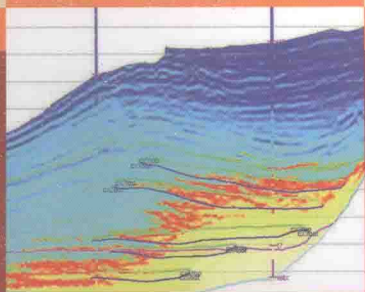


地震沉积学

杨 飞 章学刚 雷海飞 编著



 科学出版社

地震沉积学

杨 飞 章学刚 雷海飞 编著

非常规油气湖北省协同创新中心
油气资源与勘探技术教育部重点实验室 资助
长江大学科学技术发展研究院

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书主要介绍地震沉积学的基本概念、研究思路以及主要技术方法。全书共分8章,主要内容包括地震沉积学研究基础、地震相分析、地震属性参数与沉积相、地震波形聚类、地震波阻抗反演与岩性预测等,并对地震沉积学的适用性进行探讨。

本书具有一定理论与应用价值,特别是书中选取的部分实例均来源于油田科研生产,可以作为矿产普查与勘探、地球物理探测等领域从事沉积体系研究、地下岩性地质预测、地震储层预测工作的科技人员的参考书;也可作为勘探技术与工程、资源勘查与工程、地球物理学等大学本科专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

地震沉积学/杨飞,章学刚,雷海飞编著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050488-3

I. ①地… II. ①杨… ②章… ③雷… III. ①地震学-沉积学
IV. ①P588.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第265132号

责任编辑:张颖兵 杨光华/责任校对:肖 婷

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2016年11月第一版 印张:11 1/4

2016年11月第一次印刷 字数:288 000

定价:90.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自从 20 世纪末(1998 年)曾洪流等学者提出地震沉积学以来,地震沉积学作为一门新的学科越来越受到地质学家们的关注。随着沉积学理论和地球物理勘探技术的发展,地震沉积学的技术手段也在不断进步。近二十年来,国内外学者就地震沉积学的理论、研究思路、技术方法等发表过很多文章,但关于地震沉积的专著尚未见到,本书希望能在各位学者研究的基础上,结合笔者的相关研究成果与认识,对地震沉积学的理论、研究方法、技术手段等方面做一个较为全面的论述。

本书在写法上力求通俗易懂,着重于理论联系实际,尽量在每一章都给出研究实例。对地震沉积学研究手段的认识,采用的是广义的定义,即任何有助于沉积体系研究的地震勘探技术都可以视为地震沉积学的技术方法。全书共分 8 章。第 1 章主要介绍地震沉积学提出的背景、概念、研究思路、技术方法及发展现状;第 2 章从地震勘探的基本原理出发,讨论地震沉积学的研究基础;第 3 章介绍宏观地震相的研究方法,以及从地震相到沉积相的转化;第 4 章较为系统地介绍地震属性的提取方法,各类地震属性的地质含义以及它们与沉积相的关系;第 5 章介绍波形聚类分析的基本原理和方法,并选取实际地震工区利用波形聚类的方法开展沉积相研究;第 6 章主要介绍地震波阻抗反演的的方法,并利用波阻抗体进行岩性解释,阐明首先要进行各类沉积地层的物性统计分析,明确各类岩性之间的波阻抗关系,然后才能较好地开展岩性预测,进而开展沉积体系的研究;第 7 章讨论利用地震频谱分解技术进行薄砂层的检测方法和原理;第 8 章对地震沉积学研究方法的适用性进行了讨论。

本书得到油气资源与勘探技术教育部重点实验室资助,得到长江大学科学技术发展研究院资助,在此一并表示感谢。

地震沉积学构思、选材与成文过程得到非常规油气湖北省协同创新中心大力支持与资助,中心主任罗顺社教授、陈波教授,首席专家陈孔全教授,就地震沉积学在页岩气勘探开发领域中的应用提出了很多指导与建设性的意见。书中部分成果与资料也是在参加非常规油气湖北省协同创新中心研究团队中取得的,这里一并表示感谢。

笔者曾就地震沉积学研究与东方地球物理公司大港分院的李玉海总地质师及分院专家、学者进行过多次交流,获益匪浅,在这里深表谢意。另外,汪勇、徐世敏、左中航、杨锋、张东军、黄诚、陈琪、罗明、方旭蕾、张庆、王庆之、李俊飞、徐扬威、易浩、王宇、周影、董林、任智剑、邱鹏、金兴学、刘晶、周倩、刘金帅、周舟、孙均、余兴、熊冉、刘伶俐、魏三妹、潘喻斌、孙远成、吕财、刘登、董娉婷、张超、蔡芑睿、孟令阳、廖磊、颜开、王黎等参与本书的部分工作,在此深表感谢。

