

四维地震储层监测与表征

[美] 卡尔弗特·罗德尼 著
谢玉洪 周家雄 李添才 译
谢玉洪 陈志宏 陈 瑜 校



石油工业出版社

四维地震储层监测与表征

[美] 卡尔弗特·罗德尼 著

谢玉洪 周家雄 李添才 译

谢玉洪 陈志宏 陈 瑜 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从四维地震应用实例出发,介绍了四维地震的研究对象、适用的油藏类型、应用效果和范围。全书主要围绕时移地震与常规地震的异同,着重介绍了时移地震资料采集的各种关键问题及解决方案、各种用于四维监测的地震资料采集方法和技术的优势和局限性;时移地震资料处理过程中最关键的时移地震求差处理、处理过程中的质控与评价方法;四维地震资料在综合解释中的应用;四维地震监测技术的应用前景和发展方向。

本书是地球物理勘探科研人员的重要参考书,也是油藏工程师必备的指导书。

图书在版编目(CIP)数据

四维地震储层监测与表征/(美)卡尔弗特·罗德尼著;谢玉洪,周家雄,李添才译.
北京:石油工业出版社,2015.6

书名原文:Insights and methods for 4D reservoir monitoring and characterization
ISBN 978-7-5021-8408-7

I. 四…

II. ①罗…②谢…③周…④李…

III. 储集层-地震勘探-研究

IV. P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第064840号

Translation from the English language edition: “Insights and Methods for 4D Reservoir Monitoring and Characterization” by Rodney Calvert. Society of Exploration Geophysicists holds the worldwide copyright of the Work.

Copyright© 2005 SEG, All Rights Reserved.

The work is available in English for purchase from SEG.

本书经SEG授权石油工业出版社有限公司翻译出版。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2011-7791

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

编辑部:(010) 64523595

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷

880×1230毫米 开本:1/16 印张:8.25

字数:230千字

定价:80.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前言

时移地震是一项现代油气藏动态管理手段，产生于 20 世纪 70 年代中期，90 年代得到迅速发展。它利用在油气田获得的地震资料，研究由油气田开发导致的流体场、压力场等一系列变化。目前，时移地震已逐渐发展成为一种油气藏监测工具，发展潜力巨大，已在全世界许多油气田成功应用。时移地震研究的目标不再局限于储层，可以在识别有效储层的基础上，通过研究由注采等油气开发活动引起的油气藏储盖层的岩石运动学和动力学变化，推断储层流体场的变化，并根据这些变化调整油气田开采方案、优化油藏管理策略、提高油气采收率。

时移地震资料解释所应用的关键技术与一般意义上的三维地震资料解释技术没有太大差别，但由于引起油气藏储盖层岩石运动学和动力学特性变化的原因极其复杂，且这些变化不仅局限于油气开发活动，可以分为与油藏变化相关的变化和与油藏变化无关的变化。因此，在模拟和解释过程中，要追溯变化的起因，不仅要识别地震资料采集因素，还要考虑储盖层的压实、流动屏障、流体通道和流体本身等因素。

目前，时移地震技术在其运用过程中还受到诸多条件的限制。首先是资料采集的可重复性难以保证，主要表现为激发、接收环境难以保持一致，背景噪声的变化不可预测等。其次，时移地震资料的处理也存在诸多需要完善的地方，主要表现在：一是时移地震所需的岩石地球物理信号差异量级难以达到，开采和驱替引起的岩石地球物理特性变化很微弱，低于岩石物理实验的背景噪声造成时移信号识别困难；二是注入或采出的流体受储层非均质性影响；冲刷效果不够理想，所造成的孔隙压力增加或减少，没能在冲刷带引起足够的岩石地球物理特性变化，最后，时移地震的成本和频率仍是制约其广泛应用的重要因素。为了改善时移地震的可重复性，地球物理工作人员采取了一些措施：在采集阶段，通过埋置长期固定式检波器、优化设计、提高海上拖缆定位精度，以及选择检波器的接收环境和震源的激发条件等措施来提高资料采集条件的可重复性；在处理阶段，有针对性地提高数据的可重复性。时移地震资料的定量分析手段日趋成熟，时移地震级数正向着定量化和精细化方向发展。

四维地震是时移地震的重要组成部分，又被称为三维时移地震技术，可通过定时监测了解油气储层在三维空间和时间上的动态特征。随着全球能源需求的大幅增加，四维地震技术正在突飞猛进地发展。

《四维地震储层监测与表征》是一部关于四维地震技术的经典之作，该书从时移地震的历史沿革、四维地震理论基础、数据采集和分析及应用实例等几个方面做了系统阐述，是地球物理学家的参考书，也是油藏工程师必备的指导书。



