

从波动观点看塔北地区油气藏的形成演化

——以英买7油藏为例

刘国臣 吕修祥 金之钧

石油大学,北京,102249

内容提要 本文运用沉积波动过程分析方法,在综合分析野外露头、岩心、录井、测井、地震等资料的基础上,建立了塔北地区不同小区的岩性-时间剖面。研究表明,740~760 Ma、200~240 Ma、100~110 Ma、60~70 Ma、30 Ma 是控制塔北地区构造演化的主要周期。早古生代、三叠纪和第三纪以来是3次主要的沉积高峰,志留纪末一晚泥盆世早期为主要剥蚀期,剥蚀量一般>1000 m,北部>1500~2000 m,海西期、印支期和燕山期的剥蚀过程亦很明显。志留纪末下奥陶统顶面埋深超过2000 m,下奥陶统底面约3300 m。沉积-剥蚀过程的变化对油气藏的形成演化有重要的控制作用,据古地温计算,寒武系及下奥陶统在奥陶纪末期就进入生烃期,但由于整体上升,使有机质热演化处于近停止阶段,保存了二次生烃能力。三叠纪埋深速率快、幅度大,下奥陶统顶面重新超过原埋深,下奥陶统残留地层开始大量生烃,按深度计算二叠纪地层也进入大量生烃门限深度,随后发生一系列抬升过程,晚第三纪下奥陶统残留地层重新超过早古生代及三叠纪的最大埋深,第三系中下部地层也进入生烃门限。早古生代晚期抬升幅度大的地区是二次生烃的有利地区。

关键词 沉积波动过程 剥蚀量 埋藏史 二次生烃

地壳运动的波动性早已被地质学家所注意,地质上的“旋回性”、“周期性”、“等距性”、“脉动性”都是地质体波状运动的表现形式。张一伟(1983)指出,波状运动是板内地壳运动的一种主要形式,它控制了各凹陷的生成、演化、沉积、沉降中心的迁移及含油气富集区的分布。但由于地质历史的长期性(多期性)、波动的多向性,形成十分复杂的构造面貌,造成了我们对地壳波状运动认识的困难。

本文结合对塔里木盆地的研究,探讨了利用沉积波动过程分析方法研究不整合的原理和技术思路,特别是对于无沉积记录层段的沉积-剥蚀过程进行恢复,分析不整合的形成过程及剥蚀量,并将不整合的研究深入到埋藏史及油气成藏演化分析,从发展盆地分析的应用技术方面为沉积波动过程分析方法找到了应用前景。

1 波动过程分析的技术思路

沉积盆地波动过程研究通过分析一些似周期及非周期的地质现象,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。所谓波动过程是指地应力、质点运动、质点状态在地质时间和空间中有规律地转移、扩散过程。由 Мясникова (1989)、Мясникова 等(1991)创立的沉积盆地波动过程分析方法主要包括3方面内容,即资料

注:本文为“九五”国家重点科技攻关项目(编号 96-102-01-04)一级专题的部分内容。

本文1998年12月收到,1999年11月改回,周健编辑。

准备(包括原始资料的收集整理、地质基础研究)、波动方程的建立以及研究结果的分析和对比。具体包括研究区的选择、各小区原始资料的统计,将岩性-深度剖面转化为岩性-时间剖面、恢复原始厚度、计算沉积速率、建立波动方程等步骤(金之钧等,1996)。我们所用的原始资料包括野外、岩心、录井、测井、地震剖面等,最直接的是录井剖面及测井资料,为了计算沉积速率,对地层的年代框架进行标定及对地层原始厚度进行恢复是两项重要的基础工作,而滑动窗口、傅立叶变换等数理方法的引入则是我们从复杂的岩性剖面分解出周期波的有效手段(刘国臣等,1994)。图1是塔北隆起单井沉积波动特征剖面分析图,图中的曲线代表了该井区的沉积-剥蚀过程,它可被分解成 $F(t)$ 、 $G(t)$ 、 $L(t)$ 、 $M(t)$ 等曲线叠加的形式,即在上述4组曲线中,相邻曲线之差值为一周期曲线,其周期、初相可以通过观察得到,其振幅的变化规律可以通过做图版的方式求取(刘国臣等,1995)。经计算,

