

米仓山前陆冲断带波动特征与构造沉积演化

李儒峰^{①*}, 郭彤楼^②, 陈国飞^①, 张刚雄^①

①中国石油大学(北京)资源与信息学院, 盆地与油藏研究中心, 北京 102249;

②中国石化勘探南方分公司, 成都 610041

* E-mail: lirufeng717@163.com

收稿日期: 2007-04-20; 接受日期: 2008-03-21

国家重点基础研究发展计划项目(编号: G19990433, 2005CB422100)、国家自然科学基金项目(批准号: 40672143)、中石化勘探南方分公司和石油天然气成藏机理教育部重点实验室(中国石油大学)资助项目

摘要 首次将沉积波动过程分析这一新技术方法应用于米仓山前陆冲断带的构造沉积演化和油气成藏条件研究中, 通过对研究区内典型井和露头剖面的波动特征分析, 得出米仓山前陆冲断带存在有 2 个一级沉积波动周期(220 Ma), 其分别与加里东-海西和印支-燕山-喜马拉雅两个构造旋回相对应; 4 个二级沉积波动周期(100 Ma), 其与研究区两个沉积高峰期和两个剥蚀高峰期相对应; 12 个三级沉积波动(35 Ma)和 21 个四级沉积波动周期(20 Ma), 它们与研究区不同时期沉积-剥蚀过程相对应. 研究还发现 35 Ma 周期和 20 Ma 周期的波动曲线特征与生油层、储集层和盖层发育规律具有成因联系: 生油层一般发育在“波峰”与“波谷”之间的转折部位, 或是不同波动周期的波动曲线转折部位的叠加, 呈现“X”型; 储集层多发育在波动特征曲线的“波峰”部位; 盖层多发育在波动特征曲线位于沉积-剥蚀基准线右侧的“波谷”部位. 因此, 应用沉积波动过程分析这一新技术方法, 即可以从成因角度重新认识研究区构造沉积演化过程, 同时可以预测生储盖层的发育规律, 对成藏条件研究具有重要的意义.

关键词

米仓山前陆冲断带
沉积波动过程
波动周期
构造沉积演化
成藏条件

盆地从形成、发展到消亡的演化是在多种内动力和外动力作用所引起的各种波干涉响应下的沉积-剥蚀过程. 沉积波动过程分析是从动态成因过程角度研究盆地构造沉积演化的新方法, 它通过分析一般的地质现象(周期的、非周期的、似周期), 采用滑动窗口的方法分解出有规律的波动过程, 并建立波动方程, 从而达到定量预测的目的. 其主要研究方法是: 详细整理地质资料(地震、钻井、测井和露头)的基础上, 将地层岩性剖面转化成沉积速率剖面, 在沉积速率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、振幅和零相位, 建立它们的波动方程, 这一波动方程可以准确地定量描述盆地形成演

化过程中的升降运动所导致的沉积-剥蚀响应, 预测生储盖组合, 恢复无地层“记录”中的沉积-剥蚀过程, 进而研究盆地的构造沉积演化以及与油气形成分布的关系 [1-3].

1982 年前苏联学者施比伊曼提出波相互叠加干涉可以形成不同的构造样式, 到 1989 至 1991 年施比伊曼和缅斯尼科娃共同创立沉积波动过程分析方法 [4,5] 1992 年将金之钧波动过程分析方法介绍到国内, 国内学者在后续的研究工作中完善、丰富和发展了这一方法和理论, 研发出了波动过程分析软件, 将傅立叶变换引入分析过程, 大大提高了工作效率; 研究领域不断拓展, 由稳定地台到前陆盆地, 再到前陆冲段

带; 提出了波动周期与成藏旋回相关关系; 波动过程分析与层序地层学结合定量研究不整合界面的剥蚀量; 建立了高频波动特征与油气成藏条件的耦合关系等, 为含油气盆地研究提出了一种新方法, 在国内外盆地研究领域独树一帜 [6~8]。

