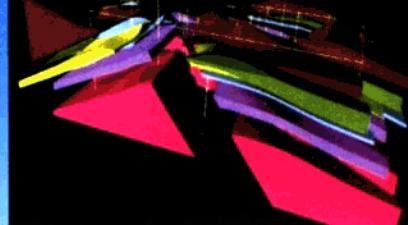
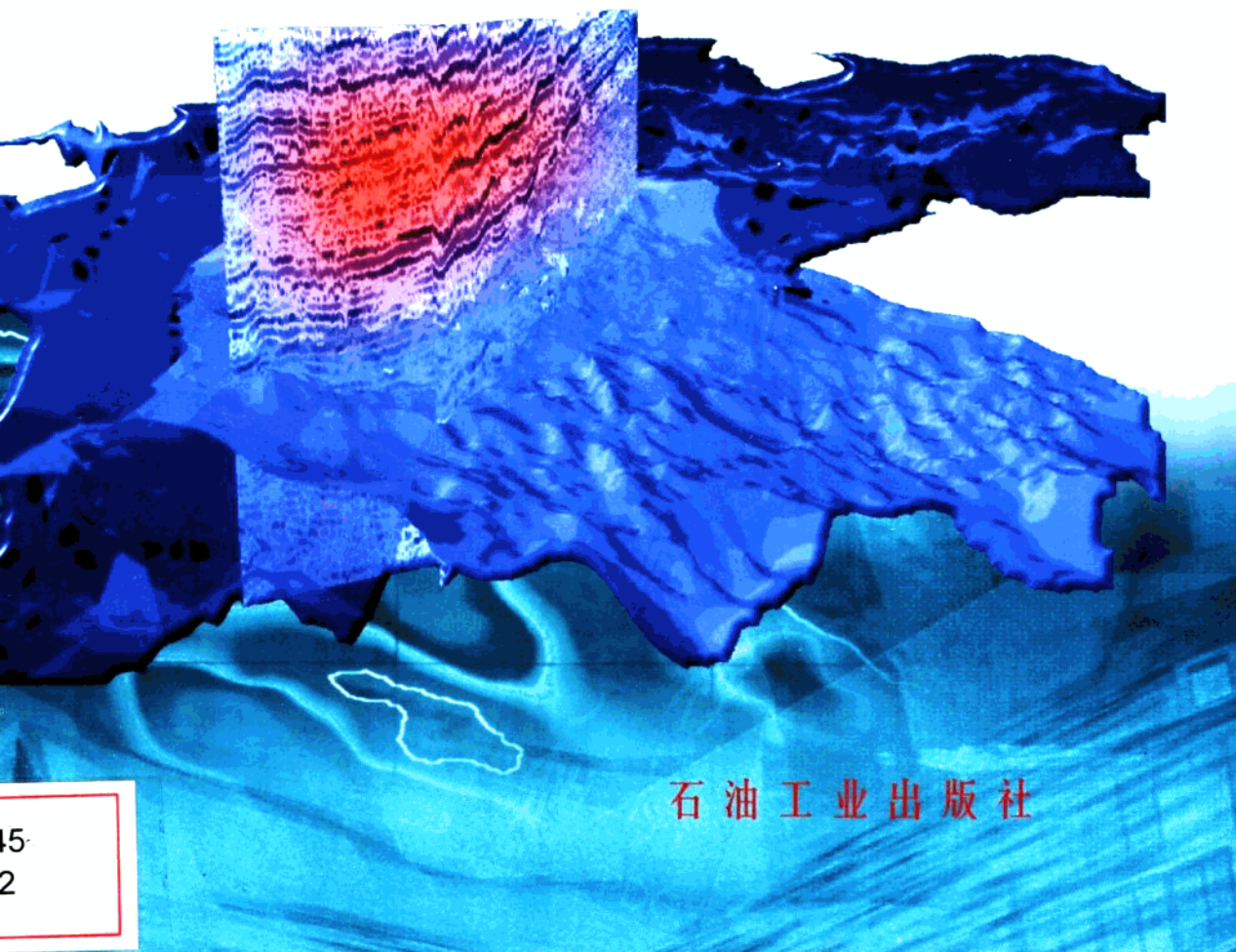


