

# 层序界面的识别与划分

自上世纪 50 年代 Sloss (1959) 提出层序地层学 (Sequence Stratigraphy) 的概念以来, 以 P.R. Vail 为代表的众多中外学者进行了大量卓有成效的工作, 发展和完善了层序地层学。其研究领域由当初的被动大陆边缘扩展到活动大陆边缘盆地、前陆盆地和陆相盆地; 从研究全盆地的层序地层到研究盆地中某一相带的层序地层, 研究时代也从起初的中新生代拓宽到了古生代。层序地层学相比于其它地层学 (岩石地层学、生物地层学、磁性地层学、化学地层学、地震地层学、动力地层学) 具有多方面的优点: ①沉积解释比其它地层学更加符合客观地质实际; ②对储集层、生油层、盖层的时空展布具有更强的预测性; ③在勘探方面更有助于在成熟盆地和新盆地发现新的油气层; ④在开发方面能提高储集层、生油层和盖层的预测精度。

在层序地层学研究中, 最关键的是层序的识别和划分。本文旨在参阅国内外的最新研究资料, 综述海相地层和陆相地层层序界面的物质表现形式以及它们在地球物理资料上的表现形式, 以期在以后的工作中具有一定的参考和指导价值。

## 1 海相地层层序界面的物质表现形式

### 1.1 古风化壳

古风化壳是地球历史时期地壳表层岩石经长期风化作用后所形成的分布于地壳表层的残积物, 它的存在代表了地质历史时期地壳上升, 海平面下降, 原岩暴露于水面之上而遭受过风化剥蚀, 所以古风化壳是典型的层序界面。

### 1.2 渣状层

渣状层又称渣状土, 是由于全球海平面下降条件下导致前期沉积暴露, 遭受风化剥蚀、淡水淋滤、溶解等地质作用所形成的异常疏松、似乎渣状的土壤。如上扬子贵州贞丰三叠系剖面第 3 层序界面上的紫红色粉土岩。

### 1.3 河流回春作用面

河流回春作用是由于全球海平面快速下降, 陆棚的一部分或全部暴露地表, 河流推进至陆棚并下切陆棚, 形成河流深切谷。如下扬子地区江苏江宁县坟头村志留系剖面, 坟头组内的一个三级层序界面上发育 10~20cm 的残积砾岩, 砾石扁平, 定向排列, 与下伏地层成切割关系。

### 1.4 古喀斯特作用面

古喀斯特作用面是指地质历史时期发育的、并被后来沉积物所覆盖的 (含有  $\text{CO}_2$  的地下水和地表水对可溶性碳酸盐岩的溶解、淋滤、侵蚀和沉积等) 古岩溶作用所形成的作用面。此类型界面的形成过程即是层序界面的发育过程, 即原始位于水体之下沉积的碳酸盐岩在构造抬升或海平面下降条件下暴露地表、遭受风

化、剥蚀，从而形成古喀斯特作用面。

### 1.5 斜坡重力流冲刷侵蚀面

此类界面在中国南方震旦系—三叠系沉积地层中的台地边缘斜坡剖面上广泛发育，主要表现为一套台地边缘垮塌沉积或斜坡侵蚀作用形成的不规则界面及其之上的低水位期的角砾状灰岩。这类界面是在海平面下降速率大于盆地沉降速率条件下所形成的典型层序界面。

### 1.6 盆地内浊流侵蚀作用面

此类界面主要表现为伴随着相对海平面的快速下降盆地内发育的浊流对前期沉积冲刷侵蚀形成不规则的界面，界面之上发育 LST 期浊积砂岩，此类砂岩的底面槽模特别发育。如广西田林潞城、八渡三叠系剖面、湖南木阳易家冲三叠系剖面等。

### 1.7 火山事件作用面

是一套与火山事件作用有关的，可将层序划分开来的一套火山作用形成的产物。如中国南方海相上、中二叠统之间的界面即为一火山事件作用面，主要表现为中二叠世结束之后，随着东吴运动主幕的拉开，在广大的川滇地区需称了大面积分布的玄武岩堆积，也由于此次构造运动使得中二叠世的海域退缩到黔南以南的地区，而其它地区上升成陆，遭受风化剥蚀，并为铁、铝、硫等矿床的形成创造了条件。

