

文章编号: 1000-0550(2004)03-0474-07

盆地波动特征与生储盖层耦合关系分析 ——以楚雄盆地为例

李儒峰¹ 金之钧² 马永生³ 范绍雷¹

1(石油大学盆地与油藏研究中心 北京 102249) 2(中国石油化工集团公司勘探开发研究院 北京 100083)

3(中国石油化工南方油气勘探开发分公司 昆明 650021)

摘要 沉积盆地的波动过程分析是建立在成因研究基础之上的全新的含油气盆地分析的理论方法,它能够定量地重塑沉积和间断的空间分布,恢复无沉积记录时间段的沉积—剥蚀过程,计算不整合的剥蚀量,分析沉积、沉降中心迁移规律,建立波动周期与构造沉积演化阶段的内在联系,揭示沉积波动特征与油气成藏要素的相关性,进而从全新的角度探讨盆地油气形成和分布规律。结合楚雄盆地井和剖面波动过程分析实例,归纳总结出了生、储、盖层的纵向分布规律与沉积—剥蚀波动过程曲线的耦合关系,揭示了沉积盆地波动特征与生、储、盖层以及油气运移通道(不整合面)之间的内在联系,建立了四种相应的耦合关系模式,这对于预测含油气盆地有利生油层、储集层、盖层时空分布规律和有效地指导油气勘探具有重要的意义。

关键词 波动特征 波动周期 成藏条件 耦合模式 楚雄盆地

第一作者简介 李儒峰 男 1962年出生 副教授 博士后 沉积学与石油地质学

中图分类号 TE121.1 **文献标识码** A

沉积盆地的波动过程分析是指通过分析一些一般的周期的、似周期的、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。波动过程分析方法是由前苏联学者 . . 缅斯妮高娃和 . . 比伊曼 90年代初建立的^[1,2],金之钧在 1992年将其介绍到国内,并领导科研集体在近十年的研究中从波动过程分析软件开发、高频、露头剖面波动过程分析、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,基本形成了一套新的含油气盆地研究方法^[3,4]。

波动过程分析方法是综合利用野外剖面、综合录井、测井和地震等资料,在开展地层古生物、不整合及沉积环境研究的基础上,建立各研究小区不同时间的沉积速率直方图,借助数学、物理方法及计算机手段,拟合出波动曲线,使之能够代表该区的沉积—剥蚀过程,进而利用其分析盆地演化阶段,恢复无沉积记录时

间段的沉积—剥蚀过程,研究不整合的时空间展布、成因、计算其剥蚀量,分析沉积、沉降中心迁移规律。

楚雄盆地是扬子板块西南缘的中新生代含油气盆地,面积约为 $3.65 \times 10^4 \text{ km}^2$,受多期构造运动的影响,具有复杂的构造、沉积演化历史^[5,6]。本文将沉积盆地波动过程分析这一新的研究方法应用于楚雄盆地研究中,根据对井和典型剖面进行波动过程分析实例,归纳总结出了生、储、盖层的纵向分布规律与沉积—剥蚀波动过程曲线的耦合关系,揭示了沉积盆地波动特征与生、储、盖层以及油气运移通道(不整合面)之间的内在联系,建立了四种相应的耦合关系模式,这对于预测含油气盆地有利生油层、储集层、盖层时空分布规律和有效地指导油气勘探具有重要的意义。

1 楚雄盆地波动过程分析

应用波动分析方法对楚雄盆地重点露头剖面和云参 1 井、云龙凹陷、东山凹陷以及黑井凹陷进行了波动过程分析,揭示了控制各个地区构造沉积演化的

金之钧,吕修祥,王毅,等.塔里木盆地波动过程及其对油气形成与分布的控制作用.“九五”国家重点科技攻关项目《塔里木盆地石油天然气勘探 96—111》成果报告.1998

李儒峰,刘振峰.华北奥陶系波动特征及与层序地层相关性研究.石油大学基础研究项目成果报告.2000.

汤良杰,李儒峰.楚雄盆地波动过程分析及其对油气形成与分布的控制作用.中石化南方海相油气勘探项目经理部项目.2002.

马永生,何治亮,王津义,等.南方海相 2001 油气勘探部署研究报告.中石化南方海相油气勘探项目经理部.2000.