米仓山前陆冲断带位于扬子板块北缘(图 1), 由于多期构造运动的影响, 具有多个不整合及复杂的构造沉积演化历史, 油气地质条件相当复杂 [9~11]。虽经历了“七五”, “八五”的重点攻关, 但尚未取得重大突破。因此, 以冲断带地质分析为基础, 以沉积波动过程分析为主要研究手段, 研究其构造沉积演化规律, 可以深化对米仓山前陆冲断带基本地质条件的认识, 有利于揭示研究区的油气形成和分布规律。

1 研究区波动方程的建立

1.1 波动单元的划分

波动过程分析方法的首要问题是结合地质、构造、地震等资料分析, 对研究区进行波动单元划分。波动单元是指具有相同或相似构造沉积背景, 可以用于盆地沉积-剥蚀过程分析的基本单元。它一般具有

以下特点: 它一般受控于控盆或控带断裂; 沉积地层特征相对一致; 构造沉积演化基本相同; 各级波动周期基本吻合; 波动振幅在一个数量级; 石油地质条件相似。波动单元的划分有利于在勘探程度较低的盆地进行沉积波动过程分析¹⁾。

通过地层、沉积和构造特征综合分析, 将研究区划分为 3 个波动单元, 分别为波动单元 I、波动单元 II、波动单元 III(图 1)

在上述 3 个波动单元中波动单元 I 的沉积波动特征反映了米仓山前陆冲断带的构造沉积演化, 波动单元 II 的沉积波动特征则反映了米仓山冲断带至大巴山前陆冲断带的过渡转换区域的沉积波动特征; 波动单元 III 的沉积波动特征则反映了大巴山前陆冲断带的构造沉积演化, 因此本文将通过对波动单元 I 的波动分析来研究米仓山前陆冲断带波动特征是如何反映构造沉积演化的, 并探讨波动曲线特征与成藏条件关系。

1.2 波动参数的选择

沉积波动过程分析的参数包括: 地层原始厚度、

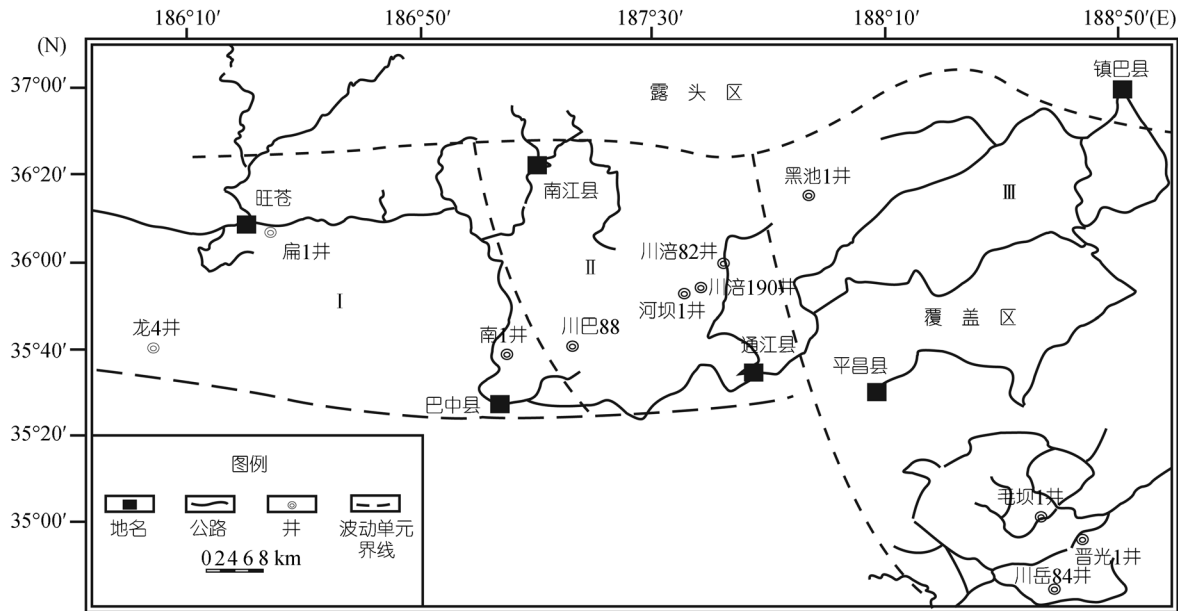


图 1 米仓山前陆冲断带波动单元划分图

1) 李儒峰, 等. 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. 中国石油化工股份有限公司, 研究报告. 2002