2009 年 5 月 18 日于湛江

目 录

1 绪言	(1)
1.1 四维地震储层监测原理及其重要性	(1)
1.2 动因	(1)
1.3 实时环境因素和安全因素	(2)
1.4 四维地震监测的多学科特性	(2)
1.5 地球物理学家的难题	(3)
1.6 本书内容要点	(3)
2 四维地震监测实例	(4)
2.1 Draugen 注水油田	(4)
2.2 其他注水实例	(8)
2.2.1 Gannet C 断层分隔	(8)
2.2.2 Gannet C 流体水平监测与管理	(8)
2.2.3 Gannet D 流动单元划分	(8)
2.2.4 定位死油区	(9)
2.2.5 识别水窜问题	(10)
2.2.6 监测碳酸盐岩储层	(11)
2.3 监测压力变化	(12)
2.3.1 观测经过泡点的油田	(12)
2.3.2 观测注水井周围的分隔	(13)
2.3.3 观测压力衰竭效应	(14)
2.4 小结	(15)
3 四维地震监测的目标、模拟与测量	(16)
3.1 判定不确定性	(16)
3.2 四维地震可行性模拟	(18)
3.2.1 流体变化	(19)
3.2.2 压力响应	(23)
3.3 四维地震测量表征的参数	(27)
3.3.1 差值数据	(27)
3.3.2 吸收参数变化	(29)
3.4 战略博弈	(30)
3.5 小结	(32)
4 四维地震可重复性及非均一性上覆地层引起的失真与噪声	(33)
4.1 绪言	(33)
4.2 不可重复性度量 (NRMS)	(33)

4.3	地震道不可重复性与炮点检波点排布不可重复性	(35)
4.4	方差图模拟	(38)
4.5	叠加响应	(43)
4.6	通过盖层非均质性解释方差图	(45)
4.7	深度相关性	(53)
4.8	非均质地层下的四维地震监测	(55)
5	四维地震资料采集	(58)
5.1	绪言	(58)
5.2	确定资料采集需求	(58)
5.2.1	观测系统重复度参数	(58)
5.2.2	测量优于估计	(60)
5.3	海上拖缆采集	(61)
5.3.1	拖缆采集的一些问题	(61)
5.3.2	双船激发	(62)
5.3.3	拖缆采集的一些禁忌	(63)
5.4	固定震源—检波器采集	(64)
5.5	固定检波器采集	(66)
5.5.1	固定检波器采集的震源	(66)
5.5.2	固定海底电缆监测	(66)
5.5.3	海底传感器 (OBS) 节点	(69)
5.5.4	成功应用	(71)
5.6	四维 VSP 监测	(72)
5.7	陆上地震资料采集	(72)
5.8	虚拟震源	(72)
5.9	小结	(78)
6	通过数据处理有效求取四维差异	(80)
6.1	四维地震数据处理的基本原则	(80)
6.1.1	定位及选道	(81)
6.1.2	标准勘探	(81)
6.1.3	道均衡	(82)
6.2	数据实例	(82)
6.3	海上地震数据处理	(90)
6.3.1	水层走时误差的不可重复性	(90)
6.3.2	表层多次波的不可重复性	(91)
6.4	小结	(101)
7	从四维地震监测到建模	(103)
7.1	历史拟合的普遍性	(103)
7.2	修正流线模型	(106)
7.3	油田生产优化	(111)
7.4	真的需要整合油藏模型吗	(111)

7.5 小结 (112)

8 四维地震监测技术的发展 (113)

8.1 四维地震的地位能否保持 (113)

8.2 四维地震监测技术将如何变化 (113)

8.3 四维地震监测是否会改变整个行业 (114)

8.4 其他四维地震监测手段 (118)

8.4.1 微震 (118)

8.4.2 重力变化 (118)

8.4.3 电磁监测 (118)

8.4.4 通过测量地表沉降监测储层压实 (119)

8.4.5 沿井温度监测 (119)

8.4.6 综合利用各项技术 (119)

8.5 小结 (119)

结语 (120)

参考文献 (122)

1 绪 言

沙特阿拉伯有句谚语说，既然骆驼已经把头伸进了帐篷，难道它还甘心把身子留在外面？本书就是关于这样两个“骆驼”的：一个是成像处理后的四维地震数据，它是非常受储层管理这一“帐篷”所欢迎的“骆驼”；另一个是财政预算“骆驼”，它迫使自己寻找到地质科学的“帐篷”以求吃饱。这两个“骆驼”不满足于目前的预测，想一口气吃掉目前所有的和那些可以定量预测到的食物。

本书的目的就是可以同时帮助这两个“骆驼”。

1.1 四维地震储层监测原理及其重要性

四维地震储层监测可以让我们适时了解在三维空间和时间上的储层动态性质，这一点非常重要。目前，全球原油剩余探明储量正在快速地被人类消耗，同时，发现常规油气藏的难度也越来越大。因此，对于业界和消费者来说，可靠、高效地开发剩余油气是一项非常紧迫的任务。

如果不了解储层的性质，就无法以最佳方式来开采。最佳方式包括安全性、环境影响、采收率、适时性，当然还要考虑成本和效益。四维地震主要提供储层动态变化及这些变化所在位置的相关数据。我们需要尽快与相关专家合作，从四维地震监测中获益。虽然我们不了解最终采收率会提高多少，但事实证明，四维地震是可行的。

图 1-1 展示了四维地震方法的简单物理学原理。如果在油气田开发之前及开发过程中实施地震采集，就可以预测储层的变化。当油气被水驱替且压力发生变化时，地震速度及储层密度也随之改变。从四维地震研究中可以看到这些变化的效果，并且可以识别出正在发生变化的储层位置。

