

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

层序地层动力成因研究的周期 分析方法及其应用

张映红 姚平

(中国石油天然气集团公司勘探开发研究院, 北京, 100083)

朱筱敏 王贵文

(石油大学地球科学系, 北京, 102200)

内容提要 本文尝试将时频分析技术与层序地层学原理相结合, 进行陆相层序地层的周期分解, 并通过与古气候和古构造的单成因周期对比, 探讨不同级序层序地层的动力成因机理。该方法在辽河断陷盆地的应用结果表明, 构造和古气候旋回对不同级序陆相层序地层的影响程度不等。小尺度($<1.19\text{ Ma}$)的古气候和古构造变化具有相关性, 两者共同决定层序体发育。Ⅲ级($4.2\sim 8.5\text{ Ma}$)古构造与古气候变化相对独立, 幕式构造活动具有幔源特征, 控制主要沉降期和沉降带分布; 古气候变化与全球性气候变化相应, 决定古植被类型和水体规模, 层序结构来自两者的时序配置。古气候变化对陆相层序地层发育仍然具有重要影响。

关键词 陆相层序地层 地质周期 火山旋回 古气候旋回 层序动力学成因

波动性或旋回性是地质活动最本质的特征之一。近年来, 随着地球动力学和层序地层学的研究与发展, 人们对于地质波动问题日趋关注。目前, 波动问题的研究在方法上大体具有3种类型, 即: 直观旋回分析法、正演周期解法和反演信号分离法。

直观旋回对比法最成功的实例当首推经典层序地层学。在经典层序地层学研究中, P. Vail根据地层边界点的旋回性移动确定层序变迁, 并通过与被动大陆边缘海平面升降旋回的直观对比, 探讨了层序发育的动力机理^[1]。正如众所周知, 早期层序地层学的成功很大程度上获益于被动大陆边缘的稳定构造沉降特征。然而, 由于陆相环境的复杂性, 湖平面升降明显受到古气候变化和构造活动的双重影响, 而且在大多数情况下用直观的方法难以有效区分, 因此, 该方法不能直接地沿用于陆相环境的层序动力成因研究。B. J. 施波伊曼和张一伟等在其地质波动理论中提出了应用线性和非线性方程进行约束求解的正演试解方法^[2,3], 该方法对盆地中一些Ⅲ级以上周期的识别和分离是比较成功的, 但是由于其解具有较强的先验性, 受认知程度的限制, 这种方法在拟合过程中可能因模型选择不当而产生假频。

本文提出的周期分析法主要基于近年来发展起来的反演信号分离技术(时频分析技术)。该项技术是一种改进的 Fourier 变换, 前人大多数将其应用于地层的对比或旋回结构分析。笔者尝试将时频技术与层序地层学原理相结合, 进行陆相层序地层的周期分解, 并与盆地火山活动所表征的构造旋回和孢粉复合分异度所表征的古气候旋回进行对比。通过三者周期时值及其地质特征的相关性分析, 探讨陆相层序地层的动力学成因。

该方法在辽河断陷盆地第三系的应用,有效地识别出了地层隐含的主周期成分,并通过与古构造和古气候变化周期的对比,分析了两者对陆相层序地层发育的贡献。

1 层序地层动力成因研究的周期分析方法

根据层序地层学原理,在一个相对独立的地球动力学系统中,层序地层的韵律结构主要来自古构造和古气候的旋回性驱动。由于地球动力学系统具有耗散结构特征,因此,这类系统在非平衡外源力的驱动下,从非平衡态向(准)平衡态的过渡主要具有 3 种作用方式,即胁迫振荡(正常持续性地质作用)、混沌运动和自组织临界。在自然临界范围内,一个持续性的地质作用过程可概括地表述为:

$$\Gamma(t) = H\{\Psi(t)\} \quad (1)$$

式中, $\Psi(t)$ 为系统的外源力函数,常见的外力分量包括古气候变化和古构造作用; $H\{\cdot\}$ 为系统的本征函数,从层序地层学的角度分析,它代表层序地层的形成规则。 $\Gamma(t)$ 为 $\Psi(t)$ 的实际层序地层响应。

