

文章编号:1672-9854(2010)-01-0061-07

## 海相碳酸盐岩勘探地球物理方法新进展

李军, 殷积峰, 谢芬

(中国石油勘探开发研究院)



**摘要** 介绍了地震相和古地貌恢复、地震属性分析、相干体、三维可视化解释、地震反演等五种主要地球物理方法技术的新进展。生物礁地震相可归纳为七种类型;层拉平技术是帮助进行古地形、古地貌分析的一种有效手段。地震属性的数量不断增加,新添的属性如分频属性、级联属性等;地震属性研究进展可概括为八个方面;目前的研究前沿主要集中在叠前深度域和弹性波。相干体技术已从第一代基于互相关的算法发展到第三代基于特征值计算的算法。虚拟现实系统的出现是三维可视化技术最新的具有质的发展意义的一次飞跃,代表了三维可视化技术的最新进展。地震反演技术的突出进展主要表现在四个方面:由单一曲线反演发展到多曲线联合反演、由基于振幅反演发展到基于地震多属性反演、由构造层序控制发展到层序地层控制、由叠后反演发展到叠前—叠后联合反演。使用所述方法在四川盆地云安厂、黄龙场、罗家寨等地区取得了较好勘探效果。

**关键词** 海相地层;碳酸盐岩;油气勘探;地球物理勘探;研究进展;四川盆地

**中图分类号:** P631.9; TE19 **文献标识码:** A

**李军** 1960年生,高级工程师。主要从事地质综合研究、地震资料综合解释工作。1982年毕业于华东石油学院石油物探专业。发表有《碳酸盐岩裂缝性储层地震预测方法》等论文。通讯地址:100083北京市910信箱地质所;电话:(010)83592330

碳酸盐岩油气田是全球油气最重要的组成部分,其常规油气储量约占世界的60%,产量约占50%。据Halbouty的资料统计,世界313个大型碳酸盐岩油气田探明可采油气总量为 $1\,434.5 \times 10^8 \text{t}$ ,其中石油约占52%,为 $750.1 \times 10^8 \text{t}$ ,气占48%,为 $684.4 \times 10^8 \text{t}$ 油当量<sup>[1]</sup>。在我国,随着油气勘探的不断深入,海相碳酸盐岩地层分布区逐渐成为重要的油气勘探场所。目前中国的海相碳酸盐岩油气勘探已进入发现的高峰期,塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地都有重大发现。近年来相继发现了陕北靖边大气田,塔里木塔河—轮南油田、塔中油气田、巴楚和田河气田,四川普光、龙岗等大型油气田<sup>[1]</sup>。在这些海相碳酸盐岩油气田的发现和突破中,地球物理勘探技术和方法发挥着非常重要的作用,同时它又推动了海相碳酸盐岩地球物理勘探方法的迅速发展。

但是相比较而言,中国海相碳酸盐岩形成于多旋回叠合盆地,具有时代老、埋藏深,储集层类型多、非均质性强,油气藏改造、破坏普遍,保存条件复杂

等特殊<sup>[2]</sup>,碳酸盐岩油气藏的油气水分布非常复杂,油气藏分布规律认识难度大,给勘探开发带来很大困难。要想解决这些问题,必须借助于地球物理勘探的新的技术方法。塔里木盆地通过强化处理“串珠状”地震反射刻画和描述奥陶系碳酸盐岩非均质储层的缝洞体系,四川盆地通过地震相和古地貌恢复技术预测和描述长兴组—飞仙关组台缘带生物礁滩体,这些都是地球物理方法在碳酸盐岩勘探中发挥重要作用的良好佐证。

为了能够清楚地展示和发挥地球物理方法在海相碳酸盐岩勘探中的作用,本文论述了地震相和古地貌恢复、地震属性分析、相干体、三维可视化解释、地震反演等几个方面的技术方法及其新进展,以期对未来我国海相碳酸盐岩的勘探和开发有所裨益。

### 1 地震相和古地貌恢复

地震相分析就是勾绘和解释地震反射的几何形态、连续性、振幅、频率、相位、层速度、外部形态以及

收稿日期:2009-10-21

基金项目:本文为国家油气专项(编号:2008ZX05004-003)和国家重点基础研究发展规划973项目(编号:2007CB209502)