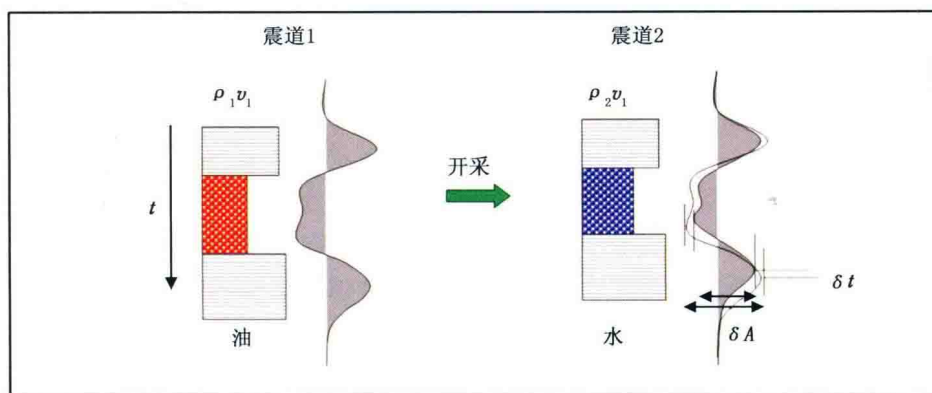


图 1-1 四维地震方法的地球物理学原理图

由于开采造成的储层纵横波速度和密度的变化，给出的相应变化表现为地震道上的振幅和计时的变化

1.2 动因

四维地震储层监测是一项新技术，发展迅速。对于一本书和一个培训教程来说，四维地震无疑是很好但同时也很难的课题。此外，当四维地震监测能够持续创造价值并且获得更好的结果时，对储层

动态变化也会有全新的认识。如四维地震监测本身的进展一样，越早地开始四维地震工作，收获就会越多，对储层的认识也就越深入。

本书介绍了四维地震储层监测技术的发展过程，目的是让读者了解其历史，认识到目前需要解决的关键问题的未知性、可能性与创新性等。四维地震监测类似于新闻业——收集信息，了解其意义，思考其影响，而后发表，从而引起人们的关注。

1.3 实时环境因素和安全因素

研究四维技术的应用之前，让我们先针对安全因素了解四维地震信息的用途。通过研究安全性和环境因素，就可以达到这一目的。

研究一个油田的内部井喷，由于此时流体已不再贮存在密封的储层中，可能引起重大损失和污染。在这种非常严重的情况下，尤其应当考虑到四维地震的作用，其对于收集流体正在运移的位置、设置解救井的位置及何时稳定局面等信息来说是一种理想的手段。

无论是二氧化碳封存还是提高经济采收率（EOR），通过加压将流体注入地下时都会出现相同的情况。基于安全和经济因素的考虑，应该跟踪注入流体的轨迹。Arts（2002）介绍的在 Sleipner 油田的二氧化碳隔离的实例图片很好地说明了这一点。图 1-2 标明了当二氧化碳经过地层时的振幅；同时，由于速度降低所造成的时延增加也很明显。

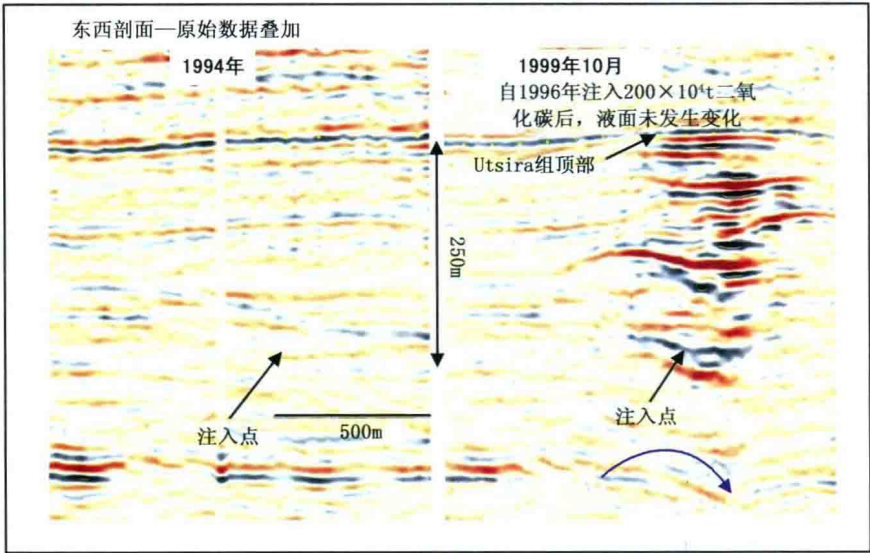


图 1-2 地震监测 Sleipner 油田的二氧化碳注入情况

在这里可以看到在 Sleipner 油田附近注入二氧化碳的影响，模拟了内部天然气喷出时所能观测到的现象。四维地震监测应当考虑任何储层封闭造成的危险及损失

1.4 四维地震监测的多学科特性

四维地震监测综合了多个学科的研究。这对于成功的四维设计、实施和解释是非常必要的，各学科间影响的结果使得每个参与四维地震监测工作的研究者都受到了极大的挑战，并从中受益。

正因为如此，地球物理学家开阔了视野，并且了解到更多关于地层和油层的地质属性方面的知识。储层建模者发现，井间流动性很不确定，且不能随意改变，如果没有流动储层测量的约束，建模

者的预测结果可能与实际情况相差甚远。岩石物理学家深知，井眼和岩心的岩性测量代表不了全部储层的岩性特征。油田管理者试图通过购买可靠的数据去掌握油田实际发生的情况，从而获得丰厚回报。因此，所有参与者都将了解到彼此学科所具有的优势和局限性。

本书的目的之一是让那些不了解四维地震监测但对此感兴趣的人懂得四维地震监测的本质。书中将通过大量图片更加直观地进行表述，虽然不能保证解决所有实际问题，但是会试着解释这些以找出解决办法，同时也希望能有更多人对此提出建议。