### 1.8 上超面

上超面是指后期沉积层与前期沉积层之间为一上超接触关系，这是由于海平面下降后又上升这一转变过程的产物。所以上超面也为一层序界面。

### 1.9 岩性、岩相转换面

岩性、岩相转换面是在海平面下降速率小于沉降速率条件下形成的，其主要表现形式为陆上暴露而河流回春现象发生，台地上和台地边缘可能会经历短暂的暴露，斜坡侵蚀作用不明显，盆地内不发育低水位扇形体。

## 2 陆相地层层序边界的识别

### 2.1 地震剖面上的识别标志

不整合面表明存在指示重大沉积间断的陆上侵蚀削截或陆上暴露现象。地层不整合在地震剖面上会表现为地震不整合一现象，故利用地震剖面可以识别不整合。地震剖面上不整合的识别主要根据同相轴的反射终止方式来判别，典型的陆相地震不整合反射有削蚀(Truncation)、上超(Onlap)及顶超(Toplap)三种终止形式(图 1)。

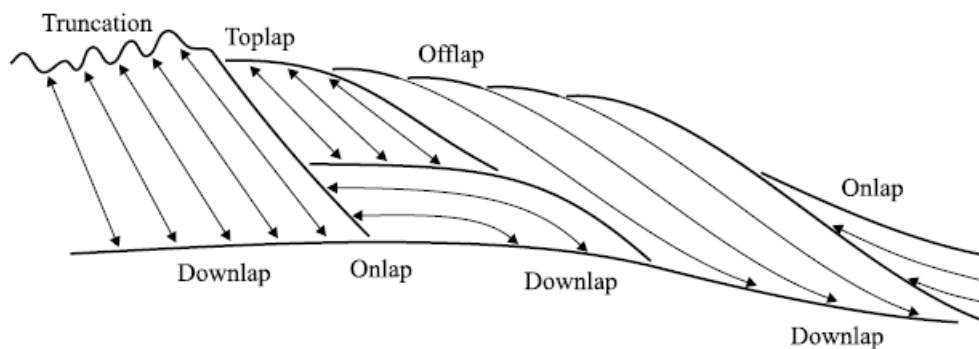


图 1 地震层序内部反射终止示意图

### 2.11 削蚀(削截、侵蚀)现象

因侵蚀作用引起的地层侧向终止，出现在层序顶界面，它既是构造运动发育的直接证据，也是最可靠的层序划分标志。它既是下伏倾斜地层的顶部与上覆水平层间的反射终止，也可以是河床底面侵蚀造成的下伏水平地层反射终止。

### 2.12 上超现象

在湖盆水域不断扩大的情况下，层序的底部在前期层序界面上逆沉积斜坡上逐层超覆。湖岸上超一般分布在湖盆边缘，反映湖平面的相对上升，是层序底界面的可靠标志。

### 2.13 顶超现象

指沿倾斜地层的无沉积顶面被新地层所超覆，在地质上是一种时间不长、由于沉积基准面太低而产生的沉积物过路现象，代表无沉积作用或水流冲刷作用的沉积间断，见于层序顶界面。

此外，对于海相层序中发育的下超(Downlap)现象，在湖盆中可能并不发育。陆相湖盆面积小、物源近，陆源碎屑供应丰富，通常情况下只要湖泊存在，任何地方都有沉积作用，只是厚薄、粗细的差别而已。下超面的形成由于远源泥岩的沉积速率相对于近源碎屑的沉积速率小，使边缘沉积厚而湖盆中心沉积薄，造成反射同相轴从边缘向中心逐渐向下“收敛”的情况，因此湖相地层中，下超面实际上是一种整合面。

## 2.2 沉积地质标志

### 2.2.1 古风化暴露面

分布广泛，主要包括古土壤和植物根土层。古暴露面上风化壳是很好的不整合界面标志。古风化壳以钙质风化壳最为常见，其次是铁质、铝质和硅质风化壳。

### 2.2.2 河床滞留沉积

河床滞留沉积是留在河床底部、集中堆积成不连续透镜体的砾石等粗粒碎屑物质，这些粗碎屑物质被河流由上游搬来或近侧向侵蚀海岸而形成，而细粒物质被选择性搬运走，河床滞留沉积的底部常具有明显的冲刷界面，是层序边界的标

