

刘春平,金之钧,林娟华,李京昌. 沉积盆地波动过程分析研究现状与发展趋势. 地球物理学进展, 2009, 24(1):164~169
Liu C P, Jin Z L, Lin J H, Li J C. Current research status and developing trends of wave process analysis in sedimentary basins. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(1):164~169

沉积盆地波动过程分析研究现状与发展趋势

刘春平^{1,2}, 金之钧¹, 林娟华², 李京昌¹

(1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司石油勘探开发研究院, 潜江 433124)

摘 要 沉积盆地波动过程分析方法是一种较新的盆地分析方法. 该方法以物理学中有关波的理论为基础, 以波动的观点来分析地壳运动. 本文介绍了沉积盆地波动过程分析的基本概念、发展过程、方法原理、研究步骤. 从含油气盆地分析的四个主要研究内容论述了波动过程分析法研究现状, 并探讨了它的发展趋势.

关键词 波动过程分析, 研究现状, 研究方法, 盆地分析, 高频波, 发展趋势

中图分类号 P631 文献标识码 A 文章编号 1004-2903(2009)01-0164-06

Current research status and developing trends of wave process analysis in sedimentary basins

LIU Chun-ping^{1,2}, JIN Zhi-jun¹, LIN Juan-hua², LI Jing-chang¹

(1. *Exploration & Production Research Institute, Sinopec, Beijing 100083, China;*

2. *E & P Research Institute, Jianghan Oil Field, Sinopec, Qianjiang 433124, China*)

Abstract Wave process analysis is one of the newly introduced methods for studying sedimentary basins. It is theoretically based on the wave theory of geophysics which regards the crust motion in the way of wave process. The basic concepts, developments, principles and methods of the wave process analysis in sedimentary basins are presented in this paper. We introduce the four main aspects of current research status of the wave process analysis in detail and discuss its developing trends.

Keywords wave process analysis, present research situation, means of research, basin analysis, high-frequency wave, trend of development

0 引 言

波动是物质运动的基本形式之一, 大到天体运动, 小到细胞内物质的运动, 无不包含着波动现象. 地壳运动是波浪式的, 地球圈层波动特征早就被地质学家所注意, 提出了地质上的“周期性”、“旋回性”、“等距性”、“脉动性”等术语和理论, 用于解释许多地球动力学过程与现象^[1~7]. 早在 20 世纪 30 年代就有人提出了地壳波动学说, 认为固体地球内部周期性对流循环引起差异性垂直运动—波动. 20 世纪 60~80 年代是波动理论在地质学应用的积累阶段^[1~4].

20 世纪 90 年代, 以中国石油大学张一伟、金之钧教授为首的学术集体将前苏联学者缅斯尼高娃和施比伊曼共同创立的沉积盆地波动过程工作方法引入我国并加以创新, 先后对塔里木盆地等地区开展了波动研究, 取得了较好效果, 探索出了一套适合中国沉积盆地特点的波动过程分析方法, 即改进的波动分析法^[8]或地质滤波法^[9].

1 理论基础

波动过程分析方法以物理学、生物学、天文学、地学等领域的大量研究成果作为基础. 总所周知, 波

收稿日期 2008-02-10; 修回日期 2008-05-20.

作者简介 刘春平, 男, 1970 年生, 湖北仙桃人, 在站博士后, 高级工程师, 主要从事盆地构造、波动过程分析研究.
(E-mail: liucp@pepris.com)

的重要特征是它能够在空间传播,它在地质体这种非均质体内传播时,波速和振幅都是变化的.这种非线性波的波动方程可以表达为:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right]^{-2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2},$$

式中 t 为时间, Ma; V 为传播速度, m/Ma; Y 为纵向传播距离, m; X 为横向传播距离, m.

当 $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ 忽略不计时, 上式为线性波动方程, 即可求出波动的周期、波长、振幅、相位角等方程参数^[10].

2 研究方法

波动过程分析的核心是建立沉积速率周期波动方程, 然后对波动方程所表示的一系列周期波进行对比分析, 从而得到盆地的演化特征. 具体工作方法如下:

(1) 选择单井

井位选择应遵循以下原则: ①井位的构造位置应有一定代表性, 分布尽可能均匀; ②尽可能选择揭示地层较全的井.

