

沉积盆地沉积-剥蚀过程定量研究的一种新方法——盆地波动分析应用之一

刘国臣 金之钧 李京昌

(石油大学,北京 102200)

提 要 本文在概述了确定剥蚀厚度方法基础上,提出了沉积盆地沉积-剥蚀过程定量研究的一种新方法——盆地波动过程分析法。该方法从钻井地层厚度资料入手,通过沉降史的研究,恢复地层的原始沉积厚度,结合各组段地层年代框架的标定,计算出各组段的沉积速率,引入数理方法建立盆地演化的波动方程。并进行剖面和平面上的分析对比,实现对沉积-剥蚀过程的定量预测。

关键词 沉积速率 波动过程 频率 滑动窗口 沉积-剥蚀过程

第一作者简介 刘国臣 男 32 讲师 在职博士生 盆地构造分析

1 剥蚀厚度确定方法概述

沉积与剥蚀过程是沉积盆地分析的基本内容之一,也是石油地质勘探首要解决的问题之一。它决定生、储、盖层在空间上的分布,决定勘探对象的含油气远景。很多地质工作者为解决这一问题作了多方面的努力,主要方法包括:

(1) 地层对比法:这是传统的地质方法,该方法是将某一岩性层段剥蚀的地区与邻区该岩性段未被剥蚀的地区进行对比,求得被剥蚀岩层的厚度^[1,2],这时可以考虑厚度递减的原则或采用其它外推法。这种方法的局限是仅对研究程度较高的地区适用,而且这里所讲的未被剥蚀地区仅是一个相对的概念,因此利用这种方法求出的剥蚀量往往小于真正的剥蚀量。

(2) 沉积速率法:使用这种方法的条件是要知道剥蚀面或不整合面代表着一段时限,在这个时限内有某一厚度的沉积被剥蚀了。于是这段时限实际是包括了两部分,一部分是该厚度的沉积岩沉积时所用的时间,另一部分是该厚度的沉积岩被剥蚀所用的时间。如果知道被剥蚀岩层的沉积速率,知道不整合上、下岩层的绝对年龄,就可以算出被剥蚀掉的沉积厚度。在计算时,还需要作出关于剥蚀速率的判别,即剥蚀速率是等于不整合以下岩层的沉积速率,还是等于不整合以上岩层的沉积速率^[3]。在做这种判断时应以研究区的构造运动、主要是升降运动的特征为基础。这种判断也只能是近似的,很可能剥蚀速率既不等于不整合面以下岩层的沉积速率,也不等于不整合面以上岩层的沉积速率。

(3) 利用测井曲线求剥蚀厚度:这是日本学者真柄寅次首先提出的一种方法。其原理是:在正常压实的情况下碎屑岩的孔隙度随深度的变化是连续的,泥质岩是指数曲线,砂质岩是直线。若利用声波测井,密度测井资料或综合解释出的孔隙度曲线观察其变化趋势即可

作出有无剥蚀的判断^{[1] [3]}。经试用,若测井曲线质量较高,且被剥蚀段的厚度比较大时是有效的。但如果剥蚀厚度较小或无法系统地获取岩石的孔隙度及声波时差值或岩层出现局部物性异常,就难以求得准确结果。

(4) 根据镜质体反射率(R_o)的突变求剥蚀量:镜质体反射率是目前应用最广的有机质成熟度指标。它是地温的一次函数,从而也同深度有关。在正常情况下, R_o 值随深度的变化是连续的,渐变的,但有时发生突变。出现这种异常情况的原因有多种,如沉积岩中再循环的镜质体岩体中有局部热源等。地层缺失也是引起 R_o 值不连续的原因之一。在确定了 R_o 值的突变是地层受剥蚀而造成以后,即可根据剥蚀面上、下 R_o 值的差计算被剥蚀的厚度。计算时可采用作图法或解联立方程的办法^[1]。应用此方法时,除上面提到的条件外,需有足够的 R_o 实测数据,这往往是难以达到的。

