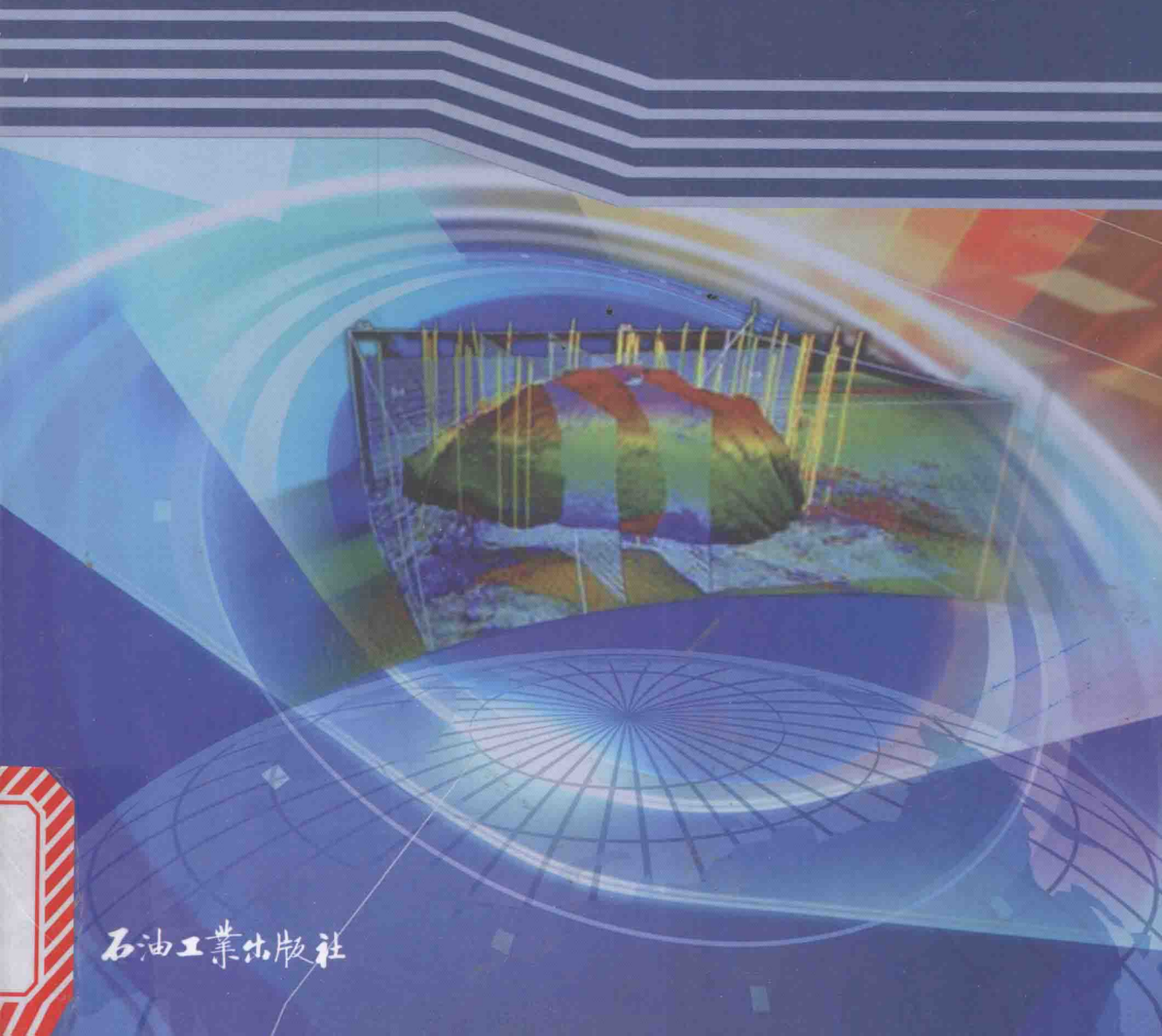


# 实用四维地震监测技术

甘利灯 邹才能 姚逢昌 张 研 等著  
杜文辉 胡 英 石玉梅 戴晓峰



石油工业出版社

# 实用四维地震监测技术

甘利灯 邹才能 姚逢昌 张 研 等著  
杜文辉 胡 英 石玉梅 戴晓峰

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书首先全面、系统地介绍了四维地震技术,主要包括四维地震基本概念、地震岩石物理基础研究、水驱油藏四维地震监测技术的可行性和适用性、叠前和叠后互均化处理、四维地震资料解释等;然后,结合渤海湾地区全波测井资料、岩心分析数据和冀东油田二次三维采集地震资料,从静态油藏描述、油藏数值模拟、动态油藏描述和剩余油分布预测等方面系统地介绍了四维地震技术在人工水驱油藏和天然水驱油藏中的应用;最后指出了国外四维地震技术的发展方向,并结合国内四维地震技术、地震资料和油藏开发现状提出了四维地震技术发展的建议。

本书是作者多年水驱油藏四维地震监测技术研究成果的系统总结,可供从事地震和油藏开发的科技人员,以及相关院校的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

实用四维地震监测技术/甘利灯等著.

北京:石油工业出版社,2010.6

ISBN 978-7-5021-6969-5

I. 实…

II. 甘…

III. 地震观测

IV. P315.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第092342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

发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

---

2010年6月第1版 2010年6月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:14.75 插页:4

字数:380千字 印数:1—1000册

---

定价:78.00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

油藏开采过程地震监测是有效管理油气资源，最大限度提高采收率和开采效率的一项新技术。油田生产过程中油藏流体、压力和温度变化，以及长期水驱过程造成的储层变化，在有利条件下可能产生地震方法可以探测的声学性质的变化，从而导致地震响应的变化。这样，利用地震资料就可以进行油藏监测。四维地震技术，也称时间推移地震，简称时移地震，就是在油藏生产过程中，在同一地方，利用不同时间重复采集的、经过互均化处理的、具有可重复性的三维地震数据体，应用时间差分技术，综合地震岩石物理和油藏工程等多学科资料，监测油藏变化，进行油藏管理的一种技术。

四维地震试验工作最早可追溯到 20 世纪 80 年代初期，为了火驱前沿，ARCO 公司在北得克萨斯州 Holt 油藏上首次开展了四维地震试验，并在火驱前后的地震剖面上见到了地震差异。早期四维地震主要应用于追踪重油开采过程中的蒸汽前沿，并先在加拿大与印度尼西亚见到了商业价值。1987 年，King 等通过野外试验证实了地面地震监测油藏注水开采的可行性。20 世纪 80 年代中后期和 90 年代初期，在大量岩石物理学实验研究的基础上，许多研究者提出了四维地震可行性的评价标准和方法，保证了四维地震的健康发展。同时，叠前和叠后互均化处理方法的不断完善为消除多次地震采集和处理过程造成的差异，提高地震资料的可重复性，有效提取与油藏变化相关的地震差异奠定了很好的基础。进入 20 世纪 90 年代，四维地震得到了空前发展。目前，国外四维地震已进入商业应用阶段，在北海地区已成为一种提高采收率的重要手段，深刻影响了北海的石油开采业。2001 年出现的“仪器化油田”（Instrumented oilfield，雪佛龙公司）或“电子化油田”（Electronic oilfield，阿莫科公司）标志着四维地震技术的新进展。它们包含两层含义：（1）在地表、近地表和井中永久布置检波器不断进行地震监测，用于大尺度流体流动成像；（2）在注入井与生产井中永久布置仪器不断监测温度、压力与饱和度等的变化，用于刻画井附近小尺度流体流动。二者结合可以提供几乎实时的储层流体流动现状，优化开采。目前，该项技术已在北海多个油藏中得以应用，实现了油藏开采的实时监测。