在沉积层序框架中地震相单元之间的关系等。对于作过地震相描述和作图的地方,解释人员可以根据钻井地质信息揭示的沉积作用和环境背景预测地震相的岩相和岩性。

生物礁滩体是一种特殊的碳酸盐岩沉积体,它的沉积建造和分布与沉积环境密切相关。由于经历了特殊的沉积作用和成岩过程,生物礁滩体具有独特的地貌及岩石学特征,与一般的碳酸盐岩建造有明显区别。这一特点决定了生物礁滩体在地震反射剖面上通常具有一些特殊的地震相反射结构特征。通过地震相和古地貌恢复方法,分析地震反射结构和地震相特征变化,能够有效识别生物礁滩体的分布范围。通过这种方法进行生物礁滩体的识别和预测,具有解释速度快、可靠性高等特点。但是,根据地震资料进行生物礁滩体的识别和预测也具有一定的

多解性,要注意排除与生物礁滩反射异常具有一定相似性的其他地质体,如泥岩丘体、火山岩体等。

生物礁体独特的地貌、结构、构造及岩石学特征决定了来自生物礁的各种地震参数诸如振幅、频率、相位、连续性等与围岩不同,使得生物礁的地震相反射结构具有一些特殊性,可以归纳为七种类型<sup>[3-4]</sup>:(a)反射外形呈丘状或透镜状;(b)顶部可能出现强反射;(c)内部为断续、杂乱或无反射空白区;(d)底部可能会出现上凸、下凹或平直特征;(e)礁体顶部出现披覆构造;(f)礁体翼部会上超;(g)绕射波(图1)。当然上述地震相反射结构不一定同时出现在同一礁体上出现,多数情况下只是出现几种地震相结构,甚至只有一二种或者根本就不出现,在解释过程中还必须充分利用各种资料进行综合分析。

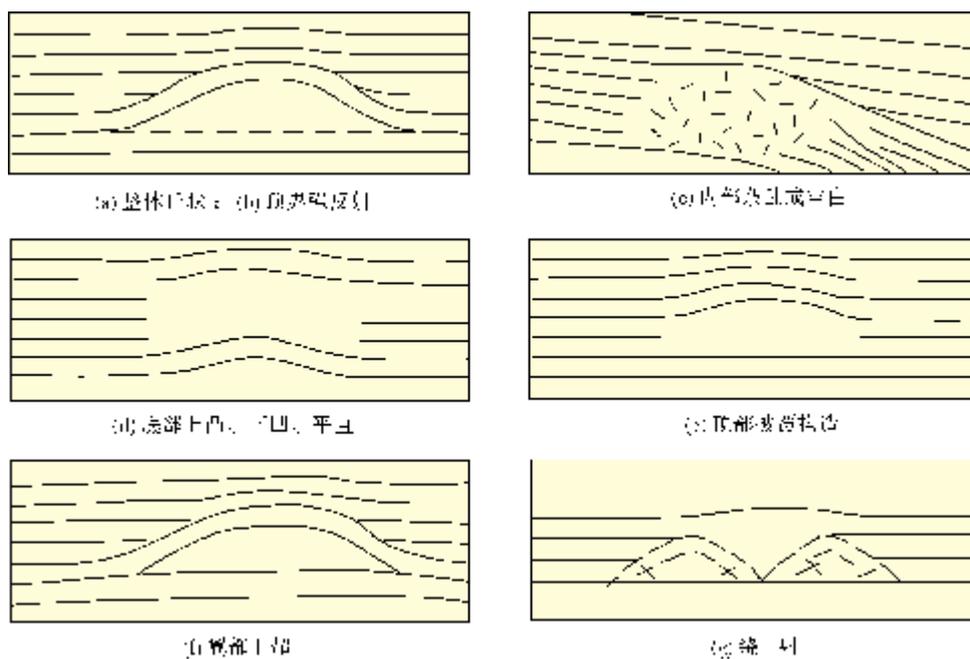


图1 生物礁可能出现的地震相反射结构

层拉平技术是帮助进行古地形、古地貌分析的一种有效手段,在地震剖面上沿目的层附近的标志层进行层拉平,可以非常快速地进行古地形、古地貌的恢复,从而一目了然地发现古地形高地和异常厚度沉积区,帮助寻找生物礁滩体的发育位置。