(5) 利用剥蚀面上下地层的密度差求地层的剥蚀厚度:这一方法的理论基础是物质平衡原则^[3]。用数学公式表达为:

$$H = 2\Delta\rho_{ab}/\rho' a(z) + \rho' b(z)$$

$\Delta\rho_{ab}$ ——上下相邻地层在不整合面接触点上的密度差。

$\rho' a(z), \rho' b(z)$ ——上覆层(a)和下伏层(b)密度函数在不整合面接触点处的一阶导数。

H——下伏地层被剥蚀的厚度。

此外还有磷灰石裂变径迹法,包裹体测温法等。以上方法从沉积过程的连续性及沉积—埋藏过程中岩石物性变化和连续性等方面确定剥蚀厚度,在实际应用中均取得一定的效果。作者在B. И. 施比伊曼教授和张一伟教授的指导下于92~93年应用盆地波动过程分析方法对黄骅拗陷进行了沉积—剥蚀过程的定量研究,取得了较满意的成果,下面简要介绍这一方面的原理、工作步骤及实例分析,供读者讨论。

2 剥蚀过程定量研究方法原理

沉积体是盆地演化最原始、最直接的地质记录,尽管沉积现象千变万化,它总是从不同的侧面反映盆地的构造背景、演化历史,人们也试图从沉积记录——地层剖面上直接寻找盆地的演化规律,但是,很快就证明在地球表面既不存在某一时间内同时发生的全球性运动,也不存在周期性完全重复的过程。然而,诸多事实已证明,地质事件在时间和空间上存在着内在的联系。1982年俄罗斯的B. И. 施比伊曼教授独立发表了论文,提出了同样的观点。认为几种严格周期过程的叠加(干涉)产生不严格的周期现象。也就是说,我们所见到的似周期而非周期的被称为沉积旋回、沉积韵律的现象,是若干个有一定周期和振幅的波动过程叠加的结果^[6]。

天文学家已经证明太阳系绕银河系旋转一周的时间为2亿年(200百万年),这一周期运动对地球表面的影响是很大的。在2亿年的时间内地球的长短半径交换位置。所以2亿年这一周期在地球演化过程中是一个重要周期,研究结果表明,它控制着一个盆地从生成到死亡,是盆地一个完整生命期^[7]。此外,人们在研究地幔对流时发现地幔的对流并不是沿着一个方向进行,经过一段时间后对流方向发生改变,这个时间周期被证明为60~70百万年。这是影响盆地演化的另一重要周期。

德国和美国两个古生物学家费施尔与阿尔土拉在详细研究了生物群的演化以后指出,

在生物演化过程中,30个百万年左右出现一个生物演化周期,我们把这个周期叫费施尔-阿尔土拉周期。另外,通过研究表明,能够影响盆地发展演化的还有10、7、5、3、1、0.65(单位为百万年)的周期。实际上在自然界的演化中还有许多高频周期,例如地球的公转与自转周期。

在地球的公转与自转过程中,偏心率、黄赤交角、岁差有规律地发生变化,其周期分别为10万年、4万年、2万年,这就是著名的米兰科维奇理论^[5]。这一理论为我们研究沉积盆地高频波的变化规律,预测生油层和储、盖层的空间变化规律奠定了理论基础。总之沉积盆地的生成与消亡,沉积与剥蚀乃至粒度层序的变化,都受着上述条件周期运动的共同控制。如果我们通过已知地层资料(露头剖面、钻井、测井资料)建立描述盆地沉积-剥蚀过程的波动方程 $F(t)$,那么,现在地层可观测原始厚度为:

$$\int_{t_0} F(t)$$

其中, t_0 为盆地开始生成的时间, t 为盆地结束的时间,单位百万年。沉积间断地层剥蚀厚度为:

$$\int_{t_1}^{t_2} F(t)$$

其中, t_1 为沉积间断开始时间, t_2 沉积间断结束时间。

上述原理我们可以结合图1(沉积-剥蚀过程平衡剖面)进一步说明。图中打斜线的直方图是在剖面上所测得的某些组段的沉积速率。因为时间对速率积分为沉积厚度(图中直方图之面积)。所以曲线X所含的整个面积等于沉积地层的厚度。在时间1,2沉积了比现在观测要多的沉积岩,部分沉积岩在时间3~4时被剥蚀了。在时间5时沉积了新的岩层,而这些岩层在时间6时又全部被剥蚀了(平等直线表示的部分)。在时间7内沉积的岩层在时间8开始就剥蚀掉了,在时间8~9中剥蚀了剩余的下部岩层,图中4用圆圈表示的部分。因此该方法有其明显的优点,是沉积盆地沉积与剥蚀过程定量研究的一种新方法。该方法的不足之处是对地层年代框架的标定要求较高,这方面的工作往往要通过地层古生物专家的努力才能实现。总之,该方法是前述七种方法一个非常有益的补充,前述方法中沉积物性变化的资料,可以作为该方法中恢复原始沉积厚度的基础。