由(1)式不难理解,层序动力学研究的核心就是力图从外源力函数和响应函数中推演得到 $H\{\cdot\}$ 的数理表达。地质动力学系统的本征函数 $H\{\cdot\}$ 通常具有复杂的非线性特征。在现有技术条件下,人们所能理解和掌握的仅仅是其中最简单和最基本的部分。下面以简单线性移不变系统为例,阐释层序地层周期分析方法的基本原理和研究思路。

根据信号处理原理,一个简单线性移不变系统的本征函数 $H\{\cdot\}$ 可以用一脉冲响应函数 $h(t)$ 来表示,并可(1)式转变为卷积求解^[4]:

$$\Gamma(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-u) \cdot \psi(u) du = h \cdot \psi(t) \quad (2)$$

对(2)式实施 Fourier 变换,变换后方程:

$$\Gamma(\omega) = h \cdot \psi(\omega) \quad (3)$$

式中, ω 为角频率。

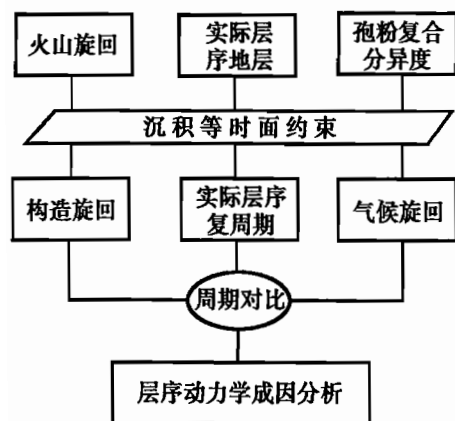


图 1 层序动力学成因分析的
周期对比法流程

Fig. 1 Flow chart of the periodic comparison
method for analyzing dynamic of sequence

显然,在频率域中 $\Gamma(\omega)$ 和 $\psi(\omega)$ 具有线性相似性,因此,可以用地层响应的频谱结构分析线性移不变系统外力函数的周期特征。由于古气候和古构造周期在频率域内稀疏分布,假定已知古气候和古构造变化的频率分布分别为 $\psi_{构造}(\omega)$ 和 $\psi_{气候}(\omega)$,则可以通过与实际地层的频率分量 $\Gamma(\omega)$ 的对比分析层序的动力成因。

层序动力成因分析的周期对比法研究流程见图 1。实际的地质动力学系统具有不同程度的非线性和时变演化特征,因此,研究过程中,需要根据具体情况进行适当简化。非线性理论研究认为,完全的混沌无序通常出现在自然临界的(如造山幕或生物灭绝事件)前期^[6],因此分析中需要对研究目标进行整理,去除突变事件及其相邻部分。当进行盆地的异地旋回研究时,应将分析点选择在构造的翼部和离物源较远的

位置,以尽量避免局域事件干扰。

2 实际层序地层的周期分解

由图1可知,一个完整的周期成因对比必须以实际层序地层的周期分析为基础。根据层序地层学原理,一个实际沉积层序的形成来自多个旋回性外力的复合驱动,并具有分级嵌套性。每一级层序或准层序的发育与可容沉积空间(ν),以及可容空间的变化率($d\nu/dt$)有关^[6]。假定不同地质参数(古气候变化、古构造旋回等)产生的可容空间及其变化率之间存在简单的线性叠加性,即:

$$\Gamma(t) = \sum_{k=1}^n [\xi_k \cdot \frac{d\nu_k(t)}{dt} + \zeta_k \cdot \nu_k(t)] \quad (4)$$

式中, $\nu_k(t)$ 为由第 k 项地质参数产生的可容空间, ξ_k 和 ζ_k 分别为第 k 项地质参数可容空间及其变化率的线性叠加系数,则(4)式的 Fourier 变换为:

$$\Gamma(\omega) = \sum_{k=1}^n [\xi_k \cdot (i\omega) \cdot \nu_k(\omega) + \zeta_k \cdot \nu_k(\omega)] \quad (5)$$

(5)式表明,在频率域中任意一套层序地层的地质波动都可以有效地分解为形成该层序的各主要地质参数的谱函数之和。由于不同动力学成因的准周期性外源力具有不同的周期时值范围和频率分布,因此,只需对 $\Gamma(t)$ 按频率展开,或采用不同频率范围进行分频滤波,即可计算出层序的周期分量。