收稿日期:2003-07-08;收修改稿日期:2004-02-03

波动周期,并求取了各区的波动方程,得出了控制盆地构造沉积演化的低频(>10 Ma)和低频(10 Ma)波动周期。楚雄盆地存在 3 个一级沉积波动周期(220 Ma)、6 个二级沉积波动周期(100 Ma)、9.5 个三级沉积波动周期(60~45 Ma)以及高频波动周期(10 Ma、5 Ma 和 2 Ma),它们分别与盆地的构造旋回、沉积—剥蚀高峰期、沉积—剥蚀过程以及沉积环境有较好的对应关系。本文以楚雄盆地和安龙堡三叠系剖面为例阐述楚雄盆地低频和高频沉积波动特征。

1.1 楚雄盆地低频波动过程分析

在云参 1 井、云龙凹陷和东山凹陷工作的基础

上,采取加权平均的方法,对整个楚雄盆地的波动过程做了分析,其中各组厚度取各个地区厚度的平均值,对同时期的沉积速率建立沉积速率直方图进行周期波分解,以得出控制盆地沉积—剥蚀过程的周期波的存在,寻找到控制盆地演化的不同级别的波动周期。波动方程的建立采用了正、反演结合的方法,即首先通过反演(滑动过程)寻找出控制该区的主要周期后,通过正演调整初相和振幅变化规律及周期的“微调”,最后找到一组周期曲线,使其能在不同的级别上代表楚雄盆地的沉积—剥蚀过程,拟合出楚雄盆地波动曲线(图 1),并建立了波动方程:

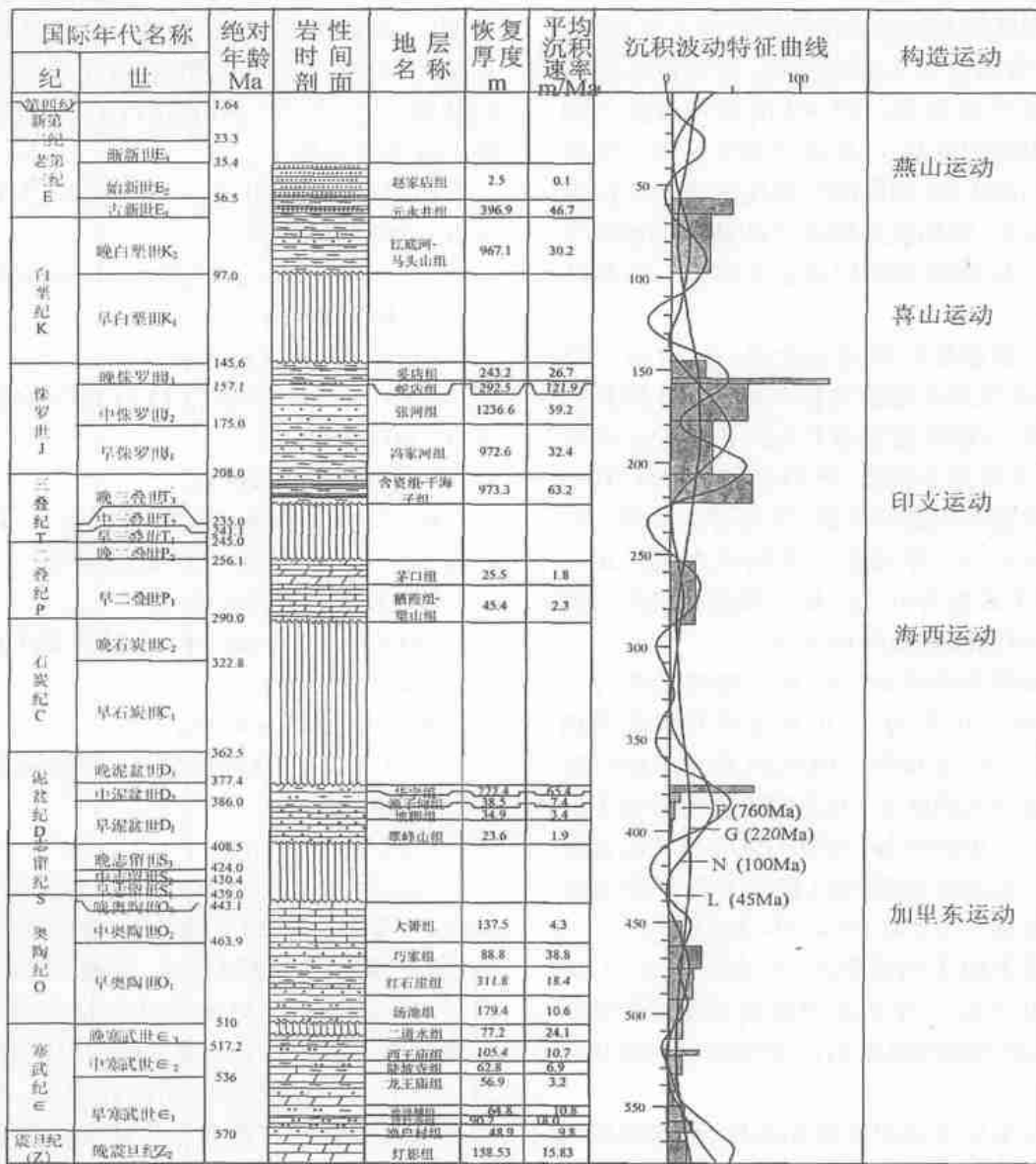


图 1 楚雄盆地波动过程分析图

Fig. 1 Analysis of wave process in Chuxiong Basin

$$\begin{aligned}
 F(t) &= 14.3 + 0.01 * t * \sin(2 * 3.1415926 \\
 &* (t - 650)/760); \\
 g(t) &= (1.20 * \text{abs}(F(t))) * \sin(2 * 3.1415926 \\
 &* (t - 140)/220); \\
 G(t) &= F(t) + g(t); \\
 l(t) &= (1.15 * \text{abs}(F(t))) * \sin(2 * 3.1415926 \\
 &* (t - 60)/100); \\
 L(t) &= G(t) + l(t); \\
 m(t) &= (1.30 * \text{abs}(F(t))) \\
 &* \sin(2 * 3.1415926 * (t - 25)/45); \\
 M(t) &= L(t) + m(t);
 \end{aligned}$$

从波动方程可以看出,760 Ma、220 Ma、100 Ma 及 45 Ma 是控制楚雄盆地构造沉积演化的主要周期。其中 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升降趋势;220 Ma 的周期波受太阳绕银河系旋转周期的控制,它控制着盆地从形成到消亡的全过程^[1,2];100 Ma 的周期与板块演化的阶段性有较好的对应关系,即构成多期叠合的楚雄盆地的不同发育阶段;45 Ma 的周期则代表盆地构造—沉积环境的改变。

综合分析楚雄盆地沉积波动曲线(图 1)可以得出:震旦纪灯影期至寒武纪波动特征曲线位于沉积—剥蚀基准线右侧,反映出盆地震旦纪灯影期至寒武纪以沉积为主,但沉积速率较低,平均为 13 m/Ma,其中龙王庙—陡坡寺期沉积速率最低,平均为 3 m/Ma,波动曲线上表现为波谷。寒武系与奥陶系之间存在一不整合,波动曲线表现为位于沉积—剥蚀基准线左侧的波谷,反映该时期以剥蚀作用为主。

奥陶纪波动特征曲线位于沉积—剥蚀基准线右侧,反映出奥陶纪以沉积为主,沉积速率与寒武纪相比有所提高,平均为 18 m/Ma,晚奥陶世至志留纪研究区一直处于抬升剥蚀状态,波动曲线表现为位于沉积—剥蚀基准线左侧的波谷,反映中奥陶统与泥盆系之间的不整合。泥盆纪波动和沉积速率特征都反映出较高的沉积速率,平均为 19 m/Ma,晚泥盆世至二叠纪研究区总体表现为剥蚀状态,形成不整合,但从波动过程分析可以看出,早石炭世晚期至晚石炭世曾经发生过沉积,波动曲线表现为位于沉积—剥蚀基准线右侧的波峰。

二叠纪仅发生局部短时的沉积事件,平均沉积速率 2 m/Ma,二叠系与上三叠统之间的不整合,在波动曲线表现为位于沉积—剥蚀基准线左侧明显的波谷。晚三叠世至侏罗纪是楚雄盆地形成的重要时期,

波动曲线和沉积速率特征都反映出高速沉积,平均沉积速率为 62 m/Ma。晚侏罗世至晚白垩世,波动曲线又表现为位于沉积—剥蚀基准线左侧的波谷,反映了它们之间的不整合。晚白垩世至始新世盆地以沉积为主,波动曲线表现为位于沉积—剥蚀基准线右侧的波峰。始新世至今楚雄盆地总体上处于剥蚀期,波动曲线表现为位于沉积—剥蚀基准线左侧的波谷。通过对楚雄盆地进行波动过程分析,定量地反映和预测了楚雄盆地的沉积—剥蚀演化规律,开辟从全新的成因角度进一步研究楚雄盆地构造沉积演化的新领域。

