

海相碳酸盐岩层系不整合量化研究及其意义

——以四川盆地北部二叠系为例

李儒峰¹⁾, 郭彤楼²⁾, 汤良杰¹⁾, 陈国飞¹⁾

1) 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京, 102249;

2) 中国石油化工股份有限公司南方油气勘探开发公司, 成都, 610041

内容提要:本文以四川盆地北部二叠系为例, 将层序地层分析和沉积盆地波动过程分析相结合, 提出了运用沉积波动过程分析研究沉积记录不完整性量化方法, 该方法可以相对准确地定量描述盆地形成演化过程中的升降运动, 恢复无地层“记录”中的沉积-剥蚀过程, 进而定量分析盆地的沉积-剥蚀过程、计算沉积间断(不整合)内的地层剥蚀量、认识其时空分布规律。同时, 通过实际钻井及“人工井”的波动过程分析, 结合地震剖面解释成果, 可以作出主要不整合的空间分布图、各层位的剥蚀厚度图和原始厚度图、各期构造的剥蚀量分布图等重要基础图件, 为盆地进一步系统分析及盆地模拟打好基础, 结合沉积相研究及构造样式分析还可分析盆地沉积中心、生油层、盖层、储层等在时空中的变化规律。由于沉积盆地的升降波动过程直接影响着盆地的埋藏史、热史和生、排烃史, 因此通过沉积波动过程的系统分析不仅能正确建立盆地演化的地质模型, 还可以正确认识油气形成与分布规律, 有效指导油气勘探。

关键词:不整合; 剥蚀量; 波动过程分析; 二叠系; 四川盆地北部

1 不整合量化研究的新方法——沉积盆地波动过程分析

沉积间断(discontinuity)所导致的沉积记录不完整性极大地影响了地质现象的解释, 为此国外有许多学者在认识到地层剖面存在有沉积间断的前提下, 从不同角度提出了各自的估测方法, 但都有其自身的局限性, 如: 长期-短期沉积速率比值法(Sadler, 1981; Sadler and Strauss, 1990)受到同位素测年精度的制约, 准确测定短期沉积速率是这一方法的关键; 剖面厚度/全球同期平均沉积厚度比值法(McShea and Raup, 1986; Wetzel and Aigner, 1986)仅适合于对地层完整性做定性估测; 浅穴化石定性估测法(Wetzel and Aigner, 1986)仅能测定海相地层, 对无沉积作用产生的沉积间断无法测定; 古地磁法(Algeo, 1993)则要求地层剖面必须具有初始碎屑剩余磁性等。

沉积盆地波动过程分析的研究方法主要是由缅斯尼科娃、施比伊曼创立(Мясникова and Шпиллман,

1989; Мясникова, 1991)。金之钧在 1992 年将这种方法介绍到国内, 并领导科研集体在后续的研究工作中从波动过程分析软件开发、高频波动过程分析、波动特征与层序地层相关性研究以及沉积盆地波动过程与油气的关系等方面完善、丰富和发展了这一方法和理论, 基本形成新的含油气盆地研究方法, 在国内外盆地研究领域独树一帜(刘国臣等, 1994; 金之钧等, 1996; 李儒峰等, 2004a, 2004b)。

Кабышев Б. П. (1995)在世界 30 个含油气区内随机选取 170 多个不同类型及储量级别地层油气田资料做了分析, 发现海西期沉积间断往往在前中生代或前二叠纪不整合面以下的地层圈闭形成中起重要作用。在与成藏有关的侵蚀强度及沉积间断时间方面, 强侵蚀间断占 44%, 中等及弱侵蚀间断分别为 24% 和 32%, 但作者以统计资料为基础, 以定性研究为主, 缺乏对沉积间断的定量研究。由此可见, 对于沉积间断和地层剖面不完整性的研究缺乏从新的地质理论到新技术方法、从定性到定量的研究。

沉积盆地的波动过程是指通过一些周期的、似

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40672143, 40472107, 40172076)、国家计划“973”项目(编号 2005CB43305)及石油天然气成藏机理教育部重点实验室开放基金项目(编号 2004-2)资助成果。