志。

### 2.2.3 沉积旋回性

包括正旋回沉积、反旋回沉积及复合旋回沉积，根据岩电特征划分出不同级别的旋回借以判别层序界面的位置。

### 2.2.4 风暴岩

当湖泊处于广阔盆地时，湖面宽、水体浅，强大的风暴浪导致形成风暴岩沉积。层序界面上常发育砂质风暴岩，这是因为发生大规模的水进。

### 2.2.5 岩性、岩相标志

岩性、岩相在垂直系列上的缺失、突变及底砾岩的出现，都可能是层序边界。

### 2.2.6 凝缩段

凝缩段通常与沉积层序期间最大水深相伴生，在湖盆中常形成于湖平面达到最高、湖岸上超点达到向陆最远时期，即最大湖泛面形成时期。而最大湖泛面是层序内的重要分界面，该界面以下是湖进体系域，界面以上是高位体系域。在测、录井资料上，该界面下为退积型准层序组，界面上为进积型准层序组。

松辽盆地凝缩段具有以下特征：①凝缩段由深灰色、灰黑色泥页岩、油页岩组成；②凝缩段内微体和超微体化石丰度高且分异度大；③在测井曲线上，生油凝缩段常以高自然伽马、低电阻率、平直自然电位为特征；④在地震反射剖面上，凝缩段响应于强振幅、高连续、分布广泛的地震反射，其上往往存在上覆层的系列下超点；⑤凝缩段有机碳含量高，自盆地中央向陆地方向有机碳含量有减少的趋势等。

最大洪泛面在地震剖面上有时表现为一个“下超面”。在此情况下，可以根据可容空间接近最大这一特征，在层序内寻找“上超点”接近盆地边缘最远处的“同相轴”，作为该层序的“最大洪泛面”。利用岩、电及分析化验资料，首先识别出凝缩段，并用合成地震记录标定到地震剖面上，从而也可在地震剖面上标定凝缩段的发育部位。

### 2.2.7 煤层（有争议）

有的学者认为，广泛分布的煤层可以作为层序边界的一种类型，因为泥碳堆积作用使煤保存下来只能发生在重要的碎屑沉积缺乏时和特定的构造和古气候条件下，可以将它与海相盆地充填中的凝缩剖面相类比。

## 2.3 古生物标志

### 2.3.1 生物（贝壳）碎屑层

生活在浅水环境中的含壳类生物，死亡后壳体经湖浪作用搬运至岸线附近，后期经湖水的不断冲刷破碎，形成贝壳碎屑层，其中壳体破碎严重，难以辨认其属种，并且呈乱杂状堆积。因此它可以反映湖岸环境，当其上地层为反映水体逐

渐或突然加深的沉积相类型时，这些碎屑层便可以近似代表层序或准层序组的顶，并可能代表层序的顶界。

#### 2.3.2 植物根迹化石

根迹化石是岩心中最易识别的遗迹化石，其种类繁多，生态特点复杂，虽不能绝对地作为暴露标志，但大都为陆面或极浅水环境下的产物。在层序边界的识别过程中，可以根据上、下地层植物根迹化石纵向上的变化推断层序边界的位置。

#### 2.3.3 遗迹化石

遗迹化石（除粪化石外）均为原地保存，它既是生物行为习性的反映，也是它们赖以生存底质的反映，而这两者直接受常驻环境因素的控制，因而与沉积环境关系十分密切。利用生物遗迹对环境的敏感性，可以反映在岩性剖面上表现出来的沉积间断面。

#### 2.3.4 生物数量的变化

层序是某一控制因素作用下所形成的一套地层，其中所含生物数量从下而上应该是渐变的，从多到少或从少到多因沉积环境不同而定。但层序边界上下的地层，由于湖水深度、沉积环境等的很大差异，生物数量差别很大，发生突变。从而利用地层中相邻地层中生物数量的突变而考虑是否存在层序界面。