1.2 楚雄盆地三叠系高频波动过程分析

三叠系是楚雄盆地有利生油层和储集层,其分布范围广,沉积厚度大,对其进行高频波动过程分析意义重大,为此,在对安龙堡剖面三叠系层序地层分析的基础之上^[7,8],对其进行了高频波动过程分析。建立波动方程如下:

$$\begin{aligned}
 F(t) &= 14.3 + 0.01 * t * \sin(2 * 3.1415926 \\
 &* (t - 650)/760); \\
 g(t) &= (1.20 * \text{abs}(F(t))) * \sin(2 * 3.1415926 \\
 &* (t - 140)/220); \\
 G(t) &= F(t) + g(t); \\
 l(t) &= (1.15 * \text{abs}(F(t))) * \sin(2 * 3.1415926 \\
 &* (t - 60)/100); \\
 L(t) &= G(t) + l(t); \\
 m(t) &= (1.30 * \text{abs}(F(t))) \\
 &* \sin(2 * 3.1415926 * (t - 25)/45); \\
 M(t) &= L(t) + m(t); \\
 n(t) &= (3.1 * \text{abs}(F(t))) * \sin(2 * 3.1415926 \\
 &* (t - 8.6)/10.0); \\
 N(t) &= M(t) + n(t); \\
 y(t) &= (1.23 * \text{abs}(F(t))) * \sin(2 * 3.1415926 \\
 &* (t - 0.9)/5.0); \\
 Y(t) &= N(t) + y(t);
 \end{aligned}$$

从高频波动方程的表达式可以看出 10 Ma 和 5 Ma 是楚雄盆地的两个高频波动周期。结合岩性特征、沉积相和层序地层分析,发现 10 Ma 的高频波动曲线与海陆沉积环境的变迁密切相关,而 5 Ma 的高频波动曲线则较好地反映出沉积体系域的特征(图 2)。从 10 Ma 的高频波动曲线分析:普家村组—干海子组沉积时期波动曲线表现为由波谷—波峰—波

见前页

许效松,尹福光. 楚雄盆地中生界沉积层序地层剖面综合研究. 中石油南方新区油气勘探项目经理部. 1998

谷完整的波动旋回,反映了盆地由海相—海陆交互相—陆相完整沉积演变过程;舍姿组沉积时期波动曲线表现为由波谷开始的不完整波动旋回,反映盆地进入了湖相—三角洲相—河流相沉积演变过程。从5 Ma的高频波动曲线分析:在由普家村组构成的层序中,低位体系域和高位体系域沉积速率较高(150~200 m/Ma),反映了低位期斜坡扇和高位期滨浅海相沉积特征;海进体系域沉积速率较低(50~100 m/Ma),反映了海进期半深海相沉积特征。在由干海子组构成的层序中,低位体系域不发育,高位体系域沉积速率较高(150~200 m/Ma),反映了高位期三角洲相沉积特征;水进体系域沉积速率较低(70~100 m/Ma),反映了水进期湖相沉积特征。在舍姿组构成的层序中,低位体系域和高位体系域均不发育,水进体系域沉积速率为80~170 m/Ma,反映了水进期稳定的湖相沉积特征。上述分析表明:高频波动特征与盆地的沉积环境和岩相特征具有很好的对应关系,证明高频波动曲线是盆地构造升降、海(湖)平面变化和沉积物供给的综合反映。

2 盆地波动特征与生储盖层耦合关系分析

通过对楚雄盆地典型剖面和井进行的波动分析,可以看出盆地波动特征与构造运动、沉积演化等地质现象有着密切的关系。沉积波动特征是地质现象的综合反映,蕴涵着丰富的地质信息,因此,波动特征与油气成藏要素之间必然存在着一定的内在联系,基于这种认识,作者对楚雄盆地所有井和剖面的波动特征进行了分析,归纳总结出了沉积—剥蚀波动过程曲线与生、储、盖层的纵向分布规律的耦合关系,即生、储、盖层段与不同周期波的波形叠加以及沉积速率等的关系,进而揭示盆地波动特征与生、储、盖层以及油气运移通道(不整合面)之间的内在联系,建立相应的耦合关系模式,这对油气勘探具有重要的指导意义。

2.1 波动特征与生油层的耦合关系

生油层常以泥岩为主,沉积水体多为富含有机质的还原环境,同时应具有一定的沉积厚度,分布范围以保证生油层的生烃能力。通过分析井和典型剖面波动曲线,发现生油层(系)在波动曲线上的分布反映出一定的规律。