$$F(t) = 26 + (18.21 + 0.024t) \sin \frac{2\pi}{760}(t - 350)$$

$$G(t) = F(t) [300 \exp(-0.25t) + F(t)] \sin \frac{2\pi}{220}(t - 410)$$

$$L(t) = G(t) + \{60 \exp[-\frac{(t-230)^2}{500}] + F(t)\} \sin \frac{2\pi}{100}(t - 215)$$

$$M(t) = L(t) + \{G(t) + 80 \exp[-\frac{(t-250)^2}{200}] + 10\} \sin \frac{2\pi}{30}(t - 110)$$

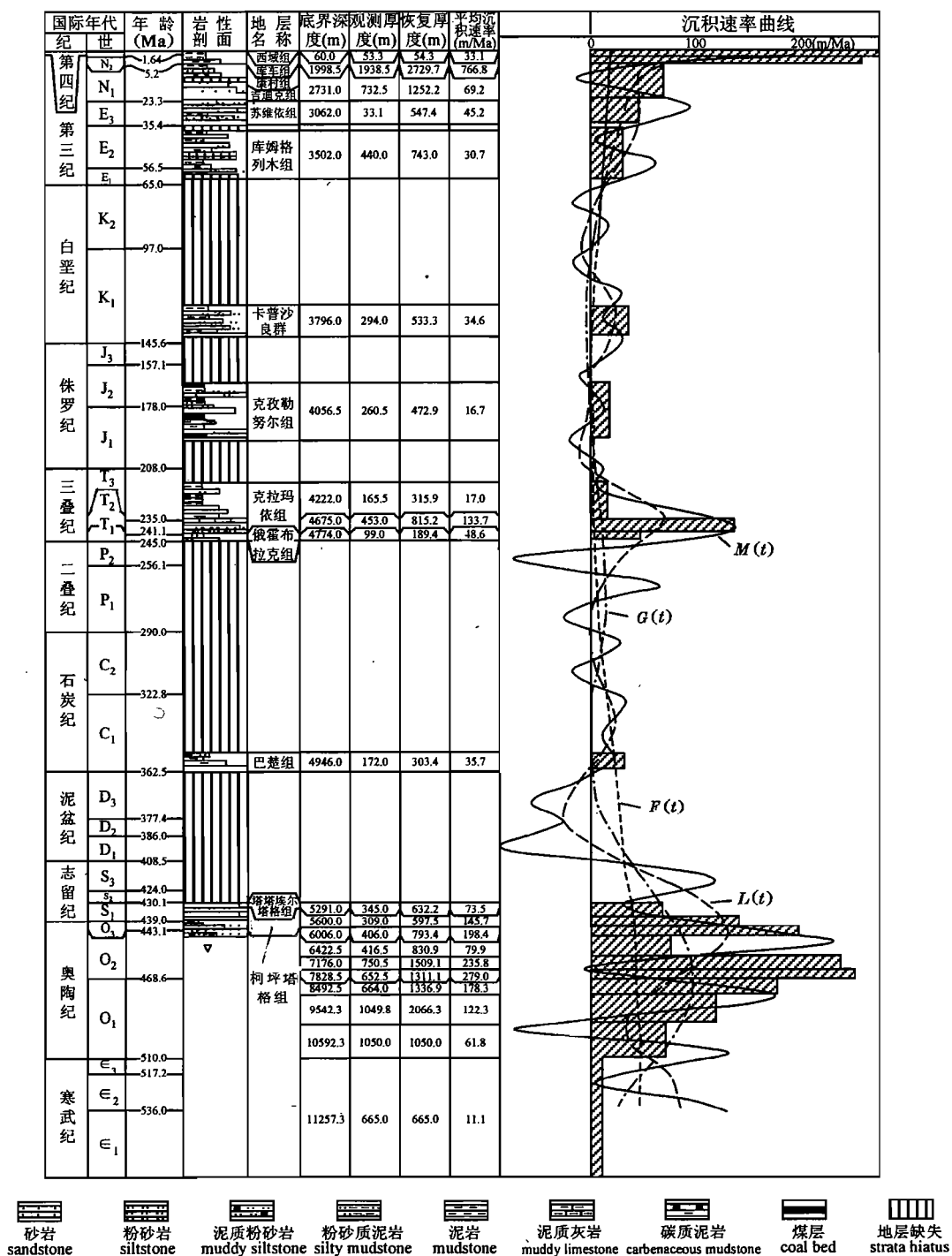
如果我们认为 $M(t)$ 曲线能够较好地代表研究区的沉积-剥蚀过程,那么现在地层可观测原始厚度为 $\int_{t_0}^t M(t)dt$,其中, t_0 为盆地开始生成的时间, t 为盆地结束的时间,单位为Ma,沉积间断