收稿日期: 2007-04-30; 改回日期: 2007-06-25; 责任编辑: 周健。

作者简介: 李儒峰, 男, 1962 年生。副教授, 主要从事层序地层学和储层沉积学的研究。通讯地址: 102200, 北京昌平区, 中国石油大学盆地与油藏研究中心; 电话 010-89733423; 传真 010-89733423; Email: lirufeng717@163.com。

周期的、非周期的地质现象,应用特殊的工作方法分解出一些有规律的波动过程,并建立波动方程,从而达到定量预测的目的。沉积波动过程分析方法的主要步骤是在详细整理地质资料(钻井岩心、测井资料、地震剖面、野外露头观测与描述)的基础上,将地层深度-岩性剖面转化成时间-沉积速度剖面,在时间-沉积速度剖面上使用滑动窗口分解出一系列的周期波,确定出它们的周期、振幅及零相位,建立它们的波动方程。

波动是板块内部盆地的主要运动形式,盆地的沉积-剥蚀过程、沉积沉降中心的迁移及盆地的形成演化历史等可以通过对盆地的波动特征的研究得到解释。通过波动过程分析,可以在给定的地质时间内推断出沉积-剥蚀的起止时间,重现和预测沉积-剥蚀过程。但是,波动过程分析的准确程度主要受研究地区年代地层格架精细程度的控制。大尺度的年代地层格架可以依据同位素、古地磁和古生物等资料建立,在生物地层无法分辨的地层格架内,依据层序地层学方法使精细年代地层格架的建立成为可能。因此,利用层序地层学的研究,建立不同级别的层序地层格架,可以在不同精度的时间格架内进行波动过程分析,能够比较精确地再现盆地在地史时期沉积-剥蚀过程,计算出地层剥蚀厚度,为不同级别沉积间断面(沉积层序界面)的识别提供了定量研究方法。

层序地层学和波动特征分析理论方法既有一定的内在联系,又有本质的区别:前者主要强调海(湖)平面变化对沉积体分布规律的影响;后者主要是研究地壳垂直运动对地层形成分布的控制作用。但是,由于二者都受地球演化节律宏观因素的控制,因此,必然导致层序地层组成要素与波动特征参数之间有一定的相关性。

本文以四川盆地北部二叠系为例,将层序地层研究与沉积盆地波动过程分析相结合,解决不整合的量化研究问题。定量研究地史时期内盆地的沉积-剥蚀过程、计算不同级别沉积间断内的地层剥蚀厚度、认识沉积间断时空分布规律,为进一步研究沉积间断和地层剥蚀对油气形成与分布的控制规律打下良好的基础。

2 四川盆地北部二叠系不整合的波动特征

2.1 不整合的结构特征

在露头区下二叠统顶界的不整合表现为下二叠

统茅口组与上二叠统吴家坪组之间的不整合。不整合界面起伏不平,有明显的破碎带和黄铁矿,缺失茅口组晚期地层,由东吴运动形成。不整合界面之下的茅口组下部为灰色石灰岩、泥质灰岩夹黑色页岩,具明显眼球状构造;中部为灰色厚层块状灰岩,有时含少量泥质;上部为灰白色块状灰岩、生物灰岩,含硅质结核及方解石晶体;顶部为棕灰色石灰岩,夹生物灰岩,含少量泥质,含少量黄铁矿。不整合界面之上的龙潭组为一套海陆过渡相含煤、铁沉积。主要为深灰、灰黑色泥页岩、岩屑砂岩夹煤层,含黄铁矿结核,有时夹石灰岩、硅质岩薄层或透镜体。向川北、川东一带,逐渐过渡为浅海碳酸盐岩沉积,称吴家坪组,其岩性主要为石灰岩,含硅质灰岩,有时夹硅质层,底部见铝土质粘土岩、碳质页岩夹薄煤层,厚度为 50~200 m。

在地震剖面上追踪相当于上二叠统底部反射,反射特征明显,能量强,连续性好,由 2~3 个强相位组成,第一强相位强弱变化不均,第二、三强相位连续性好,易追踪,在断凹处表现为双弧同相轴,是全区最易识别的标准层反射。

2.2 不整合的波动特征

(1)旺苍剖面波动过程分析:分析 20 Ma 周期的波动曲线特征(图 1),得出旺苍地区二叠纪(230~270 Ma)沉积-剥蚀演化规律为:波动曲线始终位于基准线右侧,表明该时期为沉积期,但在梁山组与栖霞组之间(251 Ma)以及茅口组与吴家坪组之间(236 Ma),波动曲线表现为位于基准线右侧“波谷”,说明该时期为一低速沉积期或者它们之间存在沉积间断,茅口组与吴家坪组之间沉积间断在露头剖面上表现明显。