国内四维地震技术研究起步较晚，目前有针对性的四维地震采集尚未见报道，但为了监测稠油蒸汽驱过程而进行的多次采集则有一些例子，如新疆红 1-1 先导区、辽河千 12 块 64-54 井区、胜利单家寺地区等。在这些试验区注气井附近都观察到了速度降低、振幅及波形变化和时滞现象。东方地球物理勘探有限责任公司对辽河和新疆试验区实际地震资料进行了详细分析和处理，指出了资料处理存在的难点。随后，冀东油田分公司对高 104-5 油田二次三维采集的地震资料进行了四维处理，见到了初步效果。与此同时，石油大学（北京）和中国地质大学（北京）分别进行了四维地震可行性和四维地震处理与解释方法探索研究。但是，这些研究成果非常零散，不成体系。为此，在中国石油天然气股份有限公司的大力支持和推动下，中国石油勘探开发研究院在四维地震可行性研究调研的基础上，从 2000 年开始进行四维地震技术系统研究，先后承担了中国石油天然气股份有限公司前沿基础研究项目“四维三分量地震储层表征方法研究”（2000—2001 年度）、“四维三分量地震剩余油预测方法研究”（2001—2002 年度）和“四维地震剩余油分布预测适用性研究”（2002—2003

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	(1)
1.1 四维地震技术 .....	(1)
1.2 国内外四维地震研究现状 .....	(7)
1.3 国内四维地震研究的资料基础 .....	(12)
<b>2 地震岩石物理学基础</b> .....	(15)
2.1 基本概念 .....	(15)
2.2 岩石物理理论模型 .....	(20)
2.3 岩石速度影响因素分析 .....	(24)
2.4 渤海湾地区岩石物理基础研究 .....	(27)
2.5 流体替代模拟 .....	(37)
<b>3 水驱油藏四维地震可行性与适用性研究</b> .....	(44)
3.1 四维地震可行性分析的一般原理 .....	(44)
3.2 长期水驱后油藏参数变化规律研究 .....	(56)
3.3 渤海湾地区水驱油藏四维地震可行性研究 .....	(66)
3.4 水驱油藏四维地震适用性研究 .....	(72)
<b>4 四维地震资料处理方法研究</b> .....	(100)
4.1 四维地震资料处理的一般原则 .....	(100)
4.2 四维地震资料处理的主要内容 .....	(102)
4.3 叠前互均化处理流程与方法 .....	(104)
4.4 叠后互均化处理流程与方法 .....	(109)
<b>5 四维地震资料解释方法研究</b> .....	(113)
5.1 四维地震资料解释的一般方法 .....	(113)
5.2 水驱油藏四维地震解释的有效途径 .....	(127)
<b>6 人工水驱油藏四维地震监测实例</b> .....	(133)
6.1 工区地质特征与勘探开发历程 .....	(133)
6.2 静态油藏描述 .....	(139)
6.3 四维地震资料处理与解释 .....	(144)
6.4 油藏数值模拟与历史拟合 .....	(161)
6.5 剩余油分布与动态油藏描述 .....	(173)
<b>7 天然水驱油藏四维地震监测</b> .....	(178)
7.1 工区概况 .....	(178)

# 1 绪 论

四维地震在过去的十几年已受到极大的关注和重视，这通过专门为四维地震组织召开的研讨会次数和在国际会议上发表的相关论文数量可见一斑。另外，美国勘探地球物理学家学会（SEG）和石油工程师学会（SPE）组织的有关四维地震的讲座在全球范围内受到普遍欢迎也显示了四维地震的魅力。根据 BP/SHELL 公司在 Foinaven 油田的应用效果统计：1984 年以前，应用二维地震技术，油气采收率为 25%~30%；1984—1995 年期间，采用三维地震技术，采收率达到 40%~50%；1996 年以来，应用四维地震技术，采收率提高到 65%~70%。正是由于四维地震技术这些良好的应用效果，四维地震在地球物理市场中所占的份额持续增长。那么，四维地震的概念，四维地震产生与发展的动力，四维地震的作用、研究内容、实施步骤和意义，国内外四维地震发展的现状，以及国内四维地震研究的资料基础又是什么呢？这就是本章要回答的内容。

## 1.1 四维地震技术

### 1.1.1 什么是四维地震

四维地震，也称时间推移地震（简称时移地震），它是产生于 20 世纪 80 年代并在 90 年代中后期得到快速发展的一项地震技术。它与以前所有其他地震技术不同之处在于，这项技术需要多次重复采集的地震数据，它试图通过多次采集的地震数据的变化来反映油藏的变化，其目的主要用于油藏监测与油藏管理，是一种新兴的现代油藏管理与监测技术，并已在海上油气开采中发挥了重要的作用。

四维地震没有严格的定义，大概内涵是：在油藏开采过程中，对同一油气田在不同的时间重复进行三维地震测量，其地震响应随时间的变化可以表征油藏性质的变化，通过特殊的四维地震处理技术、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、油藏工程等多学科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。因此，利用四维地震技术可以认识油藏内部流体（油、气、水）的运动过程，寻找剩余油气分布，确定加密井位，以达到优化开采、延长油田寿命、提高采收率的目的。四维地震在优化油藏管理和油藏动态描述等方面发挥着重要的作用。

通常人们将第一次采集的地震数据称为基础测量数据，以后采集的地震数据称为监测测量数据，当然监测可以是多次的，分别记为第一次监测、第二次监测、第三次监测等。监测地震数据与基础地震数据以及两次监测地震数据之间的差称为地震差异数据体，它是对应时间段内油藏变化的地震响应。

四维地震在英文中有两个词，一是“four dimension seismic”，二是“Time - Lapse seismic”。前者可以译为“四维地震”，后者大多译为“时间推移地震”，简称“时移地震”，但也有人译为“时间延迟地震”，简称“时延地震”。虽然译法不同，但本质与内涵都是一致的。大多数人赞成“时移地震”，而不赞成使用“四维地震”的理由是：目前只是进行多次采集，因而构不成时间维，而“时移”则表明时间向前推移，这种推移既可以是连续的，也