■ 王新红 著



四维地震技术研究与应用



石油工业出版社

四维地震技术研究与应用

王新红 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详述了四维地震技术在稠油热采监测中所涉及的理论基础、正演模拟分析、资料处理与解释等一系列实用方法、先进技术和实例研究,以及取得的显著成果。书中述及的地震监测技术对目前勘探技术的发展将会具有重要影响和借鉴意义。

本书可供地震勘探研究工作人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

四维地震技术研究与应用/王新红著.

北京:石油工业出版社,2004.4

ISBN 7-5021-4607-5

I. 四…

II. 王…

III. 地震勘探-应用-稠油开采

IV. TE355.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 023277 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:河北省欣航测绘院印刷厂印刷

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:7.75

字数:100 千字 印数:1—1000 册

书号:ISBN 7-5021-4607-5/TE·3230

定价:40.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

随着油田勘探开发程度的加深，可供发现的新区的阵地减少，而国民经济高速度发展对石油工业的依赖性加强，这日益突出的矛盾更加引发对可采储量实行科学的开采方法等问题的研究。稠油整装油田的开发，成为各石油公司争相研究的科研课题。“胜利油田四维地震技术研究”正是在这个时候被列入研究方向的。它是利用高精度的高分辨率三维技术，在已知的稠油（或重油）油田，在油田开发同时监测开发动态，以便指导油田的生产。它属于物探技术为开发服务的项目（在有些科研报告中称之为开发地震技术）。现阶段对稠油开采主要是采用注过热蒸汽和火烧油层的方法（ 300°C 以上），让蒸汽融化稠油层，降低其粘度，这样才利于其流动，从而易于采出。由于对地下地质情况掌握的程度不同，因而蒸汽对稠油层的影响程度如何？蒸汽的横向范围、纵向厚度的扩散程度如何？当出现小断层时蒸汽窜程度如何？注蒸汽的速度、数量、干度是多少为宜？这些问题开发部门在以前是通过采用打观察井的方式进行观测，或者是一口井生产，另一口井作为观测井进行观察，这种做法既不经济又带有片面性。因为打一口井需要花费大笔经费，况且观测井距也很难确立。而稠油热采的地震监测方法则经济又全面，因为它只是将检波器固定在地面上，在一个注采周期的各个时期进行人工炸药激发，通过接收信号，获取稠油层的地震信息，因而只要能克服技术上的问题则完全是可以行得通的。

在国外，该项研究开展得较早，美国、加拿大、委内瑞拉都已开始了这方面的试验。加拿大的阿尔伯达省的格列高尼湖试验区已取得了一些成果，但该试验区是在油层埋藏浅（235m）、油层厚（60m）

的情况下取得的。胜利油田的草桥稠油层埋藏较深（910m），油层较薄（10~29m），且稠油层上覆一层火成岩侵人体，势必影响地震信息的获取，因而在这样的情况下试验成功，有其重要的现实意义。

该项目的研究得到了国家地震局地质研究所、胜利油田有限公司滨南采油厂、胜利油田有限公司现河采油厂等单位的大力支持。

贺振华、杨绍国、黄德济、于世焕、邓良元、云美厚、李梦庚、张立昌、焦湘恒、刘保华、史克宝、刘泰生、李增印、王玉岭、徐淑合等同志在该项目的运行过程中给予了大力支持。

特别是于世焕同志在蒸汽驱研究、邓良元同志在计算机模型建立、张立昌同志在蒸汽吞吐资料处理、贺振华和云美厚同志在全文审核方面均做了大量的工作，对以上单位和个人表示真诚的谢意！