(2)南江剖面波动过程分析:分析该剖面 20 Ma 的波动曲线的特征(图 1),得出南江地区二叠纪(230~270 Ma)沉积-剥蚀演化规律为:波动曲线主要位于基准线右侧,以沉积为主,但在茅口组在基准线右侧存在较大波谷;波动曲线在梁山组与栖霞组之间表现为波谷,存在剥蚀;这是因为梁山组为大陆风化物沉积,由于栖霞期大规模海侵的到来,沉积了碳酸盐岩,故而形成二者的不整合接触。茅口组与吴家坪组之间沉积间断在波动曲线上表现为波谷,茅口组顶部遭受强烈剥蚀。

(3)镇巴剖面波动过程分析:分析镇巴剖面 20 Ma 周期的波动曲线特征(图 1),得出该地区沉积-剥蚀演化规律如下:在二叠纪-三叠纪,二者波动曲线特征的差异主要表现为:二叠系的茅口组与吴家

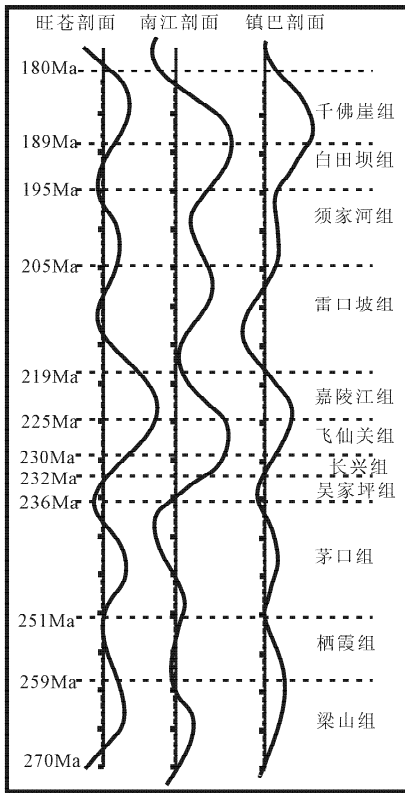


图 1 四川盆地北部露头剖面 20 Ma 波动曲线对比
Fig. 1 The correlation of 20 Ma outcrop wave curves of the Permian in the studying area

坪组之间以及三叠系的雷口坡组与须家河组之间,镇巴剖面波动曲线上反映出,其剥蚀作用比旺苍剖面强烈,露头剖面上表现为茅口组与吴家坪组之间沉积间断规模大于旺仓剖面;以及镇巴剖面缺失雷口坡组。

(4)露头剖面波动曲线对比:从旺苍剖面—南江剖面—镇巴剖面二叠纪 20 Ma 波动曲线对比来看(图 1),发现旺苍剖面波动曲线与南江剖面波动曲线的相关性较好,而二者与镇巴剖面波动曲线差异较大。在二叠纪,南江剖面剥蚀作用强于旺苍剖面和镇巴剖面,从梁山组—茅口组,南江剖面的沉积速率与旺苍剖面相近,比镇巴剖面略高。从吴家坪组—长兴组(大隆组),旺苍剖面受构造运动影响大,其沉积速率明显低于南江剖面和镇巴剖面;从时间上看,旺苍剖面波动曲线领先南江剖面 4 个相位,因此可以推测旺苍地层比南江地层更早地遭受构造运动。在早二叠世海侵初期,在研究区普遍沉积了河湖沼泽相的泥页岩,因此沉积速率较慢。中期(栖霞期)为浅海台地相灰岩沉积,覆盖整个研究区,在早二叠世晚期(茅口中晚期),遭受东吴运动导致沉积环境差异。因此这 3 条剖面上在该期遭受了不同程

度的剥蚀。镇巴剖面离大巴山较近,所以其受米苍山和大巴山共同构造作用的影响,造成其与旺苍剖面和南江剖面不同之处就是雷口坡组没有沉积或剥蚀殆尽。利用波动曲线对比,可以看出构造运动的强弱,同时根据其沉积速率的变化来推测沉积环境的变化,对研究油气成藏条件有重要的意义。