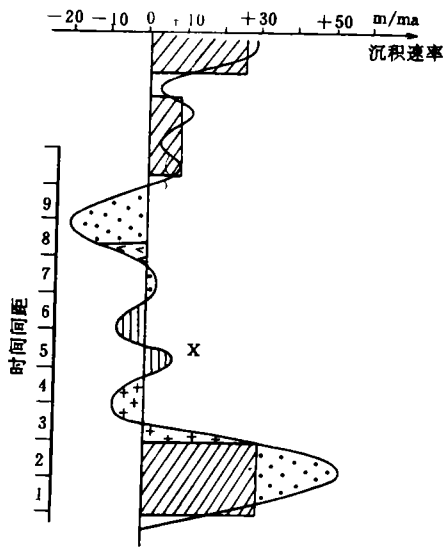


图1 沉积剥蚀过程平衡原则
Fig. 1 A principle for the balance of depositional and erosional processes

3 实现步骤

沉积盆地波动过程研究方法是由 Г. П. 缅斯尼高娃和 В. И. 施比伊曼共同创立的⁽⁸⁾⁽⁷⁾。主要包括三方面的内容,即资料准备(包括原始资料的收集和整理),波动方程的建立以及研究结果的分析与对比,具体步骤如下:

3.1 研究区的选择

当所要研究的盆地确定下来以后,就要将盆地划分为几个小区,小区的选择、划分要建立在地质情况了解的基础上,各小区的分布尽可能均匀,划分时主要依据构造位置及地层发育情况。我们在对黄骅拗陷进行波动地质学研究时,参考前人研究成果,将陆地部分划分为九个研究小区,其目的就是将各小区最终研究成果进行对比,从而得出波的传播方向、周期、振幅等的变化规律。

3.2 对每个研究小区的原始资料进行统计

在这里所谓的原始资料主要是指综合录井图,同时应广泛收集与研究区有关的其它地质资料。其中,最主要的是对各组、段厚度进行统计,厚度资料的统计结果直接影响着波动曲线方程⁽⁴⁾。

3.3 将岩性-厚度剖面转化为岩性-时间剖面

在岩性柱状图上反映的是岩性-厚度剖面,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。对地质年代的划分,不同学者有不同的方案,我们在选择时最好选取那些经过研究区实际资料检验过的最新研究成果。

在绘制岩性-时间剖面时不应忘记,不同研究小区所选择的时间坐标是一致的,即用同一个年龄值去卡某一组、段的顶底界,对于沉积间断在没有更确切资料的情况下,间断的起止时间做统一的处理以便于对比、分析(刘国臣,1994)。

3.4 恢复原始厚度、计算沉积速率

因为目前所观察到的各组、段厚度是经过地质历史时期压实的厚度,为计算沉积速率还必须恢复其原始厚度,恢复原始厚度要有一个标准,我们的标准定为恢复到埋深100m处,将各组、段的原始厚度除以各组、段的沉积时间,就可以获得各组、段沉积速率,以横坐标作为沉积速率、纵坐标作为时间,便可绘制出各组、段的沉积速率直方图(图2)。

3.5 绘制沉积速率曲线

仅仅从沉积速率直方图上观察不出有规律的波动特征,为此,必须对沉积速率直方图进行数学处理,使之变成有周期性的曲线。这里我们应用滑动平均的办法,即设定一个滑动窗口,对窗口内不同组、段的沉积速率取平均值,并将这一平均值记录在窗口中央所对应的位置上(图2)。