(2) 统计原始资料

这里所指的原始资料主要包括综合录井图、密度测井及与研究区有关的其它地质资料. 其中最主要的是对各组、段岩性厚度进行统计. 厚度资料的统计结果直接影响着波动曲线方程. 在统计各井资料时除厚度以外, 岩性组成是一项重要的参数. 对砂岩、泥岩、碳酸盐岩、膏盐、火山岩等均应独立统计出来, 以便于恢复原始厚度时使用. 此外, 地层倾角也不能忽视, 因为波动过程研究以地层沉积时的原始厚度为基础, 由于断裂、褶皱等构造作用引起的地层倾斜与地层缺失、重复均应恢复到沉积时的状态.

(3) 岩性—深度剖面转化为岩性—时间剖面

岩性—深度剖面上反映的是岩层厚度, 为计算沉积速率还必须将它转化为岩性—时间剖面, 这时需要建立一个时间坐标—地质年代表. 在岩性—深度剖面 toward 岩性—时间剖面转化时, 由于泥岩的沉积速率比砂岩慢, 因此泥岩将在时间纵轴被拉长, 砂岩相对被压缩.

(4) 恢复原始厚度、计算沉积速率

钻井揭示的地层厚度是被压实后的厚度, 为正确计算沉积速率必须恢复其原始厚度. 恢复原始厚度要有一个标准, 常用的标准定为恢复到埋深 100 m 处, 将各组、段的原始厚度除以各组、段的沉积时间, 可以获得相应的沉积速率, 以横坐标作为沉积速

率、纵坐标作为时间, 可绘制出沉积速率直方图. 在恢复原始厚度时, 灰岩、膏盐层不需进行原始厚度恢复, 火成岩的厚度应扣除, 因为它不代表沉积过程.

(5) 建立波动方程

设定一个滑动窗口, 对窗口内地层的沉积速率取平均值, 并将平均值记录在窗口中央所对应的时间位置上(图 1). 在滑动的时候从时间坐标的零点开始, 每次移动一个时间单位(时间单位的长短视研究精度而定), 依次下滑, 这样就得到一系列沉积速率平均值的点, 将这些点连接后, 就得到一条圆滑的曲线 G(低频), 这条曲线消除了周期小于该窗口尺寸的波. 改变窗口尺寸又可以得到另一条曲线 N(高频). 如果所做出的两条曲线之差是周期波 n , 同时又知道 G 的方程, 则曲线 N 方程为 $N=G+n$, 它是时间的函数. 如果所做出的两条曲线之差不是周期波, 则变换滑动窗口尺寸, 直至找到这样一个周期波为止. 改变窗口的大小, 重复以上过程, 可以将 G 曲线依次分解, 一般来讲, 经过三四级分解之后可以得到一条简单的曲线, 它是控制盆地演化的最大周期, 受天文因素控制, 称之为能量函数; 依次回代, 就可以得到代表沉积—剥蚀过程的高频曲线的波动方程.

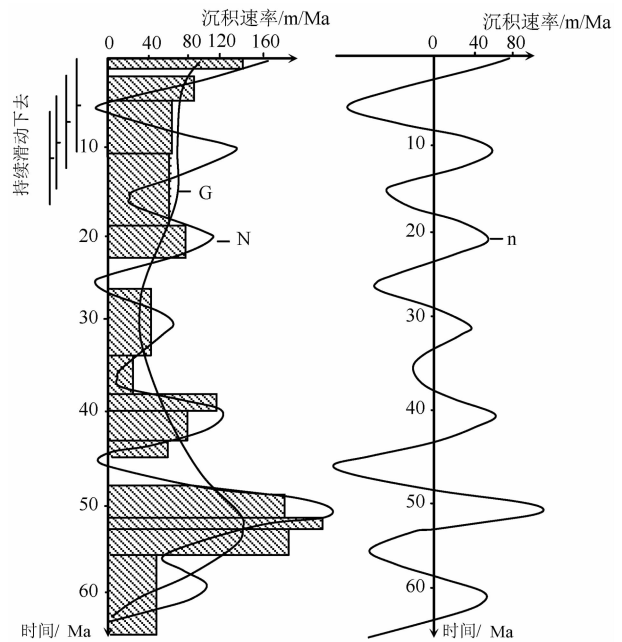


图 1 滑动窗口使用方法示意图

Fig. 1 Sketch showing the use of sliding window

3 研究现状

从上世纪 90 年代至今, 我国学者将波动过程分

析与含油气沉积盆地分析有机结合起来,取得了丰硕成果,使波动过程分析贯穿于含油气沉积盆地分析的四个主要研究方面:

3.1 盆地构造演化史研究

3.1.1 地层不整合面的识别与剥蚀量计算

识别地层不整合面并计算剥蚀量的方法很多,如镜质组反射率法、声波时差法、地震层速度法、地层趋势法、沉积速率法、岩石密度法等等.但这些方法不适合经历了多期抬升与剥蚀、甚至一个地层间断面包含多次构造抬升过程的叠合盆地;并且它们只能计算出一个地层间断面所代表的地层总剥蚀量.而波动分析法不仅能恢复构造抬升、剥蚀的过程,而且能计算出每一个过程造成的剥蚀量.其原理如图2所示,在纵轴右边,沉积速率为正值,表明盆地处于沉积阶段,而纵轴左边,沉积速率为负值,表明盆地处于剥蚀阶段.曲线F所含的整个面积等于沉积地层的残余厚度.

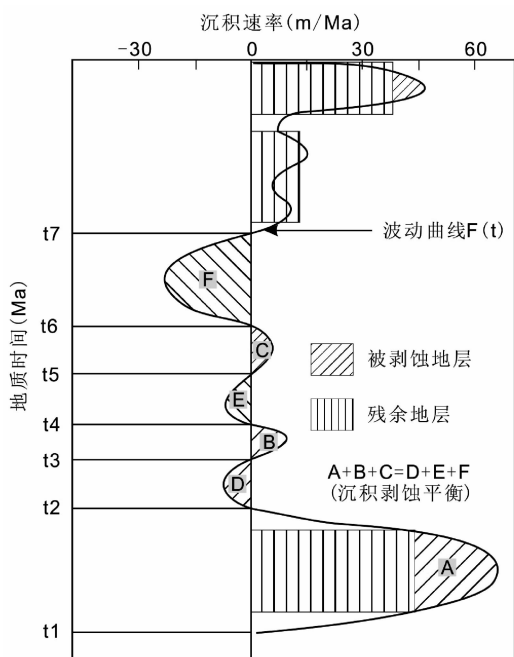


图2 沉积、剥蚀过程平衡原则

Fig. 2 Equilibrium principle of deposition and erosion process

3.1.2 盆地演化阶段划分

我国含油气盆地往往表现为早古生代海相碳酸盐岩盆地、晚古生代海陆交互相和中新生代陆相盆地(含煤盆地、盐湖盆地)多方位叠置,不同地史发展阶段具有不同构造性质和盆地原型,构造演化阶段极其复杂.

波动分析法是在建立波动方程的基础上,利用不同级别波动周期划分出盆地演化阶段.以塔里木盆地塔参1井为例(图3):

按照前述方法建立塔参1井得波动方程,表达式如下:

$$F(t) = 20 + 0.03t \times \sin[2\pi/760 \times (t - 240)]$$

$$G(t) = F(t) + [F(t) - 10]$$

$$\times \sin[2\pi/240 \times (t - 215)]$$

$$L(t) = G(t) + 10e^{0.03G(t)}$$

$$\times \sin[2\pi/100 \times (t - 205)]$$

$$M(t) = L(t) + (20 + 0.033F(t))^{1.83}$$

$$\times \sin[2\pi/30 \times (t - 235)]$$

式中: $F(t)$ 为能量函数, $G(t)$ 、 $L(t)$ 、 $M(t)$ 和 $N(t)$ 均为不同周期的波动曲线(760 Ma、240 Ma、100 Ma和30 Ma为不同周期;240、215、205和235为初相位).