地层剥蚀厚度为 $\int_{t_1}^{t_2} M(t)dt$,其中, t_1 为沉积间断开始时间, t_2 为沉积间断结束时间。上述原理

可结合图2加以说明。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。因为时间对沉积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沉积了比现在观测的地层要多,部分地层在时间3、4时被剥蚀了。在时间5时沉积了新地层,而这些地层在时间6时又全部被剥蚀了(平行直线表示的部分)。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(图中圆点表示的部分)。由此可以看出,在剖面上的平衡原则是我们利用波动曲线计算剥蚀量的理论依据。拟合检验的目的是使我们找到的 $M(t)$ 曲线能最大限度地代表该区的沉积-剥蚀过程,平衡检验则是某段时间内,曾经沉积过的厚度减去现存厚度等于被剥蚀的厚度,这也是我们利用沉积波动曲线计算剥蚀量的理论依据。

2 塔北地区构造演化的阶段性与周期性

作为多期叠合、复合发展的塔里木盆地,其构造演化的阶段性十分明显(朱英,1989;王跃等,1992;王学佑等,1998;张光亚等,1998;陈楚铭等,1999)。从地壳波状运动理论来考虑,盆地演化的阶段性是不同周期的波动过程干涉叠加的结果。我们通过对塔北地区10余口井波动曲线分析,认为740~760 Ma、200~240 Ma、100~110 Ma、60~70 Ma、30 Ma是控制塔北地区构造演化的主要周期,从盆地演化的角度考虑,震旦纪、寒武纪一晚泥盆世中期、晚泥盆世晚期—侏罗纪和白垩纪—现今为塔北地区构造演化的4个一级周期,其中震旦纪对应于大陆裂谷发育阶段,寒武纪一晚泥盆世中期对应于克拉通内裂陷盆地发育阶段和克拉通内挤压盆地地形



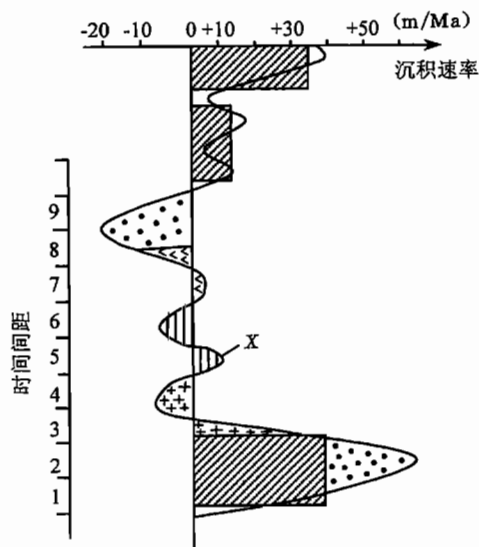


图 2 沉积—剥蚀过程平衡原则示意图

Fig. 2 A principle for the balance of depositional and erosional processes

成阶段,晚泥盆世晚期—侏罗纪末期对应弧后裂陷盆地演化阶段和弧后前陆盆地—碰撞复合前陆盆地过渡阶段,白垩纪至今对应于碰撞复合前陆盆地发展阶段及碰撞后续前陆盆地演化阶段,它们持续的时间分别为 230 Ma、203 Ma、221.4 Ma 和 145.6 Ma,其中白垩纪至今的盆地演化过程大致经历了一完整周期的四分之三。以上各阶段对应于盆地演化的一级阶段,每个阶段在构造演化、沉积建造及石油地质特征等方面都有各自的特征。塔北地区沉积波动过程可划分出 8 个二级周期,每个周期延续约 100 Ma,它们大致对应于盆地的 8 个构造演化阶段,表现出沉积波动过程周期性与板块构造演化周期性较好的对应关系,这也是 100 Ma 这一周期在塔里木盆地表现突出的原因,推测这一级别的周期与塔里木盆地特殊的大地构造位置,与板块活动及由此引起的板内应力状态的改变有关。60~70 Ma 及 30 Ma 的周期波在更精细的程度代表了盆地的沉积—剥蚀过程。

