

# 中国石油集团油藏地球物理 技术现状与发展方向

撒利明<sup>①</sup> 甘利灯<sup>\*②</sup> 黄旭日<sup>③</sup> 陈小宏<sup>④</sup> 李凌高<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国石油天然气集团公司,北京 100007; <sup>②</sup>中国石油勘探开发研究院,北京 100083; <sup>③</sup>中国石油东方地球物理公司油藏地球物理研究中心,河北涿州 072751; <sup>④</sup>中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室,北京 102249)

撒利明,甘利灯,黄旭日,陈小宏,李凌高. 中国石油集团油藏地球物理技术现状与发展方向. 石油地球物理勘探,2014,49(3):611-626.

**摘要** 在回顾油藏地球物理技术发展历程、技术内涵变迁的基础上,从油藏类型和开采方式出发分析了国内油藏地球物理技术的任务与需求,对照当今世界油藏地球物理技术最新进展,结合国内油藏地球物理技术的发展历程,从岩石物理分析、高精度地震资料处理、地震资料定量解释、井筒地震、多波多分量地震、时移地震、井震藏联合动态分析、微地震监测和应力场模拟等9个方面分析了中国石油集团的技术现状与面临的挑战,指出了未来技术的发展方向。

**关键词** 油藏地球物理技术 发展历程 技术需求 技术现状 技术挑战 发展方向

中图分类号:P631 文献标识码:A

## 1 引言

在过去一个多世纪的油气勘探和开发历程中,地球物理技术经历了构造油气藏勘探、地层岩性油气藏勘探和油藏地球物理三个发展阶段,其研究任务由构造成像与岩性预测发展为储层孔渗特征描述、油藏流体场的静态描述和动态监测等。当前,油藏地球物理技术正不断向油气田开发和工程领域延伸,已成为发现剩余油气和提高采收率的重要技术手段。

油藏地球物理技术因油气田开发与开采的需求而兴起。1977年,受美国能源部的资助,Nur在斯坦福大学成立了岩石物理研究小组,开展提高采收率(EOR)过程地震监测的岩石物理基础研究,后来向井筒地球物理拓展,并于1986年创立了SRB(斯坦福岩石物理和井筒地球物理)研究组,为将地球物理信息与油藏参数相联系做出了巨大贡献,也为油藏地球物理技术奠定了基础。1982年麻省理工学院的Toksöz成立了地球资源实验室,随后分别

立了由Arthur领导的全波形声波测井研究小组和由Roger领导的油藏描述小组,从事井筒地球物理技术评价、研究和开发。同年8月Geophysics杂志首次报道了法国CGG公司用于增加石油产量的油藏地球物理技术。1984年美国SEG协会成立了开发和开采委员会,负责加强地球物理学家、开发地质学家和油藏工程师们之间的联系。1985年Tom在科罗拉多矿业学院组建了油藏描述项目(RCP)组,研究多分量和时移地震技术,及其在油藏动静态描述中的应用。1986年SEG年会首次召开了以油藏地球物理为主题的专题研讨会;1987年,SEG和SPE联合举办了油藏地球物理的研讨会,White和Sengbush合著出版了《开采地球物理学》(Production Seismology)。此后,油藏地球物理一直是地球物理研究的热点,SEG每年至少都要举行两次专题讨论会,世界各大石油公司、院校和研究机构也不断加大研究力度。1992年以后,The Leading Edge杂志每年刊发1~2期专辑以发表SEG油藏地球物理专题讨论会的论文,到了2004年,该专题因文章太多而转为更细分的专题。伴随计算机特别是高速工

\*北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院,100083。Email:gld@petrochina.com.cn

本文于2013年10月10日收到,最终修改稿于2014年4月19日收到。

作站的飞速发展,油藏地球物理技术得到了长足进步,特别是在地震属性分析、储层预测、油藏表征、油藏监测、裂缝性储层描述等方面,已在世界范围内得到广泛应用并不断带来巨大经济效益。进入21世纪,随着叠前地震反演、多波多分量、时移地震技术的进步,地震技术已贯穿油气勘探开发全过程,如今以地震技术为主导的油藏多学科一体化技术已成为一种发展趋势。2010年SEG出版了Johnston<sup>[1]</sup>主编的《油藏地球物理方法和应用》(Methods and Applications in Reservoir Geophysics)论文集,从支撑技术、油藏管理、勘探评价、开发地球物理、生产地球物理和未来发展方向六个方面进行了系统回顾与总结,基本反映了当今油藏地球物理的最新进展。

油藏地球物理技术的概念与内涵也随着技术的发展与应用不断趋于完善。孟尔盛等<sup>[2]</sup>指出,“油藏地球物理也称开发与开采地球物理,其内涵包括油藏描述与油藏管理”。刘雯林给出了具体定义:开发地震是在勘探地震的基础上,充分利用针对油藏的观测方法和信息处理技术,紧密结合钻井、测井、岩石物理、油田地质和油藏工程等多学科资料,在油气田开发和开采过程中,对油藏特征进行横向预测,做出完整描述和进行动态监测的一门新兴学科<sup>[2]</sup>。Sheriff<sup>[3]</sup>将它定义为“利用地球物理方法帮助油藏圈定和描述,或在油藏开采过程中监测油藏变化”。Pennington<sup>[4]</sup>提出“油藏地球物理可以定义为地球物理技术在已知油藏中的应用,依据应用顺序,进一步将油藏地球物理分为‘开发’和‘开采’地球物理,前者用于油气田的初次有效开发,后者用于油田开采过程的理解”。王喜双等<sup>[5]</sup>在总结前人定义的基础上,将油藏地球物理技术定义为:“在充分利用已知油藏构造、储层和流体等信息的基础上,开展有针对性的地震资料采集、处理和解释研究,全面提高油藏构造成像、储层预测和油气水判识的精度,为油藏三维精细建模、调整井位部署、剩余油分布预测服务,最终实现油气田高效开发目标的地球物理技术”。可以预见,随着勘探开发的目标从常规油气藏到非常规油气藏的延伸,油藏地球物理技术的内涵也将更加丰富,如源岩特性、脆性、各向异性和地应力的预测,以及压裂过程的监测等。可见,尽管不同学者对油藏地球物理技术概念的表述有所不同,但其本质相似,即为油藏评价和生产服务的地球物理技术的总称,主要包括油藏静态描述、油藏动态监测

和油藏工程支持技术,以及为这些技术提供支撑的地球物理技术,如测井油藏描述技术、井筒地震技术、岩石物理技术和地震资料处理技术等。

## 2 油藏地球物理任务与技术需求

### 2.1 油藏地球物理主要任务

油气勘探开发可以划分为预探、评价与生产三个工作阶段。不同阶段的工作任务和目标各不相同,但可以顺序衔接,形成一个整体。评价阶段油藏地球物理工作的主要任务是建立油藏三维概念模型与静态模型,其核心是精细油藏描述,包括描述油藏构造形态、表征储层横向变化、预测油气分布范围,为评价井位优选、探明储量和开发方案编制提供依据。生产阶段油藏地球物理工作的主要任务是:紧密结合开发生产动态和新井资料进行地质地球物理综合研究,开展动态油藏描述研究,不断深化对油藏的认识,为调整井位优选和开发方案优化提供地质依据;应用针对性的前缘技术(井筒地震、多波、四维),监测油藏动态变化、发现剩余油气资源。随着开发过程中水平井、分段压裂的广泛应用,利用地震资料指导水平井部署,开展水压裂监测也将成为油藏地球物理技术的主要任务之一。

### 2.2 油藏地球物理技术需求

按照油藏分类管理原则,中国现今发现的油藏主要可以分为多层砂岩油藏、复杂断块油藏、低渗透砂岩油藏、砾岩油藏、稠油油藏和特殊岩性油藏六大类。除了稠油油藏采用蒸汽驱,少量低渗透油藏进行过CO<sub>2</sub>驱试验外,绝大多数油藏采用水驱开采方式。韩大匡<sup>[6,7]</sup>在系统总结中国东部老油区水驱开采现状时指出:当老油田含水超过80%以后,地下剩余油分布格局已发生重大变化,由含水60%~80%时在中、低渗透层还存在着大片连续的剩余油转变为“整体上高度分散,局部还存在着相对富集的部位”的格局,提出了“在分散中找富集,结合并网系统的重组,对剩余油富集区和分散区分别治理”的二次开发基本理念。文章指出深化油藏描述是量化剩余油分布的基础,其主要研究工作可以归结为油藏静态描述、油藏动态监测和油藏工程支持三大方面。

油藏静态描述主要包括:油藏形态描述、范围圈定、储层描述和流体识别四方面内容。当然,不同油

藏类型,油藏静态描述的重点有所不同,如在中国大庆、青海、玉门等油田普遍发育的多层砂岩油藏,该类油藏具有陆相多层砂岩多期叠置沉积、内部结构复杂、构造样式多的特点,开发过程主要矛盾是注水的低效、无效循环,急需发展不同类型单砂体及内部结构表征技术,对地震纵向分辨率的需求更加迫切。对于在大港、辽河、华北、冀东等油田发育的复杂断块油藏,由于具有断层多、断块小、储层变化快的特点,对构造、储层边界的识别更加重要,因此要进一步提高横向分辨率。在长庆、吉林油田发育的低渗透砂岩油藏主要地质问题是储层物性差、非均质性强,微裂缝较发育,因此要发展基于岩石物理的叠前与多分量地震技术,以及基于各向异性的裂缝方向与密度预测技术。砾岩油藏主要发育冲积扇类型储层,具有岩相复杂多变,孔隙结构多样,储层构型规模、连通性及渗透性等分布不均的特点,应在井震结合精细处理解释、单砂体构型、水淹层解释、三维地质建模及单砂体剩余油评价等方面加强针对性研究。稠油油藏普遍采用蒸汽驱,地震隔层识别与蒸汽腔前沿识别是剩余油分布预测的关键。特殊岩性油藏主要包括碳酸盐岩、火山岩、变质岩等,主要分布于辽河、塔里木、华北等油田,这些类型油气藏埋深大、非均质性强、内幕构造复杂、储集空间多样、油水关系复杂等,其重点是应用地震技术识别外形、内部非均质性预测和油气检测。静态油藏描述技术主要包括两大类:一是基于纵波资料的地震解释技术,如井地联合构造解释、地震属性分析和地震反演等;二是多波多分量地震技术,由于增加了横波场信息,不但可以提高孔隙型储层预测和流体识别的精度,而且可以提高裂缝型储层预测的潜力,因为横波分裂与裂缝发育密切相关,其主要技术包括纵横波匹配、纵横波联合属性分析与反演和基于各向异性的裂缝识别技术等。二者共同的基础是测井油藏描述技术、井筒地震技术、岩石物理分析技术,以及高精度地震成像处理与保幅、高分辨、全方位资料处理技术。