760 Ma的周期受天文因素控制,代表该区地质历史时期的总体沉降水平,它对其它高频的周期波均有一定控制作用,因而也被称为能量函数.240 Ma的周期波受太阳绕银河系旋转周期的控制,它基本上控制着大地构造演化阶段.100 Ma的周期可能受地幔羽活动周期的控制.30 Ma的周期过程反映盆地剥蚀—沉积过程,高频波 $M(t)$ 显示:自古生代以来,塔参1井存在6个主要的不整合面: O_2/AnO_2 、 D_1/AnD_1 、 D_3/AnD_3 、 P/AnP 、 J/AnJ 及 E/AnE .每一个主要的不整合面对应一个重要构造事件和盆地演化阶段.

3.1.3 盆地古应力场分析

盆地沉积量是盆地基底沉降量的反映,盆地基底沉降为沉积物提供了可容空间.如果2口井之间存在相同的沉积周期和初相位,说明它们之间具有相同的沉降量,反之亦然.通过多井对比,按照沉降量多少将沉降量分类.沉降量的差异,是基底不同挠曲程度的反映,基底挠曲程度受控于古应力场.因此,可以通过时间尺度波来研究空间尺度波的规律,即:通过波动周期和相位及传播方向的对比反映基底挠曲程度差异,达到研究古应力场的目的^[11,12].

3.2 盆地沉积充填史研究

3.2.1 地层格架成因分析

地层格架是指盆地内不同地层在垂向上或时间上的排列次序及各时代地层在盆地范围内的展布状况,即盆地内部的沉积实体—地层几何形态及其分布规律.建立地层格架需在了解沉积盆地地层发育特征、建立地层层序并进行盆地范围内地层对比的