多学科间的合作最重要的一点就是，认识到各自的弱点，并设法相互弥补。

1.5 地球物理学家的难题

目前，地震勘探还存在诸多难以解决的问题，因此在实际操作中会出错。例如，利用其无法矫正非均质覆盖层产生的畸变。本书的主题是四维地震监测，阐述了地球物理学家如何重复错误，最终把它们消除。基本公式如下：

$$(\text{重复数据} + \text{误差} 2) - (\text{基本数据} + \text{误差} 1) = \text{小的开采变化}$$

如果不能使得误差 1 更接近误差 2，并使其差值小于期待的小开采变化，四维地震监测的结果就是错误的。只有仔细地重复上述误差，才能解决这些难题，使得误差 1 和误差 2 的差值接近于零。

重复系统误差使四维地震监测成为一项灵敏的差异分析技术。可通过控制地震参数判断地下产油层的细微变化。

1.6 本书内容要点

第 2 章给出了实际应用中一些四维地震监测的例子，这可以很好地说明当前四维地震监测的发展情况。

第 3 章验证了通过四维地震监测解决的一些问题：储层的不确定性是什么？如何才能解决这些问题？本章将讨论可行性模拟及如何评价四维地震监测的正确性。

第 4 章研究了可重复性问题。在本章中可以看到：对给定的四维灵敏度来说，需要达到怎样的要求才能判别出微小的差别？为什么常规勘探不能够给出一致的结果？结合给定的可重复性，对实施四维地震勘探的要求是什么？

第 5 章介绍了可用于达到所需可重复性的采集方法。

第 6 章介绍了检验地震资料处理必备的流程，用在数据中保护和提取四维地震信息。

第 7 章介绍了如何将四维时变测量用于更新储层模型，以得到更好的预测结果。我们将尽可能去了解物理机制，并研究非唯一性问题：利用四维地震监测技术能得到完美的流体模型吗？

第 8 章简要地预测了四维地震监测对油气能源工业的影响，并展望了其发展前景。

本书的结语部分，从四维地震监测所需的控制训练的学习和工作经验中得出了一些观测结果和思考，为今后工作的开展奠定了基础。

2 四维地震监测实例

在更深入地研究如何完善四维地震监测之前，先从实际操作的结果来看一看四维地震监测能为我们做些什么。

2.1 Draugen 注水油田

位于挪威海边的 Draugen 油田是注水开发油田，图 2-1 列出了该油田的性质和主要参数。油田内的 Rogn 储层为优质的渗透砂岩储层。在油田开采前开展了三维地震勘探工作，通过构建的三维储层模型将油井数据与三维地震数据结合在一起，如图 2-2 所示。采用南北方向注水的方法维持储层压力，并在储层中心区域进行开采。到 1998 年，油田产量开始呈现下滑趋势，因此部署更多油井成为当务之急。

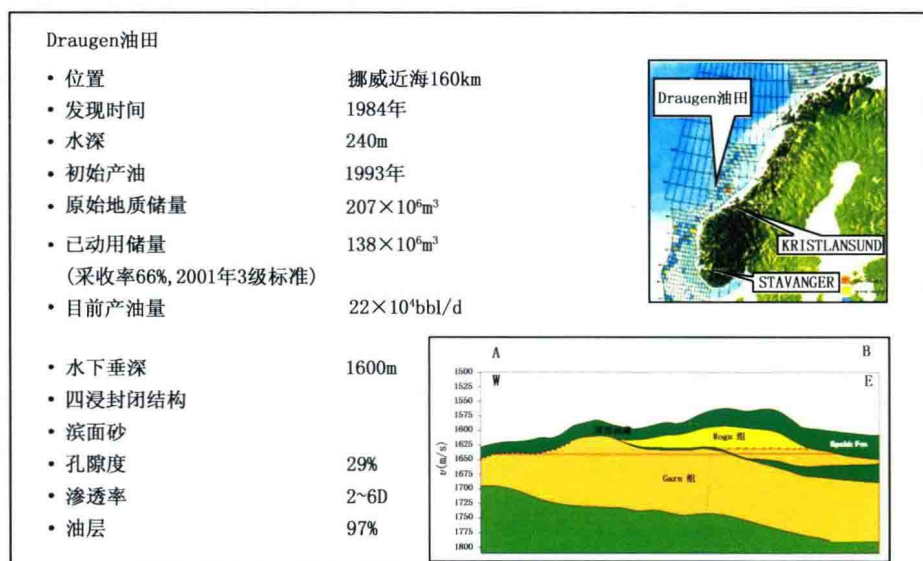


图 2-1 挪威 Draugen 油田

挪威的 Draugen 油田是四维地震技术应用的一个典型实例。

尽管该油田的储层纯度很高，且结构简单、渗透率高，但在此开展四维地震监测仍然具有很高的价值

为了确定一口新油井的位置，根据地下含水层通过断层时的连通性和流动方式，运用多种假设，尝试了多个储层模拟方案。分析师发现，为了充分利用所有与开采历史相关的数据，可以设计出许多与之相匹配的模型。然而，多个模拟结果所给出的不确定性使得资产小组决定尝试利用四维地震勘探技术，看对识别不同模型是否有帮助。在实施可行性模拟之后，分析师发现，该储层由于油水替换所导致的阻抗变化是显而易见的。