3 沉积波动过程分析方法计算不整合的剥蚀量

沉积记录的不完整主要表现为沉积层序界面,即为不同级别的沉积间断,因此,对沉积记录不完整性的量化研究的实质是对地层中沉积间断的量化研究,即确定形成各级沉积层序界面(沉积间断)形成时间和地层剥蚀厚度。

3.1 沉积盆地波动过程分析法计算剥蚀量

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:

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

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

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

其中, t_1 为沉积间断开始时间(Ma), t_2 为沉积间断结束的时间(Ma)。

对于上述原理,可以结合图 2 的沉积—剥蚀过程平衡剖面进一步加以说明,图中打斜线的直方图

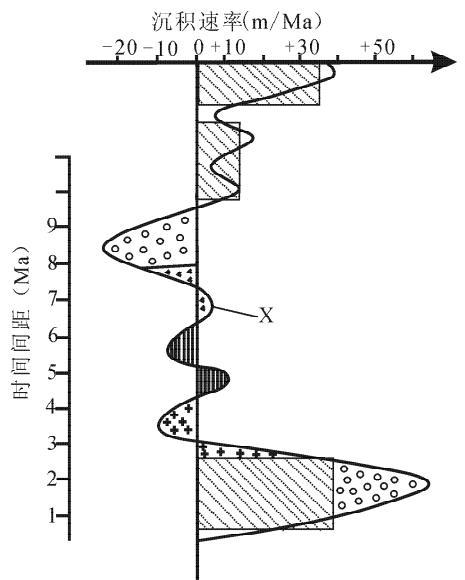


图 2 沉积剥蚀过程平衡原则图
Fig. 2 The map of equilibrium principle in the wave process

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(图中直方图面积),所以曲线 X 所含的整个面积等于沉积地层的厚度。在 1、2 时间段沉积了比现在观测的地层要多,部分地层在 3~4 时间段被剥蚀了。在 7 时间段沉积的岩层在时间 8 时间段开始就剥蚀掉了,在 8~9 时间段中剥蚀了剩余的下部岩层(图中圆点表示的部分)。该方法的优点除给出量化的概念以外,还能研究不整合的形成过程,即沉积过程或剥蚀过程的起止时间。对于那些无沉积记录的层段,可以推测其沉积—剥蚀过程,这是其他方法无法比拟的(图 2),是沉积盆地沉积与剥蚀过程定量研究的一种新方法,运用该方法定量地计算了四川盆地北缘上—下二叠统之间不整合面的地层剥蚀量(表 1)。

表 1 四川盆地北部波动过程分析法计算剥蚀量
Table 1 The denuded amount by analysis of wave process in the Northern of Sichuan Basin

| 剖面名称 | P_2/P_1 不整合剥蚀厚度(m) |
|----------|----------------------|
| 旺苍剖面 | 36 |
| 南江剖面 | 50 |
| 镇巴剖面 | 44 |
| 川巴 88 井 | 83 |
| 川涪 190 井 | 93 |
| 河坝 1 井 | 85 |
| 川涪 82 井 | 88 |
| 龙 4 井 | 39 |
| 扁 1 井 | 38 |

3.2 四川盆地北部不整合剥蚀量分布规律

根据波动分析方法计算出露头 and 井的剥蚀量,然后综合分析区域地质资料、地震资料、岩相古地理资料,利用插值法,编制了盆地下二叠统顶部的剥蚀量平面分布图。从下二叠统剥蚀厚度图(图 3)可知,剥蚀厚度范围为 36~93 m,剥蚀厚度变化不大,通南巴构造带剥蚀厚度最大,为 93 m(川涪 190 井),轴向为北东—南西方向;西部旺苍地区剥蚀厚度在 35 m 左右,剥蚀厚度较小;中部南江桥亭剖面剥蚀厚度为 50 m;川东北宣汉—达县地区剥蚀厚度在 40~50 m 之间。