2.1.1 低频波动曲线上生油层(系)的特征

从低频波动曲线上可以看出,生油层系有规律地出现在波动曲线的特定部位。总结归纳楚雄盆地寒武

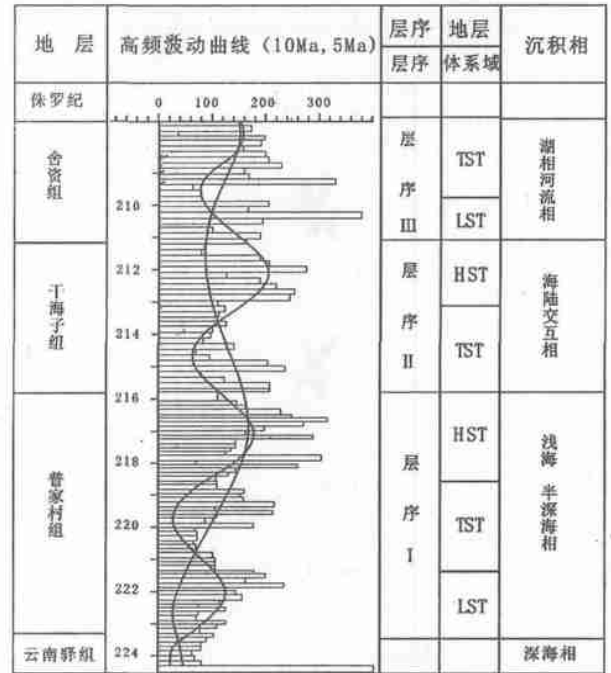


图2 安龙堡剖面高频波动分析

Fig. 2 Analysis of high frequency wave process in Anlongbao section

系、泥盆系和三叠系三套主要生烃层系波动曲线特征,得出分布规律为:生油层系一般发育在波动曲线由波峰—波谷或由波谷—波峰的转折部位;生油层系也可以发育在不同周期波动曲线叠加处的转折部位,上述两种情形其波动曲线均在沉积—剥蚀基准线的右侧,即沉积速率均大于零。根据上述实际资料建立了生油层系与低频波动曲线耦合关系模式图(图3)。

从模式图(图3)上可以清楚地看到,生油层在低频波动曲线上常分布在不同周期波动曲线的转折部位,呈现“X”形。从地质意义分析,大小周期波动过程在此位置均具有一定的沉积加速度,但它们的加速度方向恰好相反,即表现为一个加速度为正,另外一个加速度则为负(楚雄盆地两个波动周期分别为100 Ma和45 Ma)。它们共同作用使得水体环境既具备了一定的能量,又相对较稳定,有利于富含有机质的细颗粒物搬运和沉积,因此,最有利于形成优质烃源岩。

2.1.2 高频波动曲线上生油层(系)的特征

高频波动过程主要控制生油层段的沉积—剥蚀过程,分析云参1井、乌龙1井和典型剖面的生油层厚度与高频波动曲线特征的关系,得出以下分布规律:10 Ma波动周期的波动曲线表现为波谷,即低速率沉积背景,5 Ma和2 Ma则可以出现波峰,但以

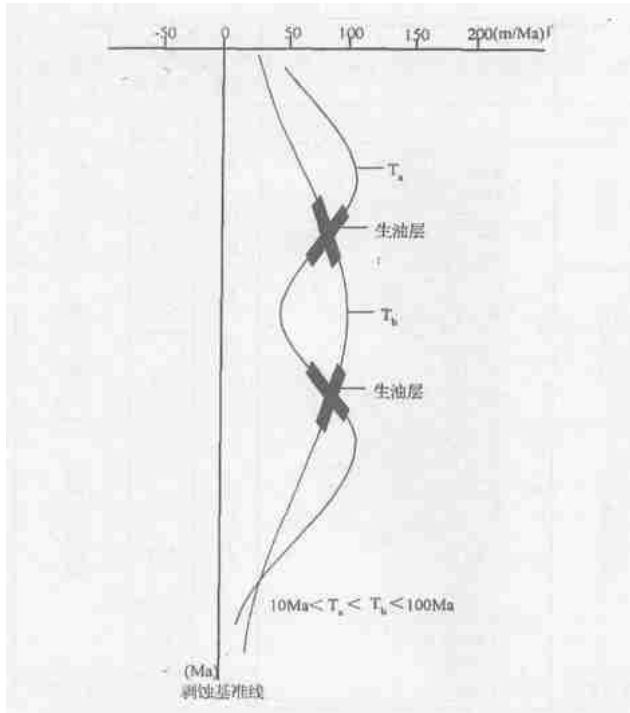


图 3 生油层与低频波动曲线耦合关系模式
 Fig. 3 Relationship between source rock and low-frequency wave curve