一名优秀的地球物理学家知道如何用现代化的多拖缆船复制出原始的双船射线路径。为了进行对比，对原始勘探和重复勘探的数据一同进行了处理。图 2-3 包含了初始地震剖面、重复地震剖面 and 两者的差值剖面，对固定的地质属性进行区分，同时也给出了由于开采导致的波阻抗变化的具体位置。

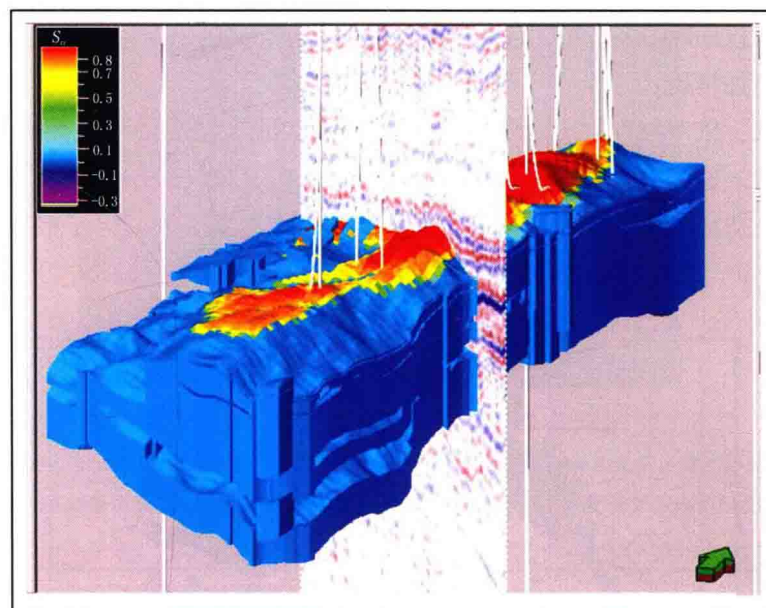


图 2-2 Draugen 储层模型图

Draugen 储层模型用来突出三维地震构造、振幅细节、来自测井的数据和岩石性质。

从石油位置、结构及孔隙度、密度、声波速度和压力等静态储层属性来看，这是一个比较好的模型

实际上，在差值剖面上，类似小断层这样的储层细节比在任何三维地震剖面上都清晰。

有时，储层位于强反射界面的干涉区，因此，很难在三维剖面上看到。然而，在重复性良好的四维地震勘探中去除能量较强且一致的信号和噪声，剖面上的储层就会出现变化。因此，一旦排除具有一致性的地质特征，储层研究就变得较为简单。当然，还需要地质学家帮助解释差值的地质含义，并且不断修正模型。

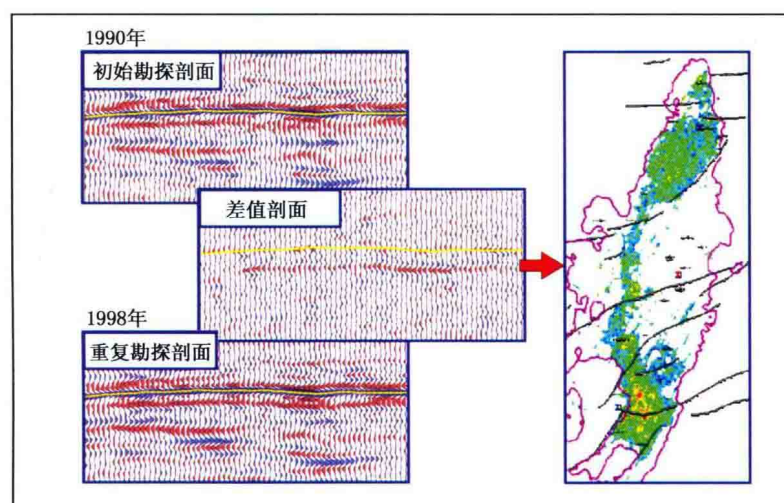


图 2-3 时移地震剖面图

利用时移地震可观测水驱动态。根据初始勘探与重复勘探数据差值，可消除不变的地质情况和可重复的噪声，从而看到注水引起储层变化的位置。根据储层差值的振幅图，可了解注水情况

图 2-3 右侧是从差值同相轴上拾取的振幅图，它显示了油水替换的位置，也证实了前面所有的模拟结果都是错误的。可以看出，从南北方向注入的水正在起作用，而储层东部却没有地下含水层支撑，这一点与模型有所不同。同时，南部断层根本没有遮挡，而北部沿北东—西南走向的断层可能遮

挡断层。另外，西部的注水也使最初设计的钻井位置很快被水淹没。

四维地震勘探可以即时分析储层的变化，同时通过远离井位的注水情况解决了不确定性问题。因此，储层模型变得更加精确。

为便于成功开采，依照新的储层模型将井位定位于东北方向，结果证明，这是个创纪录的优产井，月产油 75000bbl，这一结果使得四维地震储层监测更有意义。利用四维地震储层监测技术不仅可以避免因错误开发所造成的浪费，还可以提高油田的采收率。图 2-4 展示了根据新模型所做的预测与调整后的井位分布。

