头组高频沉积旋回的叠加型式分析 [J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 198-203
- Liang Dingyong, Yi Haisheng, Qiu Yubo, et al. Analysis of high-frequency sedimentary cycle superposition type in Quantou Formation in Dongling area of Songliao Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2): 198-203.
- [14] Neil F, Humphrey, Paul L, et al. Natural oscillations in coupled geomorphic systems: an alternative origin for cyclic sedimentation [J]. Geology, 1995, 23(6): 499-502
- [15] 程日辉, 王国栋, 王璞珺. 松辽盆地白垩系泉三段-嫩二段沉积旋回与米兰科维奇周期 [J]. 地质学报, 2008, 82(1): 55-63.
- Cheng Rihui, Wang Guodong, Wang Pujun. Sedimentary cycles of the Cretaceous Quantou-Nenjiang Formations and Milankovitch Cycles of the South hole of the Slocore-n in the Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(1): 55-63.
- [16] Anderson E J, Goodwin P W. The significance of meter-scale allocycles in the quest for a fundamental stratigraphic unit [J]. Journal of Geology, 1990, 147: 507-518.
- [17] 陈留勤. 从准层序到米级旋回—层序地层学与旋回地层学相互交融的纽带 [J]. 地层学杂志, 2008, 32(4): 447-454.
- Chen Liuqin. From parasequences to meter-scale cycles: The connection between sequence stratigraphy and cyclostratigraphy [J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(4): 447-454.
- [18] 梅冥相. 碳酸盐米级旋回层序的成因类型及识别标志 [J]. 岩相古地理, 1993, 13(6): 35-45.
- Mei minxiang. Genetic types and identification marks of Meter-scale cyclic sequences of carbonate [J]. Lithofacies Palaeogeography, 1993, 33(6): 34-45.
- [19] 梅冥相. 碳酸盐旋回与层序 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1995: 1-245.
- Mei Minxiang. Carbonate cycles and sequence [M]. Guiyang: Guizhou science and Technology Press, 1995: 1-245.
- [20] 王鸿祯, 史晓颖. 沉积层序及海平面旋回的分类级别旋回周期的成因讨论 [J]. 现代地质, 1998, 12(1): 1-16.
- Wang Hongzhen, Shi Xiaoying. Hierarchy Of Depositional sequences and eustatic cycles—a discussion on the mechanism of sedimentary cycles [J]. Geoscience, 1998, 12(1): 1-16.
- [21] Mitchum R M, Van Wagoner J C. High-frequency sequences and their stacking patterns; sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles (in the record of sea-level fluctuations) [J]. Sedimentary Geology, 1991, 70: 131-160.
- [22] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义 [J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249-254.
- Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 249-254.
- [23] Wilgus C K. Sea-level changes—An integrated approach [M]. Tulsa: SEPM Special Publication, 1988: 1-407.
- [24] 杨俊才, 马飞宙. 单岩性米级旋回在旋回地层划分中识别—以北京西山张夏组为例 [J]. 地层学杂志, 2014, 38(3): 311-316.
- Yang Juncai, Ma Feizhou. Single-lithology meter-scale cycles in cyclic stratigraphy: a case study of the Cambrian Changhania formation in Xishan [J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(3): 311-316.
- [25] 谭先锋. 陆相断陷湖盆旋回沉积机理与成岩系统物质耦合关系研究—以济阳坳陷孔店组为例 [D]. 四川成都: 成都理工大学, 2013.
- Tan Xianfeng. Study on cyclic sedimentation mechanism and diagenetic system material coupling relationship in continental rift lake basin—Take Jiyang rift lacustrine basin Kongdian formation for example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [26] 夏国清, 伊海生, 黄华谷, 等. 藏北雁石坪地区夏里组米级沉积旋回及成因 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(2): 133-138.
- Xia Guoqing, Yi Haisheng, Huang Huagu, et al. Meter-scale sedimentary cycles and their possible genetic mechanism of Middle Jurassic Xiali Formation in Yanshiping area, North Tibet, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(2): 133-138.
- [27] Milankovitch M M. Kanon der Erdbeistrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem [J]. Academic Serbe, 1941, 133: 1121-1132.
- [28] Berger A, Loutch M F, Dehant V. Pre-Quaternary Milankovitch frequencies [J]. Nature, 1989, 342(9): 133.
- [29] 付文钊, 余继峰, 杨锋杰, 等. 测井记录中米氏旋回信息提取及其沉积学意义—以济阳坳陷区为例 [J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(6): 1025-1032.
- Fu Wenzhao, Yu Jifeng, Yang Fengjie, et al. Feature extraction of Milankovitch cycle in well logs and its sedimentological significance: a case study of Jiyang depression zone [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(6): 1025-1032.
- [30] 徐伟. 东营凹陷沙河街组三段、四段高频旋回识别及其地质意义 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- Xu Wei. High frequency cycle identification and its geological significance of 3th and the 4th of Shahejie Fm in Dongying sag. [M]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.