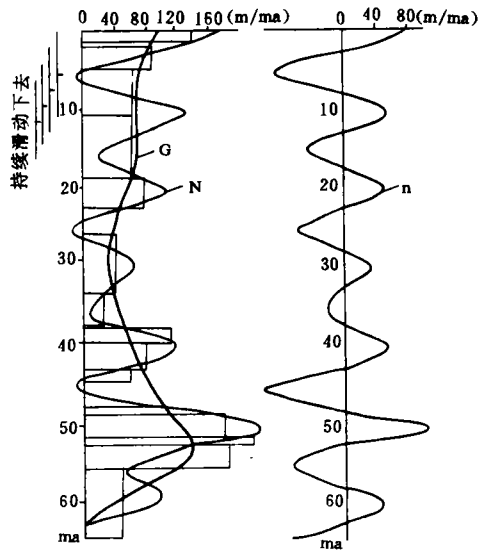
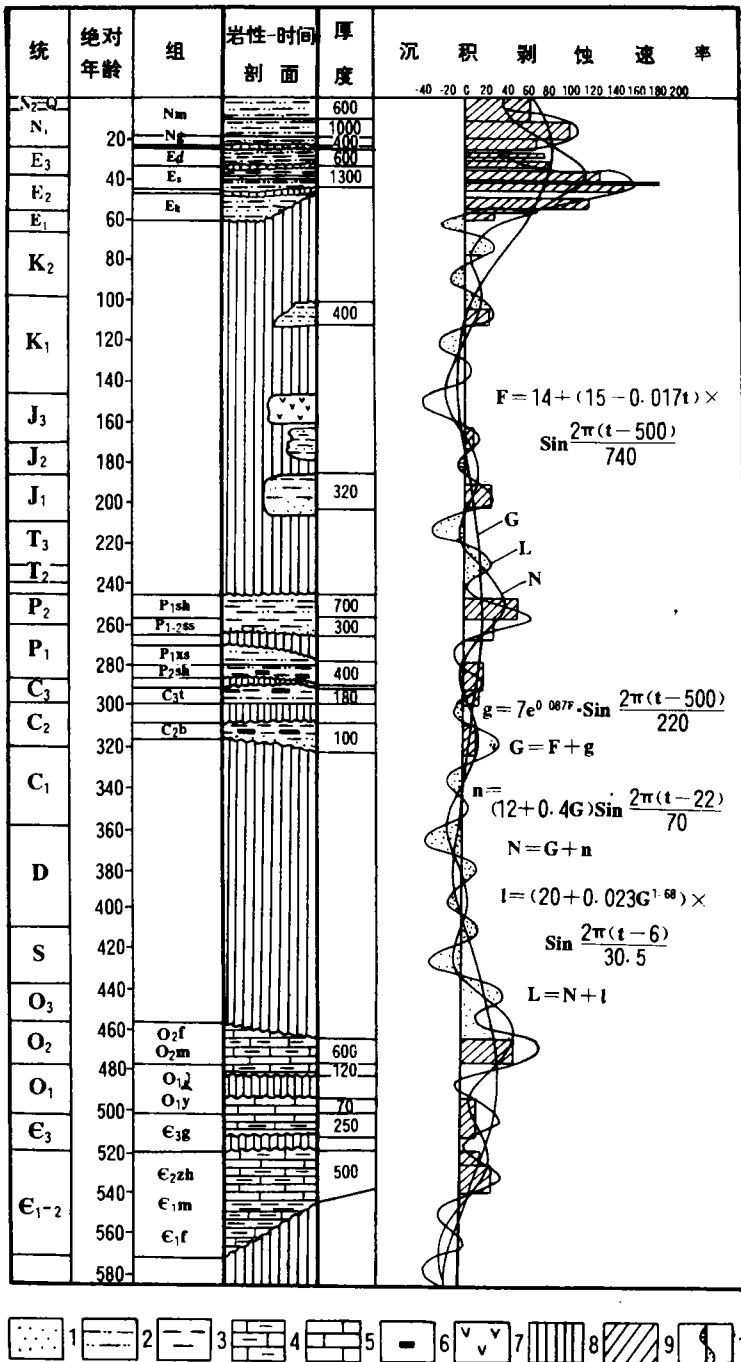


图2 滑动窗口使用方法示意图
Fig. 2 A sketch map showing the use of sliding window



- 1. 砂岩 2. 砂质泥岩 3. 泥页岩 4. 泥质灰岩 5. 灰岩 6. 膏岩
- 7. 火山岩 8. 地层缺失 9. 沉积速率直方图 10. 沉积-剥蚀过程