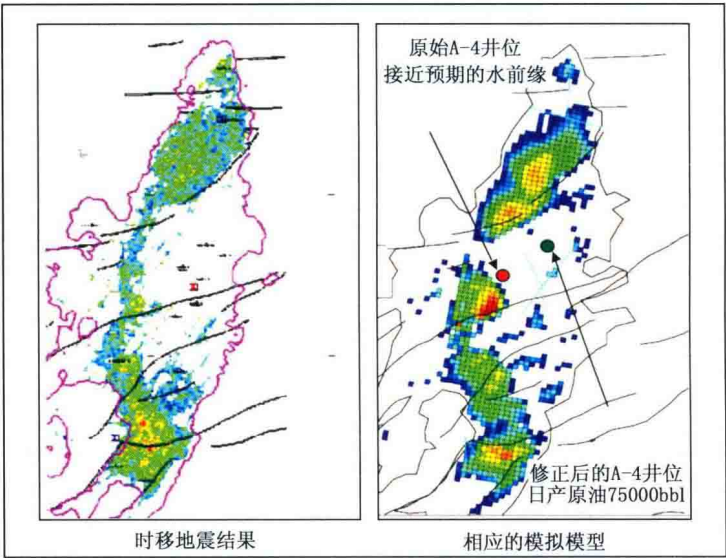


图 2-4 根据修正模型所做的预测及调整后的井位分布图

四维地震解释和修正模型显示了依据前期勘探数据设计的井位已遭水侵，因此，重新定位从北部来改进排水。该井日产油高达 75000bbl

目前，研究虽然不能预测油田将会发生怎样的变化，但是，对其进行监测还是很有必要的。目前尚不能够可靠地遥感远离井的储层渗透率。由于孔隙度直接与岩石速度和密度相关，为储层的主要地震响应控制因素，并且为我们提供了依据地震数据绘制储层孔隙度图的方法。然而，渗透率与可测量的参数仅有间接的关系。

同一储层的孔隙度不同，且总体积固定，但是，同一储层的渗透率却依流动路径具有可变性，可能会有多个数量级的变化。任意两个测量点之间的渗透率可能变化显著，这完全取决于点的选取。看一下图 2-5，就可以想像到垂直渗透率与水平渗透率是不同的，而且图中的小断层是可以封堵的。因此，油井动态取决于井位在隐蔽小断层的位置。

Draugen 研究小组成员明白，四维地震监测能够跟踪注水，他们明智地选择了要继续开展这一监测项目。尽管已有与四维地震数据相匹配的修正模型，且该模型提供的信息比从开采数据中获得的信息具有更好的约束性，仍有提升的空间。

2001 年，油田又一次实施了重复采集，这次采集比初始四维项目更容易完成和处理，并且很快得到了结果，如图 2-6 所示。差值剖面再一次清晰地显示了注水效果及其分布。

从图 2-7 中可以看到，新测量的注水情况和那些从修正模型中预测出的结果是不同的。由于从初始四维项目中获得了经过粗略校正的参数，因此，之前的模型也是正确的。然而，有些重要的细节部分是不同的，北部的注水要比南部快得多。但是研究小组成员更倾向排水的对称性，因此加速了南部的注水。另外，还可能储层有储层遗漏的风险。在新的四维地震数据基础上，研究小组快速进行了校正，



图 2-5 储层剖面图

储层非均一性控制着渗透率。图中接近手指部分显示，即便是在好的砂岩剖面上，哪怕是微小的障碍也可能中断流体的流动。即使是大的渗透率变化在地震测线上也是看不到的，也不能内插于井间。要了解储层流体如何流动，必须进行测量

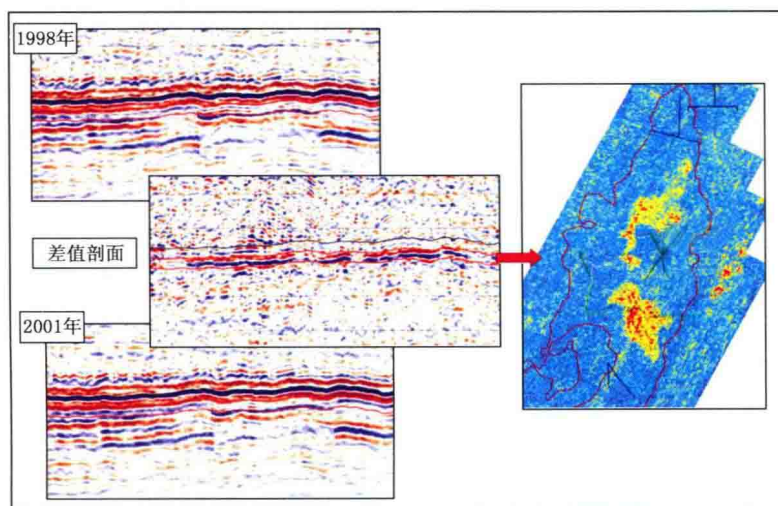


图 2-6 1998 年与 2001 年勘探对比图

由于 Draugen 油田初始四维地震勘探成功，因此进行了重复勘探，以更新注水的进度

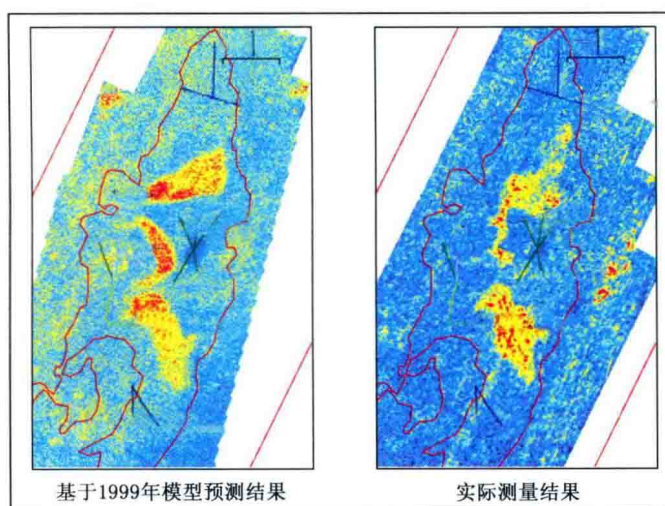


图 2-7 注水情况对比图

利用第二次监测数据，可以对比修正模型预测结果和后续的实际测量结果。前者的主要特点基本正确，但细节上仍存在误差。若不进行校正，可能会丢掉庞大的储量数据。为达到对称扫描，南部的开采要加速，而北部则需放缓