在大多数情况下,可容空间的变化为多参数非线性耦合作用的结果,因此,仅依据(5)式进行简单的纯数学变换可能出现假频。解决这一问题较现实的方法是将非线性系统按不同时窗范围离散化,力图使每一个时窗内的地层响应满足或近似满足线性特征,并在所选取的时窗内施行 Garbor 变换(有时窗的 Fourier 变换)。

图2为一测井道的 Garbor 变换结果。处理中采用零相位三角形滤波和递归滤波算法。时窗的滑移步长为4 ms,横坐标为时频频率,纵坐标为双程地震反射时间(称时频剖面)。

尽管图2中任意时窗内均存在相应的频率组合,但是这部分频率本身并不具有明确的地质周期意义。由于特定时窗内的频率曲线只能反映该时窗内的岩性组合关系,而在大多数情况下,这种岩性组合仅仅为某一层序地层单元的局部特征,即仅代表某种岩性在相应时窗内的出现频度。因此,必须观察频率谱团的变化趋势,只有时频谱团在时间域的规律迁移才具有明确的层序地层意义。

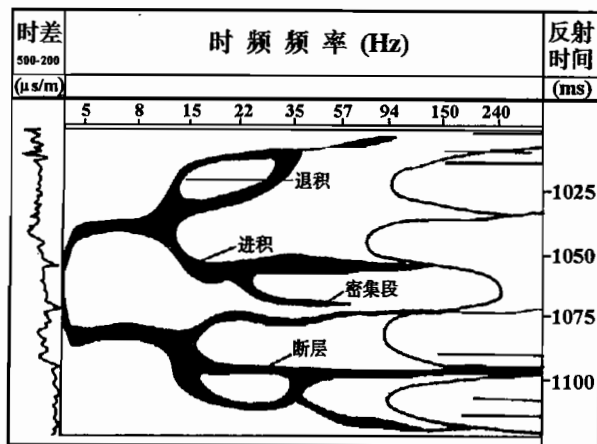


图2 辽河断陷盆地时频剖面

Fig. 2 The sequential frequency section in the Liaohe rift

图3展示了不同准层序叠加方式的时频响应特征。根据层序地层学原理,在一个完整的海(或湖)平面升降旋回中,准层序组将表现为“进积(叠积)—退积—进积(叠积)”的有序变化。在

同一时频频档(频率范围)内,这种由岩层单层厚度、粒度和夹层频度等地质参量所表征的地质律变,表现为频率谱团在时频剖面中的有序迁移。当谱团自下向上由低频向高频移动时,代表退积式准层序组;反之,谱团由高频向低频的移动则反映进积式准层序结构。

表1 辽河断陷盆地二级构造带

第三纪主要地质周期成分

Table 1 The major periods of Tertiary in difference tectonic zones of the Liaohe rift

旋回 级别	东部凹陷层 序周期(Ma)	中央凸起带 层序周期(Ma)	西部凹陷层 序周期(Ma)
II	32.2	32.2	32.2
III-1	4.92~5.93	4.53~5.25	3.47
III-2*	1.78~1.90	1.70~1.94	1.48~1.78
III-3	1.0~1.4	1.19~1.06	1.0~1.19
IV	0.74~0.66	—	0.34

注: * 该周期成分主要见于渐新世中晚期。

每一套地层的时频响应通常可以划分出多个频档,各频档分别对应不同的地质周期成分。图2中,900~1200 ms(相当于875~1500 m)反射时间范围内大体可以划分出15~35 Hz和94~120 Hz两个频档。图中875 m深度为上第三系底界,绝对地质年龄为24.7 Ma;1500 m深度对应下第三系东营组二段底界,绝对地质年龄为33.8 Ma。则频档15~35 Hz相应地质周期时值为4.05 Ma,相当于一个III级层序;94~120 Hz频档对应于1.97 Ma周期。表1为辽河断陷盆地3个二级构造带中第三纪隐含的主周期成分。

3 辽河断陷盆地的古构造和古气候周期分析

综上所述,解决陆相层序地层动力机理研究的关键在于寻找到盆地中相对独立的古气候及古构造变化的证据。在这方面,具有多期次层状火山岩分布,以及大量古生物资料的辽河断陷盆地无疑具有得天独厚的条件。

3.1 辽河断陷盆地第三纪古气候周期

中长周期的古气候变化分析,要求在较大的时间范围内能相对均匀地取值,并具有统一量纲,因此,本研究采用资料较丰富的孢粉复合分异度进行古气候周期分析。

孢粉的复合分异度:

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \ln(P_i) \quad (6)$$

式中, P_i 为第 i 个化石种属中的 N 个样品数目内,同类化石总数所占的百分比。

图4展示了辽河盆地第三系9个孢粉组合的复合分异度曲线。各层组的顶底样品点根据层组界面进行绝对地质年龄定义,层组间样点采用线性插值方法由深度域转换为地质年代坐标。图中辽河盆地孢粉的复合分异度曲线具有明显的旋回性。周期分解结果表明,辽河断陷盆地古气候中存在32.2 Ma、5.2 Ma和1.175 Ma 3个主周期成分。其周期方程:

$$\begin{cases} C1 = 7\sin(0.2066t - 4.7226) \\ C2 = 5\cos(1.2077t - 29.710) \\ C3 = 2\cos(5.347t - 131.55) \end{cases} \quad (7)$$

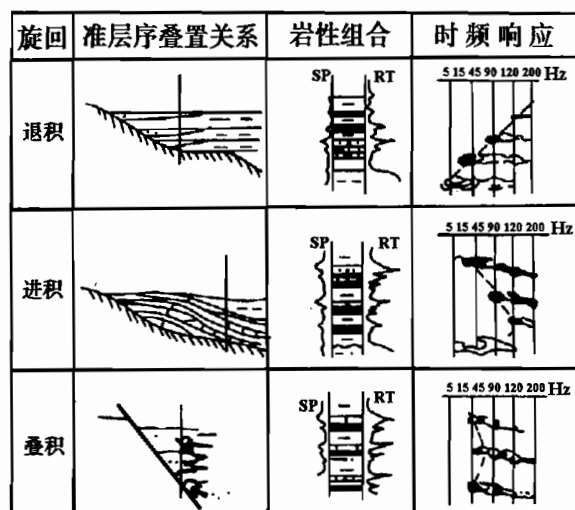


图3 不同准层序叠置关系的时频特征

Fig. 3 The sequential frequency characters of three kinds of parasequence set

式中, t 为绝对地质年龄(Ma), 全新世 $t=0$ 。

结合辽河第三纪古生物资料分析, 32.2 Ma 周期决定第三纪气候变化的低频趋势, 即“古新世温暖潮湿的亚热带偏温气候—始新世亚热带较干型气候—渐新世气温偏低的温带潮湿型气候”的周期变化。5.2 Ma 周期为本区古气候变化的优势周期, 表明在下第三纪中存在约 8 个主要气候旋回, 其中, 在进入始新世以后, 沙河街组三段中期、沙河街组一段中晚期和东营组二段晚期气候湿润, 古生物繁盛; 而沙河街组四段、沙河街组二段及东营组三段古气候偏干旱, 与前人总结的各期古生物证据相符^[7]。1.17 Ma 周期的动力学成因尚不清楚, 但在辽河盆地南部中央凸起带的下第三纪中已分解出相近周期(表 1), 表明该周期存在的客观可能性。

3.2 辽河断陷盆地古构造周期

作为一种较典型的裂谷型盆地, 辽河断陷中、新生代广泛发育火山岩。前人研究认为, 这一地区的岩浆活动具有幔源特征^[8]。由于火山岩分布直观地表征了壳幔的深位活动性, 因此, 可以用火山旋回独立地反映古构造活动周期。辽河盆地第三纪火山活动旋回见图 4。火山活动强度和旋回的划分主要依据火山岩分布面积、厚度和岩系特征。图中显示本区火山(构造)活动具有 4 个主要的演化层次。

裂陷旋回(60~65 Ma) 辽河新生代盆地形成于晚白垩世—古新世(65~70 Ma), 经历了“同裂—裂陷—热沉降”3 个主要发育阶段。这一时期, 辽河新生代盆地火山活动的能量分布满