地层顶底界绝对年龄和不同地质时期的沉积速率。

由于研究区构造复杂, 断层较多, 导致地层重复现象比较常见, 如果不加以处理就会对研究结果分析产生较大的影响. 为此研究中结合钻井、测井和地震资料综合分析, 在统计现今地层厚度时扣除重复地层这样在恢复地层原始厚度时, 就最大限度地消除了地层重复对波动过程分析造成的影响. 原始地层厚度的恢复是根据其压实状态分不同岩性进行 [12].

为了求出沉积速率, 还要求出地层的形成时间. 地层沉积时间等于地层顶底界的绝对年龄之差. 本文在前人研究的基础上 [12], 对资料进行综合分析, 建立了地层年龄格架, 标定了地层顶底界限的年龄. 沉积速率是通过地层的恢复原始厚度与其形成时间相除求得(表 1).

表 1 旺苍剖面波动参数表

层号	原始厚度/m	恢复厚度/m	顶界年龄/Ma	底界年龄/Ma	时间间距/Ma	沉积速率/ m·Ma ⁻¹	地层名称
1	725	599	182	189	7	85.59	千佛崖
2	371	822	189	195	6	137.00	白田坝
3	841	718	195	205	10	71.76	须家河
4	439	273	205	219	14	19.53	雷口坡
5	708	693	219	225	6	115.42	嘉陵江
6	1026	748	225	230	5	149.52	飞仙关
7	31	60	230	232	2	30.18	长兴组
8	29	173	232	236	4	43.30	吴家坪
9	179	175	236	251	15	11.65	茅口组
10	71	77	251	259	8	9.66	栖霞组
11	42	1	259	270	11	0.10	梁山组

1.3 波动方程的建立

波动方程的建立是一个复杂和经验性很强的拟合过程, 其关键是寻找周期波, 发现控制盆地构造沉积演化的不同级别的波动周期, 即通过滑动窗口的滤波方法在沉积速率直方图上进行. 首先通过反演(滑动过程)寻找出控制研究区的主要波动周期后, 在进行正演调整出相和振幅变化规律及周期的“微调”, 最后找到一组波动周期曲线, 使其能在不同的级别上代表研究区的沉积-剥蚀过程, 拟合出盆地波动特征曲线, 并建立波动方程. 根据不同剖面 and 井得出波动方程和波动曲线具有不同程度差异, 主要反映在波的“振幅”和“初始相位”上. 导致差异的主

控因素是构造隆升和沉降以及沉积充填和剥蚀. 通过对波动过程分析, 建立了其波动方程, 得出了控制米仓山前陆冲段带构造沉积演化的波动周期分别为 750, 220, 100, 35, 20 Ma 和它们的波动特征曲线, 逐级分析干涉后的每个周期波的波形特征, 能清楚的反映出盆地各个时期的构造沉积演化特点. 本文仅以旺苍剖面为例进行波动过程分析(图 2), 其波动方程为:

$$\begin{aligned} F(t) &= 15.5 + 0.015 \times t \times \sin(2\pi \times (t - 630) / 750), \\ G(t) &= F(t) + 0.28 \times F(t) \times \sin(2\pi \times (t - 140) / 220), \\ L(t) &= G(t) + 1.2 \times F(t) \times \sin(2\pi \times (t - 80) / 100), \\ M(t) &= L(t) + 1.3 \times F(t) \times \sin(2\pi \times (t - 8) / 35), \\ N(t) &= M(t) + 1.6 \times F(t) \times \sin(2\pi \times (t - 3) / 20). \end{aligned}$$