可以是跳跃的，比较符合目前的客观实际。然而，这种译法削弱了时间这一因素在四维地震中的关键意义，实际上，时间和空间的结合开创了具有划时代意义的前缘技术的史例很多，例如军事上声波实时检测系统和医学上的 CT、MRI 监测等新兴的技术。此外，从发展的观点来看，四维地震正朝着“仪器化油田”（Instrumented oilfields，雪佛龙公司）或“电子化油田”（Electronic oilfield，阿莫科公司）的目标前进，它们都强调实时监测，可以构成时间维。笔者认为关键技术词汇的译文应具有前瞻性，“四维地震”应该是一个很好的译法，它不但形象易懂，重点突出，而且代表了发展的趋势。当然对于多次采集的二维地面地震、VSP 和井间地震，由于基础测量都不是三维的，即使加上时间也够不成四维，此时用“时移”比较合适，如“二维时移地震”、“时移 VSP”和“时移井间地震”等。

### 1.1.2 四维地震发展的动力

作为一门技术，四维地震的出现绝非偶然。它是油气勘探、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，是经济与技术发展的产物。它产生与发展的动力可以归结以下几个方面。

#### 1.1.2.1 油气资源供需矛盾的产物

1949 年，Hubbert 对石油储量和石油生产的发展趋势提出了自己的观点和预测模式。他认为世界石油储量比较合理的估算为  $15000 \times 10^8 \text{ bbl}$ <sup>①</sup>，其极限值也不过  $20000 \times 10^8 \text{ bbl}$ 。可见，油气资源是有限的。近年来，年度世界发现总量图（图 1-1-1）表明年平均发现量呈逐渐减少的趋势。每年世界新发现的油气资源已从 20 世纪 40 年代到 20 世纪 60 年代的高峰期（年发现  $400 \times 10^8 \text{ bbl}$  到  $1000 \times 10^8 \text{ bbl}$ ，平均  $600 \times 10^8 \text{ bbl}$  左右）跌到现在年发现量不足  $100 \times 10^8 \text{ bbl}$ 。再据不包括北美的全球勘探效益统计，从 20 世纪 40 年代到 90 年代中期，每年勘探井数从不足 160 口增加到 2000 口左右，最高曾达到 2440 口；而每年增加的储量却从 20 世纪五六十年代的平均  $400 \times 10^8 \text{ bbl}$  左右降到 20 世纪 90 年代中期的  $100 \times 10^8 \text{ bbl}$  左右。勘探回报的效益锐减十分明显。

然而，当今世界人口增长比早期联合国大会预计的要快，总人口已为 1949 年的两倍，

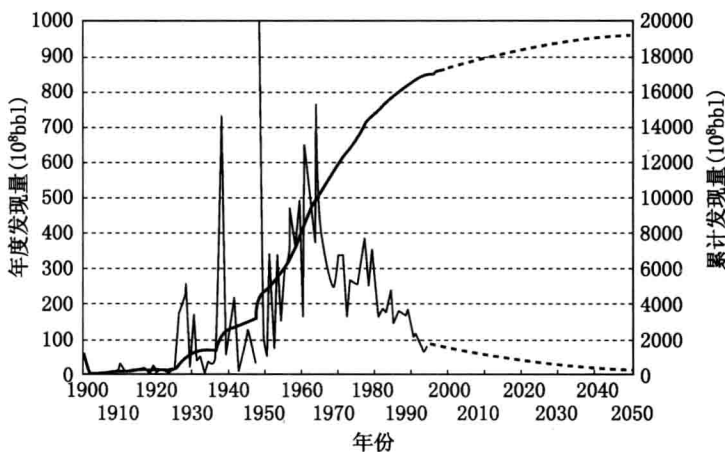


图 1-1-1 世界年度石油发现量分布图 (Jack, 1998)

①  $1 \text{ bbl} = 0.16 \text{ m}^3$ 。

并且以每年 1.7% 的速度增长。据近期石油市场统计分析，油品需求年增长率平均为 2%，油品供给量基本保持同步增长，并略有富裕。对今后的供需趋势分析，不同组织有不同的看法。据美国能源部分析，2004 年到 2005 年达到供需平衡，以后将开始出现供不应求的局面。有的研究者则认为从 2001 年到 2002 年就会达到供需平衡点，而有的研究者则认为 2010 年以后才会达到供需平衡点。总之，供需矛盾刺激技术进步，推动地震技术向开发领域渗透，促进开发地震的蓬勃发展，四维地震就是开发地震发展的最新产物。

#### 1.1.2.2 市场经济的产物

从市场经济的角度来看，一切经济活动都应该以谋求资产的最大增值为宗旨。油气开发也不例外，几乎所有的油公司，尤其是自营公司无一不在追求以更低的勘探开发成本，在更短的时间内获得更大的储量和更高的油气采收率，亦即追求更高的经济效益。为此，油公司必须充分而又合理地利用已有的资金、技术和人才资源，把握好勘探风险评价和油藏管理两大环节。

在勘探风险评价方面，地球物理技术已起到了众所周知的作用，尤其是地震技术已成为人们赖以降低勘探风险的关键。据报道，近十几年来由于地震技术的进步，特别是三维地震技术的广泛应用，使全球的油气探井成功率几乎提高了一倍，难怪人们赞誉它是油气勘探风险的消减器。地震技术帮助油气工业渡过了难关，同时也利用这个机遇使自身获得了极大的进步。

对石油工业上游来说，油气田开发是收回勘探成本并获得利润的必由之路。尽管开发活动的风险系数没有勘探高，但就现状而言，开发效果的改善通常比从事风险勘探更具经济意义，许多西方公司的实践已经证明了这一点。这就是说，科学高效地开发油气藏与尽可能降低油气勘探风险起码具有同等重要的意义。这就是为什么近些年来工业界掀起了一股“油藏管理热”的原因。加上目前发现新油田已变的越来越困难，而且勘探成本也越来越高。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。这正是四维地震可以发挥其潜力的领域。

#### 1.1.2.3 技术进步的产物

众所周知，地震资料最大的优点就是空间上是连续分布的，它所提供的井间信息是任何其他技术无法替代的。如果在地震观测值和油藏参数，诸如流体、压力或温度等参数之间有明确的联系的话，那么地震监测技术对于提供井间的横向信息有着巨大的潜力。这就是为什么地球物理要向油气开发及生产领域渗透的原因。近十年来，开发地震一直是一个热门研究领域，四维地震就是开发地震的 latest 技术代表。

回顾地震油藏描述技术的发展历史，它大约经历了以下四个阶段，一是 20 世纪 60 年代的“形态描述”阶段，主要针对构造油气藏，以小三角形测网、水平叠加、手工三维两步法偏移为主要方法；二是 70 年代的“储层描述”阶段，主要针对构造与岩性油藏，以道积分、叠后偏移为主要技术；三是 80 年代的“技术积累”阶段，这一时期发展了大量技术，如三维地震、地震反演、VSP、AVO、地震属性、相干体、叠前偏移、参数估算、模式识别、地震目标处理等，使得地震储层描述的能力大大加强，可以解决比较复杂油气藏地震描述问题；四是 90 年代的“动态监测”阶段，这个时期地震油藏描述技术在储层描述中的应用从静态向动态发展，面对的储层也越来越复杂，主要技术有 3D AVO、AVO 反演、全三维解释与可视化、四维、多波多分量、井间地震等。这些技术大多还处在试验研究与初期应用阶