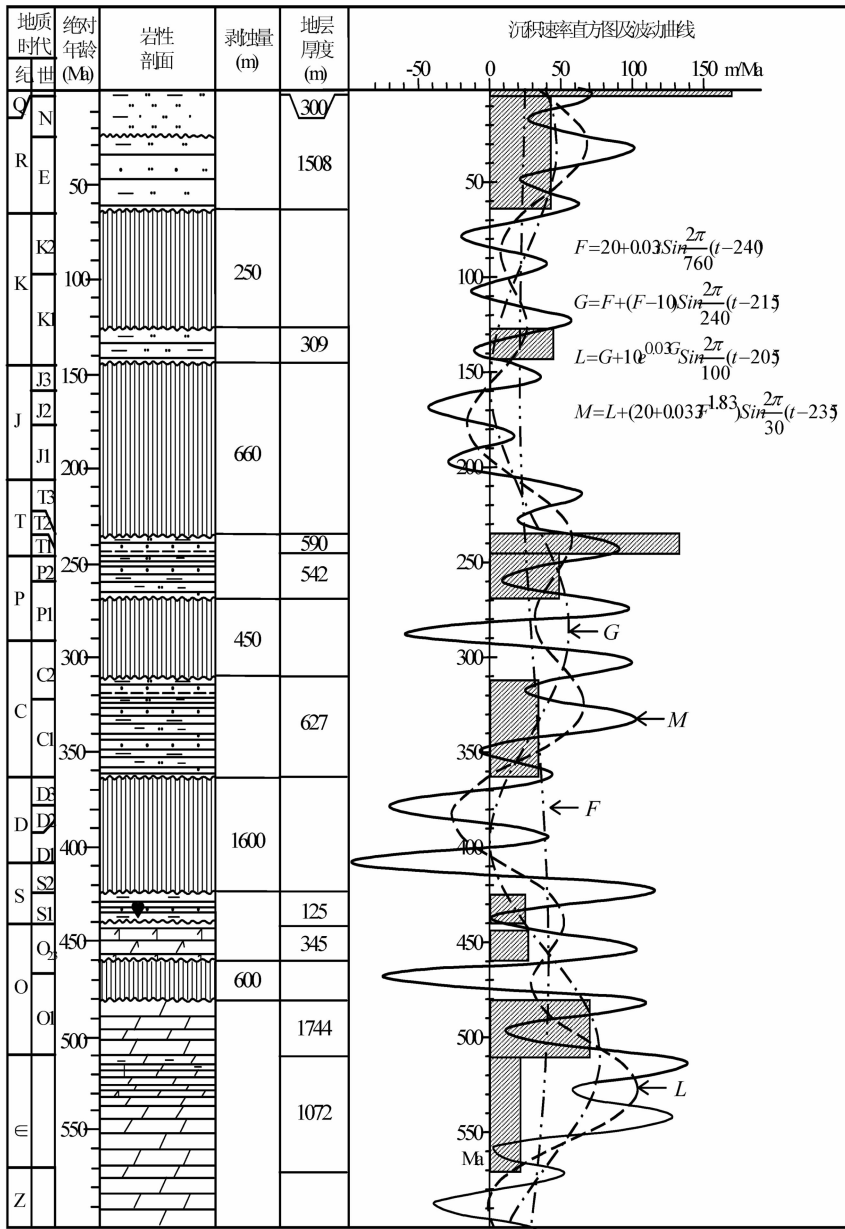


图 3 塔参 1 井沉积波动过程分析图

Fig. 3 Analysis of depositional wave procession of well TC1

基础上进行. 在地层对比之前, 要搞清楚盆地内区域不整合的分布范围、不整合面上下地层的岩性、不整合面下伏地层的保存情况, 划分出构造层. 然后在同一构造层中寻找是否存在局部不整合, 并确定它的分布范围. 从持续时间上看, 盆地的波动过程与地层层序具有一定的对应关系. 能量函数与超层序对应, 反映了盆地的总体沉积水平; 低频波与一级层序和二级层序对应, 其基本上控制了盆地的沉积过程; 高频波与三级层序对应, 三级层序为层序地层学的基本单元, 高频波则是盆地基本的波动过程, 可以影响盆地的沉积剥蚀变化. 波动过程分析不仅可以反映

层序的时空分布, 而且能有效解释地层格架的形成过程, 进行成因分析: 是剥蚀还是沉积间断导致地层缺失, 并以此确定层序时空分布的变化^[13,14].

同时, 高频波周期与三级层序联系密切. 高频波沉积速率高→低→高的变化趋势与海平面的海进→海退→海进变化序列对应. 如: 塔里木盆地志留统塔塔埃塔格组发育了一套沉积速率高→低→高的沉积物, 刚好与海进体系域→高位体系域→海进体系域对应^[13,14].

3.2.2 生储盖组合分析

波动分析法认为: 高频波的振幅值与岩性有一

定的对应关系.将高频波和岩性的关系与高频波和层序地层学的关系结合起来综合分析,可以将波动过程与储层、盖层联系起来.沉积加速度变化与古水深变化控制着生储盖组合分布.在沉积速度较大但加速度为零,即沉积由快变慢的过程中,在大陆斜坡或深水区往往发育烃源岩;当沉积加速度为正值时沉积速率加快,有利于储层的形成,当沉积加速度为负值时有利于盖层的形成^[13].因此,通过分析高频波速度变化,就可以分析生储盖组合.

3.3 盆地埋藏—沉降史研究

盆地埋藏—沉降史分析就是从分析盆地地层层序特征和埋藏状态入手,通过研究反映盆地沉降特征的地层埋藏史曲线等图件来表述盆地沉降过程.

实际上,盆地波动函数建立过程,就是盆地埋藏—沉降史的恢复过程,只是波动分析法中沉降史模型不是传统的分段式的线性曲线^[15],而是用周期波的形式体现^[16],高频波的波形就是盆地地层沉降史曲线.这一方法在多个地区得到良好应用^[17~18].

3.4 油气成藏史研究

波动过程影响着烃源岩的热演化,并控制了烃源区和油气藏的分布.波谷带控制烃源岩发育,波峰带及波谷带与波峰带之间的波动转换带是油气聚集成藏的有利部位.

3.4.1 波动过程控制生烃凹陷的分布与烃源岩成熟度

地质理论和勘探实践证明,沉积沉降中心的转移过程就是主力烃源岩层在空间上迁移的过程;高沉积速率和高埋藏速率期常常是主力烃源层发育期.而沉积沉降中心受波动过程的控制,波谷带就是盆地的沉积沉降中心.波谷带的形成、迁移过程控制了盆地沉积高峰期的出现、沉降中心的转移、主力烃源岩层的迁移及其后期的埋藏生烃过程^[12].