油藏动态监测的目的是寻找剩余油分布区,其技术包括井震藏联合动态分析技术和时移地震技术。前者以单次采集的地震资料为基础,通过地震、地质、测井和油藏多学科资料和技术的整合实现剩余油分布预测,如时移测井、3.5 维地震勘探技术和地震油藏一体化技术等。后者以两次或两次以上采集的地震资料为基础,通过一致性处理消除不同时

间采集资料中的非油藏因素引起的差异,最后利用反映油藏变化的地震差异刻画油藏的变化,预测剩余油分布。

油藏工程支持主要面向致密油气和非常规油气,目的是优化水平井部署和压裂方案,最终实现优化开采,主要技术包括应力场模拟技术和微地震技术。

油藏地球物理技术与任务之间的关系如图 1。

### 3 中国石油集团油藏地球物理技术现状

早在 20 世纪 60 年代末,中国曾出现过“开发地震”术语。当时的所谓开发地震,只不过是用地震细测及手工三维地震查明复杂断裂构造油田的小断层、小断块,为油田开发提供一张准确的构造图,并在作图过程中,已开始注意到应用油气水关系及油层压力测试资料帮助地震划分小断块。70 年代末就曾用合成声波测井圈定了纯化镇—梁家楼油田的浊积岩储层的分布。到 80 年代,地震技术取得了长足进步,为开发地震准备了技术基础。1988 年中国石油学会物探专业委员会(简称 SPG)与 SEG 协会联合召开了“开发地震研讨会”。1989 年原石油部在勘探开发科学研究院成立了地震横向预测研究中心,致力于储层预测技术研究,形成了以叠后地震反演、AVO、地震属性分析等为主要技术手段,以地震、地质、钻井、油藏工程等多学科综合研究为特色的储层地球物理技术系列,并在 90 年代开展了大量油藏实际应用研究,取得了显著的社会与经济效益。1996 年,刘雯林<sup>[8]</sup>在系统总结研究成果的基础上,出版了国内第一部系统论述油藏地球物理方法的专著《油气田开发地震技术》。

20 世纪后期,面对日益复杂储层结构,波阻抗反演技术在大多情况下无法区分储层,促进了叠后地震反演技术的发展。1997 年,撒利明等<sup>[9,10]</sup>提出一种新的多信息多参数反演方法,该反演方法基于场论和信息优化预测理论,采用非线性反演技术把地震数据反演成波阻抗和各类测井参数数据体,可适用于勘探、开发及老油田挖潜等各个阶段<sup>[11]</sup>,为日后时移测井和地震信息融合提供了基础;同年,甘利灯等<sup>[12]</sup>提出了储层特征重构反演,解决了复杂储层的地震预测难题。1999 年,在孟尔盛的倡导下,物探专业委员会聘请多位地球物理专家编写了《开

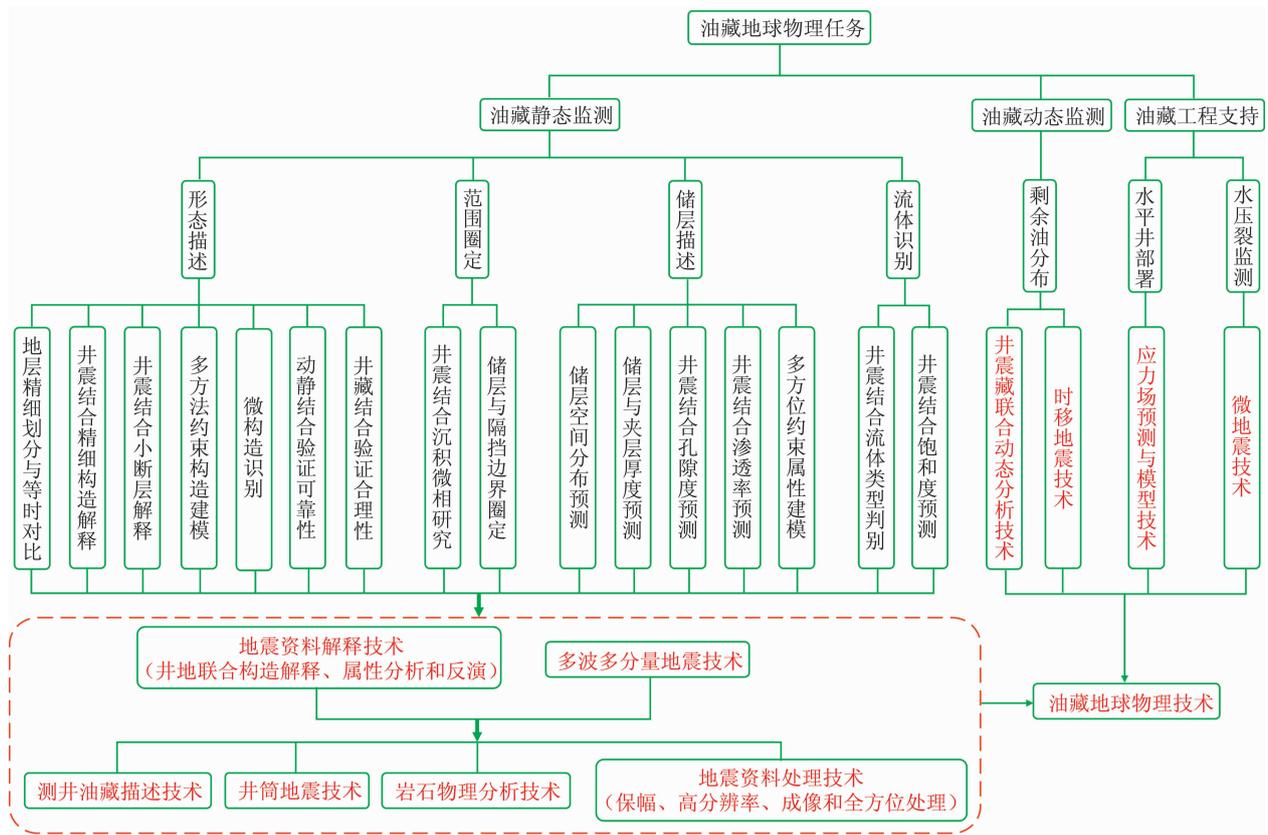


图1 油藏地球物理技术与任务

发地震》培训教材,开始了开发地震技术的推广应用<sup>[2]</sup>。此后,“开发地震”、“储层地球物理”和“油藏地球物理”也成为国内各种学术会议和技术培训的主题之一。

进入21世纪,人们意识到地震不仅可以描述静态油藏参数,也有监测油藏动态变化的能力,而二次采集地震资料的增加,为实现这种能力提供了可能,因此,基于二次二维和二次三维采集的时移地震技术研究成为热点,先后在新疆、大庆和冀东等蒸汽驱油藏和水驱油藏进行了试验研究,见到了比较明显的技术效果<sup>[5]</sup>。同期也开展了基于双相介质的油藏流体检测方法研究<sup>[13]</sup>和大量叠前地震反演与多波多分量地震技术试验<sup>[14~16]</sup>,大幅提高了地震油藏描述可靠性。

2008年,在韩大匡的提议下,中国石油提出了“二次开发”重大工程,借此在大庆长垣和新疆克拉玛依油田开展了大面积高密度三维地震采集,开启了油藏地球物理技术研究与应用的新篇章。同年,中国石油勘探开发研究院物探技术研究所油藏地球物理研究室以大庆长垣喇嘛甸油田的4D3C区块为

研究对象,通过五年研究,初步构建了开发后期密井网条件下地震油藏多学科一体化技术体系<sup>[17]</sup>。从2009年开始,中国石油东方地球物理公司油藏地球物理研究中心开展了地震、测井、地质和油藏的多学科综合研究和大量各种油藏类型的应用研究,积累了丰富的静态油藏描述与动态油藏监测的经验,并在此基础上提出了3.5D地震的理念<sup>[18]</sup>和井地联合一体化采集、处理与解释的理念<sup>[19]</sup>。2009年中国石油开始了真正意义上的时移地震采集,次年中国石油集团科技部设立了“时移地震与时移电磁技术现场试验”重大现场试验项目,在辽河油田稠油蒸汽热采和大庆油田水驱油藏中开展了时移地震和地震油藏一体化技术攻关,建立了相对完整的技术系列,并在剩余油挖潜中见到明显效果。

总之,近30年来,中国油藏地球物理技术研究取得了长足的进步。首先,以高精度三维为基础,以地震属性、地震反演为核心手段,结合解释性处理,形成了针对不同油气藏类型的精细油藏描述配套技术,并取得了明显成效。其次,在高密度宽方位地震、多波多分量地震、井筒地震和时移地震等方面也

开展了大量试验研究,推动了地震采集装备、采集技术、处理技术、解释技术和前沿地震技术的进步,初步形成了一些技术系列,为今后油藏地球物理技术的进一步推广应用奠定了良好的基础。

