

陆相断陷盆地区域地震地层学方法探讨

张厚福 曾洪流 张万选

(华东石油学院北京研究生部)

Vail和Brown等人提出的区域地震地层学研究方法对陆相断陷盆地不完全适用。本文讨论了陆相断陷盆地地震层序划分方法、地震相分析方法、地震相与沉积相关关系等问题。

随着研究方法和研究内容的发展,地震地层学趋向于划分为区域地震地层学和储层地震地层学两部分。区域地震地层学主要根据常规地震资料,研究盆地沉积环境和沉积史,其理论基础和研究方法最早是由P.R.Vail和L.F.Brown Jr.等人^[1,2]提出的,他们的研究资料和研究经验多来自海相盆地。目前,区域地震地层学已成为中国东部各含油气盆地必须研究的项目。但研究方法尚未很好解决,原因在于,陆相断陷盆地有许多不同于海相盆地的特点,不完全适用Vail和Brown等人的理论和方法。几年来,我们研究了中国东部陆相断陷盆地的大量地震剖面,并选择廊固、束鹿、莘县和辽东湾西部等典型凹陷进行了解剖,在前人工作基础上,对陆相断陷盆地区域地震地层学研究方法作了初步总结,得出了如下一些认识,供讨论。

一、陆相地震层序划分

1. 陆相地震层序划分标志

地震层序界面的反射终端类型包括削蚀、下超、上超、顶超和整合^[3,4]。对陆相断陷盆地来说,因控制地层尖灭的地质因素复杂多变,上超和顶超反射终端还可作明确的细分(图1)。

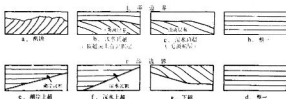


图1 陆相地震反射终端类型

上超按成因可分为湖岸、浅水区的上超和深水洼地的上超。本文分别称之为湖岸上超和深水上超(图1—e, f)。湖岸上超一般分布在湖盆边缘,反映湖平面的相对上升,是层序界面的可靠标志;深水上超则多见于湖盆中心,通常是浊积扇或深湖泥岩充填洼地的反映,也可能是深湖泥岩被连续冲刷或近湖水下扇顶部的反映。向斜坡上倾方向递变为湖岸上超的深水上超,范围一般较大,可作为层序划分的标志;局部的深水上超,常出现在层序内部,反映局部的湖底冲刷或不均衡沉积作用,通常不指示层序界面。

顶超同样有浅水、深水两种类型(图1—b, c)。浅水顶超是在浅水区形成的,一般为三角洲前积作用的产物。它有时与层序顶面一致,有时出现在层序内部,其位置受水平产状的三角洲平原顶积层发育程度的影响。深水顶超一般与浊流沉积有关,其沉积基准面受深水地形控制,与层序界面无确定的关系。

显然,并非所有反射终端都与地震层序界面有对应关系。层序界面最可靠的地震标志是削性、湖岸上超和下超。深水上超、浅水和深水顶超常常出现在层序内部,可靠性较差,只能作为辅助标志。整一反射只有当它能与不整合对比,或经钻井证实有较大沉积间断时,才能作为层序界面。

2. 陆相地震层序划分

陆相断陷盆地与海相盆地相比,具有分割性强,构造运动和水面相对升降频繁,沉积旋回多的特点。为使层序划分有量的界限,能反映盆地构造运动强弱和沉积旋回的大小,我们建议对Vail等人的层序概念作适当修改,根据不整合面的大小和地层分布范围,将地震层序分为3级:

超层序——相当于 Sloss 的层序:“在一个大陆的大部分地区可以追踪,并且以区域不整合面为界”^[1]。它反映受两次大的构造运动控制的完整的盆地发育旋回。

层序——相当于 Vail 等人的层序:“相对整合的、成因上有联系的、以不整合面或可与其对比的整合面为界的地层单元”^[1]。至少在一个凹陷内可以追踪,不整合面必须大于凹陷面积的一半。层序反映盆地的重要构造运动幕或水进水退的旋回,明显叠加在—起的层序组成超层序。