#### 2.3.5 生物种属的变化

上、下地层中的化石所代表的时代相差较远，或古生物化石群突变，出现生物演化的不连续或生物种属的突变，都说明地层之间发生过沉积间断或长时间的侵蚀风化，是不整合（层序边界）存在的证据。

### 2.4 地球化学标志

不整合面以下的岩层中，由于风化暴露作用的结果，常常造成某些元素的特殊富集或贫乏，并引起同位素组成的变异，也可以形成某些盐类，这些均可作为识别层序边界的标志。

### 2.5 成岩作用标志

碎屑岩暴露地表时成岩作用较弱，且受后生成岩作用改造较强，故这类标志一般存在于碳酸盐岩类地层中。尽管如此，地表成岩环境下某些特殊产物（如高岭土层、褐铁矿）等仍作为识别层序界面的标志。

## 3 基准面旋回的识别

层序地层学中 3 种不同的学术流派——Exxon 的经典层序地层学（以两个不整合面或与其对应的整合面之间的地层单元为层序）、Galloway 的成因层序地层学（以最大海泛面划分层序单元）和 Gross 的成因层序学（以海进—海退的一个旋回沉积层作为一个层序）关于高分辨率层序的概念、高频层序界面的选择、形成机制的解释、层序内相域的划分、地层对比的原则等方面有较明显的差异（图

2)。

Mitchum&Vail (1991)按时间跨度将层序划分为五级，即>50Ma(一级)；

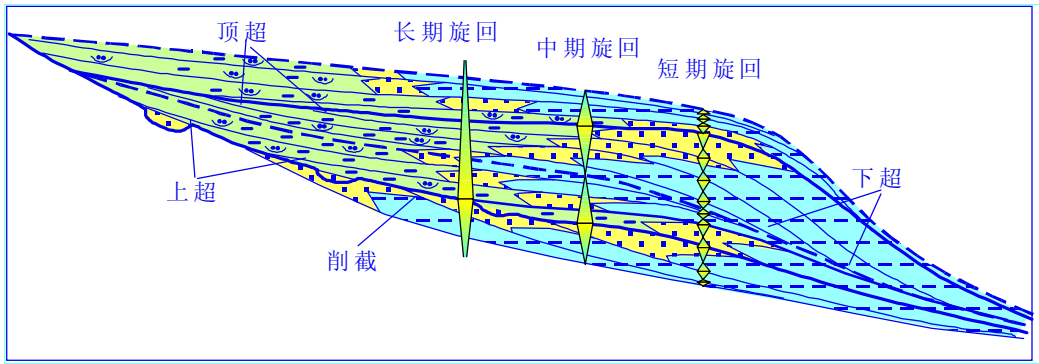


图 2 不同层序地层学派的层序划分原则及内部构成

5-50Ma(二级)；0.5-5Ma(三级)；0.1-0.5Ma(四级)；0.01-0.15Ma(五级)。其中，四、五级属准层序或准层序组。Wagoner 等(1990)据界面性质、地层单元特征和成因划分为 9 级，即巨层序、超层序、层序、准层序组、准层序、层组、层、纹层组和纹层。

用来识别不同级次基准面旋回的沉积学与地层学特征包括以下几个方面：①单一相物理性质的垂向划分；②相序与相组合的变化；③旋回对称性的变化；④旋回叠加样式的变化；⑤地层几何形态与接触关系（图 3）。

露头/岩心资料通常是识别短期基准面旋回的基础。测井曲线分析是通过短期旋回的叠加样式分析识别较长期基准面旋回的最好手段。地震资料除了可以通过反射终端的性质分析识别三级层序界面外，精细井—震标定后的地震剖面还可以在三级层序内进一步识别较高级次的基准面旋回。