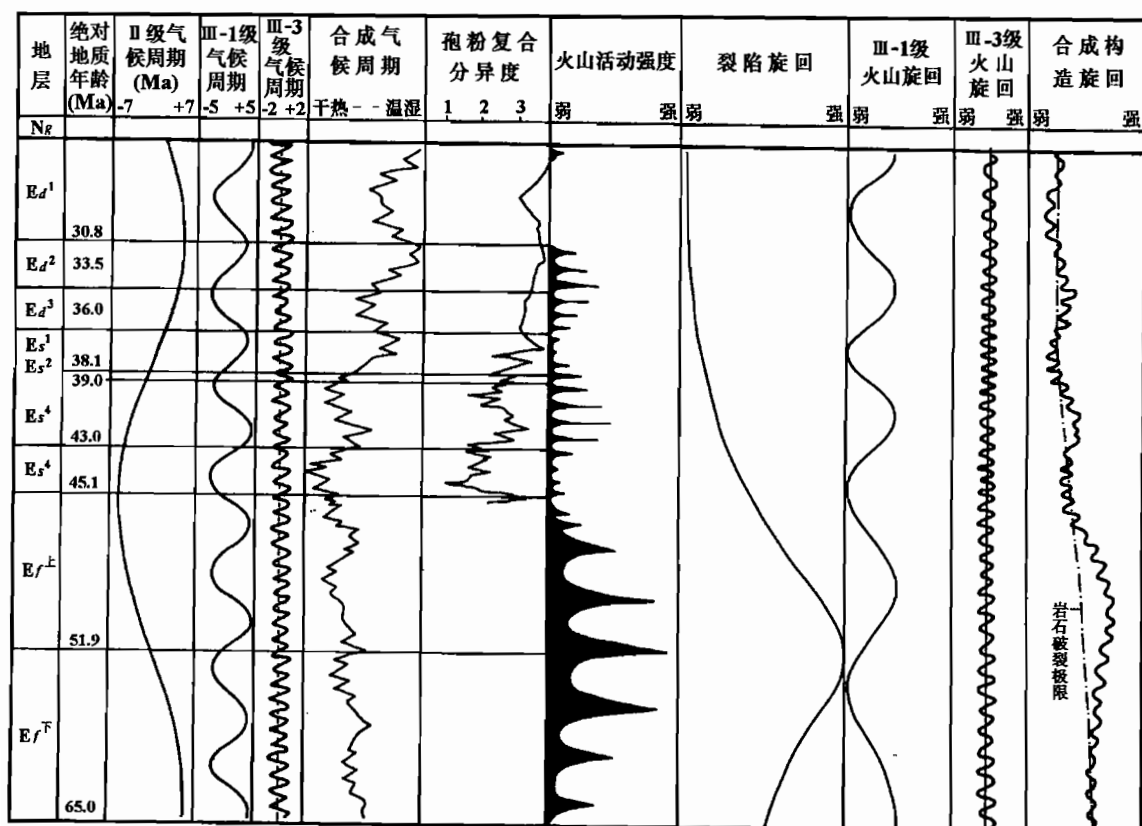


图 4 辽河断陷盆地第三纪古气候与古构造旋回对比

Fig. 4 Comparison of the paleoclimate and the paleotectonic cycles in Tertiary of the Liaohe rift

足幕律。古新世房身泡组下段火山活动逐渐增强,至房身泡组中段达到极盛,自始新世中期以后开始呈旋回式递减,在晚第三纪趋于衰竭,盆地进入整体热沉降阶段,其持续时间约 60~65 Ma。

火山活动期(29~33 Ma) 火山岩矿物组成的统计分析表明,在下第三系沙河街组二段沉积前后,火山岩之间存在明显的岩系特征差异^[8],晚白垩世一早第三纪早期,玄武岩化学成分复杂多变,第三纪中后期全区玄武岩成分相对稳定,同期盆地应力场调整,这种变化对应于华北地区早晚喜马拉雅期构造运动更替。目前在相邻的黄骅拗陷已分解出类似周期^[4]。

火山活动幕(8.2~9.5 Ma) 在进入成盆期以后,辽河断陷在沙河街组三段中后期、东营组二段,以及上第三纪再度形成多个火山活动的次峰期,其与沙四段、沙二段晚期及东一段早期的火山活动相对平静期共同构成了多个火山旋回,火山活动周期随年代变新时值逐渐减小。各火山活动幕与盆地主要沉降期相应。

火山活动次(1.0~1.19 Ma) 去除穿时火山岩以后,新生代火山岩有序地分布于Ⅲ—3级层序的下部,时值间隔为 1.0~1.19 Ma。在每一次火山活动之后,盆地进入新的沉降阶段接受沉积。间或在湖侵早期零星分布薄层玄武岩。