亚层序——在一个凹陷内可以追踪,仍以不整合面或可与其对比的整合面为界,但规定不整合面积小于凹陷面积的一半。它们一般仅分布在凹陷边缘及古隆起周围。亚层序反映盆地的次要构造运动幕或水进水退旋回。一个层序包括一个或几个亚层序。

3. 陆相地震层序划分原则

根据前人经验和实际资料观察,陆相地层的地震层序划分应遵循如下原则。

1) 建立贯穿全凹陷的联井基干测线网,使划分的地震层序具空间连续性和可对比性,并可与钻井资料相联系。

2) 坚持以不整合面划分层序界面,除非有精确的古生物资料或绝对年龄资料,应杜绝用钻井岩性分层定地震层序界面的作法。

3) 在构造复杂区域缺乏地震标志层的地区,可参考钻井沉积旋回特征划分层序。

4) 在断层发育区,可参考大套地层的反射波动力学特征划分层序。

强调以不整合划分地震层序,原因是地震层序单元性质上属于年代地层单元^[1],它与根据钻井资料划分的岩性地层单元往往不符合。这种不符合现象多出现在古生物资

料不足, 只能根据岩电特征划分岩性单元的亚层序一级, 尤其是横向相变较大的层段, 例如发育三角洲、冲积扇、近岸水下扇等相带的层段。席固凹陷有一个典型的例子, 如图2。柳泉地区沙三上亚层序 $T_3-T_3^{10}$ 发育一缓坡扇三角洲, 地震上表现为双向下超结构和大型丘状外形。在钻井剖面上划分出扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前三角洲三个亚相。其中扇三角洲前缘底界 AA' 也是钻井分层的沙三段上部底界。 AA' 明显穿过地震等时面 BB' 、 CC' 、……, 与沙三段上部地震亚层序底界 T_3^{10} (下超不整合面) 有差别, 且差别向三角洲推进方向增大。这个例子与Vail等人提供的南美第三系和圣胡安盆地的例证^[1]是一致的。

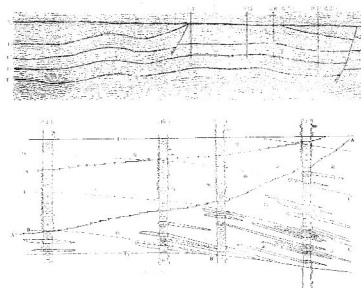


图2 GA621测线钻井岩性单元穿时现象

二、陆相断陷盆地地震相分析方法

(一) 地震相参数补充

Vail等人提出的地震相参数^[1], 按属性可分为4大类:

几何参数: 反射结构、外形;

物理参数: 反射连续性、振幅、频率;

关系参数;地震相平面组合关系;

速度-岩性参数;层速度。

这些参数已为地震地层学者熟知。但陆相断陷盆地地震地层学研究的经验表明,为了充分利用地震信息,解决比海相盆地复杂的地震相分析问题,可对后两类参数适当推广。

1. 地震相内部组合关系(关系参数)

自然界的沉积环境是多种多样的。在特定沉积环境下形成的岩相组合,能量水平相近,有特定的层理模式和形态模式。因地震相单元是沉积单元的声阻抗图象,这将导致纵横剖面反射结构和外形有规律的组合,我们可称之为地震相内部组合。

同海相盆地相比,陆相断陷盆地的构造更复杂,剖面上各种构造现象(如褶皱、掀斜、泥岩刺穿、断层削截)和地震陷井(如多次波、侧面波、绕射波)常形成假地震相,导致错误解释。我们认为使用地震相内部组合参数可帮助解决这一问题。