四川盆地晚二叠世末期的沉积环境主体以碳酸盐岩台地相、台地边缘相和海槽相为主。不同的沉积环境,有着不同的水深和古地貌、古地形特征,从而

形成不同的碳酸盐岩沉积建造,导致地层的沉积厚度有明显差异。深水海槽相,古地形最低,碳酸盐岩沉积速率最慢,地层沉积厚度最薄。台地边缘相,古地形相对较高,水体能量强,有利于生物礁滩体和碳酸盐岩沉积建造的发育,地层沉积厚度最大。碳酸盐岩台地相地形相对较平坦,但是也有高低变化。古地形较低的地方,水体能量较弱,地层沉积厚度较薄;古地形较高的地方,水体能量较强,同样有利于生物

礁滩的发育,反映在地层沉积厚度上也有一些局部增厚变化。因此通过研究地层沉积厚度变化和应用的层拉平分析技术,可以再现沉积古地形、古地貌以及岩相古地理等重要信息,从而对生物礁滩体的有利发育相带做出预测。

图2是四川盆地云安厂地区过云安12井的一条地震瞬时相位剖面,反映的是二叠系长兴组生物礁的地震相反射结构特征。对剖面沿上二叠统龙潭组底界作了层拉平处理,可以清晰地反映生物礁滩体的地震响应特征。图中黄色括号内的地质体,其地震反射整体呈丘状反射结构,地层厚度明显增大;地质体内部为断续、杂乱的地震反射结构;地质体翼部,具有明显的上超特征。因此该地质体具有前述生物礁地震相(a)(c)(f)三种反射结构特征。在该地质体分布范围以外的地区,地震反射则表现为稳定的平行反射结构特征,没有明显的生物礁地震识别标志。据此可以初步判断出生物礁体的存在以及该礁体的分布范围。

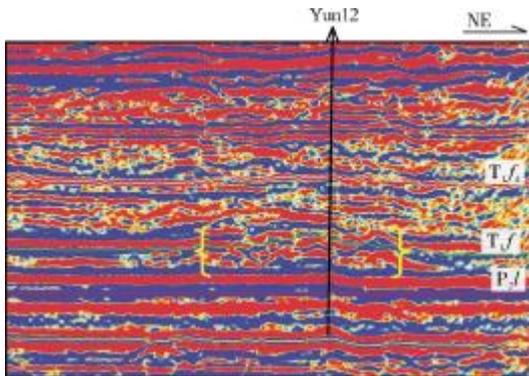


图2 四川盆地云安厂地区长兴组生物礁地震相反射结构剖面为瞬时相位处理剖面,沿上二叠统龙潭组(P<sub>2</sub>l)底界进行了层拉平古地貌恢复处理。图中黄色括号内为生物礁体。

T<sub>1</sub>f 飞仙关组; P<sub>2</sub>l 龙潭组。

图中各地层代号标注位置为相应地层的底界

## 2 地震属性分析技术

地震属性是指由叠前或叠后地震数据经过数学变换而导出的有关地震波的几何形态和运动学、动力学以及统计学等特征的特殊测量值。长期以来人们对地震数据的使用仅仅局限于对地震波同相轴的拾取,以实现油气储集体的几何形态和构造特征的描述。由于地震信号的特征是由岩石物理特性及其变化引起的,所以地震数据中隐藏着更加丰富的

有关岩性、物性及流体成分的信息。这些信息虽然可能受到各种因素影响而发生畸变,甚至是不可恢复的扭曲,但被复杂化的信息确实是隐藏于地震数据之中。进行地震属性分析,消除数据畸变,拾取隐藏在地震数据中的有关岩性和物性的信息,并根据已知钻井信息作出标定和地质解释,可以充分发挥地震数据的潜质,为油气田勘探开发提供精度更高的地质预测成果。特别是在认识非均质性强的海相碳酸盐岩油气藏方面,三维地震属性分析所能够提供的丰富的空间变化信息更是显得作用巨大。

近年来,随着地震资料储层解释技术的进步,特别是三维地震分析技术的发展,人们对地震属性的了解也越来越深刻,地震属性的数量不断增加。在常用的地震属性基础上,不断增添新的属性,如分频属性、级联属性等,同时用于属性计算和分析的方法手段也越来越多,目前,地震属性分析已成功用于碳酸盐岩储层评价、含油气性预测及储层物性估算等方面。

从20世纪60年代的直接烃类检测和亮点技术,到70年代的瞬时属性和复数道分析,80年代的多属性分析,90年代的多维属性(倾角、方位和相干等)分析,直至21世纪的自动地震相分析等,地震属性技术的发展几起几落,目前已逐渐走向成熟。