本书由长江大学杨飞主笔,长江大学工程技术学院章学刚、江汉油田荆州采油厂雷海飞为副主笔。尽管酝酿、构思这本书已有数年时间,编写人员花了一年多时间进行文献查阅和素材的收集整理,终于完成全书的编写工作,但限于编写人员水平,书中难免存在不完善之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016年8月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地震沉积学提出的背景	1
1.2 地震沉积学概念	1
1.3 地震沉积学主要研究思路	4
1.4 地震沉积学主要技术方法	6
1.4.1 地震岩石学	6
1.4.2 地震储层反演技术	6
1.4.3 地震资料 90°相位转换	8
1.4.4 地层切片分析技术	8
1.4.5 地震属性分析技术	9
1.4.6 地震相分析技术	10
1.4.7 地震波形聚类分析技术	12
1.4.8 分频解释与时频分析技术	13
1.5 地震沉积学研究现状及发展趋势	14
第 2 章 地震沉积学研究基础	15
2.1 地震反射波的基本理论	15
2.1.1 地震波传播介质	15
2.1.2 地层岩石的弹性模量	16
2.1.3 地震波的形成与分类	17
2.1.4 地震波传播的基本原理	20
2.2 影响地震波振幅的主要因素	23
2.3 影响地震波速度的主要地质因素	25
第 3 章 地震相分析	31
3.1 地震相概念	31
3.1.1 定义	31
3.1.2 主要地震相参数及其地质意义	32
3.1.3 地震相与沉积相的关系	36
3.1.4 地震相转化为沉积相	37
3.2 地震相标志	38
3.2.1 地震相或层序的外形	38
3.2.2 内部反射结构	40
3.2.3 动力学(dynamic)和运动学(kinetic)标志	44
3.2.4 层序的顶、底接触关系	45

3.3	主要沉积体的地震相特征	47
3.3.1	陆相湖盆主要砂岩沉积体地震相特征	47
3.3.2	碳酸盐岩构造形态、地质体的一般反射特征	54
3.4	地震相分析方法	57
3.4.1	地震相的特点	57
3.4.2	地震相分析的思路	61
3.4.3	基于地震地貌学的相划分法	62
3.5	地震相图制作方法	62
第4章	地震属性及其地质含义	64
4.1	地震属性的概念及其发展历程	64
4.2	地震属性的类型	65
4.3	三维体属性提取	66
4.3.1	道积分	66
4.3.2	反射强度体	67
4.3.3	相位体	68
4.3.4	频率体	69
4.3.5	地震体相似性检测	70
4.4	地震层属性提取时窗选取	72
4.5	地震反射层面属性提取	75
4.5.1	振幅类	75
4.5.2	复地震道统计类	79
4.5.3	频谱分析类	83
4.5.4	层序分析类	85
4.5.5	相关性分析类	88
4.6	地震属性的地质意义	90
第5章	地震波形聚类分析	92
5.1	地震道波形聚类研究原理	93
5.1.1	地震道分类技术基本原理	94
5.1.2	地震道分类技术核心和技术特点	94
5.2	地震波形聚类工作方法	95
5.3	地震波形聚类实例分析	96
5.3.1	油田基本概况	96
5.3.2	研究区单井相分析	98
5.3.3	波形聚类分析	101
5.3.4	沉积相带划分	106
第6章	地震波阻抗反演与岩性预测	111
6.1	地震波阻抗反演的主要类型	111
6.1.1	相对波阻抗反演	112

6.1.2	递归反演	113
6.1.3	稀疏脉冲反演	115
6.1.4	基于模型的反演	117
6.2	常用几种地震反演方法技术	118
6.2.1	递推反演(Seislog)	118
6.2.2	地震岩性模拟(SLIM)	120
6.2.3	模型约束反演——Strata 反演	120
6.2.4	地质统计学反演	121
6.2.5	波阻抗多道地震反演(ISIS 地震反演)	122
6.2.6	稀疏脉冲波阻抗反演(Jason 地震反演)	125
6.3	岩性预测	127
6.4	波阻抗岩性预测实例	132
6.4.1	研究区地质概况	132
6.4.2	岩石物理分析	133
6.4.3	测井约束稀疏脉冲反演	136
6.4.4	岩性预测结果分析	140
第 7 章	分频技术	144
7.1	分频解释技术的原理	144
7.2	分频解释的数据要求及实现步骤	148
7.3	分频技术应用	149
第 8 章	地震沉积学适用性	158
8.1	地震资料的分辨率	159
8.2	对于 90°相位转换技术应用的讨论	161
8.3	分频技术的讨论	165
	参考文献	167

第 1 章 绪 论

1998 年,曾洪流、Henry、Riola 等首次使用地震沉积学一词;2001 年,他们正式提出地震沉积学是利用地震资料来研究沉积岩及其形成过程的一门学科;2004 年,Eberli、Masaferrò、Sarg 等认为,地震沉积学是基于高精度地震资料、现代沉积环境和露头古沉积环境模式的联合反馈来识别沉积单元三维几何形态、内部结构和沉积过程的一门新兴学科。近年来,多位学者,如曾洪流、林承焰、陆永潮、杜学斌、魏嘉、朱文斌等对地震沉积学的概念、研究方法、技术手段等进行了较为深入地探讨与研究,推进了地震沉积学的发展与繁荣。