图3 华北地台黄骅地区显生宙演化分析图

Fig. 3 Analysis map of the Phanerozoic evolution of of Huanghua region in Huabei Platform

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,无疑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,从图3中可以看 $n=N-G$ 就是一条严格周期波,如果所做出的曲线N波、G波之差不是周期波,则变换滑动窗口的尺寸,直至找到这样一个周期波为止,周期波n的求得,可用作图法来实现。如果我们知道G的方程,周期波n的方程是不难建立的,则曲线W方程为 $W=G+n=F(t)$ 、是时间的函数。F(t)一旦确定就可据2中的公式计算剥蚀量。

总之,利用上述方法可以分解出不同周期的周期波来。

4 沉积与剥蚀过程分析实例

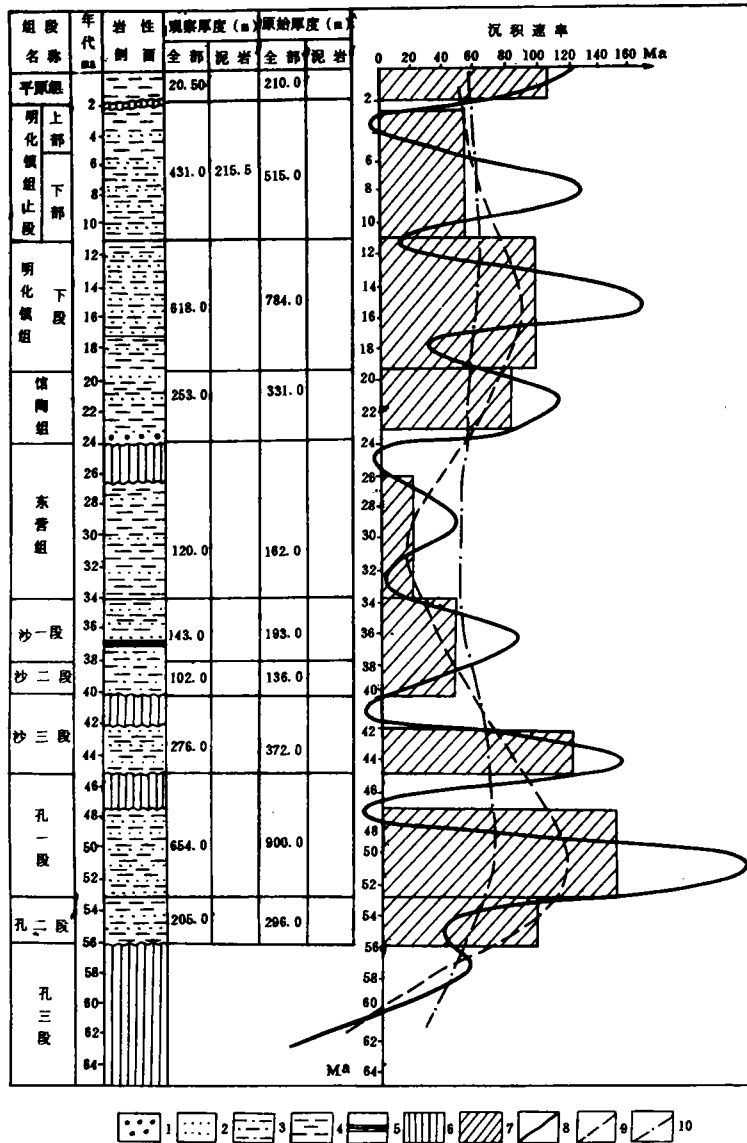
作者在B.И.施比伊曼教授指导下对黄骅拗陷进行了波动过程分析。图3是所取得的成果之一。从图中可看出整个拗陷有沉积记录的历史时期是很短的,对于这一部分的研究表明,其形成发展史可以用四个波动方程来描述(更高频率的波在另外更大的研究尺度上才能分析)。周期最长的波($T=740$ 百万年)叫做能量函数F,它决定着其它的每一个波发展演化的不同时间内的振幅(图3),以220百万年为周期的波g决定着盆地内沉积岩的形成与剥失。下古生代盆地在志留纪结束沉积,在这以后长时期遭受剥失,使中奥陶以上的地层全部被剥失掉,对于今天无沉积岩记录的盆地发展阶段,用波动过程延推过去,可以解释这一过程发生的情况。从g波的分析可知,晚古生代及侏罗纪时是一个统一的地质过程,形成了晚古生代及中生代盆地。而对于区域内主要远景层系第三系,构成了新生代盆地,该盆地仍在继续沉积,其生命历程仅仅才度过了一半。