3 塔北地区剥蚀量研究

塔里木盆地经历了漫长的发育史,多期构造变动的叠加使得盆地内沉积拗陷区和隆起区发生多次有规律的迁移,从而控制了塔里木盆地不同时期剥蚀强度及分布范围有规律地变化。研究表明,塔北地区主要剥蚀期包括加里东期末—早海西期、晚海西期、印支期及燕山期。其中加里东期末—早海西期是塔北隆起的重要形成期,英买力—轮南低隆与塔北隆起连为一体,泥盆系与下伏地层的不整合主要表现在英买力—轮南地区,表现为上泥盆统与志留系的低角度不整合接触,局部地区缺失了上泥盆统,导致石炭系直接覆盖在志留系或奥陶系之上。据波动分析,加里东末期运动及海西早期运动在塔北隆起造成的总剥蚀量大多数 >1000 m,塔北的北部(YM7、DH1、DH4、LN15、LN14、LN1、KN1 井以北)地层的剥蚀量超过 1500~2000 m。塔北隆起上由北至南地层剥蚀量逐渐减小。海西运动晚期亦是塔北隆起的主要发育期,总体而言是剥蚀量往北逐渐增大,在 NK1、LN1、Ti-1 井等地区由构造运动引起的地层剥蚀量均大于 1000 m。

印支运动引起的地层剥蚀仍然比较广泛,但剥蚀量较小。而在塔北隆起顶部的轮台断隆和东部库尔勒鼻状隆起则剥蚀厚度较大。由于侏罗系分布局限,这次构造运动直接造成的不整合只分布在轮台凸起和库尔勒鼻状隆起一带,在塔北地区侏罗系与下伏古生界不同时代层系接触,甚至直接覆盖在前震旦系之上。在草湖凹陷侏罗系与三叠系呈假整合接触,在库尔勒侏罗系则主要与下古生界不同层系接触。由波动分析得到塔北地区的剥蚀量见表 1,塔北隆起往北、往西剥蚀量逐渐增大,在 LN14、LN15 井附近达到最大(1152 m),再往北又逐渐减小,至轮台北面 Ti-1 井仅为 183 m。但其中的 YM7 井 >2500 m。燕山运动引起的剥蚀量在塔中、塔北和满加尔地区没有明显差别,总体而言,塔北隆起的剥蚀量往西、往北有逐渐增大的趋势。

波动分析还可以比较次级构造单元演化的差异。草湖凹陷内不同地区从早古生代开始直到侏罗纪在沉积—剥蚀过程的演化方面同步进行,从白垩纪开始草湖1井区和赛克1井区发生分异,赛克1井区的沉积速率明显大于草湖1井区。此外,塔北隆起内不同次级构造单元演化的分异性在波动曲线对比图上显而易见,尤其是草湖和哈拉哈塘两个次级凹陷在早、中泥盆世的剥蚀和三叠纪、白垩纪两期的沉积过程表现出与塔北隆起其他地区不同。通过波动曲线对比可以看出,提1井区从早泥盆世到晚石炭世有较长时期的剥蚀过程,以后的沉积比较微弱,尤其是三叠纪时沉积速率较低,与其他地区形成鲜明对比,这可能是提1井区位于塔北隆起的边缘,受库车凹陷的形成、演化影响较大所致。