1.1 地震沉积学提出的背景

随着地震勘探原理的不断完善,相关电子和计算机技术的发展突飞猛进,地震勘探技术业已广泛地应用于各类油气田的勘探与开发,成为现今油气田勘探开发不可或缺的重要手段。自 20 世纪 70 年代三维地震首次得到商业性应用以来,地震技术取得了长足进步,完成了从光点地震仪向模拟磁带地震仪再到数字磁带地震仪,从二维地震勘探向三维地震勘探,从普通三维地震覆盖向高分辨率三维地震覆盖及从三维地震勘探向四维地震勘探的一系列发展。一些盆地三维地震工区已经接近或者可以达到全盆地覆盖的规模,如国内的珠江口盆地、江汉盆地、苏北盆地等。三维地震资料具有覆盖面积大、能客观反映沉积体系宏观的三维形态和地层相互接触关系并能连续追踪等特点,为建立盆地内的年代地层格架提供了科学依据。

地震记录不仅反映地下地层界面的展布,还可以间接反映(或通过地震反演)地下地层的原始古地理沉积环境。也就是说,随着现代地震技术的发展,地震记录不但能反映地下地质构造特征,还可以进一步从地震记录中获得地层沉积单元的岩相、岩性及内部沉积结构等沉积学及沉积岩石学方面的信息。由于不同古地貌、物源等地质背景因素控制着沉积体系的发育,准确恢复这些沉积背景因素对于研究储集砂体的展布特征具有重大意义。另外,地震多属性分析技术还实现对沉积体系、岩石物理特征等的定量描述。这就使得地震勘探技术能广泛地应用于沉积学研究,并能与沉积学研究相融合,即构成地震沉积学。

1.2 地震沉积学概念

地震沉积学创立初期首先被定义为“利用地震资料来研究沉积岩及其形成过程的一门学科”(Zeng et al.,1998)。随后学者认为,应该在沉积学领域里建立一门分支学科,即“地震沉积学”,并将其定义为基于高精度地震资料、现代沉积环境和露头古沉积环境模式的联合反馈(mutual feed-back),以识别沉积单元的三维几何形态、内部结构和沉积过程

的一门学科(林承焰等,2007),其研究核心就是建立更为精细沉积体系的三维构成。而同样被视为地震沉积学一个学派的地震地貌学,Posamentier(2009)将其定义为“利用三维地震数据中的相关图像信息,对古地貌进行研究的学科”。地震沉积学被引入国内后,林承焰、张宪国、董春梅等将其定义确立为“利用地震的手段,结合并的资料,进行宏观的地层、岩石、沉积史、沉积体系和沉积相的平面展布研究”。

2005年2月,在美国休斯敦召开了地震沉积学国际会议,地震沉积学作为一门新的学科越来越受到地质学家们的关注。但是,由于地震资料分辨率和技术研究手段的限制,地震沉积学尚没有构成一套完整的理论体系,还处于不断完善之中。近几年,虽然国内广泛利用地震资料开展地层岩性识别、沉积相的分析研究,但还没有出现有关地震沉积学的系统专著。因此,地震沉积学研究一方面显示出它的优势和广阔前景,同时也正需要我们去不断发展它的理论和关键技术。在目前的技术条件下,地震沉积学的研究注重于地震地貌学(古地貌恢复)、地震岩石学、岩相古地理、沉积体系、沉积结构和沉积史研究。

1970年前,主要通过二维地震勘探的地震反射旅行时间来获取地下的构造形态信息,油气勘探以寻找构造油气圈闭为主。随着二维地震数据质量的提高及各种新地震资料分析技术的投入使用,研究人员开始注重利用地震波的外部形态、内部反射结构及地震反射同相轴的平行性、连续性、振幅强度、波形及显示频率等特性的变化,来挖掘地震资料中蕴藏的地层和沉积信息,并形成了地震地层学这门学科。地震地层学是基于下面一个假设:沉积层序的地震反射是沿有明显声阻抗差的地层界面产生的,因为地层界面反映等时沉积界面,所以地震反射具有等时意义,这一假设是地震地层学进行地震解释的基础。

在总结各项地震地层研究成果的基础上,Mac Jervey在20世纪70年代后期在数学上模拟和定量表示了产生全球旋回曲线的海平面、构造沉降和物源供给之间的相互关系,这项工作将地层学和盆地演化研究有机地结合起来,显示出巨大的研究潜力,为层序地层学诞生奠定了基础。20世纪80年代后期,Vail、Samgree和van Wagoner等学者正式提出层序地层学概念,并不断完善层序地层学理论体系,形成独立的学科。Vail等(1977)以海洋环境为背景,针对被动大陆边缘提出了层序地层学概念及其相关沉积模式。层序地层学的核心部分是研究全球海平面升降变化对沉积作用的控制,包括对大陆边缘碎屑沉积作用的控制和对大陆边缘碳酸盐沉积作用的控制。层序及其内部组成部分体系域是全球海平面升降、构造沉降,以及沉积物供给之间相互作用的产物。全球海平面升降和构造沉降共同作用的结果是引起海平面的相对变化。在全球海平面升降的控制下,海平面的相对变化速度是碎屑沉积地层类型和岩相分布的主要控制因素;在长期构造运动的背景下,海平面的相对变化控制碳酸盐沉积地层类型和岩相分布。