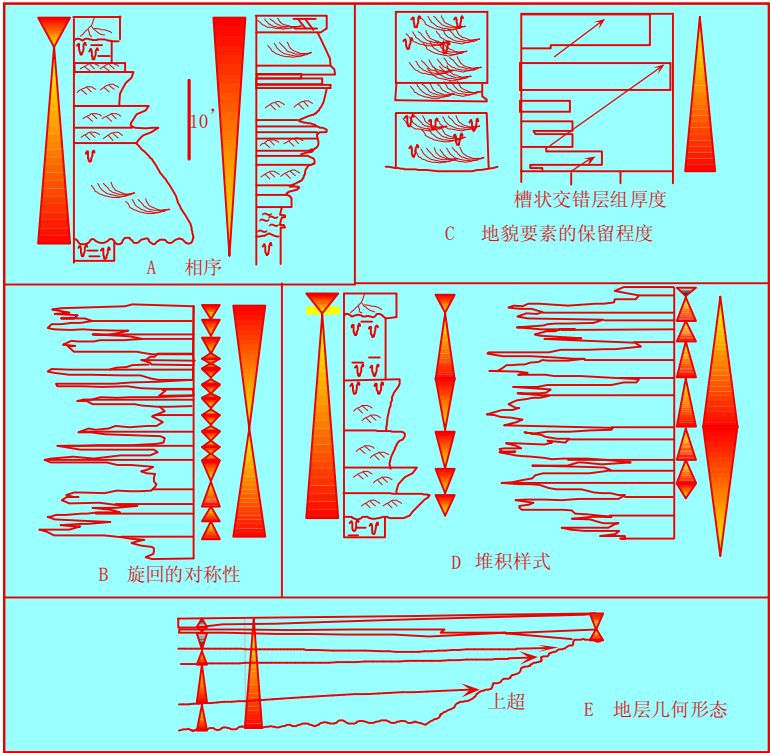


图 3 基准面旋回的识别标志

无论以哪种资料为主确定的基准面旋回，都要经过岩—电—震的相互标定与验证才能提高旋回识别的精度与可靠性（图4）。

### 3.1 岩性剖面上的识别标志

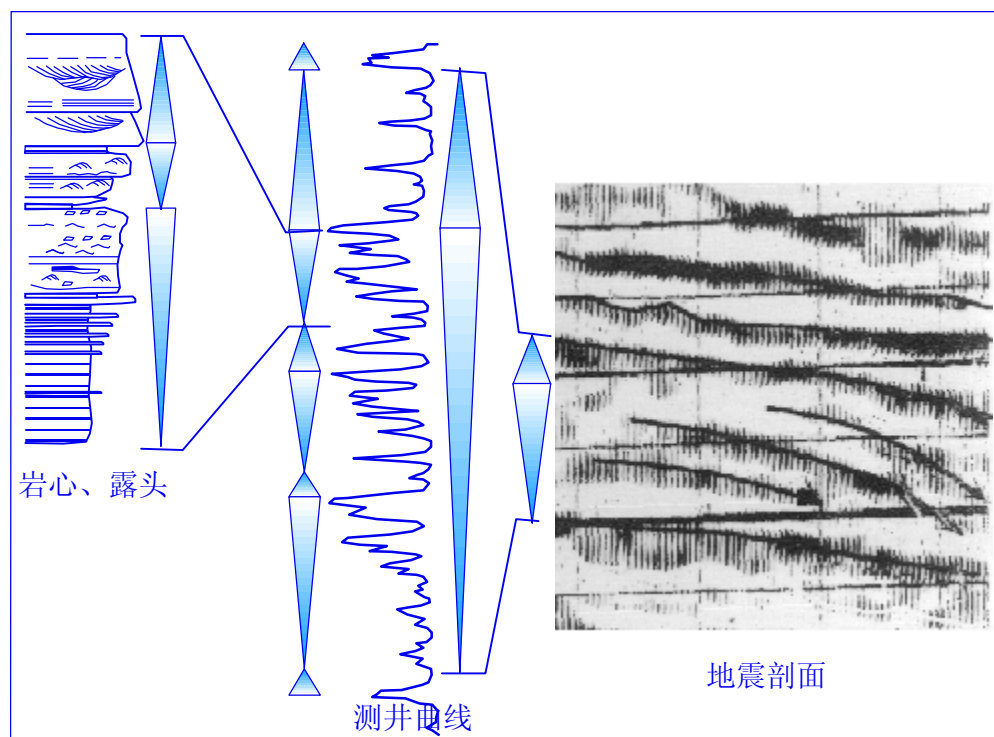


图4 多种资料综合的层序地层分析方法

岩心、钻井，特别是三维露头剖面较测井、地震反射剖面具有更高的分辨率，因而是基准面旋回，特别是短周期基准面旋回（成因层序）的识别基础。岩性剖面上旋回界面的识别标志有：