分析的一般原则是能量水平匹配,即同一沉积体的反射结构和外形必须是同一能量级。代表高能环境的反射结构和外形不能与代表低能环境的反射结构和外形匹配。反之亦然。

根据陆相断陷盆地各种反射结构和外形的一般能量水平,我们初步总结了3类配置关系。

(1) 走向-倾向反射结构组合(表1)

(2) 走向-倾向外形组合(表2)

(3) 同一剖面反射结构-外形组合(表3)

表1 走向-倾向反射结构配置表

结构 构造	平行 (低能)	近平行- 乱岗状 (中或高能)	发散 (低或中能)	前积 (高能)	杂乱 (高或极高能)	无反射 (低或极高能)
平行	相容	排斥	相容	排斥	排斥	排斥
近平行-乱岗状		相容	相容	相容	排斥	排斥
发散			相容	排斥	排斥	排斥
前积				相容	相容	排斥
杂乱					相容	排斥
无反射						相容

表2 走向-倾向外形配置表

外形	平 (低-高能)	缓 (低-高能)	丘 (高能)	交 (低-高能)
席状	相容	相容	排斥	排斥
楔状		相容	相容	排斥
丘状			相容	排斥
光滩				相容

它们包括了各种常见的配置关系,如高能的前积结构在正交剖面上只与高能近平行-乱岗状结构、前积结构、杂乱结构相容,而与低能的平行结构、低-中能发散结构、极低或极高能的无反射结构排斥;涉及外形的配置尚要考虑形态本身的三维特点,

表3 同一剖面反射结构-外形配置表

(数量水平同表1、表2)

外形	结构	平行	近平行- 乱岗状	发 散	群 积	杂 乱	无 反 射
席 状	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容
楔 状	相 斥	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容
丘 状	相 斥	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容
充 填	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容	相 容

如充填外形在正交剖面上只与充填外形相容,而通常不与席状、楔状、丘状相容,虽然它们同属低-高能量级。

2. 沟-扇组合关系(关系参数)

在陆相断陷盆地中有一个十分特殊的现象,即沿边界同生断层一般都分布有大量冲沟。这种冲沟通常向岸方向连接物源,向湖方向连接近源沉积体。这种现象可称为“沟-扇组合”。

如图固四陷,用地震剖面恢复了其主要边界断层——大兴断层的断面形态(图3),图上清楚显示了断面上分布着12条沟系。四陷陡岸一侧的主要沉积体,不论大小,也不论是近岸水下扇还是扇三角洲,大都与这些沟系有对应关系,而且断面平均坡度越陡,

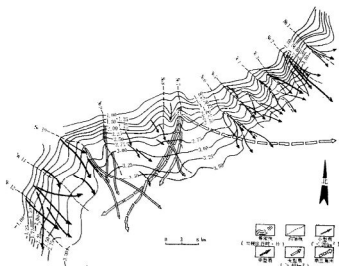


图3 大兴断层沟-扇体系图

对应关系越好,沉积体的沉积走向与沟的倾向是大致一致的。在济阳拗陷¹⁾、黄骅拗陷²⁾和渤海海域³⁾也曾描述过类似例子。

因此,恢复基岩古地形,可以当作一种预测手段。它不仅能推测沿陡岸一带沉积体分布的概貌,而且在确定物源和水流方向上与前积结构有相似作用,应当成为一个地震相标志。

3. 砂岩百分比(速度-岩性参数)

陆相断陷盆地一般具有倾斜基底,地层埋深变化很大,层速度参数用于分析横向岩性变化用处不大。近年来,速度-岩性参数正在由定性向半定量、定量方向发展。通过运用声波测井资料制作压实图版,校正声波速度-谱速度系统误差,提高速度谱解释精度。现在已在钻井稀少的砂泥岩剖面区得到精度较高的砂岩百分比图,从而为地震相分析提供唯一的定量的相标志⁴⁾。这是提高地震相分析水平的重要途径。