以30和70百万年为周期的波决定着每一个盆地不同地层沉积的相对速率。不同时期沉积间断的时间可以从代表沉积-剥蚀过程的L曲线(图3)上直接得到。例如对于早古生代奥陶纪的灰岩到底剥失了多少是一个没有很好解决的问题。我们可用

$$H = \left| \int_{182}^{35} L(t) dt \right|$$

公式求出原始沉积厚度然后再通过 $n=H_{\text{原始}}-H_{\text{观测}}$ 求得剥蚀量。利用该方法所求得的剥蚀量为:220m(原始厚度)。同样,华北地台是否有三叠系沉积,一直是有争议问题,据我们的研究,三叠系时期245~222Ma期间曾有过大量沉积过程,但222~208Ma期间以剥蚀为主,现存厚度在黄骅地区计算为15.5m,当然各个地区的沉积厚度会有变化,这里没做深入研究。同理可以得到下白垩统的剥失厚度为128m。该方法的另一个显著的优点是可以回答在长时间的地层缺失过程中是否有过沉积。如:华北地台上奥陶到下石炭是否有过沉积,一直是个没有解决的问题,图3可见在这一过程中曾经发生过3次小规模沉积,但因为在这过程中盆地以上升为主,所以到最后剥蚀殆尽。

盆地进入新生代以来以整体下降接受沉积为主。其中也有多次小规模沉积间断,但图3中的L波其周期为30百万年。故短时间的间断在L波中不能有效地反映出来。图4是黄骅拗陷舍女寺地区新生代沉积-剥蚀过程分析图。其中曲线S是叠加在曲线L、N之上的周期为7.2百万年的曲线,该曲线代表了舍女寺地区新生代的沉积-剥蚀过程,其中孔店期末,沙三晚期、东营期末和明化镇期末的四个沉积间断,在曲线S上均得到较好的反映,只是



- 1. 砾岩 2. 砂岩 3. 砂质泥岩 4. 泥岩 5. 油页岩 6. 地层缺失 7. 沉积速率直方图
- 8. 以 7.2Ma 为周期的波 9. 以 34Ma 为周期的波 10. 以 60~65Ma 为周期的波

说明 周期波 $g = (4.25N \sim 180) \sin \frac{2\pi}{7.2}(t-34)$ $S = L + g$

周期波 $ll = A \sin \frac{2\pi}{34}(t-8) A$ 随时间减小而减弱 $L = N + 1$

A_n 与 N 幂关系, 但由于 N 值变化很小, 所以近似的用线性关系来表示

图 4 舍女寺地区新生代沉积-剥蚀过程分析图

Fig. 4 Analysis map of Cenozoic depositional and erosional processes in the sheusi region

在曲线S上,孔店末期和明化镇末期的剥蚀过程出现的早一些,另有一些时期,如东营组早期,大约在33.5百万年时间可能出现短时间的沉积间断。更短时间的沉积间断只有在高频波上才能反映出来,我们正在进行这方面的研究工作,关键在于更小沉积单元顶底界面时间的确定。

5 结 论

沉积与剥蚀过程的研究是沉积盆地分析的基本内容之一,但因对于沉积间断的研究缺乏直接的证据,使得人们对于沉积间断时间,特别是对剥蚀作用的起止时间和具体的沉积—剥蚀过程的研究感到十分困难。沉积盆地波动过程分析方法为解决这一问题提供了一种新的手段。该方法主要从反映沉积—剥蚀过程的直接地质记录——沉积层的厚度出发,借助于地层古生物、地层同位素年龄等资料确定沉积层的沉积速率,利用数理方法建立沉积速率变化的波动方程,进而求得地层剥蚀量和预测无沉积记录层段的沉积—剥蚀过程。在这一过程中,原始资料的收集与整理是能否取得可靠结果的关键。而滑动窗口的使用是我们从表面上无规律的沉积速率直方图上分解出周期波的有效手段之一,是实现波动过程量化描述的桥梁。而对于短时间的沉积间断的研究,主要是靠对高频波的研究来实现。这部分工作正在探索之中。