2 波动周期的地质意义

2.1 “能量函数”周期——760 Ma

760 Ma 的周期受天文因素控制, 代表一个盆地地质历史时期的总体升降趋势, 它可以形象的称为盆地的“生命周期”. 其他相对高的频率周期波都是在此周期波干涉叠加的基础上影响着盆地的生长. 所以称 760 Ma 周期波称为“能量函数”.

2.2 构造演化周期——220 Ma 和 100 Ma

天文过程(太阳系统银河系旋转周期)和深部过程(主要是地幔对流)是地球系统的两个主要过程, 控制研究区的 220 Ma 的天文周期波与地壳板块运动有着重要的对应关系, 盆地从震旦纪基底形成到现今所经历的 600 Ma 的地质历史演化时期中, 有 3 个 220 Ma 的周期波作用盆地, 从波动曲线特征上分析, 它们分别与加里东构造运动、海西-印支运动和燕山-喜马拉雅山构造运动基本吻合(图 2).

地幔对流是地壳运动基本力源, 在研究地幔对流时发现, 其并不是沿着同一个方向进行, 经过一段时间以后对流方向发生改变, 即在分层对流和全层对流之间交替进行, 这个周期大约为 60~100 Ma. 旺苍剖面 100 Ma 周期波曲线大致表现出 8 个交替时期: 245 Ma (二叠系茅口组)、270 Ma (二叠系梁山组)、330 Ma (石炭系)、370 Ma (泥盆系)、440 Ma (奥陶系五峰组)、480 Ma (奥陶系下统)、535 Ma (寒武系孔明洞组)和 570 Ma (震旦系灯影组).