(二)地震相分析程序

关于地震相分析的程序,以往文献未进行专门讨论。但这个问题值得重视,它不仅影响工作效率,而且直接关系到地震相分析最终成果的可信程度。一个合理的地震相分析程序应当体现由易到难、由特殊到一般的解释工作方法,和多种信息结合、定性定量结合的原则。

我们推荐的地震相分析程序包括如下7个步骤:

1. 在地震剖面上寻找各种前积结构,解释大的物源位置和水流方向;
2. 划分前积结构以外的其他反射结构,尤其注意相变又比较明显的杂乱、空白、亚平行-乱岗状结构;
3. 分析各种反射结构的二维及三维外形,根据需要编制地震相单元形态图或地震程序(亚层序)等厚图;
4. 对上述分析的各种地震相作内部组合关系分析,去伪存真,并将别出的假地震相重新解释;
5. 对指相意义不明显的反射结构例如平行、发散结构,进一步用连续性、振幅、频率等物理参数划相;
6. 若边界断层清楚,可编制断面等深图,利用沟-扇组合关系进一步查清陡岸物源位置和断层下降盘粗碎屑扇体的分布;
7. 进行速度-岩性解释,根据需要编制地震相单元或地震层序(亚层序)的砂岩百分比图,查清各个地震相单元砂体格架分布。

按照这套工作程序,地震相分析的最终成果是地震相图、地震层序(亚层序)或地震相单元等厚图、凹陷陡坡带沟-扇体系图和砂岩百分比图。

1) 杨云岭, 1983, 济阳拗陷沿岸沉积体展布的地震勘探。

2) 赵学平、张毓民、杨怀丹, 1984, 黄骅坳陷扇状砂体类型及其地震反应。

3) 宫之路, 1988, 渤海海域第三系沉积相及今后找油方向探讨。

4) 张万选、张厚福、曹洪波, 1988, 陆相断陷盆地沉积地震地质学方法研究。

三、地震相向沉积相转换

地震相向沉积相的转换方法和精度取决于勘探程度。在新勘探盆地或老勘探盆地的新区,没有钻井资料,只能利用地震信息本身的地质含义完成这种转换。包括:

(1)特殊反射结构和外形与沉积相的一般对应关系。如大型斜交前积结构一般对应三角洲,湖相区丘状外形经常反映洪积扇等。

(2)速度-岩性参数反映的砂体分布规律。如放射状朵叶砂体常反映三角洲,凹陷中心的孤立砂体一般代表洪积扇。

(3)物理参数变化反映的沉积能量变化。如高连续性平行反射一般反映稳定的低能环境(如深湖),不连续振幅反射常常代表不稳定高能环境(如冲积扇、河流)。

(4)与区域背景类似的盆地的标准地震相-沉积相模式对比。目前被动大陆边缘海相盆地已有比较成熟的地震相模式^[1,2]。陆相断陷盆地的地震相模式正在探讨之中,如袁秉衡^[4]提供的模式。

但是,地震相多半有不同程度的多解性,加上地震分辨率的限制、构造假象和地震陷井的干扰等众多所周知的因素,用地震资料直接转换的沉积相通常比较粗糙。

有鉴于此,在有钻井的探区,地震相向沉积相的转换应尽可能结合钻井资料。借助钻井资料较高的分辨率和直观性质,以岩心相和测井相分析的结果作为点的控制,建立岩心相、测井相和地震相的对应关系,才能克服地震相多解性,提高划相精度,并排除非沉积因素干扰,最大限度地发挥地震方法外推的长处。一个典型的转换过程包括下列步骤。

(1)通过合成记录或VSP资料,将钻井深度坐标转换成时间坐标。

(2)岩心相分析

选择取心井段,以岩心观察为主要手段,辅以镜下鉴定和粒度分析,用原生及准同生沉积构造及其序列、岩性、矿物组成、古生物及粒度分布特征等标志判断沉积相。

(3)测井相分析

选择测井井段,分析测井曲线(主要是自然电位、自然伽马曲线或其他合适的测井组合系列)的幅度、形态、组合及其与录井岩性剖面对应的关系,划分沉积旋回,建立单井的岩心相与测井相、测井相与地震相的对应关系。