### 3.1 岩石物理分析技术

岩石物理分析是建立岩石物理性质和油藏基本参数之间关系的主要途径,可有效提高地震岩性识别、储层预测与流体检测的精度和可靠性,它是促进常规地震勘探从定性走向半定量乃至定量的最重要工具<sup>[20]</sup>。中国石油勘探开发研究院早在 2002 年就开始岩石物理分析技术的探索和研究,已在岩石物理实验、理论和应用方面取得许多重要进展。在实验研究方面,通过与国际知名机构合作,建成了具有国际领先水平的岩石物理实验室,具备了超声、低频、流体测量、微观孔隙结构表征等方面的试验能力。在理论研究方面,提出了可变临界孔隙度模型<sup>[21]</sup>和双孔介质模型<sup>[22]</sup>,提高了岩石物理建模的精度,为井震融合提供了理论依据。在应用研究方面,从面向储层预测的测井资料处理解释到岩石物理量板建立进行了系统的研究,制定了 LPF 法敏感参数分析流程<sup>[23]</sup>,有效地指导了储层敏感参数的优选;提出了“二分法”,解决了复杂火山岩储层岩石物理建模和岩石物理量板建立的难题,为首次实现火山岩储层的叠前储层预测奠定了基础<sup>[24]</sup>;提出了时间、空间和井震一致性校正的方法,解决油藏开发后期井震联合储层描述的瓶颈问题,将岩石物理研究从勘探阶段延伸到开发阶段,拓展了应用领域<sup>[17]</sup>。当前,岩石物理研究热潮不减,许多大学和科研机构、油公司和服务公司仍在开展深入研究,其应用广度也从常规油气领域发展到非常规油气领域。比较而言,国内整体研究水平仍然较低,无论是试验分析、理论模型研究,还是实际应用还有许多问题有待解决,这些问题主要为:一是复杂孔隙结构描述与岩石物理建模;二是孔隙流体分布描述与岩石物理测试;三是非均匀饱和双重孔隙介质理论研究;四是开发和开采过程岩石物理机理和模拟;五是岩石物理分析技术的工业化应用<sup>[20]</sup>。

### 3.2 高精度地震资料处理技术

伴随着计算机和信息处理技术的进步,地震资料处理技术在经历了 60 年代的水平叠加、70 年代的叠后偏移、80 年代的叠前时间偏移和 90 年代叠前深度偏移四个发展阶段后,正朝着深度域、各向异

性、全/宽方位、高密度、宽频带、混叠源、多分量、弹性波的方向发展。伴随软、硬件条件的不断改善,中国石油地震资料规模处理能力得到进一步提升,已在高陡构造叠前偏移成像、全/宽方位处理和井控高分辨率保幅处理等方面取得重要进展<sup>[25~28]</sup>。

井控高分辨率保幅处理是油藏地球物理的基础。井控地震资料处理理念是 20 世纪末西方地球物理公司提出的,其主要做法是从 VSP 资料中提取球面扩散补偿因子、Q 因子、反褶积算子、各向异性参数和偏移速度场等参数,用于地面地震资料处理或参数标定,目的是提高地面地震资料处理参数选取的可靠性和准确性,使处理结果与井资料达到最佳匹配。从现今的应用情况看,井控地震资料处理的内涵不断扩大,井控处理可以利用井中观测的各种数据,对地面地震处理参数进行标定,对处理结果进行质量控制<sup>[17]</sup>。保幅一般都是指相对振幅保持,通常包括以下三个方面:①垂向振幅保持,是指通过球面扩散补偿、Q 补偿等,消除地震波在垂直方向上由于球面扩散、地层吸收衰减等原因造成的振幅损失。处理方法主要包括球面扩散补偿、Q 补偿、透射补偿等。②水平方向振幅保持,是指消除地表及近地表结构、采集参数(震源类型、检波器类型、药量、激发井深、设备等)等因素的横向变化造成的地震波在水平方向上的振幅变化,包括炮间能量差异、道间能量差异、叠加剖面的横向能量异常等(即这些振幅变化仅与地表观测条件有关,而与地下地质构造和储层及油藏性质无关)。处理方法主要包括子波整形、地表一致性振幅补偿、叠前数据规则化、剩余振幅补偿等。③炮检距方向的振幅保持,主要是指保持反射振幅随炮检距的变化关系,即 AVO 关系,这是 AVO 分析和叠前地震反演的基础。主要处理方法是道集优化处理,包括噪声衰减、道集拉平、剩余振幅补偿、角道集生成、部分叠加分析等。实现保幅处理的关键是质量控制,除了常规的处理质量控制,还要进行保 AVO 的质量控制。传统的做法是将井点处最终处理结果道集 AVO 特征与合成道集 AVO 特征对比来判断道集是否保幅,属于结果的质量控制、点的质量控制、定性的质量控制。中国石油勘探开发研究院提出了基于 AVO 属性质量控制方法,即提取每步处理前后的 AVO 属性,分析 AVO 属性变化情况,以此判断道集是否保幅,实现了全过程的、面的、定量的质量控制,为 AVO 分析和叠前

反演奠定了数据基础。提高分辨率处理是在保幅的前提下适当拓宽频带,提高高频有效信号的信噪比,使高频段有效信息相对增强,达到分辨更薄储层的目的。主要方法有:地表一致性反褶积、井控反褶积技术、空变反Q补偿技术,以及拓频处理技术等。

### 3.3 地震资料定量解释技术

在油气田开发和开采阶段,地震资料解释的重点是将各种地球物理信息综合转化为岩性、物性和含油气性以及岩石力学性质等信息,这对地震解释的精度提出了更高的要求,定量化解释成为趋势,而且更强调多学科结合,尤其是与测井和油藏动态资料的结合。

地震资料定量解释技术除了精细构造解释之外,主要包括地震属性分析、地震反演和油藏综合描述等技术。地震属性技术的发展呈如下趋势:一是几何属性被越来越多地用于碳酸盐岩、致密砂岩、页岩气储层的裂缝检测;二是将传统的AVO属性与岩石物理和正演模拟相结合形成地震解释模板技术,指导储层和流体定量预测<sup>[29]</sup>;三是以波传播导致孔隙流体流动机理为基础,利用频散与衰减属性进行流体检测逐渐流行<sup>[30]</sup>;四是基于全方位/宽方位叠前地震资料的裂缝方位和裂缝密度预测技术得到广泛应用<sup>[31]</sup>。地震反演正向叠前、全方位、多波反演等方向发展。由于叠前反演充分利用了梯度信息,降低了储层和流体预测中多解性,可以提高岩性、物性和含油气性的预测精度,已成为当前储层预测的核心技术之一。随着“两宽一高”地震采集资料的不断增多,全方位叠前地震反演成为可能<sup>[32]</sup>。从反演算法角度看,非线性和随机反演是未来发展方向,尤其是基于贝叶斯框架的地震反演方法。

面对小尺度勘探目标,储层非均质性严重,应以地质模式为指导,开展以油藏模型为核心的多学科资料综合、多种方法结合的综合油藏描述。如在碳酸盐岩储层描述中,形成了以古地貌、沉积模式和成岩作用为指导,利用岩石物理分析、AVO分析、叠前反演进行储层预测,利用叠后属性、叠前各向异性分析和应力场分析进行裂缝预测,最后结合钻井和试油资料进行综合评价和水平井部署设计的技术系列,大幅提高了缝洞型储层描述和预测的精度<sup>[25]</sup>。

### 3.4 井筒地震技术

井筒地震是油藏地球物理技术的重要组成部分,井筒地震是将地震接收系统或激发系统放到井

中进行地震数据采集的技术。从采集方式来看,井筒地震可分为VSP、井间地震、随钻地震等。由于激发系统或接收系统可以尽可能接近地质目标体,同时可以避免地面干扰和近地表低速带的影响,因此井筒地震可得到高信噪比和高分辨率的地震数据,如井间地震的分辨率比地面地震高一个数量级,能够精细刻画两井之间的储层变化,这是井间地震技术普遍得到开发界认可的重要原因。目前,作为一类特色技术,各种VSP和井间地震技术在国外都已进入商业化应用阶段;随钻地震经过近30年的发展,演变成地震导向钻井技术,提高了钻头前方地层的预测精度<sup>[33]</sup>,正处于应用发展阶段。

中国石油集团从1980年开始调研VSP技术,1984年通过引进国外技术和设备迅速形成生产力。目前,拥有自主知识产权的KLSeis-VSP采集系统和GeoEast-VSP处理软件,常规VSP技术形成了完善配套的服务能力。其作用也从早期简单的区域速度研究和层位标定,发展为井地联合的、处理与解释一体化的油藏精细描述工具,为复杂油藏评价和开发提供了有效手段<sup>[19]</sup>。中国石油集团1993年就开始了井间地震技术的系统调研<sup>[34]</sup>,随后通过引进、合作等方式,先后在胜利、辽河、克拉玛依、吉林、大庆等油田开展了大量井间地震试验研究。目前具备初步技术服务能力,但还没有形成商业化软件,井下震源研究还处于跟踪阶段。井间地震主要利用层析成像和反射成像进行井间薄储层空间展布与连通性分析,研究井间物性变化,监测井间油藏变化,通过与地面地震资料的结合,井间地震可以对主力砂体的走向和空间展布进行更准确的预测,可以辅助水平井轨迹设计,提高水平井钻探效果<sup>[5,35]</sup>。目前,国内随钻地震仍处于前期探索研究阶段,基于钻头信号的随钻资料处理方法已形成初步工作流程,成像结果可靠,地震剖面分辨能力有明显的提升,信息更加丰富。

总之,由于井筒地震观测范围小,要发挥井筒地震的作用,必须与地面地震相结合,形成井地联合的处理和解释一体化技术,主要包括:基于VSP参数(大球面发散与吸收衰减参数、反褶积参数、速度参数、各向异性参数)的井驱动地面地震处理,基于VSP储层物性标定与精细岩性(AVO、叠前反演)解释驱动的地面地震解释,以及针对特定油藏目标的井间地震与地面地震联合解释等,这也是未来井筒