本文是在张一伟教授和 В. И. 施比伊曼教授的指导下完成的,大港石油管理局为此项研究提供基础资料,李建忠同志参加了研究工作,在此一并表示感谢。

收稿日期:1994年10月20日

参 考 文 献

- [1] 李泰明,1989,石油地质过程定量研究概论,北京:石油大学出版社。
- [2] 庞雄奇、陈章明、陈发景,1993,含油气盆地地史,热史生烃排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价,北京:地质出版社。
- [3] 陆明德、田时芸,1991,石油天然气数学地质,北京:中国地质大学出版社。
- [4] 刘国臣、金之钧、李京昌,1994,波动地质学研究中资料的收集与整理,石油大学学报,18(6)。
- [5] 徐钦琦,1994,天文学气象学,地球科学进展,9(2):82~83。
- [6] Шпильман В. И. Количественный прогноз нефтегазоносности. М.:Недра, 1982.
- [7] Мясникова Г. П. Динамика развития осадочных бассейнов как основа оценки их нефтегазоносности. Автореферат докторской диссертации, М., 1991.
- [8] Мясникова Г. П. И. Шпильман В. И. Волновая эволюция осадочных бассейнов. Труды ЗапсибНИПИ. Тюмень, 1989.

A New Method on the Quantitative Study of Depositional and Erosional Processes of Sedimentary Basins

——An Application of Wave Process Analysis during Basin Evolution

Liu Guochen Jin Zhijun and Li Jingchang

(University of Petroleum, Beijing 102200)

Abstract

The authors established a new method for the quantitative study of the depositional and erosional processes of sedimentary basins by the analysis method of wave process in basin evolution combining with the case study of the Huanghua Depression directed by Prof. Vladimir Shpilman. Prof. Zhang Yiwei and Prof. Vladimir Shpilman pointed out in 1982~1983 that the interference of a series of identical cyclic processes may result in a non-cyclic process, i. e., the observed spacious cyclic process called as sedimentary cycle or rhythm is the interference result of a number of wave processes with a certain cycle and amplitude.

Astronomy has proven that the cycle of solar system's revolution around the Galaxy is 200 Ma, and geoscience shows that 60~70Ma, 30Ma are the important cycles to the earth evolution, mantle's convection and organic evolution. These cycles control the evolution of a sedimentary basin, and there are still other cycles, such as 10, 7, 5, 3, 1, 0.65Ma which affect the evolution of the basin. During the revolution and rotation of the earth, the obliquity of the ecliptic and precession change regularly with cycles of 10×10^4 , 4×10^4 , 2×10^4 years. This is the famous Milankovitch theory which supports to study the high frequency wave processes and to predict the distribution of source rocks, reservoirs and cover beds.

If Function $F(t)$ that can describe the depositional and erosional processes of a basin has been obtained by the study of strata data, including outcrop, drilling and well logging, the primary thickness of the observed strata is $H = \int_{t_0} F(t)$, here t_0 and t refer to the starting and ending times of basin evolution, respectively, whereas the eroded thickness of a hiatus is $h = \int_{t_1}^{t_2} F(t)$, here t_1 and t_2 refer to the starting and ending times of the hiatus, respectively.

In order to complete the studies mentioned above, the following steps are prerequisite, (1) the selection of areas for study, (2) the statistics of raw data for every area, (3) the transformation from lithology thickness section to Lithology-time section, (4) restoring the primary thickness and calculating the depositional rate, (5) drawing the curve of depositional rate, (6) establishing the wave equation. The reliability of raw data is the key to success. The restoration of primary thickness and calculation of depositional rate require the study of subsidence history and the determination of strata age. And the use of sliding window is the effective means to separate cyclic waves.

The analysis and calculation have proven that the erosion quantity of O_2 in the Huanghua area of the Huabei platform is 220m, whether or not there is a depositional process in the Triassic in the Huabei platform is still an argument. It is made out by us that there is a 15.5m of the Triassic deposit and erosional quantity of the platform in the Cretaceous is 128m. Another obvious advantage of this method is that it can tell you whether or not there is a depositional process during the period of hiatus, for example, three small scale depositional processes from O_3 to C_1 may be seen from Fig. 3.