（1）地层剖面上的冲刷现象及其上覆的滞留沉积物，或代表基准面下降于地表之下的侵蚀冲刷面，或代表基准面上升时的水进冲刷面。后者与前者的区别是冲刷面幅度较小，且其上多见盆内屑。

（2）作为层序界面的滨岸上超的向下迁移，在钻井剖面中常表现为沉积相向盆地方向移动，如浅水沉积物直接覆于较深水沉积物之上，河流、浊流砂砾岩直接覆于深水泥岩之上，两类沉积之间往往缺乏过渡环境沉积。

（3）岩相类型或相组合在垂向剖面上的转换位置，如水体向上变浅的相序或相组合向水体变深的相序或相组合的转换处。

（4）砂、泥岩厚度旋回性变化，如层序界面之下，砂岩粒度向上变粗，砂泥比向上变大；层序界面之上则相反。这种旋回的变化特征常以叠加样式的改变表现出来。

根据上述特征可在不同沉积环境中识别短期基准面旋回（图 5）。

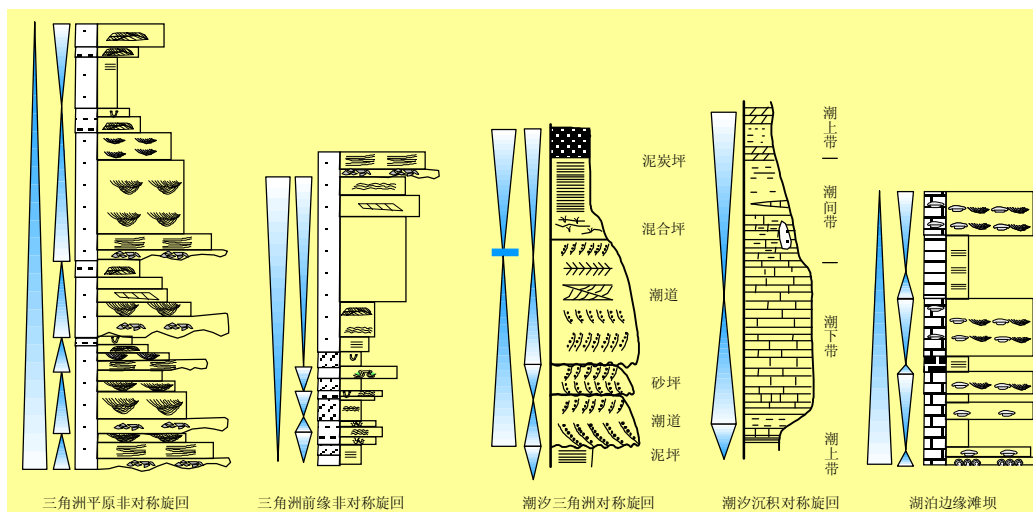


图 5 不同沉积环境中短期旋回的识别

### 3.2 测井曲线识别标志

测井曲线的高分辨率特征为各级次基准面旋回识别与划分提供了良好的资料基础。测井曲线基准面旋回的确定，特别是旋回界面的确定，是在对取心井段分析的基础上进行的。也就是说，首先要利用井段建立短期旋回及界面的测井响应模型，用于指导区域非取心井测井曲线的旋回划分。

此外，运用测井信息识别和划分基准面旋回时，为了避免测井曲线所代表地质意义的多解性，选择合理的测井组合序列十分重要。一般情况下，碎屑岩选 GR+SP+ R 系列；煤和泥炭选 GR+SP+R+密度+中子系列；碳酸盐 and 蒸发岩选 GR+SP+R+声波+氢-中子系列。