4 英买7油藏形成演化史分析

英买7油藏包含下奥陶统、白垩系及下第三系3套含油气层系,英买7井位于下奥陶统潜山及中、新生界披覆背斜的斜坡部位,仅在下奥陶统及下第三系底砂岩中获工业油气流。利用波动曲线作出的埋藏史曲线能更精细地反映埋藏历史,因为波动曲线不仅反映了有沉积记录层段的沉积—剥蚀过程,而且对于没有沉积记录时间段的沉积—剥蚀过程能起到恢复、预测的作用。从英买7井区埋藏史曲线(图3)可以看出,塔北地区寒武纪—志留纪是一个快速埋深阶段,此后泥盆纪抬升幅度较大,英买7井区下奥陶统底面此时期的最大埋深3300 m,顶面约2000 m,到晚泥盆世东河砂岩沉积前,经历了近25 Ma的风化剥蚀,早期的潜山圈闭之上直接披覆沉积了上泥盆统东河砂岩至三叠系,晚海西期在这些潜山或背斜圈闭中曾有过海相油气的聚集,不仅在英买7号构造带(英买11井下奥陶统沥青)而且在红旗构造带(东河12井志留系沥青)都有表现,三叠纪埋藏快、幅度大。下奥陶统顶面重新超过原埋深,按深度计算二叠纪地层也进入大量生烃门限深度,三叠纪末抬升剥蚀幅度大,英买7井石炭纪、二叠纪和三叠纪地层在三叠纪末及早侏罗世被全部剥蚀,剥蚀量总计2500 m左右。到早白垩世,沉积直接覆盖在残留的下奥陶统之上。白垩系沉积时埋深速率慢,并存在两次较小的剥蚀过程。第三系尤其是上第三系沉积速率大,仅上第三系厚达4000多米,此阶段使下奥陶统残留地层埋深再次超过早古生代及三叠纪的最大埋深,下奥陶统残留地层开始大量生烃,第三系中下部地层也进入生烃门限深度,是一个早古生代上部地层的重要成藏期,早古生代晚期抬升幅度大的地区仍然是二次生烃的有利地区,据前石炭纪古地质图^①估计这样的有利地区面积约5000多平方千米,三叠纪末的抬升幅度在不同井区差异较明显,二叠纪末的抬升剥蚀幅度在局部地区表现明显。总之塔北地区存在3个不同层位的大量油气生成阶段。第三纪地层原生成藏阶段是塔

表1 由波动分析得出的塔北地区各期构造运动引起的剥蚀量(m)

Table 1 Wave analysed thickness (m) of denuded strata during tectonic movements in the Tabei uplift of Tarim basin

井号	燕山运动	印支运动	海西晚期	加里东晚期—海西早期
SK1	436	330	315	1059
CAO1	442	341	813	790
KN1	336	894	820	>2000
LN14	351	1302	285	>1500
LN1	566	605	1876	>1500
Ti-1	216	183	>3000	
LN15	278	1152	270	>1500
HA1	336	391	648	1374
DH1	576	1197	363	3276
DH4	609	660	1158	>1500
YM7	750	>2500	727	>1500
YM8	400	975	240	2703
NK1	824	998	1296	825
QK1	404	716	340	925

注:地层剥蚀量是恢复到埋深100 m的原始厚度。

① 塔里木石油勘探开发指挥部. 1994. 塔里木盆地前石炭纪古地质图.