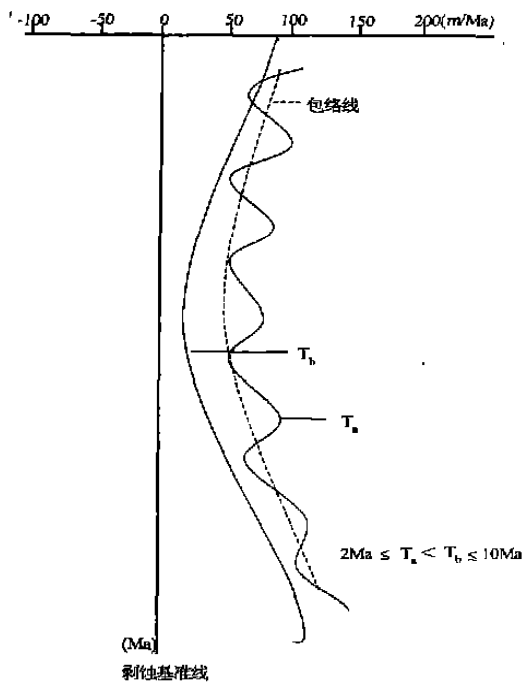


图 4 生油层与高频波动曲线耦合关系模式
 Fig. 4 Relationship between source rock and high-frequency wave curve

期曲线的波谷包络线曲线呈波谷状,与 10 Ma 曲线波谷形态一致,根据上述实际资料建立了生油层系与高频波动曲线耦合关系模式图(图 4),从模式图上分析,生油层有利的发育部位常为低速率、低能量、连续沉积背景下的水体环境。大周期波动曲线生油层常发育在波谷部位,较小周期波动曲线可有沉积速率的反复调整,但其包络趋势线与大周期的波谷形态相似。沉积地层往往以泥岩为主,同时沉积有粉砂岩和细砂岩等。

2.2 波动特征与储集层的耦合关系

储集层以砂岩为主,一般是高速率沉积期的产物,通过分析井和典型剖面波动曲线,得出了储集层在波动曲线上的规律分布。低频波动曲线上,储集层的特征均表现为处于波峰位置,即沉积速率相对较高的位置,高频小周期波动曲线的包络趋势线与低频波动曲线的波峰形状相似,其耦合关系模式如图 5、6 所示。从石油地质意义分析,波动曲线波峰处是高速率沉积期,水体环境一般为高能持续沉积环境,其沉积加速度一般不大,有利于粗粒物质搬运和沉积,因此,沉积地层一般以粗砂岩为主,有利于形成较好的储集空间。

2.3 波动特征与盖层的耦合关系

盖层一般由岩性致密的泥岩、灰岩等构成,并且

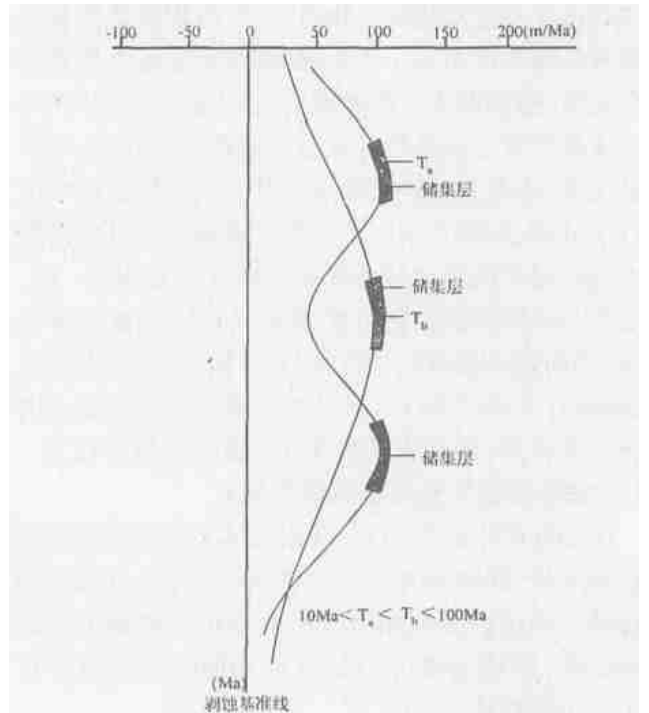


图 5 储集层与低频波动曲线耦合关系模式图
 Fig. 5 Relationship between reservoir rock and low-frequency wave curve