较长期基准面旋回的确定可以通过短期旋回特定的叠加样式分析得到，测井曲线对于这一分析尤为有效。这是因为组成较长期旋回的短期旋回特定的叠加样式是在较长期基准面旋回上升与下降过程中向其幅度的最大值（最大可容纳空间）或最小值（最小可容纳空间）单向移动的结果，这些叠加样式常常有鲜明的测井相应（图 6）。向海（湖）盆方向进积的叠加样式形成于较长期基准面旋回下降时期，此时  $A/S$  值 $<1$ ，上覆短期旋回与相邻下伏旋回相比，在沉积学、岩石学方面表现出可容纳空间减小的特征；向陆推进的退积叠加样式形成于较长期基准面旋回上升时期，此时  $A/S$  值 $>1$ ，上覆短期旋回与相邻下伏旋回相比，在沉积学、岩石学方面表现出可容纳空间增大的特征；短期基准面旋回呈加积叠加样式则出现在较长期基准面旋回上升到下降或下降到上升的转换时期，此时  $A/S=1$ ，相邻短期旋回形成时可容纳空间变化不大。图 7 说明了如何用短期旋回的叠加样式确定中期基准面旋回。



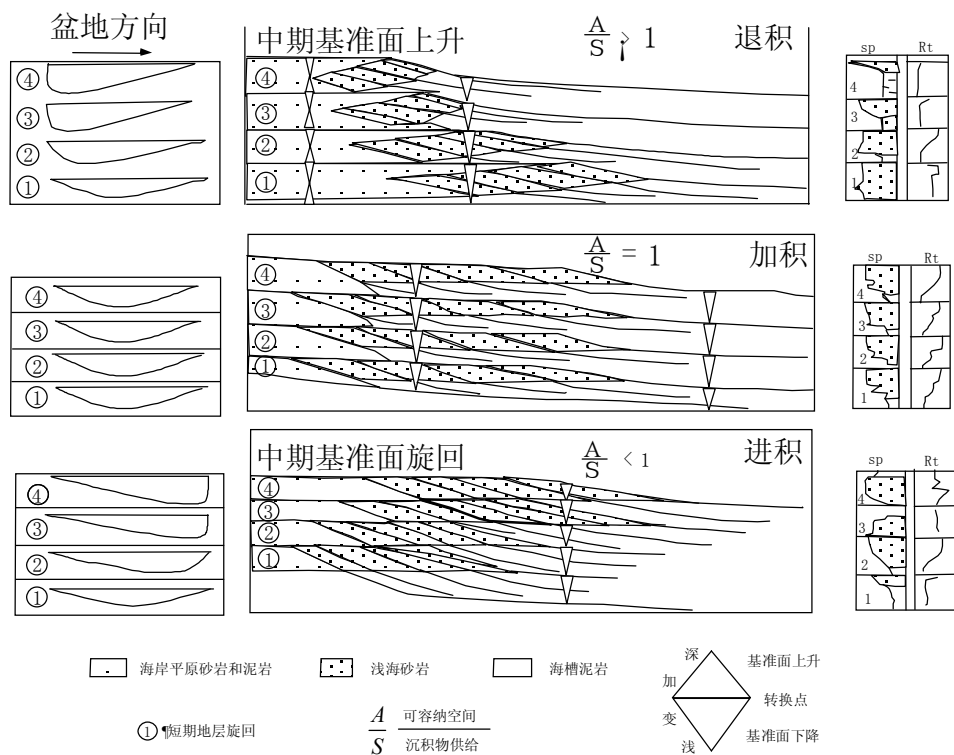


图 6 不同沉积环境中短期旋回的识别

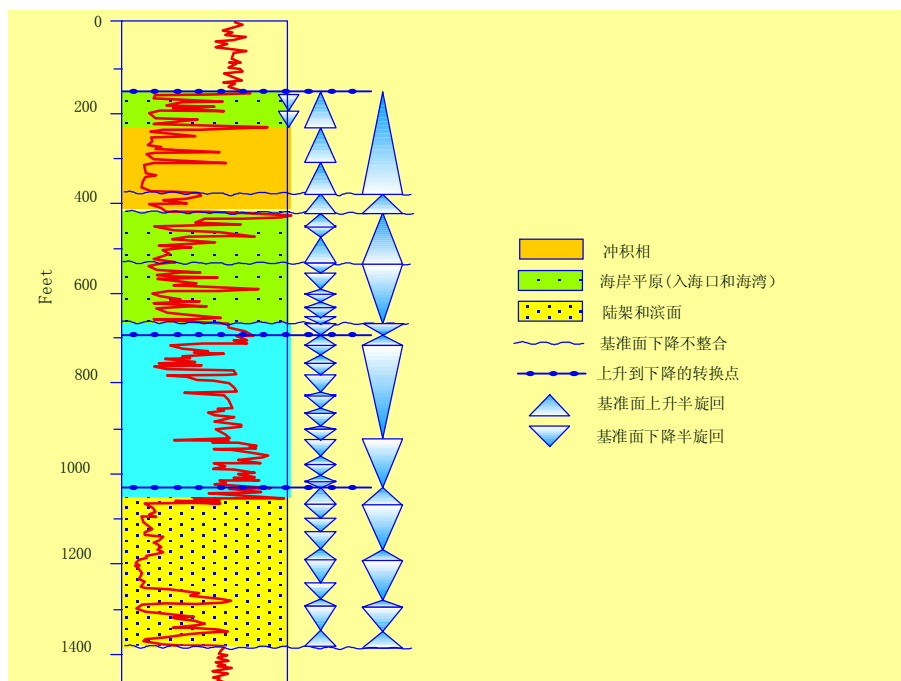


图 7 利用测井资料将短期旋回组合成中期旋回

### 3.3 地震剖面上的识别标志

地震反射界面追随的是时间界面，因而可以运用地震反射剖面进行层序地层

分析。但受地震信息垂向分辨率的限制，地震基准面旋回的划分精度与地震资料的品质和分辨率密切相关。一般来说，地震反射剖面通常只能用来识别较长期的基准面旋回。地震地层学中用来识别地震层序的标志同样适合于旋回界面的分析，如区域分布的不整合面或反映地层不协调关系的地震反射波终止类型，即顶超、削截、上超等。