关于地震属性近几年的新进展主要表现在以下八个方面<sup>[5-6]</sup>:(1)属性分类呈现几何学、物理学(运动学和动力学)、统计学并存,准属性受关注;(2)属性提取从线性向非线性发展;(3)属性分析智能化程度提高,多属性联合分析流行;(4)属性反演对岩石物理测试和正演模拟的依赖性增加,以多维属性为主;(5)属性研究从叠后向叠前推进,从纵波向弹性波扩展;(6)属性应用的重点进一步向开发,尤其是精细储层描述转移;(7)属性成果的可视化程度更高,地质意义更明了;(8)属性技术的量化进程加快,解释的置信度提高。

地震属性的研究前沿目前主要集中在两个方面,一是叠前深度域,二是弹性波。近年来,国内外学者在这两方面做了一些探索工作,但总体来看,进展还不甚明显。叠前深度域属性除振幅属性(AVO)外,其他都处在探索阶段;弹性波属性研究目前仍停留在转换波分析阶段。

地震属性分析技术在海相碳酸盐岩勘探中也发挥着巨大的作用,笔者应用近几年新兴的地震波形

分类属性预测四川盆地黄龙场地区长兴组生物礁的分布取得了良好的效果(图3)。使用 Stratimagic 软件对地震数据进行波形分类处理,该方法的核心技术是通过神经网络波形分类技术对地震道进行自动分类,在分类结果中相同的颜色代表地震波形相同,不同的颜色代表地震波形不同。在地震波形分类属性上,黄色多边形区域内为生物礁,该生物礁特征明显,与围岩存在明显差异,表现为两套北西—南东向分布的生物礁体,这一预测结果与钻井地质情况非常吻合。

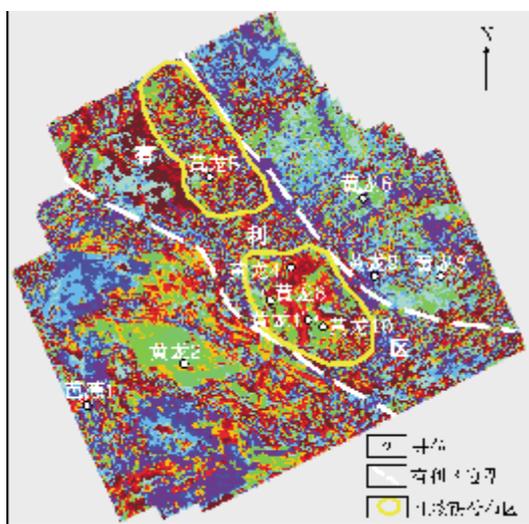


图3 四川盆地黄龙场地区地震波形分类属性识别长兴组生物礁

### 3 相干体技术

相干分析技术是20世纪90年代中期发展起来的一项新的三维地震解释技术,它通过对地震数据体相干属性的量化处理,针对波形进行相干运算,生成新的不同于常规地震振幅数据体的相干属性体。这种相干数据体可以用于较为复杂的断层及隐蔽地层岩性的解释,而这些复杂的地质特征在常规地震数据中往往无法识别和解释。相干体技术的特殊之处就在于突出那些横向不连续、不相干的地震地质特征,如断层、三角洲、河道等,能够更加客观真实地反映地下多种地质情况,帮助研究人员从整体概念上分析和认识问题,提高解释工作的效率和精度。随着相干体在三维地震勘探中的广泛应用,这项技术不断地被更精确的算法、更先进的显示技术以及新的应用领域和方法学所改进,目的在于提取地震数

据中更有意义的细节。

相干体技术尽管历史很短,然而其发展速度却很快。自从1995年Bahorich和Farmer提出相干体算法以来,短短几年,其算法已从第一代基于互相关的算法(简称C1算法,1995)<sup>[7]</sup>、第二代利用地震道相似性的算法(简称C2算法,1998)<sup>[3]</sup>,发展到第三代基于特征值计算的算法(简称C3算法,1999)<sup>[3]</sup>。