层序地层学是在地震地层学的基础上发展起来的(Vail et al.,1977),它概括了地震地层学的基本概念和方法,并综合了生物地层学、同位素地层学、磁性地层学、沉积学和构造地质学的最新成果。其基本原理是构造运动、全球绝对海平面变化和沉积物供应速度综合作用的结果,产生了地层记录,这些记录反映了上述地质作用的规模、强弱、持续时间和影响范围。其中,构造作用与海平面变化的结合引起了全球性相对海平面变化,它控制了沉积物形成的可容空间。构造作用与气候变化的结合,控制了沉积物的类型和沉积数量,以及可容纳空间中被沉积物充填的比例。而河流和海洋环境中的沉积作用又由于水

流与地形和水深间的相互影响而引起不同的岩相分布。

层序旋回周期的规模可以分为六级;持续时间大于5000万年的称为一级周期,500万~5000万年的为二级周期,50万~500万年的为三级周期,10万~50万年的为四级周期,1万~10万年的为五级周期,小于1万年的为六级周期。一级周期的起因是地壳的拉张、负载引起的地壳下挠、地壳的热冷缩等,其地层记录表现为沉积盆地的形成与发展;二级周期的起因是板块边界的调整、热的扰动、大洋盆体积的变化等,表现为大规模的海进-海退旋回、大规模的大陆淹没与暴露;三级周期的起因是局部或区域性的应力释放与地质构造运动、气候的变化、水体体积变化引起的海平面的相对变化,地层记录表现为褶皱、断层、岩浆活动、刺穿作用和层序地层学的基本单位沉积层序的形成;第四、第五、第六级周期的起因分别是气候和水体体积的变化、地球轨道偏心率的变化、地轴倾角的变化,以及岁差引起的米兰科维奇频率。地质学界一般认为,海平面的升降是全球性的,而构造活动是地区性或区域性的。尽管后者的强度通常明显大于前者,但是构造活动只能增强或削弱层序的边界不整合面和层序内部的沉积间断面,但不能制造这些面。

层序地层学主要根据露头、测井、地震资料和高分辨率的生物地层学断代资料,进行沉积层序分析,解释层序、体系域、准层序,建立年代地层框架;根据层序边界编制构造沉降和总沉降曲线,并解释盆地的地质历史。将板块碰撞或离散事件、重大海进-海退旋回、岩浆活动、重大不整合面等构造事件与地层特征联系起来,进行构造-地层综合分析,划分构造-地层单元、编制相应图件、利用计算机模拟它们的发展历史,即为层序地层研究过程。

研究层序内部的不同级次地层单位,包括沉积体系域、沉积体系、准层序组和准层序。确定其地层分布模式和相带分布;编制年代地层框图、海面升降曲线、古地理图件、岩相图件等,以进行综合解释;圈定有利生油和有利于形成油藏的地段,提出可供勘探的井位,圈定有利于形成其他矿产,如煤、铁、磷灰石等沉积矿床的地段,提出可供勘探的靶区。

层序地层学的诞生,提出了一系列新的概念。依照这些新概念,几乎一切与沉积地质学有关的学科都要接受重新检验和研究。层序地层学下一步的重要发展方向是建立和完善不同构造、不同环境背景下的不同级次的层序地层模式,特别是目前研究薄弱的陆相环境及元古宙的模式;改进和完善全球海平面相对变化曲线,以及统一的年代地层表;在层序地层学理论与高分辨率地震岩性勘探和计算机技术相结合的基础上,实现油藏、气藏、煤田和沉积矿床等的钻前预测和合理的资源开发。

层序地层学的最大特色是建立一个受控于海平面变化、物源供给、构造沉降及气候变化等因素,并具有强大预测功能的沉积地层层序垂向叠置框架模式。层序地层学的主要优势在于区域地层格架的建立及宏观的沉积体系的展布与预测研究。随着石油地质勘探的不断发展,传统的层序地层学研究已经不能满足油气勘探对储层沉积体系三维几何形态进行精细刻画的实际需求,而地震沉积学却可以结合层序地层学的优势,并在层序格架下进一步结合地质、测井资料,通过各种地震资料处理与解释技术来深化利用地震资料(如形成多种地震属性体及各类层间属性切片等),辅助沉积相与沉积体系的研究,从而更充分全面地认识地层或地质体的岩性、沉积过程、沉积特征及物性特征(如孔隙度、渗透率等)。地震地层学及层序地层学研究主要利用纵向的地震剖面与信息,而地震沉积学则综