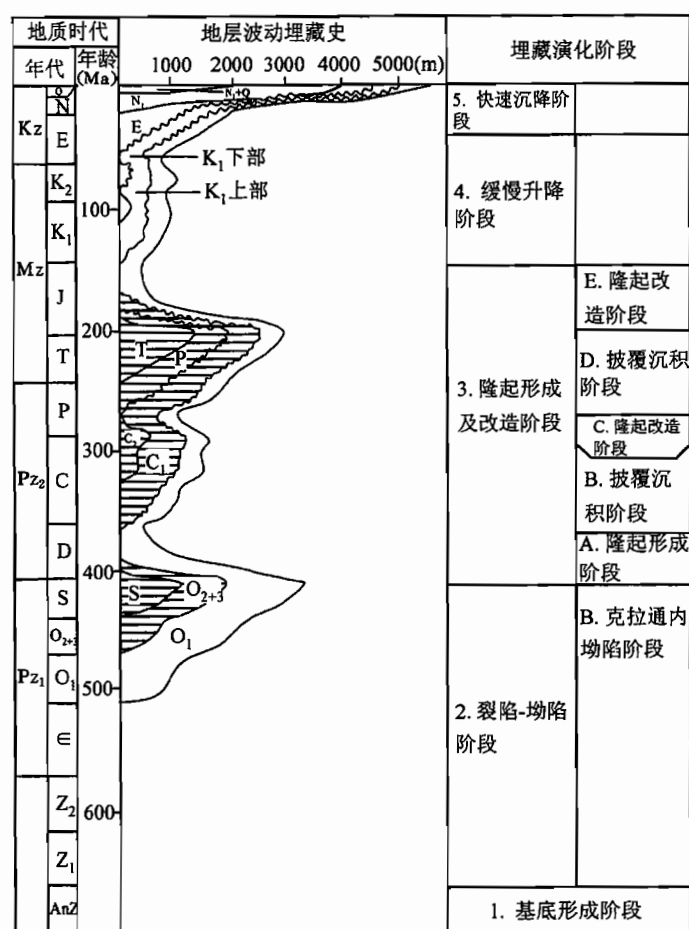


图3 塔北隆起英买7井波动埋藏史图

Fig. 3 Buried history of well YM7 by wave analysis
in the Tabei uplift

北地区的特殊表现。

综上所述,早古生代末期的长时间抬升剥蚀是塔北地区的重要成藏控制因素,现今发现的下古生界内幕油气藏可能为“二次生烃”成藏的产物,各阶段适当的抬升剥蚀与再沉积埋深的有机配合是控制成藏的主要因素之一。

5 结论

(1)塔里木盆地的多期叠合发展受地壳波状运动控制,控制塔中地区构造演化的主要周期有740~760 Ma、200~240 Ma、100~110 Ma、60~70 Ma、30 Ma,从波动分析考虑,震旦纪、寒武纪—晚泥盆世中期、晚泥盆世晚期—侏罗纪和白垩纪—现今为塔北地区波动过程的4个一级周期,波动过程的二级周期(100~110 Ma)与板块演化的阶段性、盆地体制与格局的转变等有较好的对应关系,说明二级周期受塔里木盆地特殊的大地构造背景控制,与周围板块的活动及其引起的板内应力状态的变化有关。

(2)波动分析表明,塔北地区主要剥蚀期包括加里东期末—早海西期、晚海西期、印支期及燕山期,其中加里东期末—早海西期是塔北隆起的重要形成期,剥蚀量一般>1000 m,塔北的北部(YM7、DH1、DH4、LN15等井区)地层的剥蚀量超过1500~2000 m。海西期在NK1、LN1、Ti-1井等地区由构造运动引起的地层剥蚀量>1000 m。印支运动引起的地层剥蚀量比较广泛,但剥蚀量较小,在LN14、LN15井附近达到最大(>1000 m),燕山运动引起的剥蚀量在塔北隆起有往西、往北逐渐增大的趋势。

(3)塔北地区寒武纪—志留纪是一个快速埋深阶段,志留纪末—晚泥盆世中期为主要剥蚀期,寒武系及下奥陶统在奥陶纪末期进入生烃期,但由于整体上升,使有机质热演化处于近停止状态,保存了二次生烃能力。志留纪末下奥陶统顶面埋深超过2000 m,底面约3300 m,根据古地温计算,晚泥盆世晚期—早石炭世为沉积期,晚石炭世—早二叠世的剥蚀使早石炭世地层基本剥蚀,三叠纪埋深速率快、幅度大,下奥陶统顶面重新超过原埋深,按深度计算二叠纪地层

也进入大量生烃门限深度。三叠纪末抬升剥蚀幅度大,英买7井区石炭纪、二叠纪、三叠纪地层在三叠纪末及早侏罗世被全部剥蚀,晚第三纪下奥陶统残留地层埋深再次超过早古生代及三叠纪的最大埋深,下奥陶统残留地层开始大量生烃,第三系中下部地层也进入生烃门限,早古生代晚期抬升幅度大的地区是二次生烃的有利地区。

(4)沉积—剥蚀过程定量研究为精细建立盆地的埋藏史模型提供了一种有效的手段,对于分析盆地热演化史、油气的生成、运移、成藏期具有重要意义。

参加研究工作的还有李京昌、齐永安、刘银河、邱楠生等。本文的研究工作得到塔里木石油勘探开发指挥部勘探开发研究中心领导和专家的支持,在此表示衷心地感谢!