地震的发展趋势。

### 3.5 多波多分量地震技术

多波多分量地震技术在油气勘探中的应用经历了横波、转换波和多波多分量地震勘探三个发展阶段。20 世纪 70 年代,人们企图利用横波速度低的特点来获得比纵波更高的地震分辨率,从而兴起了横波勘探的热潮,但由于横波频率低、能量衰减快,在实际应用中未能得到预期的效果。80 年代中后期,海上多波地震采集设备的出现和纵波激发横波接收的技术的应用,使转换波勘探进入了发展高潮,并开始了工业化应用。2000 年,SEG 和 EAGE 联合举办了多波多分量技术研讨会,对多波多分量技术的作用、存在的问题和技术发展趋势进行了详细的总结,指出了下一步研究和发展的方向<sup>[36]</sup>。进入 21 世纪后,数字检波器的出现推动了多波多分量地震技术由海上到陆上的发展,全面开启了多波多分量研究的新局面。2005 年,EAGE 和 SEG 再次联合召开了多波多分量技术研讨会,在讨论了数据采集、处理和解释技术的基础上,指出了可能的应用领域<sup>[37]</sup>。目前,多波多分量采集技术已经基本成熟;处理技术基本过关,建立了比较系统的基于偏移成像的处理流程,拥有商业化处理软件系统;解释技术相对比较薄弱,但近年进展很快,初步建立了三分量资料用于储层描述的流程,商业化解释软件平台日趋成熟,如 ProMC、VectorVista、RockTrace 等。总之,多波多分量地震技术经过近 40 年的发展,已从纯粹的理论研究走向了工业化的实验应用阶段,除了在复杂构造成像、致密砂岩气藏识别和高孔油藏精细描述外,多波多分量地震技术在油藏监测,特别是稠油油藏蒸汽驱、低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 驱,以及页岩气开采中的应用不断增加,4D3C 地震学逐渐成为现实。

中国石油集团多波多分量地震勘探始于 20 世纪 80 年代初,也大致经历了 80 年代初期横波勘探、80 年代末至 90 年代末的转换波勘探和 21 世纪的多波多分量勘探三个阶段。2002 年以来,中国石油集团在鄂尔多斯盆地苏里格气田、四川盆地广安气田、松辽盆地大庆油田、柴达木盆地三湖地区开展了数字二维三分量和三维三分量的工业化试验<sup>[35]</sup>。目前,苏里格气田已成为中国数字多分量地震规模化应用最广的地区,经过多年攻关研究,资料品质得到明显提高,形成了以叠前 AVO 分析与交会、叠前弹性参数反演与交会、多波属性及多波联合反演等

关键技术的多波有效储层预测和含气性检测技术系列,大幅度提高了有效储层的钻井成功率<sup>[38]</sup>。此外,在广安和徐深气田,以及三湖地区应用中,同时利用纵波与转换波提高了构造成像效果,圈定了含气范围,更清晰刻画火山岩喷发旋回和火山岩的各向异性<sup>[15]</sup>。2013 年中国石油西南分公司在四川盆地魔溪—龙女寺地区采集了陆上最大面积数字三维三分量地震资料。

尽管如此,至今多波多分量地震技术在大多数地区的应用仍没有充分体现该技术的价值,其主要原因如下:一是目前资料处理和解释周期过长,难以满足生产需求,没有充分体现多分量地震的潜力;二是处理和解释技术不能满足各种复杂地表和地下条件的需求,如纵波和转换波分别处理,处理效果不稳定,一套处理参数难以兼顾浅、中、深层,处理结果信噪比低、分辨率低;此外因纵波和转换波频率和相位的差异大,导致纵横波匹配难等;三是没有做好采集、处理和解释规划和可行性研究,导致其应用效果不能令人满意。因此,要用好多波多分量地震技术,必须从地质问题出发,在可行性研究的基础上,统筹制定采集、处理和解释对策,强化基于模型的处理和解释技术研究,实现采集、处理和解释一体化。

### 3.6 时移地震技术

时移地震是在油藏开采过程中,通过对同一油气田在不同的时间重复进行三维地震测量,用地震响应随时间的变化表征油藏性质的变化,应用特殊的时移地震处理技术、差异分析技术、差异成像技术和计算机可视化技术,结合岩石物理学、地质学、油藏工程等资料来描述油藏内部物性参数(孔隙度、渗透率、饱和度、压力、温度)的变化,追踪流体前缘<sup>[38]</sup>。时移地震试验工作最早可追溯到 20 世纪 80 年代初期,但与时移地震相关的成功案例直到 20 世纪 90 年代初期才见诸于文献<sup>[40]</sup>。为了监测热采的效果,ARCO 公司于 1982~1983 年在北德克萨斯州 Holt 储层上首次实施了时移地震试验,在火驱采油前、后和火驱过程中各进行了一次地震采集,不同时期地震图象之间的差异非常醒目,显示了时移地震监测火驱的潜力<sup>[41]</sup>。1987 年 King 等通过野外试验证实了地面地震监测注水的可行性。在 80 年代中后期和 90 年代初期,Nur 等<sup>[42]</sup>做了大量岩石物理学实验研究,为时移地震的发展奠定了坚实的岩石物理基础。1992~1995 年间在印度尼西亚

Duri 油田取得的巨大成功表明了时移地震可以在油田开发中发挥重要的作用,促进了世界范围内时移地震研究的开展<sup>[43]</sup>。进入 21 世纪,人们提出 e-field 的概念<sup>[44]</sup>,即在油田开发的每个阶段,在油藏表面、井筒内(如套管上)均安装检波器,然后,选择不同时间进行地震激发,并迅速进行数据处理和分析,以及时跟踪油藏动态并调整开发方案,最终获得最佳的采收率。目前,时移地震技术已成为油藏监测的一项核心技术被广泛地应用于海上油气田的开发和生产过程中。

中国石油集团时移地震研究起步较晚,2000 年以前属于文献调研和时移地震资料处理和解释方法探索阶段<sup>[45~47]</sup>。2000 年以后开始进行一些现场实验研究,主要是以二次二维和二次三维采集的地震资料为基础进行互均化处理和时移地震解释研究,取得了一些初步成果。2001 年凌云等<sup>[18]</sup>提出了特殊的处理方法和流程,在不采用互均化处理条件下获得时移地震储层的差异信息。2000~2001 年开展了一些稠油热采的时移地震监测试验<sup>[49,50]</sup>。随后向水驱油藏监测延伸,2002~2003 年,云美厚等<sup>[51]</sup>、易维启等<sup>[52]</sup>从时移地震可行性分析出发,对大庆油田 T30 井区两次采集的二维地震资料进行了归一化处理,利用时移地震资料差异属性变化研究了该区剩余油分布规律。2003 年,甘利灯等<sup>[53~55]</sup>、胡英等<sup>[56]</sup>在深入剖析长期水驱过程引起的各种油藏参数变化规律以及这些参数变化对地震响应影响的基础上,结合冀东油田二次三维地震采集资料,从可行性研究、叠前和叠后互均化处理以及动态油藏描述等方面对水驱时移地震技术进行了系统的研究,初步形成了配套技术,并在应用中利用振幅差异和时移弹性阻抗反演差异预测了水驱前缘,圈定剩余油分布范围。2007 年,凌云等<sup>[57]</sup>基于准噶尔盆地某油田二次三维采集资料,消除了采集因素差异造成的影响,改善了时移地震的可重复性,获得了反映蒸汽驱油藏的变化,指导了油田进一步开发。2009 年后,中国石油集团开始了真正意义的时移地震采集,于 2009 年 2 月和 2011 年 2 月在辽河曙光油田完成了 7 km<sup>2</sup> 的时移地震资料采集和 2 口时移 VSP 资料采集,通过时移地震处理和解释联合攻关,很好地刻画了蒸汽腔的几何形态和演变过程<sup>[58]</sup>。

目前,国内时移地震技术已具备工业化应用的基础,但推广应用面临巨大障碍,主要原因有两点:

①大多数老油田都在陆上,与海上油田相比,地震采集费用高,钻井费用低,加上井网密,大大降低了时移地震技术的经济可行性;②大多数油田属于陆相沉积,储层薄、纵横向变化剧烈,加上水驱为主的开发方式,短时间内油藏变化造成的地震差异小,加上开采过程复杂,开采过程的岩石物理机理研究薄弱,大大降低了时移地震技术可行性。因此,国内时移地震,尤其是水驱时移地震应用研究任重道远。未来发展的方向应该是地震油藏多学科一体化技术(图 2),这样既避免了分辨率的问题,又避免了水驱油藏造成地震差异小的问题。

### 3.7 井震联合油藏动态分析技术

油气藏开发阶段最大的特点是资料丰富,既有地质、测井和地震资料,又有丰富的油藏动态资料。不同学科的资料都是油藏特征不同侧面的反映,具有不同的特点,可以相互印证,相互补充。例如测井资料具有纵向分辨率高的优势,而地震资料具有横向连续分布的优势。因此,在油藏静态描述中应用井震结合可以最大程度发挥地震和测井资料的优势。同样,油藏动态资料蕴含了丰富的油藏静态和动态信息,与地震资料结合,可以更好地进行油藏静态描述和动态分析。国际上,Huang 等<sup>[59]</sup>最早将时移地震技术与油藏数值模拟相结合,提出了利用时移地震数据约束历史拟合的概念,提高了历史拟合的精度。随后,又提出利用生产动态数据约束时移地震资料分析<sup>[60]</sup>,最终形成了从地震到油藏,再回到地震的技术思路和流程,为地震与油藏融合提供了一种有效途径<sup>[61]</sup>。当前,从地震到油藏,井震结合已成为油藏地球物理技术发展的重要趋势。