波谷出现频率高于波峰出现频率,且波动曲线均位于沉积—剥蚀基准线右侧,即沉积速率均大于零,小周

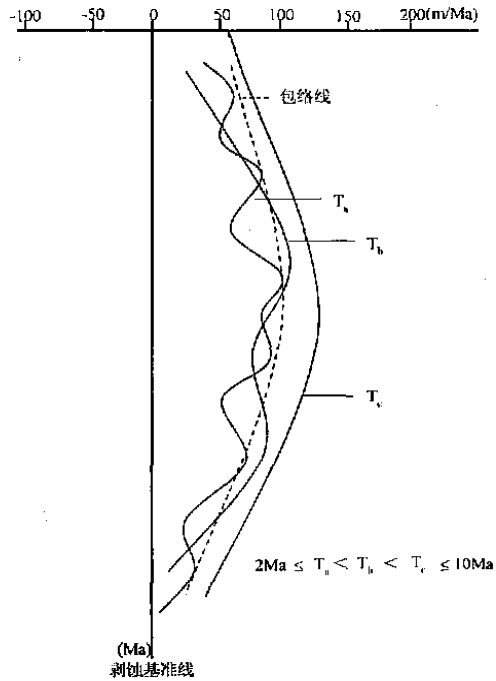


图 6 储集层与高频波动曲线耦合关系模式图

Fig. 6 Relationship between reservoir rock and high-frequency wave curve

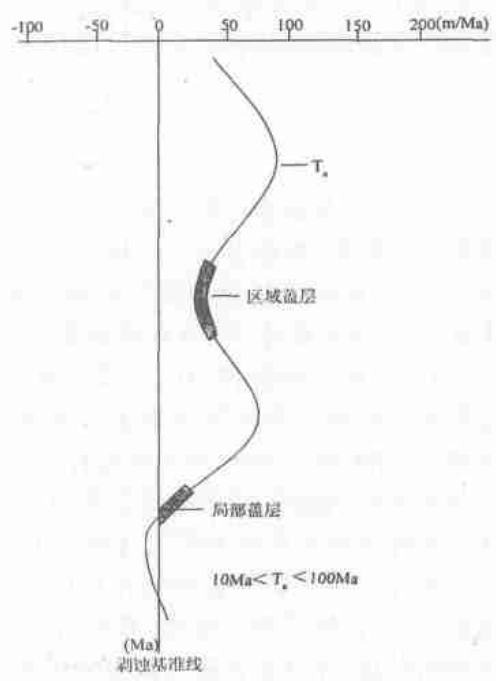


图 7 盖层与低频波动曲线耦合关系模式图

Fig. 7 Relationship between caprock and low-frequency wave curve

有一定的厚度和分布范围,以保证其具有封盖能力。正是由于盖层分布范围决定其封盖能力的原因,使得盖层的区域性分布就显得尤为重要,所以在低频波动曲线上讨论其特征要比在高频曲线上讨论更有意义。分析井和典型剖面的低频波动曲线特征,不难发现,盖层与低频波动曲线的波谷相吻合,并且常与地层的剥蚀相伴,而波谷分布可位于沉积—剥蚀基准线的右侧,也可以位于基准线左侧。总结归纳盖层与波动曲线的耦合关系,模式图如图 7。其石油地质意义在于,波动曲线波谷处是沉积速率较低时期,具有有机质含量低,难以形成有效生油岩,同时由于沉积速率低,沉积物多为致密泥岩等,因此,容易形成盖层。

2.4 波动特征与油气运移通道(不整合面)的耦合关系

不整合面和沉积间断是油气运移的重要通道,在不同的波动周期曲线上均位于沉积剥蚀基准线左侧,表现为不同规模的剥蚀厚度。楚雄盆地寒武系—奥陶系,奥陶系—泥盆系,泥盆系—三叠系,侏罗系—白垩系均表现为大规模的不整合,波动曲线上表现为位于沉积—剥蚀基准线左侧的波谷(图 1)。总结归纳出波动特征与油气运移通道(不整合面)的耦合关系如图 8 所示,其石油地质意义在于,波动曲线反映沉