段。由此可以清晰地看到地震油藏描述所要解决的主要目标的变化历程：即从构造到岩性，再到流体。由于流体是动态的，要描述它，必然需要多次采集，因此，可以说四维地震是油藏描述发展的必然结果。

从地震技术发展的角度来看，由二维到四维、由单分量到多分量、由叠后到叠前、由时间到深度、由各向同性到各向异性、由单一到综合、由声波到弹性波、由反射系数到岩石物性、由勘探到开发代表了当今地震技术的发展趋势，相信这也代表了今后地震油藏描述的发展方向。其中由二维到四维、由单分量到多分量、由叠后到叠前将是近期地震技术发展的主要方向。

### 1.1.3 四维地震的作用

在油藏管理中，监测油藏流体流动的现行方法，都仅限于在井筒中进行测量，如压力测试、采油速度、注入速度、油水比、油气比、示踪剂、生产测井、地层测试等。这些方法都要进行井间内插，远离井点时，其精度有限，且有很多限制。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，来预测井间油藏随时间发生了什么变化，这种新方法就是四维地震。概括起来，四维地震主要应用于：

(1) 寻找死油区，确定加密井和扩边井井位，以及为老井重新作业提供帮助。

(2) 监测注入流体，如水、蒸汽、CO<sub>2</sub>等流体的流动，以此为依据对注采关系进行调整，优化油藏管理。

具体来说，在老油田，加密井仍然是油公司实现产量目标的主要措施，由于死油区和（或）未发现圈闭的尺度往往比较小，因而采用四维地震可以更准确地布置加密井，减少井数，提高效益。在有利条件下，对采油过程中流体界面的移动进行地震监测，可用来修改开采方案。在强化采油过程中监测流体前缘的推进情况，了解流体扫过的地带，可以决定如何采取补救措施。再有就是监测压裂、预测渗透率各向异性、确定开发井位和注入井位等。

### 1.1.4 四维地震的研究内容

四维地震的研究内容主要包括：岩石物理与地震可行性研究、地震采集与可重复性评价、四维地震资料处理与解释方法研究、四维地震剩余油分布预测研究，以及四维地震经济可行性评价等内容。

可行性研究包括技术可行性与经济可行性。技术可行性实质上是研究油气开采过程中油藏变化引起的地震响应变化的可观测性，它包括岩石物理可行性与地震可行性，它回答什么样的油藏可以利用四维地震进行监测。岩石物理可行性重点研究油气藏生产/开采过程对地震响应的影响。这种影响来源于四个方面：油藏岩石骨架弹性特征、孔隙流体压缩系数差异、采油方式、油藏参数。地震可行性研究主要包括地震主频、平均分辨率、图像质量、可重复性、流体界面可视性等。最后通过对以上各个因素进行定量评分给出油气藏四维地震技术风险评价表。经济可行性研究的目的是要回答什么样的油藏值得使用四维地震。一般而言，四维地震投资要小于增加效益的 20%。

四维地震采集就是在同一地区不同的时间进行多次地震采集。为了更好地刻画不同时间油藏内部的变化，要求不同时间采集的资料具有高度可重复性，即在没有油藏变化的区域不同时间采集资料尽可能保持一致。因此，希望不同时间采集使用相同的观测系统、相同的采集设备和相同的采集参数。

四维地震资料处理的目的是克服采集所造成的“脚印”问题，同时尽可能使有关油藏动态变化所造成的地震变化得到最佳成像，强调互均化处理。

四维地震资料解释的目的是突出有关油藏动态变化所造成的地震变化，强调真实性与可视化。主要有：地震多属性分析与模式判别、地震反演、AVO 分析等。国外石油公司业已证明四维地震资料与油藏数值模拟以及动态生产资料的结合具有巨大的潜力。这是四维地震解决剩余油分布的关键途径。

#### 1.1.5 四维地震的实施步骤

四维地震的实施步骤大体上可分为三个阶段，即可行性研究阶段、先导试验阶段和大规模应用阶段。

四维地震的目的就是要突出由于油藏变化造成的地震差异，是一个很复杂的系统工程，难度很大。因此在项目实施前，必须进行技术风险分析，对实施的可行性进行认真评价。

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区块，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。20 世纪 90 年代中后期，四维地震监测的成功事例都集中在现场“先导试验”阶段。这一阶段着重进行地震资料可重复性的研究工作，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。

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周期，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。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。

#### 1.1.6 四维地震的意义

综观全球油气田的发现状况，大部分油气田都是在 1980 年以前发现的。1980 年以后找到的新油气田大体上是在两个地区，一是在地表条件恶劣和地下地质条件复杂的新区，二是在老油田内部和周边。美国近 50 年石油储量的增长状况（图 1-1-2）表明，新区发现和老区新层系找到的储量在总储量的增长中仅占一小部分，86% 的储量是通过老油田扩边和调整找到的，其中开发调整占有更大的比例。开发方案调整和老油田扩边是发现新储量的主要增长点，这既是对开发地震的技术需求，也是激励开发地震迅速发展的动力。开发地震除用于油藏静态描述，提高开发效果外，最新进展是监测油藏变化，加强油藏管理的四维地震技术。世界上约有 3/4 的油气储量无法用常规方法开采，需要采用某种增产措施强化开采。这就激励了四维地震的发展。

据 Stanford 大学 Nur 教授对美国油气资源的分析来看，全美 1994 年时总的石油资源量为  $5230 \times 10^8$  bbl，当时已产出  $1690 \times 10^8$  bbl，剩余的可采储量为  $265 \times 10^8$  bbl。留在地下资源中的  $1650 \times 10^8$  bbl 为不能流动的油无法采出，而剩下的  $1625 \times 10^8$  bbl 石油将是很有潜力可供开采的资源。它是剩余可采储量的六倍多，为累计采出石油量的 96%。看来，提高采收率确实具有很大的潜力。

专家们认为，目前世界油田平均采收率只达到 35% 左右，大部分成为死油区留于地下。

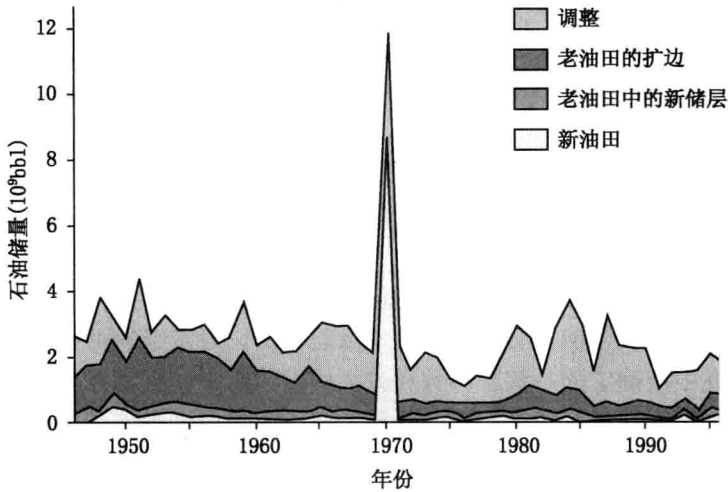


图 1-1-2 美国近 50 年石油储量增长示意图 (刘雯林, 2001)