20 世纪末,撒利明等<sup>[10]</sup>就尝试利用基础和加密井网测井资料和三维地震资料,结合油藏动态数据,通过“地震约束时移测井非线性反演技术”,建立开发初期和开发中后期油藏模型,最后通过油藏模型的差异分析,结合动态资料综合预测剩余油分布<sup>[11]</sup>。凌云等<sup>[18]</sup>针对中国广泛开展二次或三次高精度 3D 地震勘探这一背景,将地震与油藏动态资料相结合,提出了 3.5D 地震勘探方法。其研究成果认为:油田开发中、晚期采集的静态高精度 3D 地震数据经过严格的相对保持振幅、频率、相位和波形的提高分辨率和高精度成像处理,通过精细 3D 构造演化解、沉积相解释以及结合油田开发动态信

息的综合解释,可以较有效地解决油田开发中的问题,预测剩余油气的分布范围。3.5D 地震勘探较好地回避了时移地震勘探中存在的非重复性噪声问题,解决了某些油田没有早期 3D 地震或早期 3D 地震数据质量差的问题,因此可以减少油田开发阶段地震勘探的投入。甘利灯等<sup>[17]</sup>以大庆长垣喇嘛甸油田“二次开发”实验区采集的、观测系统相近的拟 4D3C 资料(炮点和检波点 95%以上重合)为基础,从资料处理、岩石物理、油藏静态描述和动态描述,到油藏建模和数值模拟开展了系统研究,提出了以油藏静

态和动态模型为核心,通过动态岩石物理分析和井控保幅处理实现井震融合,通过不对油藏模型进行粗化、地震约束油藏建模和数值模拟实现地震油藏融合,最终实现从地震到油藏,再回到油藏的技术思路。初步构建了以八大技术系列为核心的开发后期密井网条件下地震油藏多学科一体化技术体系,建立了基于一次和多次采集地震资料的剩余油分布预测技术流程(图 2)。此项研究成果有效地指导了油田剩余油挖潜方案设计和措施实施,采取措施后 15 口井平均单井日增油 8.9t,含水率下降了 9.7%。

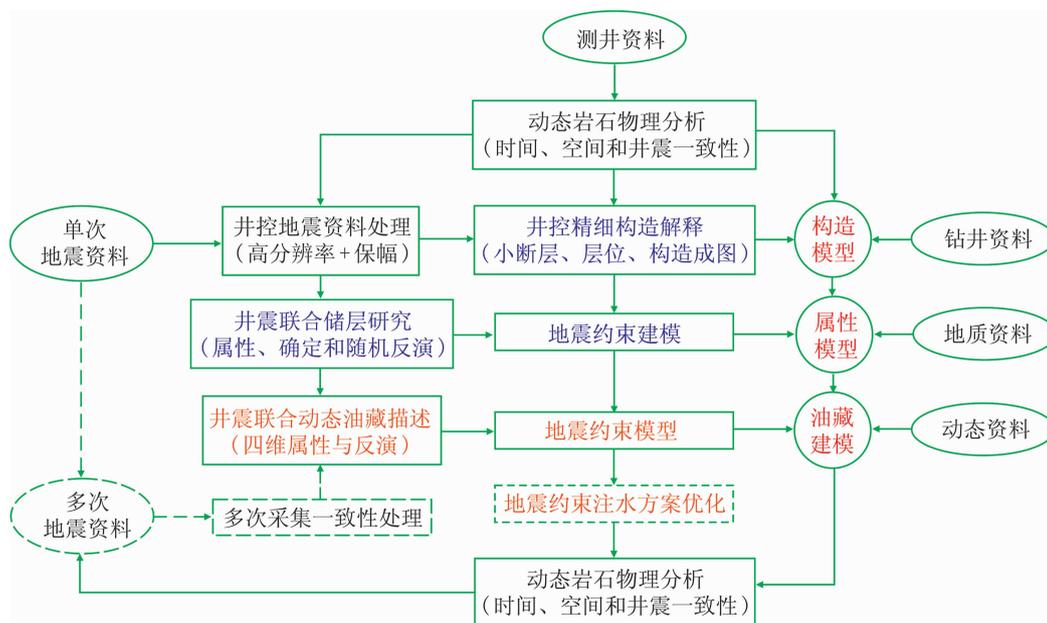


图 2 开发后期密井网条件下地震油藏多学科一体化技术流程

### 3.8 微地震监测技术

微地震监测技术是通过接收地下岩石破裂产生的声发射事件,定位分析地下破裂产生的几何形态和震源机制,揭示地下岩石破裂性质的技术。观测方式包括井中、地面和井地联合等;资料处理包括速度模型优化、微地震事件筛选、初至拾取、偏振分析、事件快速定位等技术;解释技术包括裂缝网络几何形态分析、地应力估计、储层改造体积(SRV)计算等。通过微地震监测能够对非常规油气开发的水力压裂进行实时指导和评估压裂效果,为压裂施工和油气开发方案提供依据。

微地震监测技术始于地热开发行业,20 世纪 80 年代水力压裂地面监测微地震试验由于信号信噪比太低而宣告失败,随后转入水力压裂井下地震监测试验,并获得成功,使井下观测方式得以快速商业

化。2000 年左右,随着检波器性能的提高和信号处理技术的发展,地面监测方式重新受到关注,并加大了研究力度,2003 年水压裂地面微地震监测在国外开始走向商业化<sup>[62]</sup>。目前,井中微地震监测技术日渐成熟,斯伦贝谢、ESG、MSI、Magnitude、Pinnacle 等公司均有井中监测实时处理能力。展望未来,井中监测的检波器级数不断增加、井地联合微震监测、多井监测是微地震采集的主要发展趋势。在处理和解释上,人们已经不再满足于微震事件的定位,如何利用微地震记录波形反演得到描述破裂性质的震源参数成为竞相研究的热点,如裂缝网络连通性分析及有效 SRV 估计等。在应用上,水力压裂的微地震监测也将逐步向油藏动态监测发展。

中国石油集团微地震监测技术研究起步较晚。东方地球物理公司自 2006 年开始技术调研,2009

年进行了压裂微震监测先导性研究,2010年起,开展了专题技术研究,并在微地震震源机理、资料采集、资料处理、定位方法等方面取得重要进展,建立了技术流程。2013年东方地球物理公司与中国石油勘探开发研究院廊坊分院成功研发了井中微地震裂缝监测配套软件,通过引进法国 Sercel 公司井下三分量数字检波器,形成了较为成熟的井下微地震监测服务能力,已在国内 14 个油气田进行了 80 多口井的微地震监测,整体技术水平与国际同步。川庆物探公司依托集团公司项目“微地震监测技术研究与应用”,形成了成熟的地面微地震监测技术,建立了野外施工流程。在蜀南、威远、长宁和昭通地区页岩气区带评价和开发应用中,优选了页岩气有利勘探区域,提供了直井和水平井井位部署意见和支撑服务。

### 3.9 应力场模拟技术

在地壳的不同部位,不同深度地层中的地应力的大小和方向随空间和时间的变化而变化构成地应力场<sup>[63]</sup>。它无所不在,无时不在,而且直接影响着固体介质及其蕴含的各种流体的力学行为,是地学研究的重要领域之一。研究表明,古应力场影响和控制油气运移与聚集。现今应力场影响和控制着油气田开发过程中油、气、水的动态变化,它对注采井网部署、调整及开发方案设计;对井壁稳定性研究,套管设计、油层改造和水力压裂设计方案优化;对采油过程引起的地层出砂,注水诱发地震与地层蠕动,以及由此导致的大面积套管损坏具有重要意义。因此,地应力研究在油气勘探开发中有着十分重要的应用价值。

获取地应力场信息最直接的方法就是原地测量,最早的地应力测量可以追溯到 1932 年,美国垦务局利用解除法对哈佛大坝泄水隧道表面应力进行测量。20 世纪 50 年代初,瑞典科学家 Hast 博士发明了测试地应力的仪器,此后开展了大规模浅地层应力测量。随着水压致裂法技术的逐步成熟,20 世纪 70 年代地应力测量的深度不断加大,可达 5000~6000m。其后,地应力测量与测井技术结合使得测量深度进一步加大,测量方法日趋多样化。目前地应力测量大致可以分为四大类<sup>[64]</sup>,主要包括:构造行迹、裂缝行迹分析法,实验室岩心分析法,测井资料计算法和矿场应力测量法。虽然现场实测地应力是提供地应力场最直接的途径,但是在工程现

场,由于测试费用昂贵、测试所需时间长和现场试验条件艰苦等原因,不可能进行大量的测量;而且地应力场原因复杂,影响因素众多,各测点的测量成果受到测量误差的影响,使得地应力测量成果有一定程度的离散性。地应力模拟则可以弥补地应力测量的不足,可以获得更为准确的、范围更大的三维地应力场。目前,模拟方法主要有物理和数学模拟两类:物理模拟是以相似理论为依据,在人工条件下,用适当的材料模拟某些构造变形在自然界的形成过程;数学模拟是用数学力学的方法进行构造应力场模拟计算,最常用的是有限元法。地下应力场主要与三个因素有关:一是地层结构,如地层形态和结构,断层的位置与方向等;二是介质的性质,如介质的弹性、强度和密度等;三是外部应力,如构造应力和孔隙压力等。这些信息可以从地质、测井和地震资料中获取。因此在数学模拟中,以岩心和测井地应力分析资料为基础,以实际地应力测量数据为约束,充分发挥地震资料面上采集连续的优势,采用多学科一体化的模拟流程和技术是未来的发展方向,图 3 为斯伦贝谢公司地应力模拟流程与数据来源。