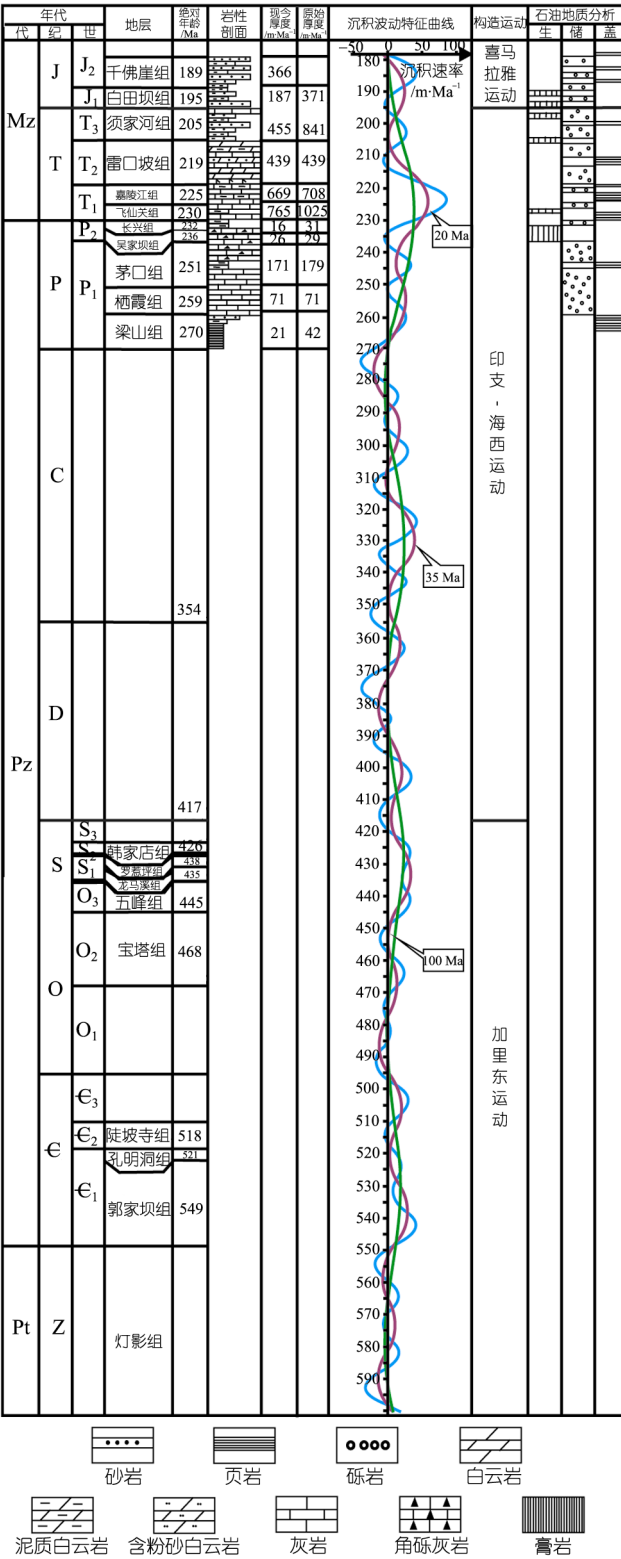


图 2 旺苍剖面波动过程与成藏条件综合分析图
图内 C→Z 均根据波动方法预测得到地层发育状况

综上所述, 220 Ma 和 100 Ma 两个周期波在能量函数基础上干涉叠加形成的内动力地质作用, 形成了盆地可容纳空间。

2.3 沉积-剥蚀周期——35 Ma 和 20 Ma

在内动力地质作用提供盆地可容纳空间同时, 沉积-剥蚀过程对盆地的演化更为重要, 主要表现在: 提供盆地沉积需要的物源填充物(碎屑和生物物源), 当时的气候条件和生物特征, 而气候和生物特征又为相互印证的关系。古生物学家在研究生物群的演化后, 发现古生物集群演化具有周期性, 大约为 30 Ma 左右, 同时其也显示了气候的变化情况。旺苍剖面通过滤波得出研究区存在 35 Ma 的周期波。

在长周期波控制盆地生长形态时, 相对小的周期波代表和揭示了盆地沉积-剥蚀的纵向演化、平面迁移特征和不整合分布规律。其中 20 Ma 的周期波严格控制这一过程。对旺苍剖面 20 Ma 周期的波动曲线特征分析, 得出旺苍剖面沉积-剥蚀演化纵向规律如下:

震旦纪灯影期(630~549 Ma)波动曲线在沉积-剥蚀基准线(以下简称“基准线”)两侧均存在, 说明在该时期沉积和剥蚀作用都曾发生, 晚期波动曲线位于基准线左侧呈“波谷”, 反映出震旦系灯影组顶部遭受剥蚀, 剖面上表现为其与上覆寒武系呈不整合接触。

寒武纪(495~549 Ma)波动曲线主要分布在基准线右侧, 说明在该时期以沉积作用为主, 沉积速率在早期和中期较高, 平均约为 100 m/Ma, 末期波动曲线位于基准线左侧呈“波谷”下降翼, 反映出寒武系顶部存在小幅度的剥蚀, 剖面上表现为其与上覆奥陶系呈不整合接触。

早奥陶世波动曲线主要分布在基准线左侧, 表明在该时期以剥蚀作用为主; 中奥陶世波动曲线在基准线两侧均有分布, 同时, 右侧积分面积明显大于左侧积分面积, 表明该时期沉积和剥蚀作用都曾发生, 但最终表现存在中奥陶统; 晚奥陶世波动曲线位于基准线右侧, 表明在该时期以沉积作用为主, 在奥陶系与志留系界限, 波动曲线表现为处于基准线右侧的“波谷”, 表明二者之间存在低速沉积。

志留纪(409~435 Ma)早期波动曲线位于基准线右侧, 表明在该时期以沉积作用为主, 沉积了龙马溪组 and 罗惹坪组; 志留纪晚期波动曲线位于基准线左

侧, 表明在该时期以剥蚀作用为主, 缺失中上志留统; 在泥盆系与志留系界限, 波动曲线表现为处于基准线左侧的“波谷”, 表明二者之间为不整合接触。

泥盆纪(360~409 Ma)波动曲线主要分布在基准线左侧, 左侧积分面积远大于右侧积分面积, 表明该时期为剥蚀期, 泥盆系在本区不存在。

石炭纪(270~360 Ma)早期波动曲线位于基准线左侧, 表明该时期仍为剥蚀期; 石炭纪中期(310~280 Ma)波动曲线分布在基准线右侧, 表明该时期为沉积期。石炭纪晚期波动曲线主要分布在基准线左侧, 表明该时期为剥蚀期, 在石炭系与泥盆系界限, 波动曲线表现为处于基准线左侧的“波谷”, 表明二者之间为不整合接触。