三维地震曾经使石油工业界取得了少打井多采油的效果，三维使投资回报率提高了 25%~30%。他们认为四维地震有可能使投资回报率再提高 30%。

中国石油“九五”期间，靠新油田增加的探明石油储量占 42%，一多半新增探明石油储量都是在老油田中找到的。与美国相比，我们靠老油田增加储量的潜力还是非常大的。我国石油储量分布状况如图 1-1-3 所示，常规平均采收率仅有 33%，未波及的可动剩余油储量达 28%，不可动残余油储量占 39%。造成采收率偏低，剩余油和残余油储量如此之高的主要原因是，我国陆相湖盆储层存在的强的非均质性。在未波及的各类碎屑岩可动剩余油储量中，河流相砂岩油藏储量占到 51.5%，见图 1-1-3。这表明，我国碎屑岩油藏的调整挖潜能力是相当大的，关键是需要用开发地震技术，精细描述一个个砂体的分布，预测剩余油分布，建立油藏精细地质模型。

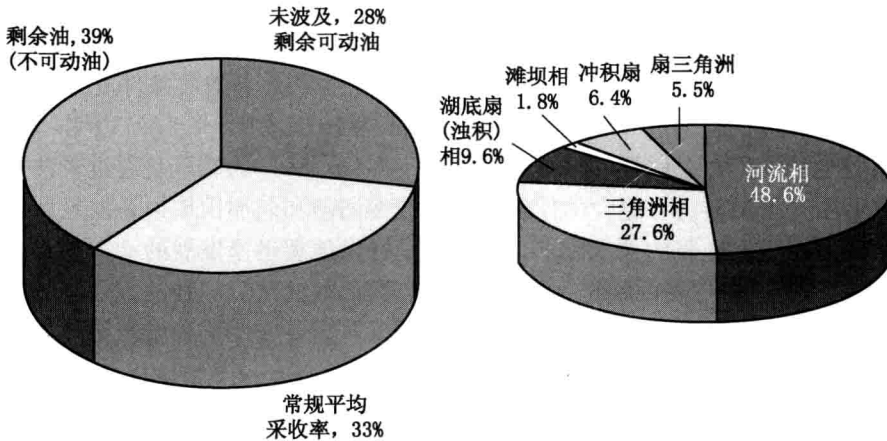


图 1-1-3 我国剩余储量分布图 (徐安娜, 1998)

从技术的角度讲，四维地震是地震勘探技术发展的重要里程碑。虽然在国外它已进入应用阶段，但在国内还处于试验与研究阶段，应该立即抓住机遇，加强这方面的研究，以缩小与西方发达国家的距离。同时也满足开发现状对技术的迫切需求。

## 1.2 国内外四维地震研究现状

四维地震的试验工作最早可追溯到 20 世纪 80 年代初期,但“4D Seismic”或“Time-lapse seismic”等与四维地震相关的专业词汇直到 20 世纪 90 年代初期才见诸于文献。为了监测注气开采的效果,ARCO 公司于 1982—1983 年在北得克萨斯州 Holt 储层上首次实施了四维地震项目, Greaves 等人(1987)记录了那次过程。那是一次火驱采油,在火驱采油前进行了小范围的 3D 采集,在火驱期间又重复采集一次,至火驱结束时再进行一次采集。不同时期地震图像之间的差异非常醒目,显示了四维地震在火驱中效果不凡。应该说,早期四维地震主要运用于追踪重油开采过程中的蒸汽,并先在加拿大与印度尼西亚见到了商业价值。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 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学实验研究,为四维地震的发展奠定了坚实的岩石物理基础。

进入 20 世纪 90 年代,四维地震得到了空前的发展。90 年代初期进行了大量的先导性实验,并于 1992—1995 年间在印度尼西亚 Duri 油田取得了巨大成功,它的成功表明了四维地震可以在油田开发中发挥重要的作用,促进了世界范围内四维地震研究工作的开展。然而这一时期人们并没有充分认识到四维地震的复杂性,大多数史例采用 70 年代和 90 年代初不同时间、不同观测系统条件下采集的常规三维数据,经过常规处理开展四维地震研究。随着研究的深入,人们开始认识到四维地震不像人们想象的那样简单。首先,如果对两次观测的数据只进行常规处理,那么由于储层动态变化造成的差异和地震观测条件和处理参数不同造成的差异在同一数量级上,这严重地影响四维地震的能力和效果。因此,在 1997—1999 年期间发表了不少四维地震问题分析和可行性研究的文章。这些研究大大提高了人们对四维地震的认识,促进了四维地震的健康发展。其后,人们已经不再限于问题的争论,而是进行了大量可行的、严格的实际野外采集和处理研究。期间,世界上大多数石油公司都相继开展了四维地震试验工作。仅 1997 年全球用于四维地震的费用就达到 5 亿美元,占当年地震勘探费用的 1/7。到 2005 年,全球四维地震费用达到 35 亿美元。并从单一的常规三维地面地震向 VSP、井间等观测方式延伸。值得指出的是,四维与多分量的结合是近年四维发展的一个主要趋势。由于纵、横波信息的联合使用可以大大地提升地震在岩性和流体描述上的能力,四维三分量将是未来地震观测的主要形式,流体描述和动态监测将是地震技术的归宿。

从四维地震的应用情况来看,海上应用较多,而且集中在北海和墨西哥湾,陆上应用较少。这主要是由于海上资料的信噪比高、噪声小,加上钻井费用高,经济效益也高。总之,四维地震已成为地震油藏监测领域的一个重要研究热点,它已从试验研究阶段步入应用阶段,已成为海上油气开采的重要技术之一,展示出了美好发展前景。

国内四维地震研究起步较晚,目前有针对性的四维地震采集在国内尚未见报道,但为了强化采油而进行的多次采集则有一些例子,如新疆、二连、辽河、胜利等。胜利油田于 1988 年首次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。在新疆红 1-1 先导区进行的采集试验结果令人满意,在注气井附近观察到了速度降低、振幅及波形变化、时滞现象。实际上,四维地震能否成功地达到预期的油藏监测目标主要取决于该油田是否具备四维地震的油藏条件和地震观测条件,即需要做前期可行性研究。另外,四维地震用于油藏监测并非简单地使用两次观测到地震资料,而是经过一系列配套的处理之后才能反映油藏