作 者

2004 年 3 月

目 录

第一章 稠油热采地震监测概述·····	(1)
第一节 地震监测的概念与作用·····	(1)
第二节 四维地震的研究前提·····	(3)
第三节 四维地震的基本工作流程·····	(6)
第四节 稠油热采地震监测研究现状与发展前景·····	(9)
第二章 地震监测基础·····	(12)
第一节 双相介质地震波传播理论概述·····	(12)
第二节 稠油岩心物性参数的实验室测量及研究·····	(24)
第三章 地震监测正演模拟分析·····	(37)
第一节 正演模拟方法·····	(37)
第二节 正演模拟分析·····	(38)
第四章 地震监测方法研究·····	(44)
第一节 影响地震监测资料可重复性的因素·····	(44)
第二节 地震监测资料处理方法研究·····	(46)
第三节 地震监测资料解释方法研究·····	(51)
第五章 稠油热采地震监测效果分析·····	(57)
第一节 蒸汽吞吐地震监测试验·····	(57)
第二节 蒸汽驱地震监测试验·····	(66)
结论与认识·····	(105)
参考文献·····	(109)

第一章 稠油热采地震监测概述

由于全球油气价格的波动，加上发现新油田变得越来越困难，勘探成本越来越高，特别是边远地区勘探风险更大。因此，世界各主要石油公司在进行调整减员的同时，正努力降低勘探风险和采油成本。显而易见，降低勘探风险的最佳选择应当是在已经发现石油的地方寻找石油。

要提高现有油气田的采收率就必须精确估计剩余油位置，有效地监测油藏内流体的流动，制定合理的开发方案。现有的油藏管理方法大多是根据油藏极少量井孔样点的测量数据来进行管理，为了加强油藏管理，提高最终采收率，迫切需要有一种新方法预测井间油藏随时间的动态变化。与此同时，地震技术的飞速发展使得利用地震技术进行油藏管理已成为可能。因此，从 20 世纪 80 年代初期，国外就开始尝试将地震技术用于稠油热采动态监测，并取得良好的效果，为地震勘探开辟了一个崭新的研究领域。由此可见，稠油热采地震监测作为一种技术绝非偶然，它是石油勘探、开发客观实际的需要，同时也是地震技术飞速发展的必然结果。

第一节 地震监测的概念与作用

一般来说，地震油藏监测（SRM）或地震监测这一术语是指利用地震资料监测油藏内部动态特性变化的过程，它与地震油藏描述一起共同构成开发地震的两大支柱。所不同的是地震油藏描述通常强调的是利用地震资料对油藏静态特性的解释，而关于油藏动态特征的描述则构成了地震油藏监测。

20 世纪 90 年代中期，相继出现了四维地震（4D seismic）和时间推移地震（Time lapse seismic）两个新的概念，它们均强调地震资料采集的重复性。相比之下，四维地震主要是指利用重复三维地震测量资料进行油藏动态监测，而时间推移地震与四维地震相比则具有较宽的外延，它可以是重复多次二维测量也可以是重复多次三维测量。图 1-1-1 较好地显示了上述几个概念之间的相互关系。胜利油田稠油热采地震监测主要是通过重复三维地震测量来实现油藏动态监测目的，因此，应属于四维地震的范畴。

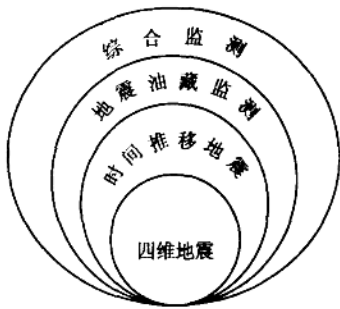


图 1-1-1 几个基本概念的相互关系示意图

此外，按观测方式的不同，时间推移地震可细分为如下几种情形：

(1) 四维三维地震，常称四维地震。它是目前较常规的四维地震方法，也是四维地震最先使用的方法。它的成本最高，效果也最好。

(2) 四维二维地震，常称重复地震。它是近几年发展起来的方法，其特点是成本低，易实现，效果也较好。

(3) 四维 VSP，它是研究井史及井旁油藏特征变化规律的好方法。目前国外已有三分量及九分量四维 VSP。

(4) 井间四维地震，它是利用重复井间地震方法来实现油藏动态管理。目前尚处于试验阶段。

在四维地震监测过程中，通常人们将前一次地震测量称为基础地震测量，后一次地震测量称为监测地震测量。监测地震剖面与基础地震剖面之差称为地震差异剖面或地震异常剖面，它是油藏物性变化的地震表现。四维地震的作用主要表现在以下几个方面。