二叠纪(230~270 Ma)、三叠纪(195~230 Ma)、侏罗纪(195~230 Ma)三个时期在剖面和井中地质信息齐全。通过露头确定了岩性及其厚度和识别主要不整合, 在和井资料结合起来, 波动曲线特征和实际资料吻合。

3 波动特征与构造沉积演化和油气成藏条件分析

3.1 波动特征与构造沉积演化相关性分析

在低频波动研究过程中发现, 控制米苍山前地区的周期为 760, 220, 100 和 35 Ma, 它们的意义已经说明。通过本次波动分析研究结合区域地质研究, 奥陶系-志留系, 对应于被动大陆边缘发展阶段, 虽然波动特征表现出沉积速率振荡变化, 但总体上处于抬升遭受剥蚀状态。泥盆系-石炭系地壳破裂、板块边缘断块隆升, 总体上沉积很少。进入三叠系后, 盆地进入前陆盆地发育阶段, 总体上表现为沉降接受沉积状态, 地层分布范围较广。

(1) 一级沉积波动周期(220 Ma)。在米苍山前地区, 晚震旦早期(580 Ma)至今可划分为沉积速率 3 个一级沉积波动周期(G), 549~354 Ma 为第一个一级沉积波动周期, 其主体与加里东构造运动相吻合; 354~195 Ma 为第二个一级沉积波动周期, 其与海西-印支运动相吻合; 195 至今为第三个一级沉积波动周期, 其与燕山-喜马拉雅构造运动相吻合。

(2) 二级沉积波动周期(100 Ma)。通过沉积盆地波动过程分析, 可将米苍山前地区划分为 6 个沉积速率具有高-低-高特征的二级沉积波动周期(N), 每

个周期持续时间约 100 Ma, 与四川盆地北部六个演化阶段有着较好的对应关系。

震旦纪灯影期至志留纪包含了沉积速率具低-高-低特征的 2 个二级周期, 大致相当于盆地的离散边缘演化阶段, 对应着加里东构造运动期。该期扬子准地台西南部基本上由两个单元组成, 东部康滇隆起(现今秦岭中段前陆冲断带前陆隆起)属台缘隆起, 其西部为台缘坳陷, 四川盆地北部前陆隆起为大陆浅海区, 形成一套台地型碳酸盐岩夹碎屑沉积, 震旦系厚 548~1195 m, 寒武系厚 888~1450 m, 奥陶系厚 68.86~72.6 m, 志留系仅存下统罗惹坪组和龙马溪组。

泥盆纪至二叠纪包含了沉积速率具低-高特征的 2 个二级沉积波动周期, 大致相当于盆地演化的活动大陆边缘演化阶段, 对应于海西构造运动期。该期构造体制转化为挤压性质的活动大陆边缘, 多有间歇性的海侵发生, 在该时期内沉积与剥蚀速率相当。

三叠纪至早白垩纪包含了沉积速率具高-低-高特征的 2 个二级周期, 大致相当于盆地演化的前陆盆地形成演化阶段。三叠纪时金沙江弧的出现使该区进入弧后盆地发展阶段, 早中三叠世, 四川盆地北部主体处于扬子准地台西南的滇中丘陵-平原区域。

在喜马拉雅运动影响下, 盆地频频震荡沉降, 沉积中心向东迁移, 沉积范围也不断扩展, 早、中侏罗世沉积了内陆湖相砂泥岩夹泥晶灰岩, 代表湖盆鼎盛期沉积。晚侏罗世为红色粗碎屑沉积。侏罗纪末期的燕山运动三幕使盆地重新抬升、被剥蚀。早白垩世仅在盆地西部有分布, 东部缺失该期地层。