的变化。当然监测测量时间的把握可能是最重要的，这是国外花费了大量人力物力后获得的经验教训。

与此同时，许多专家学者对四维地震的理论方法进行了不同程度的研究。在岩石物理学研究方面，由国家自然科学基金资助的“八五”重大项目“陆相薄互层油储地球物理理论与方法”针对大庆油田进行了储层条件下岩石物理参数的测量与分析研究。此外，中国石油勘探开发研究院、胜利油田等单位分别针对胜利油田、塔里木盆地、济阳凹陷、准噶尔盆地等不同地区、不同种类的岩石进行了不同程度的岩石物理实验研究。中国石油大学（北京）进行了四维地震可行性方面的研究。中国地质大学（北京）进行了部分处理和解释研究。原石油地球物理勘探局对辽河和新疆油田的先导性实例进行了详细的问题分析和处理方法研究，提出许多有意义的四维地震资料处理的建议。冀东油田分公司对高 104-5 油田进行了四维地震资料处理，见到初步效果。中国石油勘探开发研究院在中国石油勘探与生产分公司的大力支持下，从 1999 年开始一直从事四维地震研究，在大量文献调研和水驱四维地震可行性研究的基础上，指出了未来水驱四维地震的研究方向，以及国内外水驱四维地震研究存在的盲区——没有全面考虑长期注水过程引起的各种变化对地震响应的影响。对这个盲区进行了综合研究，得到的结果有望改变长期以来人们对水驱四维地震可行性持悲观的态度。在可行性研究的同时，对高 29 断块油藏开展叠前和叠后四维地震资料处理研究。叠后互均化处理结果表明，四维地震可以监测水驱前沿。同时也指出，该区的小断层可能会对水驱起阻挡作用。

四维地震将成为未来地震的主要工作方式，成为重新认识现有油气藏，寻找剩余油分布区，监测油气田开采过程，进行开发方案调整，提高采收率，不断增加新储量的重要技术。2001 年出现的“仪器化油田”或“电子化油田”标志着四维地震技术的新进展。它们包含两层含义：（1）在地表、近地表和井中永久布置检波器不断进行地震监测，用于大尺度流体流动成像；（2）在注入井与生产井中永久布置仪器不断监测温度、压力与饱和度等的变化，用于刻画井附近小尺度流体流动；二者结合可以提供几乎实时的储层流体流动现状，优化开采。

四维地震有两个目的，其一是突出油藏的非均质性，寻找死油区，其二是监测强化采油过程。初期的四维地震主要在加拿大稠油蒸汽驱中进行试验，四维地震用于蒸汽驱监测具有很大的优势，主要原因在于孔隙流体的可压缩性高，储层温度和压力变化对地震响应影响大，但四维地震在蒸汽驱中的试验也历经多次反复，终于在印度尼西亚的 DURI 油田取得了巨大成功，成为四维地震走向工业应用最成功的工区之一。在该区利用四维地震可以清晰地反映蒸汽的推进过程，包括蒸汽波及的范围与厚度，储层中蒸汽的数量，蒸汽逃窜的可能位置，以及 37 种不同注采方式对应的蒸汽驱油模式。由于它的成功，还由于初期试验多集中于蒸汽驱，使人们觉得四维地震只能应用于蒸汽驱。然而，Lumey (2001) 的统计有助于改变这种认识，该统计表明：截止到 2000 年春，70% 的四维地震研究工区涉及油-水体系，这包括初采、自然水驱和注水开采，涉及蒸汽驱的仅占 15%（见图 1-2-1），这说明四维地震研究与应用的主要领域已从蒸汽驱向水驱转移，油水体系已成为四维地震的研究重点。

另一个认识是四维地震还处于试验研究阶段，实用价值不高，但是自 20 世纪 90 年代后期，世界各大油公司在北海进行了大量四维地震研究，并取得了很大的成功，深刻影响了北海的石油开采业。就 BP 公司而言，1995—1996 年才开始在北海进行四维地震研究与试验（5 个工区），到了 1997 年就步入商业性应用阶段，在 1997—2000 年的 3 年间就进行了 17 个工区的四维地震应用研究，2001 年又得到加速发展，仅上半年就进行了 5 个工区应用的研究，其热门程度可见一斑。

在北海进行的四维地震研究中有许多工区进行了两次以上的地震采集，有些甚至成了年度生产计划的一个重要组成部分，充分体现了四维地震在北海石油开采中的作用。同时，在这些研究工区中也不乏水驱四维地震成功的实例。例如，北海的 Foinaven 油田，1980 年以前采用二维地震技术，油气采收率为 25%~30%；1980—1996 年，由于三维地震技术的应用，油气采收率提高到 40%~50%；1996 年以来，在采用四维地震技术以后，油气采收率提高到 65%~75%，如图 1-2-2。

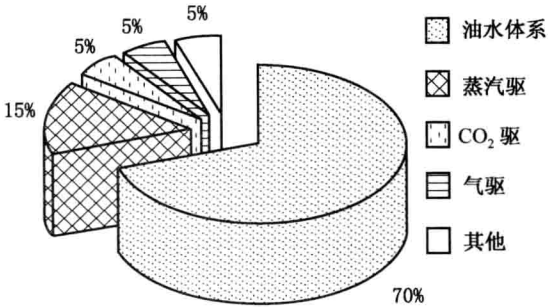


图 1-2-1 国外四维地震工区涉及的强化采油方式 (Lumley, 2001)

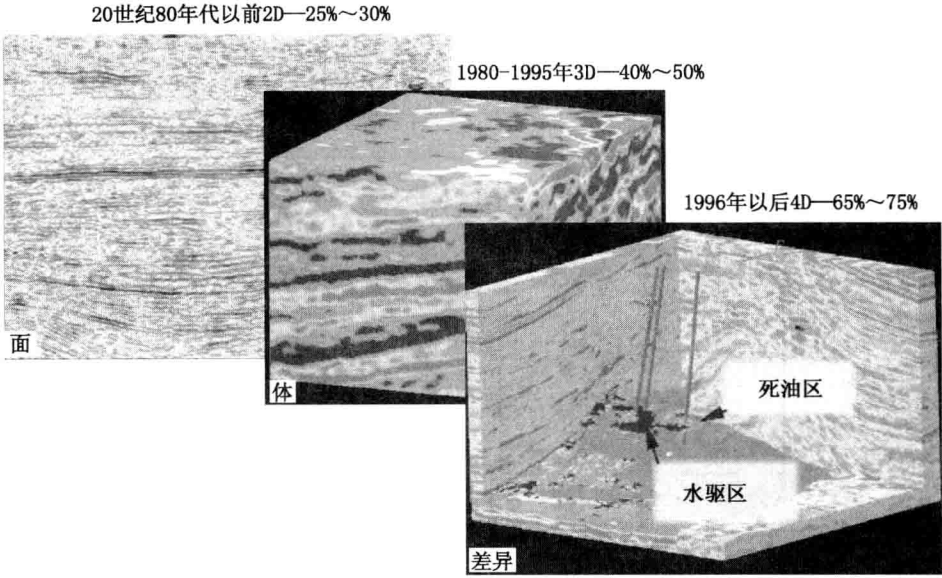


图 1-2-2 国外水驱油藏四维地震成功实例之一：Foinaven 油田 (Anderson, 1997)