(4)钻井-地震相剖面

在钻井较多的局部地区,可将岩心相、测井相和地震相综合分析,在联井地震剖面上建立三相对应关系,恢复各种沉积体的形态、演变过程和相变规律。

(5)地震相图向沉积相图转换

以上列举的各项工作,实际上是把单个或局部地震相转换成沉积相的过程,它们的综合表达和最终成果就是沉积相或沉积环境图。在编制沉积环境图时,应注意沉积相平面组合关系的合理性。沉积相边界一般与地震相边界吻合。但因地震相图通常反映作图单位沉积体最大分布范围,而沉积环境图只能反映有代表性的瞬间事件,两者也可以不吻合。

四、研究实例

下文用麻固凹陷的例子说明上述研究方法的应用。

麻固凹陷是一个典型的早第三纪陆相单断(箕状)盆地。图4是LF511剖面,表示麻固凹陷地震层序划分。为减少构造干扰,在此之前作过细致的构造成因分析,解释了构造-断层组合。在剖面上利用上超、下超、顶超、削蚀等不整合标志划分了层序界面,并根据其平面分布确定了层序等级;利用钻井资料和区域地质知识尽可能精确地确定了地层时代,并以此命名了地震层序。结果,以 T_2 、 T_4 为界,分出上第三系、下第三系、前第三系3个超层序;在下第三系超层序内部以 T_3 、 T_4 为界分出沙二段—东营组、沙三段、沙四段—孔店组3个层序;又在沙三段层序内部以 T_3^1 、 T_3^2 、 T_3^3 为界,分出4个亚层序。各层序界面不整合—特征如下(图4,由上到下),

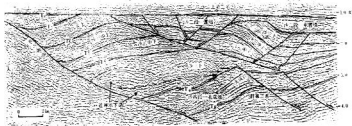


图4 LF511剖面,示麻固凹陷地震层序划分

T_1 (区域不整合): 削蚀

T_2 (不整合面积大于凹陷二分之一): 湖岸上超、削蚀

T_3^1 (不整合面积小于凹陷二分之一): 浅水顶超(另见下超)

T_3^2 (不整合面积小于凹陷二分之一): 下超、深水顶超(另见深水上超和湖岸上超)

T_3^3 (不整合面积小于凹陷二分之一): 下超、削蚀(另见深水上超)

T_3^4 (不整合面积大于凹陷二分之一): 深水上超, 湖岸上超

T_4 (区域不整合): 浅水上超、削蚀

其中浅水顶超与深水顶超、湖岸上超与深水上超的区分主要依据钻井资料及有关地质推断。另外,沙四段—孔店组层序中之火成岩顶面,沙三下亚层序中之近岸水下扇顶面(深水上超面),皆为局部不整合现象,不能全凹陷追踪,因此未作为层序界面划分。