合利用纵向的地震剖面信息及水平方向各类地震属性切片信息。地震沉积学正是在这种背景下诞生的,并且成为油气储层精细刻画及定量描述的主要手段(图 1.1)。

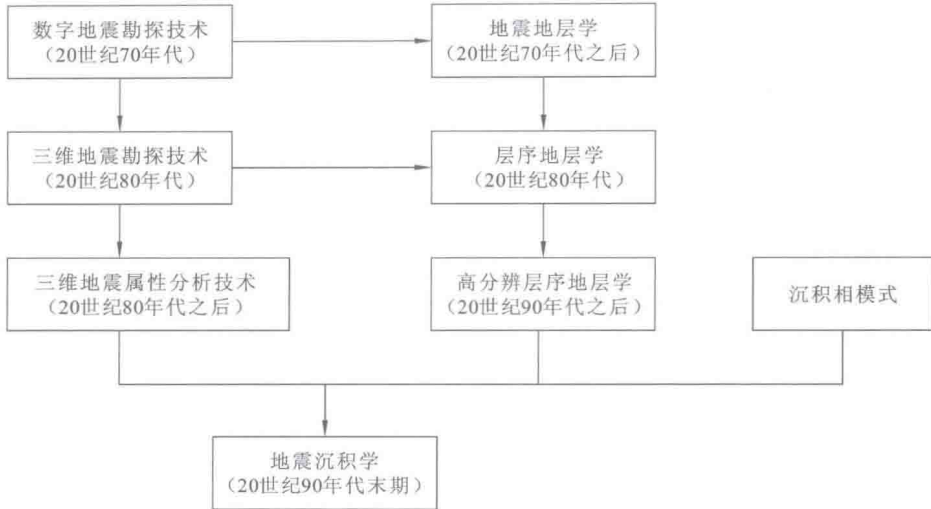


图 1.1 地震沉积学学科演变及定位

综合来看,地震沉积学是利用地震信息研究沉积相、沉积体系及沉积岩形成过程的学科,它是继地震地层学、层序地层学之后发展起来的又一门新兴边缘交叉学科(吴因业等,2008),其理论基础在于对“地下沉积体系任何纵向和横向的变化都会引起地震波形及属性变化”的重新认识(林承焰等,2006),地震沉积学与地震地层学的最大不同在于,它认识到地震同相轴既不简单反映等时界面,也不单纯反映岩性界面,而是受到地震资料频率的控制,不同频段的地震数据反映的地质信息是不同的。低频资料中反射同相轴更多地反映岩性界面信息,而高频资料中反射同相轴更多地反映等时沉积界面信息。地震沉积学是层序地层学和沉积学的发展而不是替代,地震沉积学研究要以地质研究为基础,在沉积学规律的指导下进行(Zeng et al.,1998)。地质记录是沉积环境的响应,而从地震资料所获得的各类信息又是地质记录的地震响应。所以,从地震记录可以间接地反映和反演出地质记录的原始古沉积环境。

从上述学者们给出的地震沉积学概念可以看出,地震沉积学是在地震资料成功应用于层序地层格架内沉积体系研究与沉积相划分的基础上提出来的,是地震资料应用于沉积学研究和油气储层分析量化需求的必然结果。因此,地震沉积学可以定义为以高精度三维地震资料为基础,以精细沉积学模式为指导,通过综合应用地球物理技术方法,在层序地层格架内研究沉积体系分布特征及其演化的一门学科(董春梅等,2006a;2006b)。

1.3 地震沉积学主要研究思路

地震沉积学研究的主导思想是利用高精度现代地震技术与沉积学研究进行互动反馈、相互印证。它综合了当前高新地震勘探技术与现代沉积学思想,充分运用高新地震勘

探技术,结合地质与地球物理资料(包括钻、测井资料及地震资料),对地下地质体进行综合分析研究,从而得出全面准确的沉积学认识(林正良等,2009)。

地震沉积学以高精度地震资料、露头古沉积环境模式分析、现代沉积环境研究的综合研究为基础,并以识别层序地层格架下各沉积单元的三维几何形态、内部结构和沉积过程为目的(图 1.2)。

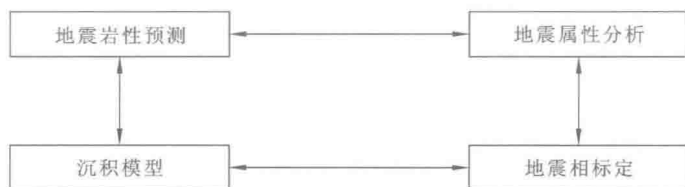


图 1.2 地震沉积学研究思路和流程

地震正演模拟技术是地震沉积学研究的桥梁。地震正演模拟是指用物理模型和数学模型代替地下真实地质介质,用物理实验和数学计算模拟地震记录的形成过程,从而得到理论地震记录的各种方法和技术(李长宝,2007)。不同地质体由于其岩石组合、内部结构、岩性、物性和含油气性等差异,在地震上其地震参数反射特征,如反射形态、内部结构、反射频率、振幅等必然有所不同。由于地下地质的复杂性和地震波传播过程的复杂性,加之各种波的干扰,造成了地震剖面中的各种反射现象存在多解性,极大地增加了地震资料解释的难度。利用地震正演模型技术,结合实际资料,不仅可以建立各类地质体的地震响应识别模型,同时也可以减少地震解释的多解性,提高地震资料解释的精度(陆永潮等,2008)。

正演模型的建立不仅可以在宏观上验证地震资料处理和解释方法的正确与否,而且对层序格架内不同沉积背景下各类储集体的地震资料处理和精细解释有很好的指导作用。尤其是近年来高分辨三维地震资料在油气勘探开发中的广泛应用,建立有地域和地质年代特色的高精度正演模型已经成为各个地球物理学家和油气田勘探开发地质工作者关注的热点。