再如北海的 Draugen 油田，该油田位于挪威海域，埋深 2000m，为一南北向延伸的小起伏背斜，长约 21km、宽 6km，最大垂直厚度 50m。主力油藏为砂岩油藏，孔隙度为 27%，净毛比为 97%，渗透率为 4D。油田于 1993 年投产，现平均产量为  $22.5 \times 10^4$  bbl/d，预计可持续生产到 2002 年以后。油藏管理措施是从南北方向向位于中央的生产井保持压力 (16.5MPa) 注水开采。存在的问题是：(1) 油藏通过内部分布的页岩层与水层分隔，但页岩层横向分布不清；(2) 油藏通过小断层的错断与水层相通，已建立的一些连通模式都与生产历史数据匹配，但对未来生产预测存在明显的差异，落实连通模式对未来生产影响巨大。为解决这些问题开展了四维地震研究，利用 1990 年与 1998 年两次观测系统基本一致的地震资料得到了以下结论 (图 1-2-3)：(1) 四维地震资料清楚地显示出注水前沿沿油田西侧从注水井向上倾方向移动，在油田北部，注水沿西南方向移动，且受断层引导，而以前都假设注水沿油田两侧移动；(2) 排除了与四维地震数据不符的北部有连通路程和断层连通模

式，证实了西部连通路程模式；(3) 根据西部连通路程模式，通过反演基础和监测数据体，成功地对地震差值进行了量化处理，结合油藏模型对等效油气藏高度 (EHC) 进行了定量估算 (EHC 是含油饱和度、孔隙度和油藏厚度的综合指标)，并通过四维地震资料与生产历史数据匹配得到最终模型，修改了以前的井位 (从图 1-2-3e 中白色三角形移到黑色三角形处)，新井产量达到 76775 bbl/d。平稳生产一年后，用新油藏模型进行预测，估计单纯通过加快生产速度使该项目 NPV 达到 8400 万美元，而四维地震监测项目的成本约 400 万美元。由于它的成功，决定在 2001 年进行第二次监测测量，指导加密井的部署。

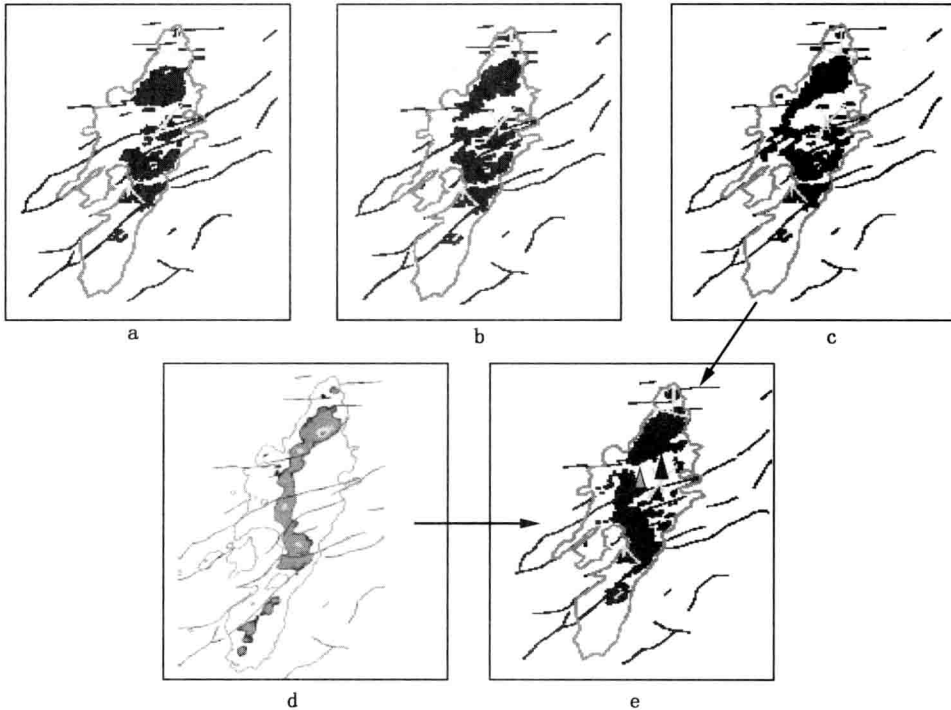


图 1-2-3 国外水驱油藏四维地震成功实例之二: Draugen 油田 (Koster, 2000)  
 a—北部有连通路程, 与 4D 不符; b—通过断层连通, 与 4D 不符; c—西部有连通路程, 与 4D 相符;  
 d—四维地震监测的实际结果; e—地震与生产历史数据匹配后的最终模型

Gannet - C 油田位于北海中部地堑的边缘, 有一个围绕中心盐丘的环形圈闭, 在气顶下方有 120 m 厚的油环。这种刺穿盐丘沉积后和同步隆起形成了复杂的辐射状断裂模式, 这些断层的封闭能力尚未确定。该油田有八口水平生产井穿过油藏中部进行开发, 通过一口注气井结合蓄水层向油田提供压力支持。油藏流动模拟结果预测采收率为 46%。该油田于 1995 年开始生产, 至今已有 86% 的可采原油产出, 也就是说 Gannet - C 油田的开采寿命已接近尾声。四维地震监测的可行性研究表明, 因生产活动产生的饱和度变化导致油藏顶面地震振幅下降 25%, 而且原始油水边界的振幅也有明显下降。预计这些变化能够在指定均方根差异率的四维地震数据上检测到。经济评估结果表明, 在 Gannet - C 油田进行四维地震监测的信息价值、成功概率和投资效益综合指标非常高。在该油田进行四维地震监测的主要目的是确定波及断块与波及范围。四维地震实施结果达到了预期的目的, 并获得以下认识: (1) 在构造的南部和东部两条断层限定的部分没有发现振幅变化, 结合动、静态油藏模型后

认为，在生产期间断层对这部分区域起到封闭作用形成死油区（见图 1-2-4），估计这些断块拥有  $1500 \times 10^4 \text{ bbl}$  原油储量（ $500 \times 10^4 \text{ bbl}$  经济可采储量）；（2）在南部曾经被认为是含水区的地方出现明显的振幅差异，由于那里没有明显的压力变化，因此认为是饱和度变化产生的这些差异；（3）对注气井周围的振幅异常解释结果表明，注入的气体以离散的方式进入含油区。最后根据地震资料建立新的动、静态油藏模型，这些模型将被迭代修改直到与获得的四维地震数据和生产数据相符为止。其目的是完善在一个未波及断块进行加密井的钻探工作，这口井被视为四维地震监测项目的直接结果，它将带来 2200 万美元的净现值（NPV），而地震测量的成本约为 280 万美元。