3.2 波动特征与油气成藏条件分析

米仓山前地区是一个演化历史漫长, 并受到后期改造的叠合盆地, 盆地的发育演化具有多旋回性的特点。波动过程分析表明, 在漫长的地质历史时期, 米仓山前地区经历过多期沉降与隆升剥蚀的转换过程。结合旺苍剖面低频波动分析实例, 归纳总结该区生、储、盖层的纵向分布规律与波动曲线(35 和 20 Ma)的耦合关系, 即生、储、盖层段与不同周期波的波形耦合关系。

(1) 波动曲线与生油层的耦合关系。生油层有规律的出现于波动曲线的特定部位。总结归纳旺苍剖面寒武系、志留系和下二叠统三套主要生烃层系与

波动曲线的对应关系, 得出生油层多发育在 35 和 20 Ma 两个周期波叠加的波谷-波峰转折部位, 特征呈现“X”, 以旺苍剖面二叠系为例如图 3 所示。从地质意义上分析, 大小周期波动过程(35 Ma 和 20 Ma)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, 共同作用使得水体环境相对稳定, 有利于富含有机质的细粒物质搬运和沉积, 即生油层发育。

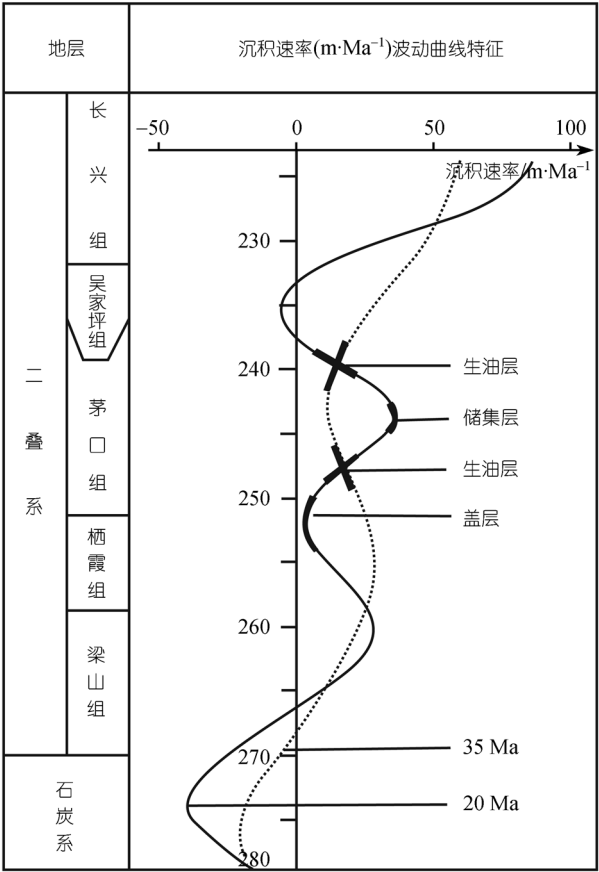


图 3 波动特征与生储盖的耦合关系

(2) 波动曲线与储集层的耦合关系。储集层均发育在低频波动曲线的波峰位置, 因为其对应的沉积环境沉积速率相对较高, 一般为海相潮间-潮上带沉积的灰岩、白云岩和膏岩, 河流和三角洲相沉积的砂岩。旺苍剖面二叠系波动曲线显示的储集层特征如图 3 所示。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, 所以沉积层孔隙极其发育, 有利于形成较好的储集空间。

(3) 波动曲线与盖层的耦合关系。盖层与低频

波动曲线的波谷吻合的较好,但波谷不能位于沉积-剥蚀基准线的左侧.盖层一般由致密的泥岩、灰岩构成,而波动曲线波谷出沉积速率较低,有机质含量低,沉积物多为致密的泥岩和潮上带的灰岩,盖层发育.见图 3 为旺苍剖面二叠系低频波动曲线与盖层的耦合关系.