近年来,相干体技术在石油、煤炭等能源勘探领域的应用上也取得了飞速发展,现已成为地震勘探中一项必不可少的实用技术,作为三维地震解释的一种常规技术手段应用于断层构造解释和特殊岩性体研究中,并在断层、裂缝分析以及地层岩性体、特殊类型油藏研究方面都取得了良好效果。当前,相干体技术在应用上的最新研究进展表现在,将相干体层切片与地层倾角、方位角检测成果联合起来,用不同的色系重叠显示在一起。通过这种特殊的处理和显示方法,可以对一些在常规相干体解释中难以识别的小断层、裂缝系统和地质体进行有效的识别和圈定,更好地发挥相干体技术的潜能。

笔者将相干体技术应用于四川盆地罗家寨地区嘉陵江组海相碳酸盐岩储集层的裂缝检测,取得了良好的效果。通过相干数据体的计算和层切片技术,很好地描述了小断层和裂缝体系的展布,揭示出裂缝发育有利区,用于指导钻探并位的部署。

### 4 三维可视化技术

三维可视化技术是20世纪80年代中期诞生的一门集计算机数据处理、图像显示等多项技术前缘于一身的综合性技术。目前,该技术已被广泛地应用到地质及地球物理学等多媒体的石油勘探开发领域。它借助于实时图形工作站的先进显示技术,可以对地震数据体进行全方位的透视。不仅可以用于显示和描述地下诸多地质特征,而且可以用于进行油藏动态监控和描述。无论是复杂构造还是地层沉积储层的变化,都可以实时显示在图形工作站上,为石油勘探开发工作者提供了新的数据分析和有效的成果表达手段。

近年来,全球各大石油地球物理公司都相继研发了自己的三维可视化软件系统,其中比较著名的有Landmark公司的GeoProbe,ParaDigm公司的VoxelGeo以及GeoQuest公司的Geoviz,这些软件产品代表了当今世界三维可视化技术的发展水平和前

沿。这些技术产品使三维可视化技术逐渐成为一种全新的地震解释技术<sup>[8]</sup>。它可以充分利用三维地震信息和地震属性,以人们易于感知的三维图形对各种复杂数据场和数据关系进行描述。解释人员可在三维空间上对地震数据体直接进行层位的空间域自动追踪、断层的空间组合、岩性分析、岩性体追踪以及沉积环境解释。而且三维可视化技术解释速度快、周期短、精度高,是描述复杂断块油藏构造形态和隐蔽性油气藏储层的有效手段之一<sup>[9]</sup>。

随着计算机及图像显示技术的快速发展,三维可视化技术逐步走向成熟,而且已经成为储层预测与油藏描述方法中的关键技术,它可以直接快速地显示和描述河道、三角洲、冲积扇、生物礁滩等沉积相带及储层、油藏展布。三维可视化技术的引入,使地震储层预测与油藏描述研究工作达到了一种全新的境界,真正实现了从二维到三维的实质性跨越。

虚拟现实系统(The Virtual Reality System)在地震勘探中的应用始于20世纪90年代中后期,它是伴随着计算机技术的飞速发展而诞生的,这一技术的出现是三维可视化技术最新的具有质的发展意义的一次飞跃,代表了三维可视化技术的最新进展,它把观测者、操作者和决策者都浸入到数字化信息的多维图像空间里,用透视的、确切空间坐标的和全方位的人机交互方式来提高对信息的分析和理解<sup>[10-11]</sup>。

虚拟现实系统与常规三维可视化显示有着本质的不同! (1)由于有了更多信息,立体感增强后的数据分布使人们获取更多直觉感应下的理解与分析推理,由此而得出的结论往往是准三维可视化条件下所不存在的。(2)在虚拟现实环境中,实现的交互操作给使用者带来了设身处地的参与感,这比常规三维可视化中通过鼠标点击菜单或图形的交互操作是一个飞跃。(3)常规三维可视化往往局限于二维的计算机显示器屏幕,属于单人操作行为,而虚拟现实系统往往以与人体高度相当或更大尺寸的屏幕及投影空间来实现,可将团队中的多个成员同时沉浸于同一空间环境,并可穿越具体的目标体,这使得许多要求团队合作的行业分析和决策得以实现,如油田勘探开发决策等。

三维可视化技术在海相碳酸盐岩勘探中也发挥着巨大的作用,笔者使用这一技术对四川盆地黄龙场地区长兴组生物礁进行描述和评价,取得了良好的效果。图4为地震振幅三维可视化结果,蓝色分布区为低振幅区;橙色—黄色分布区为高振幅异常区,