精细沉积建模是地震沉积学研究的基础(陆永潮等,2008)。在高精度等时层序框架中动态地恢复沉积体系的三维空间展布及其演化,是当今沉积学研究的主要方向。高精度层序地层学不但为储层建模提供了一个高分辨率的等时层序框架,而且也精细等时层序分层提供了手段,在此层序框架内,研究储集体在多重控制因素下的演化过程就具有动态建模意义。

运用高精度层序地层学方法进行沉积相和沉积体系分析,能够清晰地展示各沉积体系随时间变化的动态过程。因此,研究不仅可以揭示沉积体系内部结构各要素的基本特征、古地貌变化,还可以揭示各种沉积体系在等时层序格架中的空间分布和随时间迁移的变化规律,这些动态的概念模式为油气储集体的展布特征及其储集性能研究提供了更好的研究手段。

高分辨三维地震资料的精细油气储集体描述和成像技术是地震沉积学研究的核心。在动态沉积地质模型指导下的三维地震资料解释、储集体描述和成像技术不仅赋予了宏

观地震相和地震属性全新的地质意义和沉积学概念,也客观地再现了各类油气储集体三维空间形态及其内部沉积构成变化。特别是近年来发展起来的地震储层测井约束反演技术、地震分频解释技术、地震多属性分析技术等,使地质学家和地球物理学家们更清楚地了解层序格架内各地质体的内部结构、储层纵向变化和横向变化规律。随着地震勘探技术的进步,各类地震资料的处理和精细解释技术(包括构造解释和岩性解释)的使用均可在更高分辨率的基础上对各类储集体进行精细描述,从而为地震沉积学的发展开辟广阔前景。

1.4 地震沉积学主要技术方法

利用地震资料辅助进行沉积相分析的技术方法有很多,几乎所有的地震勘探手段都可以用来辅助沉积相的研究,即都可以作为地震沉积学的技术方法,主要包括地震岩石学、地震储层反演技术、地层切片分析技术、分频解释与时频分析技术等。

1.4.1 地震岩石学

地震岩石学是指对通过地震资料进行特殊处理,使地震波同相轴可以像测井曲线一样解释地层岩性(谢玉洪等,2010)。地震岩石学研究要求把三维地震数据体转化成测井岩性体,在岩性体内将电阻率、伽马、自然电位等测井曲线和邻近的地震反射系数结合,更好地从地震资料上判识和追踪圈闭。

利用钻井取心资料开展钻井岩心观察和室内化验分析,以确定岩性。利用岩心分析结果对测井资料进行标定;通过井-震结合,并利用地震储层预测技术识别储层的岩性,包括碎屑岩、碳酸盐岩、火成岩和变质岩,对于一些特殊的岩性地体,如生物礁、盐丘、泥丘、火成岩体等也可以通过地震反射结构进行识别和预测。

地震波速度和泥质含量关系主要用来分析地震振幅和岩性的关系。泥质含量可以由伽马测井曲线计算得来,地震波速度则能从声波时差测井曲线计算得来。纯净泥岩的泥质含量最高,对应着最低的波速;而纯净砂岩则对应着最高的波速。

岩石物理分析技术主要研究岩石的地震波速度及各类弹性参数(体变模量、杨氏模量、泊松比、切变模量、拉梅常数等)。该技术利用常规测井、偶极横波测井、试油等资料进行储层的岩石物理响应特征研究(包括各种类型储层的弹性参数特征)。建立不同弹性参数与储集空间类型、含油气性等对应关系,确定对储集层类型、含油气性敏感的弹性参数,选取适当的弹性参数,进行有利储层的地震预测。

1.4.2 地震储层反演技术

在地震储层预测中,地震储层反演技术是不可缺少的技术,其在砂岩岩性油藏描述中发挥了非常重要的作用。著名地球物理学家李庆忠院士也曾指出:“交到地质人员手中的地震资料都应是作了反演的波阻抗剖面”“波阻抗反演是高分辨率地震资料处理的最终表达形式”“采集处理了高分辨率资料后,如果不作波阻抗或积分道剖面,就好比农夫辛辛苦苦种了庄稼而不去收获!”目前,地震资料的测井约束反演处理已经成为处理常规目标的一种手段。

根据地震勘探原理,地震反射波法勘探的地质基础在于,地下不同地层具有不同波阻抗,当地震波传播到有波阻抗差异的地层分界面时,就会产生透射和反射,从而形成地震反射波。地震反射波振幅等于反射系数与地震子波的褶积,而地层界面的垂直反射系数就等于该界面上下介质的波阻抗差与波阻抗和之比。也就是说,如果已知地下地层的波阻抗分布就可以推导出地震反射波,即地震反射剖面,我们将由地质的地层波阻抗剖面得到地震反射波剖面的过程称为地震波阻抗正演,反过来,我们将由地震反射剖面推导出地质的地层波阻抗剖面,与地震波阻抗正演相对应,将由地震反射剖面得到地层波阻抗剖面的过程称为地震波阻抗反演。