3.4.2 波动过程控制油气藏的分布

沉积沉降中心位于波谷带,是有利的烃源区;波峰带及其与波谷带过渡的枢纽部位—波动转换带发育各种类型的构造圈闭和地层圈闭;而波峰带是油气运移的有利指向.因此,波峰带及其与波谷带过渡的枢纽部位就成为有利于油气聚集成藏的地区^[12,19].如:柴北缘的冷湖3号、4号、5号油田和南八仙油气田及鱼卡油田都分布在这些地区.

4 发展趋势

波动过程分析作为一门新兴学科,已具有一定的理论体系及相应的技术方法,在可预见的将来,以

下3方面将是波动过程分析的主要发展趋势:

(1)进一步发展精细定年技术.波动分析是在地层定年技术基础上进行沉积速率及波动过程研究的方法.现在的定年技术可以精确到0.4 Ma^[20],考虑到滑动窗口的最小长度,波动过程分析的实际分辨率只相当于层序地层学中的三级周期.这样就丢失了地层包含的高频信息.发展精细定年技术,可以利用地层高频信息,使波动过程与四级或五级层序对比,且能够使沉积、测井等高精度地质及地球物理资料在波动分析中得到充分应用^[21],丰富发展波动分析.

(2)开展波动研究与层序地层学精细对比,研究不同大地构造背景下,波相(周期、振幅、速度等)与各种体系域及岩相的对应关系,将物理的波动过程及波相与地质现象直接联系起来,有利于波动过程分析的发展与推广.

(3)将地震资料引入波动过程分析.目前,波动地质学以井资料基础.钻井资料有限,且是以一维方式表现地质过程.如果能引入地震资料,不但资料丰富,使地质研究更精细,而且二维方式能更客观、全面表现地质过程的波动特征.

总之,波动过程分析是研究盆地形成演化的新方法,为石油地质工作者提供了全新的盆地分析思路与工具,但它的研究和发展仍需要新的地质理论和相关技术方法来补充和完善.

参 考 文 献 (References):

- [1] 张伯声.中国地壳的波浪状镶嵌构造[M].北京:科学出版社,1980:1~90.
Zhang B S. Chinese crust undulant and mosaic structure[M]. Beijing: Science Press, 1980, 1~90.
- [2] 张伯声.地壳波浪与镶嵌构造研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1982:103~109.
Zhang B S. Research of crust wave and mosaic structure [M]. Xi'an: Shanxi Science and Techology Press, 1982, 103~109.
- [3] 张一伟.山东西部箕状凹陷形成的探讨—初论地壳波状运动[J].石油学报,1983,4(4):19~25.
Zhang Y W. On the formation of dustpan-shaped depressions in the western part of Shandong—a preliminary discussion on wave-link crustal movement [J]. Acta Petrolei Inaica, 1983, 4 (4): 19~25.
- [4] Hirose A, Lonngren K E. Introduction to wave phenomena [M]. New York: John Wiley & Sons, 1985. 25~73.
- [5] 李延兴,李金岭,张静华,等.弹性板块运动模型研究进展[J].地球物理学进展,2007,22(4):1201~1208.
Li Y X, LI J L, Zhang J H, et al. The research progress in elastic plate motion model [J]. Progress in Geophysics, 2007,