生物礁表现为断续—杂乱的高振幅异常,主要分布于黄龙1井区(HL1)的黄色圈区域内,钻井已证实为生物礁分布区;在黄龙5井区(HL5)及黄龙2井(HL2)南部的两个粉红色圈异常体为可能的生物礁,而黄龙2井区大面积连续性好的高振幅异常区则为泥页岩的反应。通过三维可视化技术,可以非常清晰地刻画出生物礁体在三维空间的展布,据此部署的两口探井均获得高产。

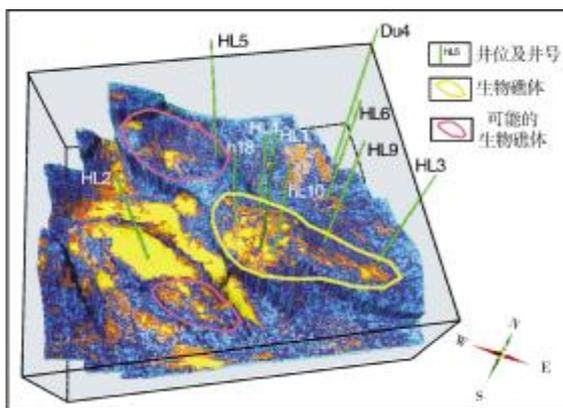


图4 四川盆地黄龙场地区长兴组生物礁体三维可视化  
使用 Landmark 公司的 Geoprobe 三维可视化软件,对地震振幅进行可视化显示和解释,蓝色区为低振幅区,橙色—黄色区为高振幅异常区,生物礁表现为断续—杂乱的高振幅异常。  
图中多边形圈定的区域为生物礁体和地震异常体

## 5 地震反演技术

自20世纪90年代以来,世界上各大石油公司和研究机构普遍加强了地震油藏描述技术研究和攻关,以地震反演、属性分析、相干体处理、三维可视化、模式识别等为核心的地震综合油藏描述技术有了长足的进步,这些地球物理技术和方法在海相碳酸盐岩勘探中也发挥着越来越大的作用。在地震反演方面,新技术更是层出不穷,发展很快,近几年主要应用的方法有递推反演、测井约束反演、多参数地震反演、地震属性反演等。这些反演方法都有其不同的特点和适用性,在使用时应根据研究区的特点及所要解决的地质问题选择最适合的反演方法。

在90年代中后期发展起来的地震—测井联合反演和以地震属性为依托的多参数联合反演技术则明显提高了分辨薄层和预测复杂油气藏的能力。目前,地震反演技术已经渗透到油气田勘探、开发的各个阶段,成为复杂岩性油气藏和非均质油气藏预测

与描述的主要技术手段。近几年地震反演技术的突出进展主要表现在以下四个方面。

由单一曲线反演发展到多曲线联合反演 常规地震反演技术主要是反演波阻抗一类的曲线信息,这种反演技术能够获得成功的关键因素是储集层和围岩的波阻抗具有一定差异,但是油气勘探所面临的地质情况是非常复杂的,在许多情况下要研究的储集层与围岩波阻抗差异非常小,甚至没有差异,单纯根据波阻抗很难将这类储集层与围岩区分开来,很难将有利的储集体识别出来。研究发现其他一些电测曲线如伽马、自然电位、电阻率等有时对岩性区分更加敏感。近几年地震反演技术在多参数岩性反演方面取得了很大进展,目前已经能够做到针对复杂油气藏进行多种曲线的联合反演。这种多曲线联合反演就是在充分分析油藏的岩性、电性特征的基础上,选取多个对岩性区分和油藏特征比较敏感的曲线参数,与地震信息建立联系,进行多曲线联合反演,达到岩性预测和油藏描述的目的。

由基于振幅反演发展到基于地震多属性反演 传统的地震反演技术基于褶积模型理论,反演中用到的地震信息主要是振幅信息,这种反演技术和方法在储层预测和油气藏描述中发挥了很大的作用。随着油气勘探开发程度的不断加大,所面临的地质问题也越来越复杂,单纯依靠地震振幅信息的波阻抗反演技术也不断地显示出它的局限性。近年来,地球物理学家们不断创新,突破了褶积模型理论的束缚,尝试使用地震数据中更多的属性信息,通过神经网络技术,将地震多属性与测井目标曲线联系起来,