地震储层反演技术在 20 世纪 70 年代开始出现,当时对地震反演的研究只是以基于褶积模型的叠后一维波阻抗反演为主,80 年代得到了迅速发展。1983 年,Cooke 介绍了地震资料广义线性反演方法,从而揭开了波阻抗反演技术的崭新序幕。90 年代初期,石油地球物理勘探学家们提出了综合利用地质、地震和测井资料进行约束反演,可克服单一的线性反演方法的缺陷。90 年代至今围绕一维波阻抗反演的各类算法及应用成果层出不穷,随着研究的升温,Amoco 公司的 Connolly 在 1999 年正式发表了关于弹性波阻抗反演方法的论文,在 2000 年度 SEG 年会上出现了多篇关于弹性波阻抗反演的论文,ARCO 公司则介绍了他们申请专利的弹性波阻抗反演方法,认为其在求取反射系数的稳定性方面要好于 Connolly 的方法,而且计算弹性阻抗和声波阻抗数值在一个尺度下,同时 BP 和 Amoco 公司在会上又提出了扩充弹性波阻抗方法,可以用于流体和岩性的预测。此外,Paradigm 公司在其商业软件 Vanguard 的最新版本中也有有关弹性波阻抗反演功能的出现。Jason 公司也推出了 RockTrace 弹性反演模块,以纵波波阻抗和横波波阻抗的概念来区别其与以往软件中波阻抗的概念。这些进展说明,弹性波阻抗已经成为波阻抗反演进一步发展的方向之一,地震反演的发展正走向声波阻抗和弹性波阻抗结合的道路。

从地震波反演所用的地震资料来看,地震反演可分为叠前反演和叠后反演;从地震反演所利用的地震信息来看,地震反演又可分为地震波旅行时反演和地震波振幅反演;从地震反演的地质结果来看,地震反演可分为构造反演、波阻抗反演(声波阻抗/弹性阻抗)、储层参数反演等(张国栋等,2010)。

叠前反演主要包括基于旅行时的 CT 成像技术和基于振幅的 AVO 分析技术,可以进行弹性阻抗的反演;叠后反演主要包括基于旅行时的构造分析和基于振幅信息的声阻抗反演。

近 20 年来,叠后地震反演取得了巨大进展,已形成了多种成熟方法和技术。通常“地震反演”往往特指“叠后地震波阻抗反演”,“地震波阻抗”也往往是指“声阻抗”。叠后波阻抗反演在具体实现过程中,对各种参数的估算方法不同、对反演结果的运算过程不同,因此派生出很多的反演方法。例如,按测井资料在其中所起作用的大小,可将地震波阻抗反演分成 4 类:无井约束的地震直接反演、测井约束地震反演、测井-地震联合反演和地震控制下的测井内插外推。目前,石油地质研究上广泛采用的地震储层反演方法是测井约束反演,即通过与测井、地质模型等信息的融合,将地震反演的波阻抗频率范围在地震频带的基础上分别向低频段和高频段进行拓展。测井约束反演从确定一个初始地质模型开

始,利用模型的物性参数,进行反射系数估算,进而反演出合成地震道,并与井旁地震道相比较,求得剩余误差道,利用误差道来修正模型参数,直至达到满意的相关系数为止。

1.4.3 地震资料 90° 相位转换

学者曾洪流先生认为, 0° 相位地震资料在研究单一反射界面时效果较好,而在对岩层和地层剖面解释时 90° 相位地震资料效果更好。提出 90° 相位转换的学者认为,常规地震资料一般都是进行了子波零相位化处理(陈旭等,2010),且零相位数据体在地震解释中具有很多优点,它包括子波的对称性、主瓣中心(最大振幅)与反射界面一致及较高的分辨率等。这样,零相位地震数据体中的同相轴波峰、波谷对应着地层界面,地震剖面是界面型剖面。岩性地层与地震同相轴之间不存在必然的关系,要建立地震数据和岩性测井曲线间的联系很困难。特别是在陆相沉积中,砂岩储集层往往较薄,横向上连续性差,相带窄且空间变化大(张延章等,2003)。对薄砂层而言,反射波振幅是组合地震响应,它混合了来自薄砂层顶底界的反射,砂体与地震同相轴之间也没有直接的对应关系,因此零相位地震数据不适合于薄层砂体的解释。

90° 相位转换的方法就是通过将地震相位旋转 90° 后,将反射波主瓣提到薄层中心,以此来克服零相位波的缺陷。这样,地震反射波同相轴就对应着砂岩层,而不是对应地层顶、底界面,而地层界面则对应零相位,这就使得地震反射波同相轴与地质上的岩层对应,地震波同相轴也就具有了岩性地层意义,从而使地震道类似于波阻抗剖面,地震剖面就具有岩性地层意义。该方法就是通过对地震反射波做相位旋转,使反射波同相轴(波峰或波谷)跟薄互层地层中的地质岩层相对应,而不是对应于地层的顶、底界面,从而使地震反射同相轴具有了岩性地层意义,这时地震相位在一个波长的厚度范围内与岩性相对应。虽然没有实质上提高地震资料分辨率,但使地震剖面转换为一种类似于波阻抗剖面的准地震地质剖面,使得地层解释更加形象、直观。