中国地应力测量和研究工作起步较晚,始于 20 世纪 50 年代末期,20 世纪 80 年代中期成功研制出了 YG-81 型压磁应力计。1980 年 10 月在河北易县首次成功进行了水力压裂法地应力测量,目前中国的水力压裂地应力测量深度已突破 6000m。1990 年以来,以蔡美峰领衔的北京科技大学研究组不仅在地应力测试理论方面进行了系统的研究,而且还在实验研究和现场实测的基础上,提出了一系列考虑岩体非线性、不连续性、非均质性和各向异性,并正确进行温度补偿的应力解除法测量技术和措施,大幅度提高地应力的测量精度。在石油工业中,20 世纪 80 年代以来,北京石油勘探开发科学研究院及廊坊分院,辽河、吉林、胜利、大庆和华北油田等都相继开展了地应力测量及应用的研究工作。1993 年,中国石油天然气总公司组织了“地应力测量技术及其在油气勘探开发中的应用”的攻关项目,从应力测量、计算、模拟、解释和应用等方面进行系统研究,其研究成果已在中国石油行业得到推广和应用。但是,以储层为中心的地应力场理论研究还不够深入,地应力场测量和模拟方法还有待进一步提高,地应力场在油气勘探开发中应用研究还不广泛。虽然如

今油气勘探开发中积累了大量的地质、物探、测井、钻井、采油、注水、压裂等资料可为地应力研究提供丰富的信息,但至今还没很好地开发和利用。随着勘探开发目标由常规油气富集区向致密和非常规油气区的转移,水平井分段压裂已逐渐成为增产的主要手段,油气勘探开发对地应力研究的需求定会越

来越多,不仅需要宏观的、区域的地应力场,也需要局部的、微观的地应力场;不仅需要平面的地应力场,更需要空间的地应力场;不仅需要了解地应力强度的分布,还需要了解地应力的方向;不仅需要了解地层中地应力的现今状况,也需要了解地应力场的演化历史。

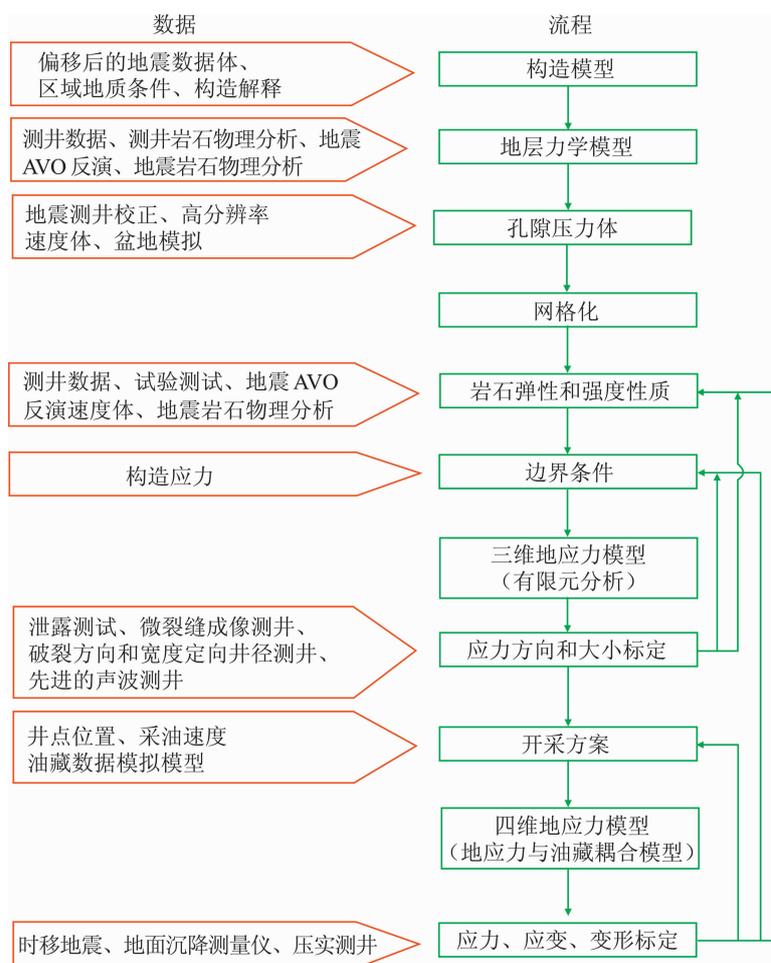


图 3 地应力模拟流程与数据来源(据斯伦贝谢公司)

## 4 中国石油集团油藏地球物理技术展望

### 4.1 面临挑战

地球物理技术从面向勘探到面向开发目标的延伸是目前国际地球物理技术发展的趋势,但对于中国陆相薄互层油气藏,加上开发过程复杂,井网密度大,开发和开采阶段的地球物理技术面临着严峻的挑战,主要表现在以下几个方面。

第一,现有的技术效果与地质需求仍存在较大

差距。油藏地球物理面临的研究对象具有如下两个特点:一是尺度小,如砂泥岩薄互层中单砂体、低级序断层、微幅度构造以及废弃河道等;二是精度要求高,需要准确识别砂体边界与泥质隔层,需要提高孔隙度、厚度等储层参数的预测精度,甚至需要进行孔隙流体检测。这些目标和需求使油藏地球物理技术面临严峻考验。

第二,动态岩石物理研究有待加强,开发和开采过程造成的地震响应变化的机理研究严重不足。油藏地球物理的核心任务就是建立共享油藏模型,包括静态和动态模型,需要通过岩石物理技术建立储

层参数与地震参数之间的联系。由于开发和开采过程会造成油藏参数的变化,如油藏压力和饱和度的变化,如果长期水驱还会造成孔隙度与孔隙形态,以及泥质含量的变化,这些变化及其对地震响应的影响是监测油藏动态变化和建立油藏动态模型的基础。然而,目前这方面的研究几乎是一片空白,而且研究难度巨大,如长期水驱后孔隙度与孔隙结构如何变化,以及孔隙结构变化对渗流的影响;聚合物驱的弹性性质及其对地震响应的影响;黏土矿物在水驱过程中的化学变化以及这些变化对弹性性质的影响等,所有这些无一不是世界级难题。

第三,尽管面向“二次开发”的高精度地震采集技术初见成效,但处理、解释和油藏描述配套技术尚未完善,仍不能满足油藏开发与生产的需求。主要表现在:①高分辨和保幅处理技术有待提高与完善,尤其是高精度静校正、保幅去噪、保幅偏移等;②地震油藏描述与油藏建模和数值模拟结合不够,直接影响地震在油藏开发中的应用,大大减低了地震资料的价值;③开发阶段井网密度大,由于没有适合的批处理软件,使得井震结合储层研究的工作量大幅增加,工作时效性降低,难以赶上生产节奏,影响了地震资料的使用率;④面向开发和开采阶段的地震新技术还不够成熟,如高密度、井地联合、多波和时移地震资料处理和解释等技术,使得采集的相关资料不能及时发挥作用,这都成为“地震无用”的证据。

第四,开发和开采阶段井网密集,拥有大量地质、测井和动态生产资料,但是,由于条块管理,阻碍了多学科之间的交流;由于缺乏地震、测井、油藏等多学科融合的技术与软件平台,降低了油藏地球物理技术应用的时效性;加上开发部门没有足够地球物理人员,使得多学科资料融合成为一句空话,难以落到实处,制约了地震作用的发挥。

第五,高密度、多波多分量和时移地震野外采集成本较高,还面临经济可行性争论。

## 4.2 发展方向

油藏地球物理是勘探地球物理的延伸,勘探阶段由于井少,储层预测主要依赖地震资料,而开发与开采阶段由于井多,地震的作用逐渐减低,这种主次关系的转变,决定了油藏地球物理技术不是勘探地球物理技术简单重复与延伸,要更好地发展油藏地球物理技术需要转变思路。第一,从可分辨到可辨识的转变,前者属于时间域范畴,无论地震资料具有

多高分辨率,都无法满足单砂层识别的需求,后者强调在反演结果上可辨识,由于同样分辨率的资料在波阻抗和密度反演结果上可辨识程度是不同的,这为识别薄储层提供了可能。第二,从确定性到统计性的转变,由于目标尺度小,不确定性强,利用统计性方法可以评估这种不确定性,提高预测结果的可靠性。第三,从时间分辨率到空间分辨的转变,目的是充分发挥地震在面上采集、具有较高横向分辨率的优势,以横向分辨率弥补纵向分辨的不足。第四,从测井约束地震到地震约束测井,其目的是充分发挥高含水后期井网密,测井资料丰富的优势。第五,从单学科到多学科的转变,建立由地震到油藏再回地震的闭合循环技术流程,以充分挖掘动态资料中所蕴含的丰富油藏信息。通过以上转变思路,要形成以动静态油藏模型为目标,以井控资料处理、井控解释和井震联合储层研究实现井震融合,以油藏模型不粗化、地震约束建模和地震约束数值模拟实现地震油藏一体化为技术对策的技术系列,在此基础上建立基于一次采集地震资料和多次采集地震资料的剩余油分布预测技术流程,最大程度发挥地震资料的价值(图2)。为此必须做好以下几个方面的工作。

第一,要强化基础研究,做好动态岩石物理分析,为井震和震藏融合奠定基础。在开发与生产阶段,由于更加关注油藏的变化与流体在储层中的流动,即油藏的渗流特性,这与储层的微观结构、孔隙的形态与流体的可流动性密切相关。因此开发与开采阶段岩石物理研究要突出动态与微观两个特征,更加注重孔隙中流体的流动及其对地震响应的影响,这对岩石物理提出更高要求。此外,由于开发后期测井资料时间跨度大,使得地震、测井资料不匹配问题更加突出,还必须做好井震一致性处理与校正。

第二,要强化井控处理,做好井地联合采集与处理,充分发挥井筒地震的作用。井筒地震的分辨率介于测井与地面地震之间,是连接二者的最佳桥梁,可以在资料处理中发挥重要作用,其主要作用有两个方面:井控处理与保幅处理质量控制。此外,由于井筒资料分辨率较高,可以通过约束提高地面地震处理结果的分辨率,以更好满足开发阶段对分辨率的需求。通过井控地震资料处理进一步实现井震资料的一致性,为井震融合解释提供基础,未来井筒地震与地面地震联合采集、处理与解释将是油藏地球