- 22(4): 1201~1208.
- [6] 李延兴,张静华,何建坤,等.由空间大地测量得到的太平洋板块现今构造运动与板内形变应变场[J].地球物理学报,2007,50(2):437~447.
Li Y X, Zhang J H, He J K, *et al.* Current-day tectonic motion and intraplate deformation-strain field obtained from space geodesy in the Pacific Plate[J]. Chinese Journal of geophysics, 2007, 50(2): 0437~0447.
- [7] 李延兴,张静华,何建坤,等.菲律宾海板块的整体旋转线性应变模型与板内形变-应变场.地球物理学报,2006,49(5):1339~1346.
Li Y X, Zhang J H, He J K, *et al.* Integral-rotation linear strain model and intraplate deformation-strain field of the Philippine Sea Plate[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5):1339~1346.
- [8] 金之钧,张一伟,陈书平.塔里木盆地构造-沉积波动过程[J].中国科学 D 辑,2005,35(6):530~539.
Jin Z J, Zhang Y W, Cheng S P. Tectonic and sedimentary fluctuation process of Tarim Basin [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 35(6): 530~539.
- [9] 马宗晋,杜品仁,洪汉净.地球构造与动力学[M].广州:广东科技出版社,2003,506~555.
Ma Z J, Du P R, Hong H Z. Earth structure and dynamics [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2003: 506~555.
- [10] 金之钧,吕修祥,王毅,等.塔里木盆地波动过程极控油规律[M].北京:石油工业出版社,2003.3~6.
Jin Z J, Lu X X, Wang Yi, *et al.* Sedimentary fluctuation process of Tarim Basin and role in controlling oil and gas Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003, 3~6.
- [11] 李京昌.沉积盆地古应力场研究的新方法-波动分析法[J].石油实验地质,1998,20(2):149~151.
Li J C. Undulation analysis served as a new method to the paleostress field study of a sedimentary basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(2): 149~151.
- [12] 金之钧,李京昌,汤良杰,等.柴达木盆地新生代波动过程及与油气关系[J].地质学报,2006,80(3):359~365.
Jin Z J, Li J C, Tang L J, *et al.* Cenozoic wave processes and their relationships to hydrocarbon in the Qaidam Basin [J]. Acta Geological Sinica, 2006, 80(3):359~365.
- [13] 范国章,金之钧,刘国臣,等.塔里木盆地高频波识别及其意义[J].沉积学报,2001,19(2):245~270.
Fan G Z, Jin Z J, Liu G C, *et al.* Identification and significance of the high-frequency waves in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2):245~270.
- [14] 刘国臣.沉积波动过程分析在地层层序分析中的应用—以塔里木盆地为例[J].沉积学报,1998,16(4):14~20.
Liu G C. The applications of sedimentary wave processes in the analysis of stratigraphic sequences—case study of Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(4):14~20.
- [15] 何丽娟,汪集旸.沉积盆地构造热演化研究进展:回顾与展望[J].地球物理学进展,2007,22(4):1215~1219.
He L J, Wang J Y. Tectonic-thermal modeling of sedimentary basins: review and outlook [J]. Progress in Geophysics. 2007,22(4):1215~1219.
- [16] 李京昌,金之钧,刘国臣.盆地沉降史研究的新方法——波动分析[J].地球科学进展,1997,12(5):479~483.
Li J C, Jin Z J, Liu G C. A new method for studying basin sedimentation history: wave analysis[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(5): 479~483.
- [17] Underdown R, Redfern J. Petroleum generation and migration in the Ghadames Basin, north Africa: A two-dimensional basin-modeling study[J]. AAPG Bull. 2008, 92(1):53~76.
- [18] 王颖,张凯,杨光,等.波动分析在恢复埋藏史中的应用—以云龙凹陷为例[J].中国西部油气地质,2006,2(2):181~184.
Wang Y, Zhang K, Yang G, *et al.* The application of wave analysis in recreating sedimentary buried history: case study of Yunlong Depression [J]. West China Petroleum Geosciences, 2006, 2(2): 181~184.
- [19] 汤良杰,马永生,郭彤楼,等.沉积盆地波动过程分析方法与应用[J].海相油气地质,2005,10(4):39~46.
Tang L J, Ma Y S, Guo T L, *et al.* Wave process theory for sedimentary basins: A case of its application in Northeastern Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(4): 39~46.
- [20] 金之钧,范国章,刘国臣.一种地层精细定年的新方法[J].地球科学-中国地质大学学报,1999,24(4):379~382.
Jin Z J, Fan G Z, Liu G C. A new method for accurate dating of strata [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(4): 379~382.
- [21] 王永军,郭泽清,刘卫红,等.柴达木盆地东部三湖地区四系米兰柯维奇旋回分析[J].地球物理学进展,2007,22(2):544~551.
Wang Y J, Guo Z Q, Liu W H, *et al.* Analysis of milankovitch cycles of quaternary in sanhu area, eastern qaidam basin [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 544~551.