当然，在其他地区也有水驱四维地震成功的例子，如尼日尼亚海上的 Meren 油田。该油田由 5 个断块组成，具有 10~12 个含油砂层，埋深为 5300~9000ft。油田采用注水开采，1988 年油田正式投入生产。基础三维地震为 1987 年采集，面元为  $12.5\text{m} \times 50\text{m}$ ，基础观测采集于 1996 年，面元为  $25\text{m} \times 25\text{m}$ 。经过互均化处理后的两次地震资料的可重复性较好。预期油水界面平滑、均匀向上倾方向移动，但实际上水的推进过程要复杂得多，如图 1-2-5。南部注水井顺狭窄高渗透河道沿西北方向推进，该河道受未被识别的沿岸砂岩障壁岛（coastal sand barrier）沉积特征控制，该河道在尺度上如此小以至用现有 26 口井的资料无法预测；南部注水井还向西通过原来认为是封闭的断层向西推进，很好地解释了邻区异常压力存在的原因，同时断层封堵性也证实了断层两侧存在一小段砂岩与砂岩接触。通过四维

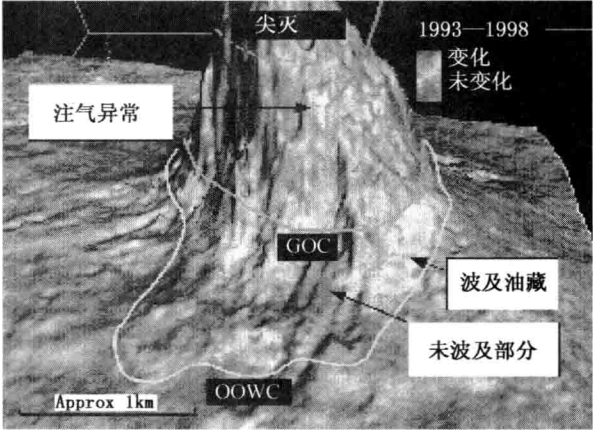


图 1-2-4 国外水驱油藏四维地震成功实例之三：Gannet-c 油田（Koster, 2000）

地震监测项目，该河道在尺度上如此小以至用现有 26 口井的资料无法预测；南部注水井还向西通过原来认为是封闭的断层向西推进，很好地解释了邻区异常压力存在的原因，同时断层封堵性也证实了断层两侧存在一小段砂岩与砂岩接触。通过四维

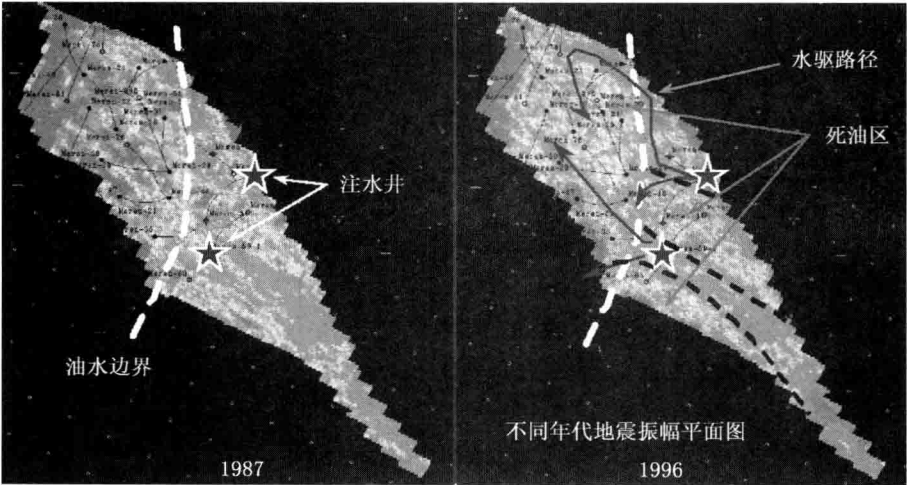


图 1-2-5 国外水驱油藏四维地震成功实例之四：Meren 油田（Lumley, 2001）  
见书后彩图



地震发现了多个死油区，死油区是由一些以前没有发现的小的下滑断层阻挡形成的，这些小断层尽管存在砂岩—砂岩衔接，但由于断面涂抹了泥岩而起到分隔的作用。仅在南部发现的死油区就找到了  $0.6 \times 10^8$  bbl 剩余油，价值 6 亿美元，而 4D 投资仅为 5 百万美元，不到增加效益的 1%。可见，四维地震不但在蒸汽驱中取得很大的成功，而且在油水体系的监测中也发挥了越来越重要的作用。

国内水驱四维地震研究非常薄弱。除了中国石油勘探开发研究院和冀东油田分公司在高尚堡地区，以及大庆油田分公司在太平屯地区进行过一些水驱四维地震研究外，没有见到其他的报道。在高尚堡地区进行的四维地震资料互均化处理见到了一些效果，但在综合研究与开发动态资料结合上有待加强。云美厚等人对大庆地区水驱四维地震的岩石物理可行性进行了大量研究，但在应用上缺乏力度。这种研究现状与开发现状对技术的迫切需求是不相适应的。

## 1.3 国内四维地震研究的资料基础

### 1.3.1 二次三维采集现状调研

渤海湾地区三维地震采集始于 1983 年，早期的三维采集以构造圈闭为勘查目标，其特点是：激发方式单一，使得中深层地震资料频带窄，能量弱；观测方式简单，使得方位角窄，炮检距分布不均匀，覆盖次数低，面元大，CMP 属性差，资料信噪比低，横向分辨率低，严重影响中深层资料的品质；排列长度短，不能满足中深层及高角度断层成像的需求。此外，地震也已不再限于构造圈闭的评价，而已深入到储层岩性、流体静态描述与动态描述中。因此，早期采集的三维资料显然不能满足当前勘探开发对地震资料的要求，虽经多次处理，资料品质仍然得不到提高，不能满足储层表征的需要。高精度二次三维地震采集是老区挖潜与新领域拓展的有效途径。此外，随着仪器设备的进步（如道数与动态范围增加等），采集方法的完善（如精细表层调查，变井深激发，合理的观测系统设计，小面元、宽方位和长排列以及管理水平的提高）大大改善了资料的品质。

二次三维采集是保证渤海湾油气勘探可持续发展的重大技术决策，其目的是采用先进、适用的地震精细采集技术，最大限度地提升渤海湾探区地震资料品质，为精细构造勘探、岩性勘探、立体勘探提供优质钻探圈闭，多找储量。为做好二次采集，推广应用了八项成熟技术：

- (1) 增加覆盖次数（不低于 60 次）；
- (2) 加大排列长度；
- (3) 采用先进的大道数地震仪接收；
- (4) 优化观测系统，采用大型障碍区特观设计技术；
- (5) 小面元、小道距；
- (6) 最佳岩性、多井、小药量组合激发技术；
- (7) 低噪声接收技术，如三级风以上不施工；
- (8) 量化质量监控等。

通过这些措施，地震资料质量得到了大幅度提高。如在辽河油田，通过精细二次三维采集和处理，资料品质上了一个台阶，信噪比大大提高，主频达到 65Hz（图 1-3-1），落实了曙光潜山。冀东油田二次三维采集提高了中深层资料的品质，重新认识了柳赞断层，为岩性勘探奠定了资料基础。