(1) 对于新油田：四维地震可以帮助估算和合理计划下一步油田开采规模和具体技术、措施、施工因素及相应的经济效益等，如地面

蒸汽设备的规模、注采方案设计、蒸汽转驱时间等。

(2) 对于中期油田：四维地震有助于了解并确定剩余油的分布特点、流体界面、注入蒸汽的渗透边界、油气运移通道规律，调整地面注入蒸汽量及速度方案。

(3) 对于老油田：四维地震根据注入蒸汽的范围大小及剩余油的分布，可以正确估算油田有效开采寿命，帮助开发工作者确定新井布置、何时封井等问题。

四维地震的主要用途包括：

- (1) 进行油藏精细描述，揭示各种隐蔽油气藏；
- (2) 预测裂缝发育方向；
- (3) 动态监测油藏内部流体运动规律；
- (4) 进行热采监测，提高采收率；
- (5) 找出储层内的剩余油目标区；
- (6) 钻探新井，增加老油田的可采油气量；
- (7) 降低成本，增加储量，实现油藏最佳管理。

第二节 四维地震的研究前提

由于注采所造成的地震响应的变化，因油田而异，因储层而不同。只有包括储层的所有变化的综合效应在给定的地震分辨率范围内存在稳定可信的地震差异时，四维地震才可以得到成功地应用。换句话说，四维地震的实施对储层条件、注采方式、地震方法本身都有不同的要求。

一、储层条件

四维地震并非适用所有的储层，要进行四维地震监测，油藏本身必须满足特定的条件。Lumley 等（1997）的研究表明，低骨架弹性特征是四维地震监测得以实现的第一必要条件，而孔隙流体压缩系数

的明显差异是四维地震成功的第二必要条件。

适于四维地震监测较为理想的油藏条件是：孔隙度大（ $>25\%$ ），岩石疏松；埋藏深度浅；厚度大；原油的油气比高；流体饱和度变化大等。

对于稠油热采而言，由于在高温高压，特别是高温作用下孔隙流体压缩系数通常会发生较为明显的变化，因而是实施地震监测的最为理想的开采方式，这也是为什么地震监测最早是在稠油油田进行的缘故所在。

二、注采方式

尽管储层地震特性的变化与油藏开采过程有关，但并不是所有的采油过程都能进行地震监测。因此，充分认识开采过程与储层地震特性之间的关系，了解采油方式引起油藏特性的变化对四维地震监测的实施显得非常重要。

在一次采油过程中，油藏压力下降有时是很明显的，这会使储层岩石骨架应力增大，进而引起岩石速度、密度增加，四维地震应当有能力监测油藏衰竭过程。

在注水或水驱过程中，如果油是轻油或活油，油与水之间的压缩系数之差较大，有利于四维地震的实施；如果储层孔隙中含的是重油或死油，其与水的压缩系数之差较小，这将不利于监测的实施。

在热采（注蒸汽、火烧）过程中，随着储层温度的增加，孔隙流体粘度降低，岩石和孔隙流体的压缩系数增加，从而导致岩石速度、密度明显降低。特别是对于浅层稠油热采，四维地震监测几乎总是可行的。

在溶解驱和非溶解驱开采过程中，由于注入流体（ CO_2 或气）的可压性远远高于储层流体的可压性，且注入流体使得孔隙流体粘度减小，并驱替了原始孔隙流体，四维地震的监测应当是可行的。