模型再次被修改。同时，为了使模型更适合三次地震处理，采用了更为复杂的匹配技术。最终证实，新的四维地震勘探是合理的。

2.2 其他注水实例

北海 Gannet 油田的研究小组很好地利用了四维地震监测信息，通过合理布井并控制储层流体流动来提高采收率。

2.2.1 Gannet C 断层分隔

图 2-8 展示了如何利用四维数据判断出盐丘油田是否有断层分隔。图的左侧是基于三维地震监测数据所绘制的断层细节图。关键在于是否所有断块都在衰竭。为此，实施了重复采集并进行了四维分析。从储层角度可以清楚地看出开采后的振幅差异，图右下方展示了储层周围时窗的均方根振幅。分析表明，盐丘周围区域确实正在衰竭，这是在获得高品质差值数据之后几分钟内就能得出的结果。

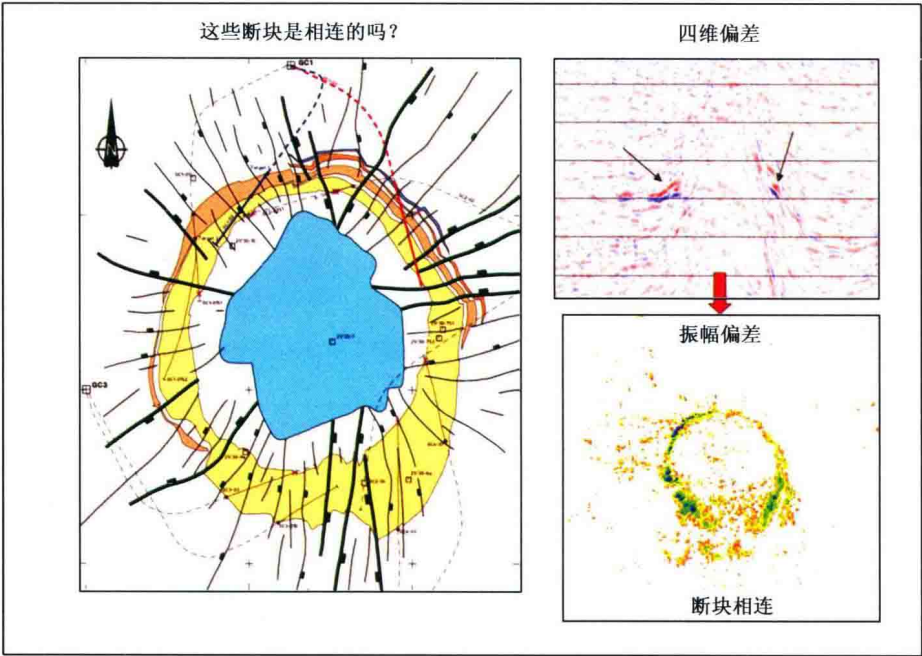


图 2-8 断层分隔图

四维地震监测的一个关键作用是解决断层分隔问题。在断裂盐丘构造带，需确定构造带周围油田是否已衰竭。

基于初始勘探和四维地震监测结果差异的振幅差异图展示了整个油田的开采情况

2.2.2 Gannet C 流体水平监测与管理

研究人员利用以上数据进行更深刻的分析，从而追踪气—油和油—水界面的变化情况，然后，建立一个能拟合向上水锥和向下油锥的储层模型，如图 2-9 所示，根据该模型调整采收率以便更好地开采。

2.2.3 Gannet D 流动单元划分

图 2-10 给出了 Gannet D 气田水面升高的差值剖面图。最初认为气—水界面是水平的，原因在于该气田的三个假设储层单元（Tay 储层中部、下部、Forties 储层）压力传递性好，然而，四维结果表明，上层单元中的水推进速度更快。