物理发展的一个方向。

第三,要发挥地震和测井资料各自优势,做好井震联合储层研究,提高井间储层描述可靠性。地震资料的优势在于横向分辨率,而测井资料的优势在于纵向分辨率,二者结合才能优势互补,满足开发阶段对构造解释和储层的预测高精度需求,全程井控的构造解释和储层预测是未来油藏地球物理解释技术发展的另一个趋势,主要内容包括井控小断层解释、井控层位追踪、井控构造成图、井控属性分析和随机地震反演等技术。

第四,要发挥叠前和多分量地震资料优势,提高储层与流体描述精度。由于增加了梯度信息,基于叠前地震资料的储层预测技术不但可以提高岩性和物性预测的精度,还可以提高流体检测精度,叠前反演与时移地震技术结合,还可以区分不同因素引起的油藏变化,如区分油藏压力与饱和度变化,减低时移地震剩余油分布预测的多解性。同样,多分量地震技术由于增加了横波的信息,可以弥补纵波成像的不足,提高储层预测精度,增强流体识别能力,突破裂缝预测瓶颈。近年来问世的 4D3C 地震技术已展示良好的发展前景,可应用于各种复杂油藏,如碳酸盐岩油藏和致密  $\text{CO}_2$  驱油藏的监测。

第五,要探索时移地震和微地震监测技术,提高动态油藏描述的可靠性。时移地震油藏监测是预测剩余油分布最直接的手段,由于中国东部老油区大部分地区都开展过二次三维采集,充分利用已采集的资料开展时移地震研究具有重要经济价值,当然由于不是真正意义的时移采集,资料的可重复性差,需要研发新的互均化处理技术,以消除采集参数差异造成的影响。更需要研发快速有效的四维资料解释技术,这种技术能够将互均化处理后不同时间的地震资料与动态资料关联,从中找出一些敏感的地震参数反映油藏的变化,达到预测剩余油分布的目的。微地震监测能够对非常规油气开发的水力压裂进行实时指导和压裂效果评估,为压裂施工和油气开发方案提供帮助,是未来地震向油藏工程延伸的重要技术。

第六,要提倡在不进行油藏模型粗化的基础上开展油藏数值模拟,做好地震约束油藏建模和数值模拟,实现多学科一体化,提高剩余油分布预测精度。地震约束油藏地质建模是以地质统计学理论为核心,结合常规地震解释、反演、属性分析等成果以

及井间地震、VSP 等资料,建立油藏地质模型的一项综合技术。在高含水后期,地震资料对油藏地质模型的约束作用主要体现为控制构造空间形态、表征储层非均质性以及降低模型不确定性上。地震约束油藏数值模拟技术的核心是在历史拟合过程中引入了地震信息,不但可以实现井点模拟结果和实际动态数据匹配,还保证了油藏模型对应的地震合成资料与实际资料匹配,从而提高了油藏数值模拟的精度和剩余油分布预测的可靠性。值得指出的是,传统数值模拟是在粗化的模型上进行的,由于粗化使得数值模拟结果的纵向采样率减低,油藏数值模拟结果对应的合成记录与实际记录差异巨大,无法实现与实际地震记录的对比分析,阻碍了多学科一体化。

此外,为实现地震在油藏工程中的支撑作用,指导水平井和压裂部署和现场跟踪,要加强地应力场模拟研究,充分发挥地震资料空间连续分布的优势,提供完整、准确的三维地应力分布。

## 5 结束语

现今地球物理师与油藏工程师的联系日益紧密,具备了地球物理向开发延伸的技术基础;近几年中国石油面向“二次开发”的地震技术取得的成效树立了油藏地球物理技术发展的信心;通过叠前反演、烃类检测、高密度、宽方位、多波、四维、井地联合等高端技术攻关,地震技术进入开发实现贯穿油田勘探开发整个生命周期目标是可能的。为此,在组织上,要强调地震采集、处理和解释的一体化,地震、地质和油藏工程的一体化以及开发部、研究院和采油厂等参加单位组织协调一体化。在技术上,要集成成熟技术,研发地震油藏一体化平台,推动地震技术向油藏工程领域延伸;要攻关瓶颈技术,提高多学科一体化时效性,全面提升地震在油藏工程中的作用;要试验和研究宽方位、多分量和时移地震等高端技术,增加井间地震信息采样密度和信息量,提高井间油藏变化的刻画精度;要探索前沿技术,突出面向开发过程的岩石物理基础研究,如孔隙结构和渗流特性的地震响应特征研究,从物理机理上实现地震油藏一体化。在措施上,要建立相对稳定的研究团队,推动地震—油藏一体化平台建设以及人员和软件平台的整合;要以典型实验区研究为目标,带动技术系

列、技术流程和技术规范的形成及推广,为油藏地球物理技术大面积推广应用奠定基础;要做好技术培训,充分发挥采油厂的作用,尽快将技术转化为生产力,力争在“二次开发”的实践中发挥主力军作用。

感谢中国石油勘探开发研究院物探技术所张研所长、谢占安副所长对论文编写的大力支持,感谢董世泰主任和王春明高工提供了部分素材。论文引用了大量公开发表的油藏地球物理研究成果和结论,其中许多作者是中国油藏地球物理界的老前辈、老领导,对他们的贡献特表敬意!

### 参 考 文 献

- [1] Johnston D. Methods and Applications in Reservoir Geophysics (Investigations in Geophysics Series: No. 15). SEG, 2010.
- [2] 孟尔盛等. 开发地震. 中国石油学会物探专业委员会培训班教材, 1999.
- [3] Sheriff R E. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. SEG, 2002.
- [4] Pennington W D. The rapid rise of reservoir geophysics. The Leading Edge, 2005, 24(S): 86-91.
- [5] 王喜双, 甘利灯, 易维启等. 油藏地球物理技术进展. 石油地球物理勘探, 2006, 41(5): 606-613. Wang Xishuang, Gan Lideng, Yi Weiqi et al. Technical progress of reservoir geophysics. OGP, 2006, 41(5): 606-613.
- [6] 韩大匡. 准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究. 石油学报, 2007, 28(2): 73-78. Han Dakuang. Precisely predicting abundant remaining oil and improving the secondary recovery of mature oilfields. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 73-78.
- [7] 韩大匡. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 583-591. Han Dakuang. Discussions on concepts, countermeasures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfields. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 583-591.
- [8] 刘雯林. 油气田开发地震技术. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [9] 撒利明, 梁秀文, 张志让. 一种新的多信息多参数反演技术研究—SEIMPAR. 1997 东部地区第九次石油物探技术研讨会论文摘要汇编, 1997, 364-367.
- [10] 撒利明, 师永民. 大庆太 190 区块地震多信息反演剩余油预测(研究报告). 中国石油集团西北地质研究所, 1999.
- [11] 崔生旺, 管叶君编著. 大庆油气地球物理技术发展史. 北京: 石油工业出版社, 2003, 494-499.
- [12] 甘利灯, 殷积峰, 李永根等. 利用储层特征重构技术进行泥岩裂缝储层预测. 1997 年东部地区第九次石油物探技术研讨会论文摘要汇编, 446-456.
- [13] 撒利明, 梁秀文, 刘全新. 一种基于多相介质理论的气检测方法. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6): 32-35. Sa Liming, Liang Xiuwen, Liu Quanxin. A multiphase theory based hydrocarbon detection method. Progress in Exploration Geophysics. 2002, 25(6): 32-35.
- [14] 杜金虎, 赵邦六, 王喜双等. 中国石油物探技术攻关成效及成功做法. 中国石油勘探, 2011, 16(5-6): 1-7. Du Jinhu, Zhao Bangliu, Wang Xishuang et al. Achievements and successful experience of PetroChina in geophysical research. China Petroleum Exploration, 2011, 16(5-6): 1-7.
- [15] 刘振武, 撒利明, 张明等. 多波地震技术在中国部分气田的应用和进展. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6): 668-672. Liu Zhenwu, Sa Liming, Zhang Ming et al. Progress of application of multi-wave seismic technology in part of gas-fields of China. OGP, 2008, 43(6): 668-672.
- [16] 刘振武, 撒利明, 董世泰等. 中国石油物探技术现状及发展方向. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 1-10. Liu Zhenwu, Sa Liming, Dong Shitai et al. Current situation and trend of geophysical technology in CNPC. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1): 1-10.
- [17] 甘利灯, 戴晓峰, 张昕等. 高含水后期地震油藏描述技术. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 365-377. Gan Lideng, Dai Xiaofeng, Zhang Xin et al. Key technologies for the seismic reservoir characterization of high water-cut oilfields. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 365-377.
- [18] 凌云, 黄旭日, 孙德胜等. 3.5 D 地震勘探实例研究. 石油物探, 2007, 46(4): 339-352. Ling Yun, Huang Xuri, Sun Desheng et al. Case study of 3.5-D seismic exploration. GPP, 2007, 46(4): 339-352.
- [19] 郭向宇, 凌云, 高军等. 井地联合地震勘探技术研究. 石油物探, 2010, 49(5): 438-450. Guo Xiangyu, Ling Yun, Gao Jun et al. Study of seismic-logging joint seismic exploration technology. GPP, 2010, 49(5): 438-450.
- [20] 撒利明, 董世泰, 李向阳. 中国石油物探新技术研究及展望. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 1014-1023. Sa Liming, Dong Shitai, Li Xiangyang. Research and perspective on new geophysical technologies and methods in China. OGP, 2012, 47(6): 1014-1023.
- [21] 张佳佳, 李宏兵, 姚逢昌. 可变临界孔隙度模型及横波预测. 中国地球物理 2010—中国地球物理学会第二十六届年会、中国地震学会第十三次学术大会论文集, 2010.
- [22] Ba J, Cao H, Yao F C. Velocity dispersion of P waves in sandstone and carbonate; Double-porosity and local fluid flow theory. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010, 29: 2557-2563.
- [23] 李凌高, 甘利灯, 杜文辉等. 面向叠前储层预测和油气检测的岩石物理分析新方法. 内蒙古石油化工, 2008, 33(18): 116-119. Li Linggao, Gan Lideng, Du Wenhui et al. A new