当注入压力和注入速度较高时，可能导致岩石破裂，引起速度的

明显改变。特别是当裂隙定向排列时，利用横波分裂可以圈定裂缝发育区。

由此可见，四维地震适用于水驱和溶解气驱，且水驱采油最好是轻油或气；热驱采油应当是重油。在碳酸盐岩地区，四维地震适用于气驱、CO₂ 驱、蒸汽驱和溶解气驱储层。

三、地震条件

当油藏特性、注采方式均满足监测条件时，地震资料质量的好坏直接决定了四维地震监测的成败。表 1-2-1 列出了四维地震监测对地震资料的限制条件。

表 1-2-1 四维地震监测得以实施的地震条件（据 Lumley 等，1997）

参 数	要 求
地震成像质量	叠加或偏移信噪比高（>1）；油藏反射成像清晰；油藏振幅可靠和有意义；油藏反射未受多次波和相干噪声污染；油藏反射未被浅层气、静态四维或速度异常弄模糊
地震分辨率	震源主频要高；油藏厚度至少等于半个地震厚度分辨率（分辨率等于 1/4 波长）；若在 4 倍地震分辨率以上最好
地震流体界面	至少应有一个地震流体界面是可见的；若全部界面均可在平面作图为最好
地震可重复性	采用同样的采集设备观测；使用永久性震源和检波器排列装置；按规范标准精确定位；按相同的方向放炮；每次采集都用同样的面元、炮检距和方位角分布
阻抗变化	应当大于 4%（经验法则）
旅行时变化	应当大于 4 个时间采样间隔（经验法则）

在上述地震参数中，地震资料的可重复性是四维地震所面临的主要困难之一。四维地震监测要求不同时间采集和处理的地震资料要有一致性或可重复性。不一致或不重复的部分应当是由油藏引起的真变化，不是采集处理制造出来的假变化。但实际上两次采集很难保证完全一致，因为地下水位的变化会造成地表条件的不一致，环境的变化会造成环境噪声的不一致，震源形状、瞬时位置或放炮方式的不精确会造成能量分布的不一致，采集仪器的不同会造成不同的仪器噪声和不同的频谱特征，观测系统的差别会导致两个数据体难以比较等等。所有这些不一致都会造成反演结果之间的差异可能仅代表噪声而无实际物理意义。特别是由于技术的进步，新的重复地震不可能与原有的地震采用同样的采集、处理参数。一句话，不一致是绝对的，一致是相对的。这就决定了四维地震监测必须在采集、处理上下大功夫，使得由于各种非地质因素引起的不一致降低到最小的限度。

此外，由于注入和开采而造成的储层差异是否能引起稳定而可信的地震差异是四维地震监测所面临的又一主要困难。地震所观测的是油藏与盖层（或围岩）的波阻抗差异，波阻抗又是密度、速度的乘积。因此，地震反射是速度、密度的函数。由于注采而引起的油藏变化最终都将反映到油藏的地震波速度和密度的改变上，从而引起地震反射特征的变化。只要这一变化特征足够大，地震能观测到，就可以通过四维地震监测油藏流体的改变。这就要求地震资料必须有足够的分辨率、信噪比和较高的保真度。

由此可见，四维地震资料总的要求是相对振幅保持处理、高信噪比处理和一致性处理，其中一致性处理的难度最大，也最为关键。

第三节 四维地震的基本工作流程

由于四维地震实施的技术风险较大，所以对于四维地震勘探必须进行合理设计，精心组织。通常，四维地震大致分三步来进行，即可

行性研究、现场先导试验和油田大规模应用。

一、可行性研究

四维地震应用难度很大,在项目实施前,必须进行技术风险分析,对其实施的可行性进行认真的评价。可行性研究一般包括两个方面的内容:一是四维地震监测的适用性或称为技术风险评价;二是四维地震监测的经济有效性。前者主要是通过对油藏特性、注采方式和地震资料本身的分辨率、信噪比、可重复性等的分析与评价,以确定所研究的油藏是否适合用四维地震方法进行监测。后者则是对四维地震监测能否在油藏开采中获得良好的回报率的评价。即由于监测提高油藏采收率而获得的费用是否可偿付四维地震监测的费用。只有当因监测提高采收率的费用高于地震监测的费用才是经济有效的。目前,关于四维地震监测的技术风险评价一般做得较多,而对于经济有效性的评价做得相对较少。