90° 相位转换的目的是为了赋予地震同相轴地质含义,具体转换角度要根据地震资料相位谱及标定后测井分层上目的层位对应的地震相位来决定。当地层厚度和地震波长的一半相当时,对于处理提供的零相位子波地震数据来说,相位转换只需要将原来的地震数据体旋转 90° 即可,这时相位转换后的地震剖面就可以和薄互层地层中岩性相对应。但通常情况下,地震资料的相位在解释之前是不确定的,很难刚好就是零相位,这时就需要具体计算地震反射波子波的相位,根据地震子波相位来确定相位调整量,使地震资料的同相轴最终和薄互层中的岩性地层相对应。而对于更小单元的薄互层地层,则需要先通过井震标定,确定层序界面实际对应的相位,然后调整地震资料的相位,使地震主瓣主体位置和薄岩性地层对应,来实现赋予地震同相轴地质含义的目的。

1.4.4 地层切片分析技术

Brown 等(1986)等学者在利用三维地震资料进行地层岩性解释的过程中,首先提出了基于三维地震的水平成像(即时间切片)可以进行平面上的高分辨率沉积相解释。随后曾洪流等学者(Zeng et al.,1996)提出,平行于或者沿着所追踪地震同相轴所得到的层位进行沿层切片,更具有实际的地球物理意义和地质含义。地震地层切片成像就是沿等时

地层沉积界面(地质时间界面)提取各类综合地震属性(均方根振幅+平均波峰振幅+平均绝对振幅+最大波峰振幅+平均波谷振幅等),并将地震属性进行优化,使之能客观地反映地震工区内各类沉积体系的平面展布。地层切片是通过在两个等时界面间进行合理的内插切片来实现,这与1996年Posamentier等学者提出的等比例切片比较类似。地层切片是盆地分析和储层粗略描述中的一项新技术,它不仅具有较高的分辨率、能更准确地拾取沉积界面,而且能够得到层序格架控制下的大量切片,有利于盆地沉积演化分析。地层切片使沉积相成图工作变得简单,并极大地减缓了穿时问题,特别适合于楔状沉积层序的分析。

常用的地震切片类型包括时间切片和沿层切片(林承焰等,2006)。时间切片是沿某一固定地震反射波旅行时对地震数据体进行切片显示,切片方向是沿垂直于时间轴的方向,它切过的不是一个具有地质意义的层面;沿层切片是沿着或平行于追踪的地震层位进行切片,它们具有明确的地球物理意义,更便于进行地质解释。目前,常用的切片手段包括时间切片、沿层切片和地层切片或按比例切片。研究中应该选取最适合于特定构造和地层状态的某一种方法:①假如地层是席状且近似水平的,时间切片能适应;②假如地层是席状但并非水平沉积,则沿层切片更合适;③假如地层既不是席状也不呈水平沉积状,则必须选用地层切片,地层切片比时间切片和沿层切片更能接近于地质时间界面。地层切片是以解释的两个等时沉积界面为顶底,在地层的顶底界面间按照厚度等比例内插出一系列层面,沿这些内插出的层面逐一生成切片。

沿层切片由于是按解释地震反射层向上或向下平行时移后提取的地震振幅值,在上下地层平行整合接触时,这种方法相对有效,但绝大多数情况下,解释的层面和其上下的沉积地层并非平行关系,因此按照解释层位平移的方法制作上下地层的沿层切片,由于地层的厚度不等,则会产生穿时现象,切片所表现的振幅特征不能反映同一时间沉积特征,最多仅仅在局部范围内能够相对反映岩性体的边界和展布。而地层切片按厚度等比例内插层面的方法考虑了沉积空间随平面位置的变化,降低了误差,比时间水平切片和沿层切片更加有效、合理。

1.4.5 地震属性分析技术

地层储集体的岩性变化会改变其波阻抗特征,同时引起地震波运动学和动力学特征(相位特征、频率特征、能量特征等多方面信息)的变化,另外,利用储层的岩石物理特性与各类地震属性建立起相关性,那么地震波阻抗、动力学和运动学特征等地震属性也可以用来预测储层特性。随着数字地震勘探技术的不断进步,从20世纪70年代开始研究和使用时震属性,最早主要是以振幅为基础的瞬时属性,用来直接指示油气,也就是所说的“亮点”法。在20世纪70年代初,人们发现了含气砂岩波阻抗的异常变化,于是利用地震反射波振幅异常——“亮点”“暗点”,预测潜在的含气砂岩储集体(张延玲等,2005)。

20世纪80年代,石油地球物理勘探界学者们提出了全新的地震属性计算方法——复数地震道分析,所提取地震属性的数量迅速增加。虽然这些属性中的许多属性具有严谨的数学定义,也有明确的物理含义,但最为重要的地质意义却模糊不清,严重影响了这些属性的广泛应用。地球物理勘探的最终目的是解决地质问题,若所提取的地震属性没