4 辽河断陷盆地第三纪陆相层序地层的动力学成因分析

辽河断陷盆地第三纪构造活动周期、古气候周期及实际地层周期的对比结果表明,不同级序的构造和气候旋回与相应层序地层之间具有不同的对应关系。

4.1 Ⅲ—3 级(1.06~1.19 Ma)层序(准层序)

对辽河盆地Ⅲ—3级火山旋回的分布研究表明,火山岩较集中地分布于层序或准层序的底部,部分地区与层序湖侵初期沉积物共生,在最大湖侵期和高位期尚未发现有分布。该现象表明,Ⅲ—3级层序地层的发育受古气候和古构造旋回控制,其中气候变化与构造活动之间具有一定的相关性,构造活动占据主导地位。因为,若古气候变化与古构造旋回之间缺乏必然联系,则气候变化相对于构造变化的偏离,必将导致火山岩在层序中的不稳定分布。两类周期相近的时值也从另一角度论证了其相关性。

根据火山活动与短期气候变化的相关性^[9]推测,这种相关性可能来自古气候相对于火山活动的回馈效应。

4.2 Ⅲ—2 级(1.78~1.70 Ma)层序

主要见于辽河盆地 3 个二级构造单元的东营组。该周期在古气候旋回中尚未见到,分析主要受构造活动控制,与这一地区两条 NE 向深断裂的活动性有关。由于周期节点附近不伴随明显的火山活动,而且主要见于中、晚渐新世,推测属壳内运动的地层响应。

4.3 Ⅲ—1 级(4.2~8.5 Ma)层序

Ⅲ—1 级周期是盆地发育的优势周期。从图 4 不难看出,辽河断陷盆地第三系沙河街组一段、二段和四段沉积时期构造活动趋于稳定。沙一时期,盆地达到最大湖侵,全盆地广泛分布的暗色泥岩成为这一油区最重要的区域性盖层和主力生油层段。这种变化主要来自Ⅱ级和Ⅲ级古气候旋回同时出现由干冷型向温湿型的急剧转换。沙二和沙四时期明显受Ⅲ级古气候周期控制,气候偏干热,湖盆水体萎缩,形成大面积的红色碎屑岩建造。

沙河街组三段和东营组三段中后期为该盆地两个主要沉降期,在每一次急剧断陷沉降之后,火山活动开始进入高峰期,基底强烈离散伸展,表生断裂发育。显然,这种区域性沉降主要

受构造事件控制。

图中显示该时值范围内的古构造与古气候旋回之间具有相对的独立性。古气候周期具有相对等时性,与全球性气候变化有关,受局域影响较小,决定植被类型和水体规模。而古构造旋回则呈现明显的时变特征,控制主要沉降期和沉降带分布。

由于Ⅲ级古气候和古构造旋回时值相近,分析两者可能具有同一天文成因,王鸿祯等推测为银地系统小周期^[10]。两者周期特征的差异可能与圈层的耦合驱动机制不同有关。气候旋回主要受大气圈和水圈驱动影响,而这一地区构造旋回受地球圈层耦合驱动制约,两者具有不同的动力机理。

4.4 Ⅱ级(32.2 Ma)层序及Ⅰ级(65 Ma)层序

构造控制的基底裂陷是盆地地层发育的主要成因。与盆地发育的“同裂—裂陷—热沉降”阶段相应,断陷湖盆的超层序可划分为“湖盆深陷体系域—湖盆扩张体系域—湖盆收缩体系域”。前人的研究表明,在盆地发育过程中,构造成因的古地貌和泄水孔高程变化,与古气候变化导致的湖平面升降,共同决定层序体结构和规模^[11]。

由上述分析可见,过去认为“陆相层序地层主要受构造作用控制”的观点是不全面的。构造和古气候旋回对不同级序的陆相地层具有不同的影响和控制作用,而且古气候变化对陆相层序地层发育仍然具有重要影响。因此,对陆相层序地层动力机理的研究必须注意研究的尺度效应。

5 结语

近年来,应用周期时值对比进行地质动力学系统的成因机制分析已成为一种趋势。这种研究的优势在于它可以摆脱具体地质表象的限制,而更多的体现不同地质域之间变化的、联系的本质。本文提出的反演分析法主要基于实际地层周期、古气候周期和古构造周期的独立获取。实际应用结果表明,这种方法在具有火山岩分布的裂谷型盆地,尤其是在能获得地史期内丰富的古气候证据的地区,可以获得有价值的成果,而且,这方面研究工作的开展无疑将有效地促进陆相层序地层学的发展。