1. 技术风险评价

Lumley 等人(1997)根据诸多四维地震项目的实施经验,选择油藏参数和地震参数中最关键的参数,建立了一套较为实用的技术风险定量评价方法。其首先建立了油藏参数和地震参数的评分标准,然后,对不同的油藏利用该评分标准逐项进行打分,最后按照得分高低的情况对可行性或技术风险做出评价。利用该方法对来自雪佛龙石油公司在印度尼西亚、墨西哥湾、西非和北海的四维地震项目进行定量评价,取得了与实际测量结果非常吻合的评价效果。在 2000 年第 70 届 SEG 年会上, Lumley 等人再次对其定量评价方法进行修改和补充,并将其用于时移 VSP 的定量评价中,也取得了较好的评价效果。

2. 经济有效性评价

由于评价四维地震监测的经济效益是一项非常复杂的活动,所用方法不同得出的结论可能完全相反,因此应当尽可能简单地考虑这个问题。根据偿付监测成本所需要的额外产量来评价监测的经济有效性

也许是一种可行的方法。具体做法概述如下：

首先核算油藏监测中所有与资料采集、处理和解释有关的成本；然后根据市场原油价格将所有成本折算为所需原油额外产量；最后根据油藏储量计算采出相当于监测费用的额外产量的原油所需提高采收率的最低值，若监测可使得油藏采收率提高的幅度大于偿付监测费用所需的采收率，则监测是经济有效的。由于技术进步和油价的变化，使得经济有效性评价变得非常复杂，它是时间的动态函数。

经济有效性评价是在保证监测顺利实施的前提下，使四维地震监测能以最经济合理的方式实现，以便获得最大的经济效益。

二、现场先导试验

将可行性研究中所确定的一整套参数和方法用于油田中具有良好前景的储层，这样既可提供最好的机会来精细地了解四维地震的效果，又可减少资金投入的风险。目前，四维地震监测的成功事例都集中在“现场先导试验”阶段。这一阶段着重进行资料重复性的研究工作，同时还要对地震资料的成像质量、旅行时变化和波阻抗变化进行分析，最终确定合理而有效的四维地震采集、处理和解释方法，为四维地震的大规模应用奠定基础或提供指导。

三、油田大规模应用

将现场先导性试验所获得的一整套有效参数和方法应用于整个油田，这样无论从技术观点出发还是从经济观点出发，其成功的可能性都大大地增加了。一方面，先导试验为其降低技术风险提供了保障；另一方面，四维地震的大规模应用使得监测费用可以均摊在整个油田生产期，从而使得监测成本相对地减少了。

由于四维地震是为油藏管理服务的，而油藏是处于动态的，所以四维地震必须对新的信息有快速分析和响应的能力。也就是说，四维地震必须具有快速采集、处理和解释的能力。慢了就没有任何用途

了。四维地震需要处理大量的地球物理的、地质的和油藏工程的数据，因此，在油田大规模运用时，必须有一套与之相适应的处理软件系统，同时还要求地球物理学家、地质学家和油藏工程师的密切配合。另外，四维地震要求采用可视化技术，以实现解释结果的可视化。

第四节 稠油热采地震监测研究现状与发展前景

由于开采引起的油藏变化的概念是在 20 世纪 80 年代提出的，早期的使用重复地震测量监测试验当数 ARCO 石油公司在得克萨斯中北部 Holt 砂岩采用重复三维地震对火驱采油的成功监测（1981—1983 年）。与此同时，美国 Conoco 公司的 Britton 等人（1983）也报道了在南得克萨斯的 Street Ranch 沥青质稠油层中蒸汽驱地震监测的成功试验。所不同的是他们以蒸汽井为中心做了四条米字形常规地震反射剖面，但同样取得了较为理想的监测效果。之后，稠油热采地震监测野外试验逐年增多，相应的理论研究和岩石物理基础研究也不断深入。Pulin 等（1987）对加拿大 Athabasca 沥青砂岩油藏进行了地震监测注气效果的先导试验工作；Mishr（1988）对印度北坝贝盆地进行了地震监测试验，用于提高油田的采收率；G.A.King 等人（1987）通过野外试验证实了注水地面地震监测的可能……