4 波动过程分析方法研究不整合的意义

运用沉积波动过程分析方法可以准确地定量描

述盆地形成演化过程中的升降运动,恢复无地层“记录”中的沉积—剥蚀过程。通过许多实际钻井及“人工井”的波动过程分析,结合地震剖面解释成果,可以作出主要不整合的空间分布图、各层位的剥蚀厚度图和原始厚度图、各期构造的剥蚀量分布图等一批重要基础图件,为盆地进一步系统分析及盆地模拟打好基础,结合沉积相研究及构造样式分析还可分析盆地沉积中心、生油层、盖层、储层等在时空中的变化规律。沉积盆地的升降波动过程直接影响着盆地的埋藏史、热史和生、排烃史,因此通过沉积波动过程的系统分析不仅能正确建立盆地演化的地质模型,还可以正确认识油气形成与分布规律,有效指导油气勘探。

参 考 文 献

- 金之钧,张一伟,刘国臣,等. 1996. 沉积盆地物理分析——波动分析. 地质论评,42(增刊):170~180.
- 刘国臣,李京昌. 1994. 资料的整理与分析——盆地波动分析的关键. 石油大学学报,18:1~7.
- 李儒峰,金之钧,马永生,等. 2004. 盆地波动特征与生储盖层耦合关系分析——以楚雄盆地为例. 沉积学报,22(3):474~480.
- 李儒峰,马永生,汤良杰,等. 2004. 云南楚雄盆地波动特征及构造沉积演化. 地球科学—中国地质大学学报,29(3):309~318.
- Sadler P M. 1981. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic section. *Jour. of Geology*,89:569~584.
- Sadler P M, Strauss D J. 1990. Estimation of completeness of stratigraphical sections using empirical data and theoretical models. *Jour. of the Geological London*,147:471~485.
- McShea D W, Raup D M. 1986. Completeness of the geological record. *Jour. of Geology*, 94:596~584.
- Tipper J C. 1987. Estimating stratigraphic completeness. *Jour. of Geology*,95:710~715.
- Wetzel A, Aigner T. 1986. Stratigraphic completeness; tiered trace fossils provide a measure stick. *Geology*, 14:234~237.
- Algeo T J. 1993. Quantifying stratigraphic completeness: A probabilistic approach using paleomagnetic data. *Jour. of Geology*, 101:421~433.
- Мясникова Г. П. динамика развития осадочных бассейнов как основа их нефтегазоносности. Автореферат докторской диссертации, М. 1991.
- Мясникова Г. П. Ш. Пилвман В. н. Волновая эволюция осадочных бассейнов. Труды Запсибниги. Тюмень. 1989.

The Imperfection Quantitative Study of the Unconformity Record in Sea Facies Carbonate Rock Stratum and the Signification

—A Case of the North of Sichuan Basin in Permian

LI Rufeng¹⁾, GUO tonglou²⁾, TANG Liangjie¹⁾, CHEN Guofei¹⁾

1) *Research Center of Basin & Reservoir, University of Petroleum, Beijing, 102249;*

2) *Southern Exploration and Development Company, SINOPEC, Chengdou, 610041*

Abstract

In this paper, taking the Permian stratum of the north Sichuan Basin as an example, combining the analysis method of sequence stratigraphy with the analysis method of wave processes, the quantized method that studies the imperfection of sedimentary record by using the analysis method of wave processes has been put forward. This method can describe quantitatively heave motion accurately during the course of basin evolution and can renew the course of sediment-denude without record in stratum and then analyse quantitatively the course of sediment-denude, calculate the erosion amount of discontinuity, and understand their distribution law of space-time. At the same time, a set of basal and important figures have been worked out, for example, the space distribution diagram of main unconformity, the contour diagram showing denuded amount, the contour diagram showing original ply, the denuded amount distribution diagram of structures of in different epoch. All of these figures are based on many actual drilled wells and the analysis of wave processes of manmade wells and the interpretation of seismic sections. The above analysis gives the basis of further study of basin systemic analysis and basin simulation, and also can specify the variety law of reservoir bed, centre of sedimentation, capping bed, source bed in space-time combined with the study of sedimentary facies and the analysis of tectonic style. The heave wave process of sedimentary basin directly influences buried history, heat history, create and blowout hydrocarbon history of basin. So, the analysis of wave processes can not only correctly set up the geological model of basin evolution, but also correctly recognize the law of the form and distribution of hydrocarbon, then instruct the exploration of oil gas effectively.

Key words: unconformity; denuded amount analysis method of wave processes; Permian; north of Sichuan Basin