本项研究在中国石油勘探开发研究院渤海湾分院完成,谯汉生教授关心并指导有关工作。研究过程中得到王永刚教授、孙洪斌高级工程师、陈学亮高级工程师等的帮助,郭兴生参加了主要工作,在此谨以致谢。

参 考 文 献

- 1 Sangree J B, Vail P. 应用层序地层学. 张宏逵等译. 山东:石油大学出版社,1991. 17~27.
- 2 施波伊曼 B Л, 张一伟, 金之钧. 波动地质学在黄骅拗陷分析中的应用. 石油学报, 1994, (专刊): 19~27.
- 3 金之均, 张一伟, 刘国臣, 李京昌, 缅斯尼科娃 Г П, 施波伊曼 B Л. 沉积盆地物理分析——波动分析. 地质论评, 1996, 42 (增刊): 170~179.
- 4 程佩青. 数字信号处理教程. 北京:清华大学出版社, 1997. 215~246.
- 5 Slingerland R. Predictability and chaos in quantitative dynamic stratigraphy. In: Timothy A C. ed. Quantitative dynamic stratigraphy. 1994, 22~45.
- 6 Jervey M T. 硅质碎屑岩层序及其地震表示的定量地质模拟. 见: Wagoner C K 主编. 层序地层学原理. 徐怀大等译. 北京:石油工业出版社, 1993. 56~85.
- 7 姚益民等. 中国油气区第三系(Ⅳ)渤海湾盆地油气区分册. 北京:石油工业出版社, 1994. 26~48.
- 8 陈文寄等. 下辽河裂谷盆地玄武岩的年代与地球化学. 见:刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京:地震出版社, 1992. 44~80.

- 9 Rampino M R. Volcanism, climatic change and the geologic record. In: Fisher R V. ed. Sedimentation in volcanic settings, 1991. 23~45.
- 10 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. 现代地质, 1998, 12(1): 1~17.
- 11 纪友亮, 张世奇. 陆相断陷湖盆层序地层学. 北京: 石油工业出版社, 1996. 7~44.

A New Method for Analyzing the Dynamic Mechanism of Continental Strata by Comparing Their Periods

—Its Principle and Applications

Zhang Yinghong, Yao Ping

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing, 100083)

Zhu Xiaomin and Wang Guiwen

(Petroleum University of China, Beijing, 102200)

Abstract

A new method has been put forward to analyze the dynamic mechanism of continental strata. The method is based on the comparable relationship between the rhythm of strata and the varieties of the paleo-climate or the tectonic episodes, in a simple nonlinear or para-linear geodynamic system. In the research, the technique of sequential frequency process has been used to discern geological periods in stratigraphic sequence, and the volcanic rhythm and the abundance of palaeobiocoenosis have been used to calculate the values of frequency in the tectonic and paleo-climate field. It is important that some special surfaces, of which the ages are known, are provided in unison when the operations are taken. As a result, it is suggested that there be four major cycles, 32.2 Ma, 5.93 Ma, 1.78~1.90 Ma and 1.19 Ma, respectively in the Tertiary of the Liaohé rift. Meanwhile it is noted that tectonic activities are not always major factors forming the continental sequences. For a III—3 order sequence, a correlation between the varieties of tectonic and climatic waves has been found. In a III—1 order sequence, the fluctuation of paleo-climate is independent of the changes of tectonic, and the tectonic activities decide the major subsidence periods and their distribution. On the other hand, the palaeoclimate and its varieties have controlled the types of vegetation and the scale of lake basins. So the scale of research objects must be paid enough attention to in discussing the dynamic mechanism of continental strata.

Key words: continental sequence stratigraphy; geologic rhythm; volcanic episodes; paleoclimate cycle; dynamic mechanism

作者简介

张映红, 女, 1963 年生。1984 年毕业于云南大学地球物理系; 1997 年起在石油大学攻读沉积学博士学位。现任中国石油集团公司勘探开发研究院高级工程师, 从事渤海湾地区火山岩分布及油藏研究。通讯地址: 100083, 北京海淀区学院路 20 号 910 信箱。