对沙三段4个亚层序均作了系统的地震相分析,以沙三中下亚层序为例,经相交测线网闭合解释,作出了地震相图(图5),首先,识别出S形-斜交复合前积相①,杂乱

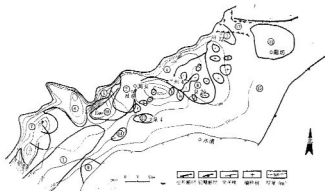


图5 庙岗凹陷沙三中下亚层序地震相图（附等厚线）

前积、帚状前积或前积-退积相②—①，斜交前积相③。根据前积方向初步判断沿陡岸和长轴入口有多个物源方向。本区非前积结构多为发散结构，有多解性，仅在缓坡见一杂乱相⑤，反映来自缓坡的粗杂岩性。地震剖面上典型的外形包括丘状上超充填相（沉积型）⑥、丘相⑦和水道上超充填相（侵蚀型）⑧，它们或者互为共生组合（如⑥和⑧），或者与别的地震相组成共生体系（如⑥和杂乱前积相②）。经编制全亚层序等厚图，恢复了湖盆沉降中心在陡坡一侧的箕状形态，并揭示了⑥、⑦、⑧之扇状外形。经地震相内部组合关系分析，从纵横剖面上验证了上述解释的合理性，并识别出准同生重力滑动成因、对沉积起控制作用的构造丘③和④。因本区地震资料处理参数不统一，用物理参数仅粗略划出中振幅中连续发散相⑥以反映广大缓坡区地震相特征。陡坡区地震相与大兴断层断面上的冲沟（图3）显示了良好对应关系，并可看出物源大多是继承性的。最后，在地震、地质条件较好的地区利用测井和大量速度谱资料进行了速度-岩性解释，编制出砂岩百分比图，在斜交前积相③及其周围发现了一批砂岩百分比高值区（带十号区域）。

图5所示的地震相图向沉积相转换充分利用了钻井资料。岩心相和测井相分析表明陡坡区有两种主要沉积相：州12井、州4井代表的近岸水下扇相和固6井、固4井代表的扇三角洲相，它们分别与前积-退积相和杂乱前积相对应；缓坡区构造丘周围见滩砂（泉4井）；湖心区砂岩高值区为浊积砂体（如泉29井）。另外，S形-斜交前积相①的沉积意义较明显，直接解释为长轴扇三角洲；丘相⑦周围钻井为深湖泥岩，且与水道上超充填相伴生，可解释为浊积扇。在钻井较多的LF511剖面沿线还作了钻井-地震相剖面图（图6），清楚地揭示了沙三中下亚层序在盆地发育旋回上处于断陷扩张期，湖面开阔，以深水环境为主，浊积砂体十分发育，而且与近岸沉积体组成共生体系。以此区域背景为基础，恢复了沙三中下亚层序沉积环境图（图7），图上各种沉积相的共生关

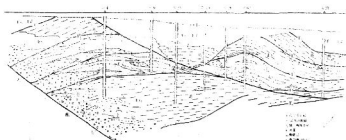


图6 LF511钻井-地震相剖面图



图7 库图因南沙三中下亚层沉积环境图

系十分明显,组成各种沉积体系,包括陡坡区一侧的扇三角洲-浊积扇体系、近岸水下扇-浊积扇体系、湖底侵蚀谷-浊积扇体系和缓坡区的岸外沙洲(障壁岛)-湖泊体系。

参 考 文 献

- [1] C. E. 何慎侯, 1977, 地震地层学, 牛锡范等译, 1980, 石油工业出版社。
[2] Brown, J. F. and Fisher, W. J., 1979, AAPG Continuing Education Course Note Series#10,
[3] Sloss, L. L., 1963, Geol. Soc. Amer. Bull., Vol. 74,
[4] 袁集衡等, 1985, 石油学报, 第6卷, 第4期。

REGIONAL SEISMIC STRATIGRAPHIC METHOD FOR FAULT-DEPRESSED BASINS IN LAND

Zhang Houfu Zeng Hongliu Zhang Wanxuan

(Beijing Graduate School, Huddong College of Petroleum)

Abstract

The method of regional seismic stratigraphy should be improved in some aspects due to the differences between fault-depressed continental basins and marine basins. The meaning of reflectional terminals varied from kind to kind. Seismic sequences should be discriminated into supersequences, sequences and subsequences according to the scale of unconformity. In the analysis of seismic facies, a reasonable program should be followed, and the internal combination of seismic facies, the gully-fan connection and the velocity-petrology parameters should be considered in addition to geometrical and physical parameters. The interpretation of seismic facies into correspondent depositional facies must be combined with well data as much as possible, and the seismic facies must be concordant with core facies and well-log facies. The study of the Langfang-Gu'an depression has provided an example of above approach.