- method of rock physics analysis for reservoir prediction and hydrocarbon detection. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2008, 33(18): 116-119.
- [24] Gan L, Dai X, Li L. Application of petrophysics-based prestack inversion to volcanic gas reservoir prediction in Songliao Basin. *CPS/SEG Beijing 2009 International Geophysical Conference & Exposition*, 2009.
- [25] 王喜双, 曾忠, 易维启等. 中国石油集团地球物理技术的应用现状及前景. *石油地球物理勘探*, 2010(5): 768-777.  
Wang Xishuang, Zeng Zhong, Yi Weiqi et al. CNPC geophysical technology application status and prospects. *OGP*, 2010, 45(5): 768-777.
- [26] 杜金虎等. 碳酸盐岩岩溶储层描述关键技术. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [27] 王喜双, 曾忠, 张研等. 中油股份公司物探技术现状及发展趋势. *中国石油勘探*, 2006, 11(3): 35-49.  
Wang Xishuang, Zeng Zhong, Zhang Yan et al. Status and development tendency of Petrochina geophysical technique. *China Petroleum Exploration*, 2006, 11(3): 35-49.
- [28] 赵邦六等. 低渗透薄储层地震勘探关键技术. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [29] 杨志芳, 曹宏, 姚逢昌等. 致密碳酸盐岩气藏地震定量描述. *中国地球物理第二十九届年会论文集*, 2013, 731-732.
- [30] Li Xiangyang, Wu Xiaoyang and Mark Chapman. Quantitative estimation of gas saturation by frequency dependent AVO: Numerical, physical modeling and field studies. *ITPC*, 2013, NO. 16671.
- [31] Roure B, Downton J, Doyen P M et al. Azimuthal seismic inversion for shale gas reservoir characterization. *ITPC*, 2013, NO. 17034.
- [32] Zong Z, Yin X, and Wu G. AVAZ inversion and stress evaluation in heterogeneous media. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2013, 32: 428-432.
- [33] Chuck Peng, John Dai and Sherman Yang. Seismic guided drilling: Near real time 3D updating of subsurface images and pore pressure model. *ITPC*, 2013, No. 16575.
- [34] 甘利灯. 地震层析成像现状与展望, *石油地球物理勘探*, 1993, 28(3): 362-373.  
Gan Lideng. Status and future of seismic tomography. *OGP*, 1993, 28(3): 362-373.
- [35] 刘振武, 撒利明, 张昕等. 中国石油开发地震技术应用现状和未来发展建议. *石油学报*, 2009, 30(5): 711-721.  
Liu Zhenwu, Sa Liming, Zhang Xin et al. Current application and future development of production seismology in PetroChina. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(5): 711-721.
- [36] James Gaiser, Nick Moldoveanu, Colin Macbeth et al. Multicomponent technology: the players, problems, applications, and trends; Summary of the workshop sessions. *The Leading Edge*, 2001, 20(9): 974-977.
- [37] Heloise Lynn, Simon Spitz. *Pau* 2005. *The Leading Edge*, 2006, 25(8): 950-953.
- [38] 杨华等. 苏里格气田多波地震勘探关键技术. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [39] 甘利灯等. 实用四维地震监测技术. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [40] 赵改善. 油藏动态监测技术的发展现状与展望: 时延地震. *勘探地球物理进展*, 2005, 28(3): 157-168.  
Zhao Gaishan. The status and outlook of dynamic reservoir monitoring: Time-lapse seismic. *Progress in Exploration Geophysics*, 2005, 28(3): 157-168.
- [41] Greaves R J, Fulp T J, Head P I. Three-dimensional seismic monitoring of an enhanced oil recovery project. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1998, 17: 476-478.
- [42] Nur A M and Wang Z. *Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks: Volume 1, Experimental Studies*. SEG, 1989.
- [43] Jenkins S, Waite M and Bee M. Time lapse monitoring of the Duri steam flood: A pilot and case study. *The Leading Edge*, 1997, 16(9): 1267-1274.
- [44] Lumley D E. The next wave in reservoir monitoring: The instrumented oil field. *The Leading Edge*, 2001, 20(6): 640-648.
- [45] 庄东海, 许云等. 四维地震资料处理及其关键. *地球物理学进展*, 1999, 14(2): 33-43.  
Zhuang Donghai, Xu Yun et al. 4D seismic data processing and its key. *Progress in Geophysics*, 1999, 14(2): 33-43.
- [46] 陈小宏, 牟永光. 四维地震油藏监测技术及其应用. *石油地球物理勘探*, 1998, 33(6): 707-715.  
Chen Xiaohong, Mou Yongguang. Four-dimensional seismic reservoir monitoring technique and its application. *OGP*, 1998, 33(6): 707-715.
- [47] 庄东海, 许云等. 四维地震资料解释. *勘探家*, 2000, 5(1): 22-25.  
Zhuang Donghai, Xu Yun et al. 4D seismic data interpretation. *Explorationist*, 2000, 5(1): 22-25.
- [48] 凌云, 高军, 张汝杰等. 随时间推移(TL)地震勘探处理方法研究. *石油地球物理勘探*, 2001, 36(2): 173-179.  
Ling Yun, Gao Jun, Zhang Rujie et al. Processing method study for time-lapse seismic exploration. *OGP*, 2001, 36(2): 173-179.
- [49] 于世焕, 宋玉龙. 四维地震技术在草20块蒸汽驱试验区的应用. *复式油气田*, 2000, 21(3): 48-51  
Yu Shihuan, Song Yulong. Application of 4D seismic technologies in the steam drive test area of CAO-20 Block. *Multiple Oil-gas Field*, 2000, 21(3): 48-51.
- [50] 霍进, 张新国. 四维地震技术在稠油开采中的应用. *石油勘探与开发*, 2001, 28(3): 80-82.  
Huo Jin, Zhang Xinguo et al. The application of four-dimensional seismic technology to heavy oil production. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(3): 80-82.
- [51] 云美厚, 张国才, 李清仁等. 大庆T30井区注水时移

- 地震监测可行性研究. 石油物探, 2002, 41(4): 410-415.
- Yun Meihou, Zhang Guocai, Li Qingren et al. Feasibility study of time-lapse seismic monitoring of water-flooding in Daqing well-T30 area. GPP, 2002, 41(4): 410-415.
- [52] 易维启, 李清仁, 张国才等. 大庆 TN 油田时移地震研究与剩余油分布规律预测. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1): 61-65.
- Yi Weiqi, Li Qingren, Zhang Guocai et al. Study on time-lapse seismic and prediction of the distribution of residual oil in TN oilfield. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(1): 61-65.
- [53] 甘利灯等. 水驱四维地震技术: 可行性研究及其存在的盲区. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1): 24-29.
- Gan Lideng et al. 4-D seismic in water flooding reservoirs: Feasibility study and its limitation. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(1): 24-29.
- [54] 甘利灯等. 水驱四维地震技术: 叠后互均化处理. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1): 54-60.
- Gan Lideng et al. 4-D seismic in water flooding reservoirs: Post-stack cross equalization processing. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(1): 54-60.
- [55] 甘利灯等. 水驱油藏四维地震技术. 石油勘探与开发, 2006, 34(4): 437-444.
- Gan Lideng et al. 4D seismic technology for water flooding reservoirs. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 437-444.
- [56] 胡英等. 水驱四维地震技术: 叠前互均化处理. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1): 49-53.
- Hu Ying et al. 4D seismic in water flooding reservoirs: Pre-stack cross equalization. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(1): 49-53.
- [57] 凌云, 黄旭日, 高军等. 非重复性采集随时间推移地震勘探实例研究. 石油物探, 2007, 46(3): 231-248.
- Ling Yun, Huang Xuri, Gao Jun et al. Case study of non-repeatability acquisition in time lapse seismic. GPP, 2007, 46(3): 231-248.
- [58] 凌云, 郭向宇, 蔡银涛等. 无基础地震观测的时移地震油藏监测技术. 石油地球物理勘探, 2013, 48(6): 938-947.
- Ling Yun, Guo Xiangyu, Cai Yintao et al. 3.5D+4D seismic reservoir surveillance without baseline survey. OGP, 2013, 48(6): 938-947.
- [59] Huang Xuri, Laurent Meister, Rick Workman. Production history matching with time lapse seismic data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1997, 16: 862-865.
- [60] Huang Xuri, Robert Will. Constraining time-lapse seismic analysis with production data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000, 19: 1472-1476.
- [61] Huang Xuri. Integrating time-lapse seismic with production data: A tool for reservoir engineering. The Leading Edge, 2001, 20(10): 1148-1153.
- [62] 尹陈, 刘鸿, 李亚林等. 微地震监测定位精度分析. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 800-807.
- Yin Chen, Liu Hong, Li Yalin et al. The precision analysis of the microseismic location. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 800-807.
- [63] 李志明, 张金珠编著. 地应力与油气勘探开发. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [64] 周文, 闫长辉等著. 油气藏现今地应力场评价方法及应用. 北京: 地质出版社, 2007.

(本文编辑: 宜明理)

## 作者简介



撒利明 教授级高级工程师, 1964年生; 1986年本科毕业于西南石油学院地球物理勘探专业, 2003年获中国科学院研究生院构造地质学专业理学博士学位, 2006年于中国石油大学(北京)博士后工作站出站。长期从事地球物理储层预测、油气检测理论方法研究和软件研制, 已在各种学术期刊发表论文 50 余篇, 现在中国石油天然气集团公司科技管理部从事科技发展战略研究、规划编制和物探科技项目管理。