参 考 文 献

- 陈楚铭,卢华复,贾东等. 1999. 塔里木盆地北缘库车再生前陆褶皱逆冲带中丘里塔格前锋带的构造与油气. 地质论评, 45(4): 423~433.
- 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,金之钧. 1994. 波动地质学研究中资料的收集与整理. 石油大学学报(自然科学版), 18(6): 1~7.
- 刘国臣,金之钧,李京昌. 1995. 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. 沉积学报, 13(3): 23~31.
- 王学佑,管海晏,袁宏仕. 1998. 论塔里木环式弧形构造系统. 地质论评, 44(1): 7~14.
- 王跃,董光荣,金炯等. 1992. 新构造运动在塔里木盆地演化中作用. 地质论评, 38(5): 426~430.
- 张光亚,宋建国. 1998. 塔里木克拉通盆地改造对油气聚集和保存的控制. 地质论评, 44(5): 511~521.
- 张一伟. 1983. 山东西部箕状凹陷形成的探讨——初论地壳波动运动. 石油学报, 4(4): 19~25.
- 朱英. 1989. 南天山—北塔里木的大地构造和深部构造. 地质论评, 35(6): 512~520.
- Мясникова Г. П. 1991. Динамика развития осадочных бассейнов как основа оценки их нефтегазоносности. Автореферат докторской диссертации. М.
- Мясникова Г. П., Шпильман В. И. 1989. Волновая эволюция осадочных бассейнов. Труды Зап. Сибир. ун-та. Тюмень.

A Study of Reservoir Evolution in the Tabei Area of Tarim Basin with the Wave Analysis

—A Case Study of the YM7 Reservoir

Liu Guochen Lü Xiuxiang Jin Zhijun
University of Petroleum, Beijing, 102249

Abstract

Based on comprehensive analyses of data from field work, coring, well-logging and geophysical exploration, the wave processes in the Tabei area of the Tarim basin have been studied with the wave analysis method, in which a set of mathematical and physical principles are used. It is shown that 740~760 Ma, 200~240 Ma, 100~110 Ma, 60~70 Ma and 30 Ma are the main cycles which control the evolution of the Tabei uplift. The periods of the early Paleozoic, the Triassic and from the Tertiary to the present are the three main periods of depositional processes, and the end of the Silurian to the early Late Devonian is the main erosional period with the average hiatus over 1000 m, greater than 1500~2000 m in the northern part. Erosional processes are also obvious in the Hercynian, Indosinian and Yanshanian epoches. The buried depth of the top of the lower Ordovician at the end of the Silurian exceeds 2000 m, the bottom of the lower Ordovician is about 3300 m at depth. The deposition-erosion processes play an important role in

the reservoir formation. The palaeotemperature measurement proves that the Cambrian and lower Ordovician source beds began to get matured by the end of the Ordovician and maintained the ability of secondary generation of hydrocarbons because of the uplifting. Because of the high-speed deposition and great burial depth during the Triassic, the burial depth of the top of lower Ordovician surpassed the original depth, and the lower Ordovician began to generate hydrocarbons in large quantity, and at the same time the Permian source bed also reached the threshold depth of massive hydrocarbon generation according to the burial depth calculation, but a series of uplifting occurred until late Tertiary, then the remains of the Permian surpassed the maximum burial depth of the early Palaeozoic and Triassic, and the lower to middle parts of the Tertiary began to get matured. Therefore, the areas where the uplifting was of a large magnitude in the late Early Palaeozoic are favourable areas for secondary generation of hydrocarbon.

Key words: depositional wave process; thickness of denuded strata; burial history; secondary generation of hydrocarbons

作 者 简 介

刘国臣,男,1962年生。1984年毕业于华东石油学院勘探系石油地质专业。博士,副教授,主要从事构造地质及石油地质综合研究。通讯地址:102249,北京昌平石油大学盆地与油藏研究中心;电话(传真):010—69743646。