达到反演多种曲线信息,从多个角度进行油气藏的精细预测和描述。实践证明,这种方法比单纯依靠振幅信息效果更好。

由构造层序控制发展到层序地层控制 近几年,随着层序地层学在油气勘探开发中的作用越来越大,地震反演技术的最新进展也表现在将地震反演技术和层序地层学技术结合起来,发挥各自的优势,在高分辨率层序地层框架控制下进行的地震反演,使得反演结果能够更加真实反映实际地层沉积结构,油藏描述的效果也更加理想。层序地层学分析技术在油气勘探开发中发挥着巨大的作用,进行岩性圈闭勘探,首先要建立起全盆地层序地层和体系域的等时格架,搞清沉积体系的时空展布和演化特征,根据岩性圈闭发育的一般规律,确定其发育的有利地区和层位。随之要对重点地区的主要目的层建立高分辨率层序等时地层格架,搞清高频层序的岩性展布和地层叠置关系,从而在全区建立准确的等时地层沉积模型,为地震反演和储层预测打好坚实的基础,使得储层预测和油藏描述结果更加准确可靠。进一步结合储层、盖层和侧向封堵层的空间展布规律和配置组合关系,系统进行岩性圈闭识别和油藏描述工作。

由叠后反演发展到叠前—叠后联合反演 与叠后反演相比,叠前全波形反演考虑了波形转换,层间多次反射、透射能量损失等多种影响因素,充分利用了地震数据中的有效信息,反演结果准确、完整<sup>[12]</sup>。它的缺点是计算量太大,目前还难以应用于大规模的生产实践。为此,WesternGeco 公司提出了一种经

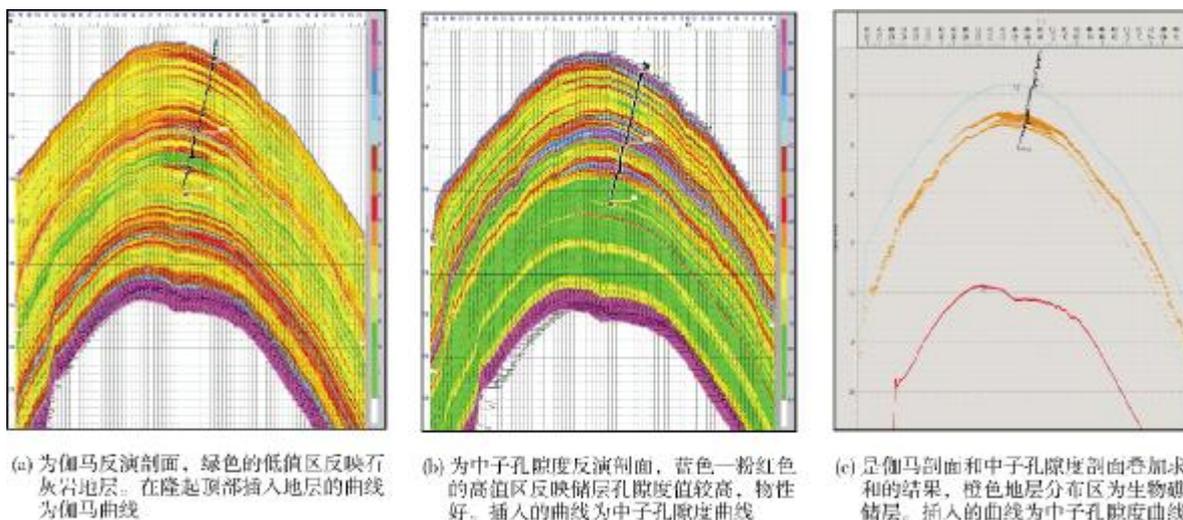


图5 四川盆地黄龙场地区黄龙10井地震多属性联合反演技术识别生物礁储层

济实用的叠前—叠后联合反演方法,即在全区先选择少量控制点作叠前全波波形反演,然后用这些控制点作标定,指导全区叠后反演。联合反演不仅能够提高直接反演结果的可信度和精度,也为后续参数转换提供了可靠的基础数据。

笔者应用地震多属性联合反演技术对四川盆地黄龙场地区长兴组生物礁储层进行了联合反演(图5)。图5a为伽马反演处理剖面,由绿色—黄色—橙色—蓝色—粉红色分别对应伽马值由低到高,其中绿色的低值区一般为石灰岩和白云岩分布区;图5b为中子孔隙度反演处理剖面,由绿色—黄色—橙色—蓝色—粉红色分别对应孔隙度值由低到高,其中蓝色—粉红色的高值区一般为孔隙度高值分布区,储层物性较好;图5c为伽马反演剖面与孔隙度反演剖面叠合求和的结果,保留下来的橙色分布区反应的是物性较好的生物礁储层。这样,通过地震多属性分析,进行伽马和中子孔隙度的联合反演,并根据反演结果进行了生物礁储层的解释和描述评价,很好地预测了生物礁储层的平面和空间展布。