基准面相对于地表运动过程中，存在四种沉积作用过程，即沉积作用、侵蚀作用、沉积路过冲刷作用和趁机非补偿作用。基准面位于地表之下的侵蚀作用，在地震剖面上表现为削截现象，是地震层序界面，也是较长期基准面旋回界面。基准面与地表重合时，后期沉积物对前期沉积物表面产生路过冲刷作用，在地震剖面上长表现为顶超现象。这种沉积间断作用在具有前积作用的三角洲、扇三角洲区常常发育。基准面位于地表之上，沉积物供给相对不足产生的非补偿作用在地震剖面上则表现为下超。因此，根据地震反射终端性质可以识别基准面旋回中的重要界面。此外，用来识别旋回界面的主要地震标志还包括：

(1) 与较长期基准面旋回上升到下降转换位置相对应的地震反射常为高振幅、高连续的反射或一组反射。

(2) 测井曲线或岩心观察到的区域相变相对应的地震反射常为在振幅、连续性、频率、地震相在区域上发生重大变化。

(3) 测井曲线和岩心中可观察到的地层叠加样式变化在地震剖面上可表现为地震反射几何形态的变化，如由高振幅、水平反射到低振幅 S 型反射。

### 3.4 井—震结合的高分辨率层序划分与对比

多级次基准面识别与划分是高分辨率地层格架建立的基础，而高分辨率的地层格架建立的最终目的是将在钻/测井中的一维信息变为对三维地层关系的预测。虽然钻/测井的纵向分辨率高，但毕竟是一孔或几孔之见，在横向上的探测范围很小。地震在横向上可以连续地采集地层与沉积信息，但其纵向分辨率却受到记录频带的限制而远远低于测井。因此，如何将根据测井曲线划分的旋回标定到地震剖面上，充分利用两者的优势是高分辨率层序准确划分和对比的关键，也是确定研究区层序地层平面图单元的基础。

测井与地震所提取的信息在横向上和纵向上的这种不匹配性需要通过测井与地震的结合技术来解决，如时—深转换、合成记录制作与标定、VSP 测井、地震测井、井间地震和地层反演技术等。其中运用 VSP 资料、合成记录的精细标定以及地震反演技术，特别是井约束下的地震反演技术是将钻/测井资料和地震资料联系常用的有效手段。