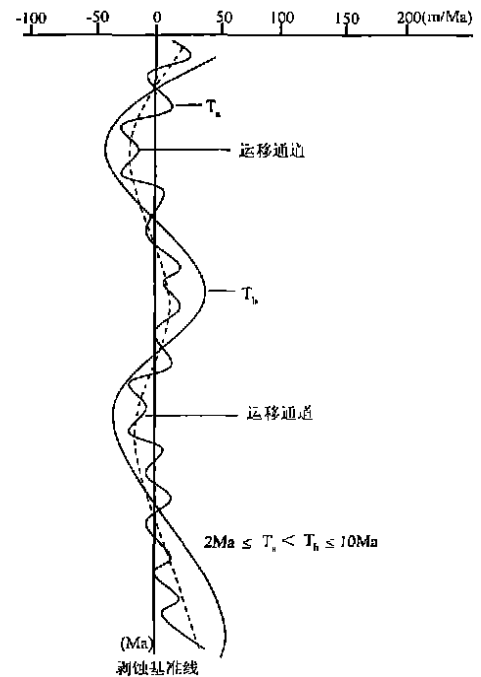


图 8 运移通道与低频波动曲线耦合关系模式图

Fig. 8 Relationship between migration channel and low-frequency wave curve

积—剥蚀过程,又反映大规模不整合形成过程,以及在低频波动过程中表现连续沉积地层,在高频波动过

程中仍可识别出次一级沉积间断,这些沉积间断有的相当于准层序界面的沉积间断,在油气运移中起重要的作用。

3 结论

上述研究表明:盆地波动特征确实与油气成藏条件有着紧密内在联系,根据含油气盆地不同周期波动曲线特征,可以以不同的精度预测其有利生油层、储集层和盖层时空分布规律,进而有效地指导油气勘探。但是,也应该认识到这种对应关系的复杂性,高频波动过程对沉积地层的控制作用还受到低频波动过程等因素的影响,在不同级别的波动作用过程中,哪一种占优势和起决定作用还有要具体问题具体分析。由于沉积环境的多样性和沉积条件变化的复杂性,所以,只有综合对比研究各种沉积环境的不同级别波动过程,建立比较系统完善的“模型库”,才能得出符合实际的结论,并具有普遍的预测和指导作用。

参考文献(References)

- 1 刘国臣,李京昌.资料的整理与分析—盆地波动分析的关键.石油大学学报,1994,18:1~7[Liu G C, LI J C. Collection and sorting out of analysis data—the key of wave analysis. Journal of China University of Petroleum,1994,18:1~7]
- 2 金之钧,张一伟,刘国臣,等.沉积盆地物理分析—波动分析.地质论评,1996,42(增刊):170~180[Jin Z J, Zhang Y W, Liu G C, et al. Physical analysis of sedimentary basin—analysis of wave processes. Geological Review,1996,42(Suppl.):170~180]
- 3 朱夏.论中国含油气盆地构造.北京:石油工业出版社,1986[Zhu X. The statement of structure in oil and gas-bearing basin in China. Beijing:Petroleum Industry Press,1986]
- 4 黄汲清,任纪舜,等.中国大地构造演化.北京:科学出版社,1980[Huang J Q, Ren J S, et al. The tectonic evolution in China. Beijing:Science Press,1980]
- 5 Suasser A. Lagoonal-peritidal sequence in carbonate environments: autocyclic and allocyclic processes. In:Einsle G, et al, eds. Cycles and Events in Stratigraphy. Spring Verlag,1991.709~721
- 6 李儒峰,鲍志东.鄂尔多斯盆地中部马五1亚段高分辨率层序地层格架中风化成岩模式和储层特征.沉积学报,1999,17(3):390~396[Li R F, Bao Z D. Diagenesis model and reservoir characteristics within high resolution sequence stratigraphic framework in the Mawu 1 submember in Ordos basin, China. Acta Sedimentologica Sinica, 1999,17(3):390~396]

Analysis for the Coupling Relationship between Basin Wave Characteristics and Source, Reservoir and Cap Rocks: A case study of Chuxiong Basin, Yunnan

LI Ru-feng¹ JIN Zhi-jun² MA Yong-sheng³ FAN Shao-lei¹

1 (University of Petroleum, Beijing 102249)

2 (Exploration and Development Institute, SINOPEC, Beijing 100089)

3 (Southern E & P Company, SINOPEC, Kunming 650021)

Abstract The wave process analysis of sedimentary basin is bran - new theory and method on oil and gas basin analysis. Based on the wave principle and method, the deposition and erosion processes of the deeper part or its vicinity, where strata data are unknown, can be predicted, and the erosion thickness can be calculated and the evolutionary history of the basin can be restored in detail. The transferred law of deposition and subsidence center can be found, and the relativity between wave characteristic and petroleum geologic factors can be recognized, so all of these results make it possible that we discuss the law of petroleum forming and distributing from bran - new point of view.

In this paper, a case study on Chuxiong basin is given. These coupling relationships between wave characteristic curve and source, reservoir and cap rocks are established by wave processes analysis for wells and sections of Chuxiong basin, and four kinds of coupling patterns are given, in which the source layer occur at the transition position of the wave curve in the right of datum line, the reservoir lie in the wave crest position of the wave curve in the right of datum line, the cover locate in the trough position of the wave curve the in right of datum line, and the migration channel (unconformity) appear on the trough position of the wave curve in the left of datum line. These research achievements are of important significance for predicting space-time distribution law of source, reservoir and cap rocks, and for effectively instructing oil and gas exploration.

Key words wave characteristics, wave period, petroleum geologic factor, coupling patterns, Chuxiong basin