4 讨论

沉积波动过程分析理论方法是建立在板块内部盆地以垂直运动为主的基础上,如何将其运用到前陆冲断带内和推覆带内,作者在相关研究中进行了不断的探索和尝试^[2].首先,在基础数据的采集和整理过程中要剔除冲断和推覆所造成地层重复,根据地层倾角恢复地层真厚度;然后,在综合研究的基础上将地层受力分解成为水平和垂直两个方向,垂直方向的力造成盆地的抬升与沉降,可以运用沉积波动过程分析理论方法研究其沉积-剥蚀演化过程,而水平方向的力则主要造成地层的重复,其波动特征曲线必然反映出与区域宏观构造演化相悖之处,因此,通过综合分析采用构造恢复技术是可以消除板块内部小规模水平构造运动对盆地沉积波动过程的影响.

5 结论

(1) 通过对研究区内典型井和露头剖面的波动特征分析,得出米仓山前陆冲断带存在有 2 个一级沉积波动周期(220 Ma),其分别与加里东-海西和印支-燕山-喜马拉雅两个构造旋回相对应;4 个二级沉积波动周期(100 Ma),其与研究区两个沉积高峰期和两个剥蚀高峰期相对应;12 个三级沉积波动(35 Ma)和 21 个四级沉积波动周期(20 Ma),它们与研究区不同时期沉积-剥蚀过程相对应.

(2) 研究发现 35 Ma 周期和 20 Ma 周期的波动曲线特征与生油层、储集层和盖层发育规律具有成因联系:生油层一般发育在“波峰”与“波谷”之间的转折部位,或是不同波动周期的波动曲线转折部位的叠加,呈现“X”型;储集层多发育在波动特征曲线的“波峰”部位;盖层多发育在波动特征曲线位于沉积-剥蚀基准线右侧的“波谷”部位.

(3) 应用沉积波动过程分析这一新技术方法,即可以从成因角度重新认识研究区构造沉积演化过程,同时可以预测生储盖层的发育规律,对成藏条件研究具有重要的意义.

致谢 感谢王月辉、刘玉娥同志对部分文、图的修改和清绘,感谢审稿人认真的审阅并提出的建议和意见.

参考文献

- 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
- 2 刘国臣,金之钧,李京昌,等.沉积盆地沉积-剥蚀定量过程研究的一种新方法——盆地波动分析应用之一.沉积学报,1995,13(3):23—30
- 3 金之钧,张一伟,等.沉积盆地物理分析-波动分析.地质论评,1996,42(增刊):170—180
- 4 Ясников Т П, Шпилеван В И. Волновая звонция осадочных бассейнов, Труды Запсибниги. Тюмень, 1989
- 5 Мисникова Т П. Динамика развития осадочных как основа оценки их нефтегазоносности. Автореферат докторской диссертации М, 1991
- 6 施比伊曼 В И, 张一伟, 金之钧, 等. 波动地质学在黄骅拗陷分析中的应用. 石油学报, 1994, 15(增刊): 19—26
- 7 李儒峰, 金之钧, 马永生, 等. 云南楚雄盆地波动特征及构造演化分析. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(3): 309—316
- 8 李儒峰, 马永生, 汤良杰, 等. 盆地波动特征与生储盖层耦合关系分析——以云南楚雄盆地为例. 沉积学报, 2004, 22(3): 474—480
- 9 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十). 北京: 石油工业出版社, 1989
- 10 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社, 1996
- 11 江为为, 刘伊克, 郝天珩, 等. 四川盆地综合地质、地球物理研究. 地球物理学进展, 2001, 16(1): 11—23
- 12 王鸿楦, 李光岑, 编译. 国际时代地层对比表. 北京: 地质出版社, 1990

1) 汤良杰, 李儒峰, 吴世祥, 等. 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. 中国石油化工股份有限公司. 研究报告, 2002

2) 汤良杰, 李儒峰, 周雁, 等. 秦岭中段前陆冲段带波动过程分析及其对油气形成与分布的控制作用. 中国石油化工股份有限公司. 研究报告, 2004