## 6 结 语

海相碳酸盐岩的油气勘探工作在我国方兴未艾,油气地球物理工作者面临着巨大的机遇和挑战。文中总结的五种地球物理方法,包括地震相和古地貌恢复、地震属性分析技术、相干体、三维可视化解

释以及地震反演技术等仅是目前常用的几种叠后评价方法,它们更多地适用于生物礁滩型海相碳酸盐岩的地球物理勘探。面对多种多样、纷繁复杂的海相碳酸盐岩油气藏,必定还有其他多种方法有待进行开发和总结。

### 参 考 文 献

- [1] 罗平,张静,刘伟,等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. 地学前缘,2008,15(1):36-49.
- [2] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩系油气勘探特殊性问题[J]. 地学前缘,2005,12(3):15-22.
- [3] 殷积峰,李军,谢芬,等. 川东二叠系生物礁油气藏的地震勘探技术[J]. 石油地球物理勘探,2007,42(1):70-75.
- [4] 殷积峰,李军,谢芬,等. 波形分类技术在川东生物礁气藏预测中的应用[J]. 石油物探,2007,46(1):53-57.
- [5] 高林,杨勤勇. 地震属性技术的新进展[J]. 石油物探,2004,43(增刊):10-16.
- [6] 李明,候连华,邹才能,等. 岩性地层油气藏地球物理勘探技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2005.
- [7] 苑书金. 地震相干体技术的研究综述. 勘探地球物理进展[J],2007,30(1):7-15.
- [8] Ronald W W. 未来地球物理技术的发展方向[J]. 游之,译. 石油物探译丛,1996,(6):16-24.
- [9] Gerald D K. Fundamentals of 3-D seismic volume visualization[J]. The Leading Edge,1999,(6):702-709.
- [10] 陈蓉,张传宝,杨卫东,等. 三维可视化技术在吉和油田开发中的应用[J]. 石油勘探与开发,2001,28(6):87-88.
- [11] 冉建斌,何峰. 虚拟现实系统及三维地震数据解释[J]. 石油地球物理勘探,2006,41(1):36-42.
- [12] 高林. SEG第70周年暨2000年国际展览会综述[G]// 新星石油物探研究所.SEG第70周年会论文概要. 北京:石油工业出版社,2002:1-9.

编辑:吴厚松

## Progress of Geophysical Methods in Exploration of Marine Carbonate Reservoirs

Li Jun, Yin Jifeng, Xie Fen

**Abstract:** Five major geophysical methods and the new related progress are mainly discussed, which include seismic facies recognition and palaeo-geomorphology restoration, seismic attribute analysis, coherence calculation, 3-D visualization interpretation and seismic inversion. Reef seismic facies can be summarized to seven types. Horizon flattening technique is helpful to palaeo-geomorphology restoration. The number of seismic attribute increases continuously and the increasing attributes include frequency spectral decomposition and cascade attribute etc. The research progress of seismic attribute can be summarized to 8 aspects. The leading research foreland mainly focuses on pre-stack depth domain and elastic wave. The coherence technique has developed from generation-I that is based on cross-correlation calculation to generation-II that is based on characteristic value calculation. The virtual reality system is the most significant developing stage of 3-D visualization, which represents the recent progress of it. The prominent progress of seismic inversion is mainly expressed in 4 aspects: (1) from single log inversion to multi-logs combined inversion, (2) from basing on amplitude to basing on seismic attributes inversion, (3) from structural stratum control to sequence stratum control, and (4) from post-stack inversion to pre-stack and post-stack union inversion. Good exploration results have been achieved in application of these geophysical methods to Yun'anchang, Huanglongchang and Luoiazhai oilfield areas, Sichuan Basin.

**Key words:** Marine formation; Carbonate rock; Oil and gas exploration; Geophysical exploration; Geophysical method, Research progress; Sichuan Basin

**Li Jun:** male, Senior Geologist. Add: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 20 Xueyuan Rd., Beijing, 100083 China