在理论研究方面，White 和 Sengbush 在其专著《开发地震学》中对开发地震技术和方法进行了系统地总结，并初步建立了开发地震学的理论框架。布尔贝（1987）在其专著《孔隙介质声学》中对多孔隙介质中波的传播理论进行了深入研究，进一步丰富了开发地震学的理论。Sheriff（1992）主编了《储层地球物理学》，书中详细介绍了储层地球物理方法及发展现状。在 20 世纪 80 年代中后期和 90 年代初期，Nur 和王之敬等人做了大量岩石物理性质的实验研究。这些都为地震监测技术的发展奠定了坚实的理论基础。

进入 20 世纪 90 年代，特别是 90 年代后期，稠油热采地震监测的成功以其良好的回报受到世界各大石油公司的重视，并纷纷开展野外试验工作，地震监测技术得到了迅猛的发展，野外试验工作大幅度增加，相关的出版物也大量增加。90 年代中期，四维地震和时间推移地震等新概念出现，使得地震监测的概念更加具体化。到目前为止，全世界已累计完成了 100 多个时间推移地震项目，而且目前尚有 70 多个项目正在进行当中。时间推移地震的应用呈指数增长，相信以后仍将保持这种增长的趋势。近年来，时间推移地震已成为历届 SEG 年会关注的重点之一。这些充分说明了时间推移地震的美好发展前景。

国内的地震监测技术的研究起步较晚，20 世纪 90 年代初期，胜利油田率先在单家寺地区进行了蒸汽吞吐与蒸汽驱稠油热采地震监测试验，取得了初步成功。之后，新疆石油管理局以及辽河油田也分别进行了部分稠油热采地震监测试验，取得了一定的效果。目前，时间推移地震已经引起了国内各油田和研究院所的普遍重视，研究工作方兴未艾。国内许多专家学者对地震监测的理论方法进行了不同程度的研究。在岩石物理实验方面，针对大庆油田、胜利油田、塔里木盆地、济阳凹陷、准噶尔盆地等不同地区和不同种类的岩石，许多研究者均进行了不同程度的岩石物理实验研究。

目前，时间推移地震研究与应用的主要领域正从稠油热采监测向水驱开采监测转移，油水体系地震监测将成为时间推移地震的研究重点。国外部分地区水驱时间推移地震监测已经投入商业应用。国内，包括大港、大庆油田在内的几个油田正在积极努力，准备开展水驱四维地震监测野外试验工作。胜利油田目前也正在进行这方面的理论研究工作。

就总体研究水平来看，地震油藏监测技术尚未完全成熟。从岩石物理基础到资料采集、处理以及解释方法等各个方面还有待于进一步完善和提高。从地震监测的应用现状来看，海上应用相对较多，且多

集中在北海和墨西哥湾，陆上应用较少。注水监测虽然已经引起了人们的极大关注，而且野外试验逐年增多，但仍以稠油热采监测成功的实例居多。这主要是由于海上资料的信噪比高、噪声小，加上油质好，经济效益也高（稀井高产）。从地震监测的应用效果来看，油田的采收率通过二维地震勘探可达到 20% ~ 30%。三维地震的应用又使油气的采收率提高到了 40% ~ 50%。尽管四维地震目前还基本处于定性解释阶段，但专家预测，四维地震方法的应用可望在 21 世纪使油气储量采收率提高到 65% ~ 75%（Anderson, 1997）。

由于我国绝大多数油藏为陆相砂岩油藏，单层厚度较薄，而且相当一部分油田埋深较大（3000m 以上），断层多，断块小，常规地震资料的分辨率目前仍有限，再加上陆上油田开发井距较密等客观因素的影响，使得四维地震的效益难以得到充分的展现。但随着我国石油工业改革地进一步深入，以效益为中心的一些开发技术（如稀井高产采油等）将被广泛采用，那时四维地震将有广阔的用武之地。