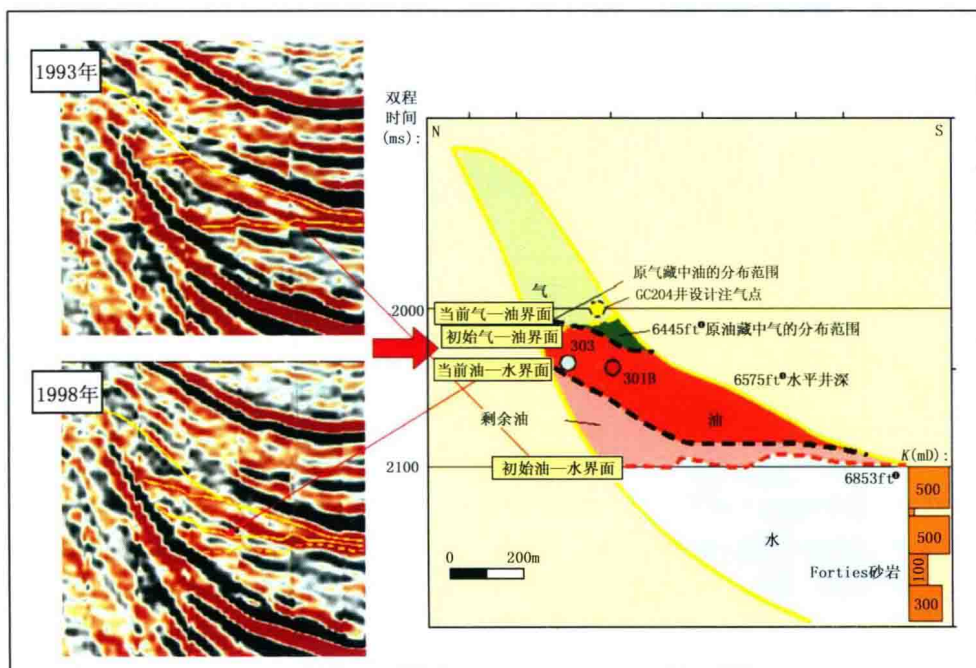


图 2-9 液面跟踪四维监测图

进一步研究 Gannet 油田数据表明，可以确定变化的油—水界面和气—油界面。两者分别沿产油井向上、向下形成锥形，可通过长期控制产油率来提高采收率

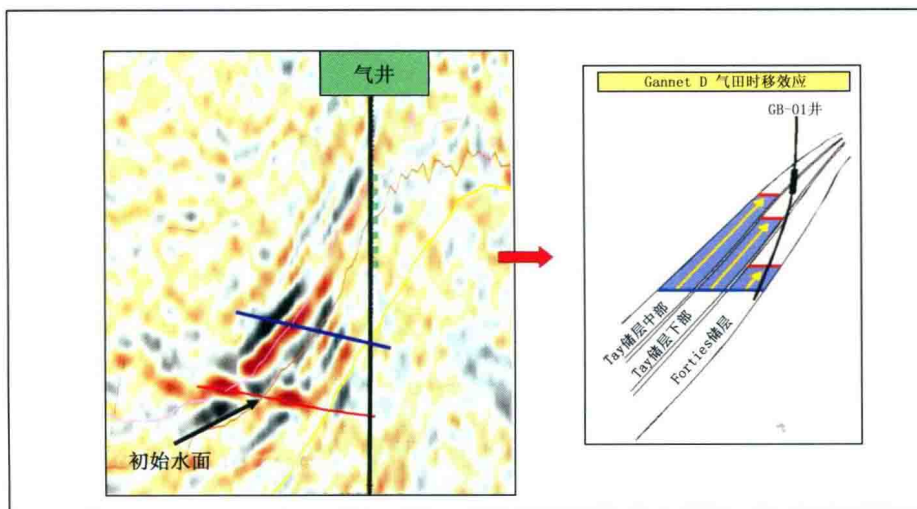


图 2-10 Gannet D 气田水锥形成图

在 Gannet D 气田，水锥形成是个意外发现。Tay 储层和 Forties 储层砂岩联系在一起，开采时其共同的气—水界面会保持相近水平。四维差值图表明，如果没有四维信息，Tay 储层中部注水的快速逼近很有可能解释为早期的水侵

2.2.4 定位死油区

图 2-11 展示了某成熟油田内油井正处于水侵状态，新井的钻孔位置更难确定。在该油田，四维地震监测数据帮助人们鉴别出未枯竭储层的位置。图 2-12 中的四维差异数据体展示了 1995 年到 2000 年期间由于注水引起变化的区域。保持不变的区域则可能是尚未开发的含油储层，或者是前期采空后

的下倾含水区，或者就是非油气储层。对这样一个成熟油田来说，上述信息很有价值。

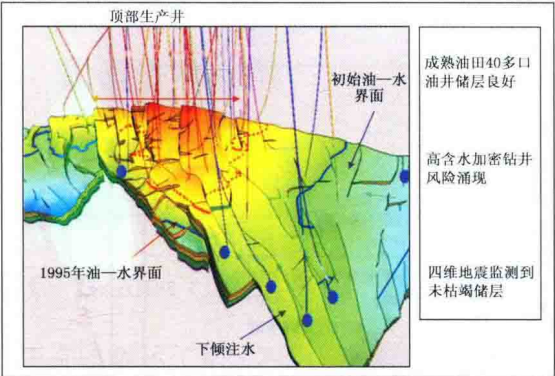


图 2-11 废弃油区钻井图

油田开采期间，应用四维勘测来定位废弃油区。进行合适的原始勘探和重复的监测勘探，可以确定出该油田尚未发生变化的部分，从而说明该部分可能还未开采

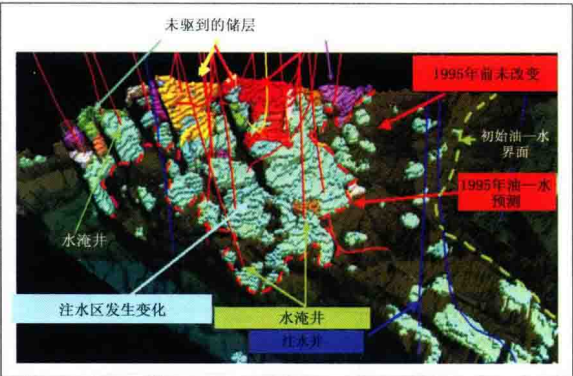


图 2-12 未枯竭储层四维地震监测图

在这种情况下，可以对比开采中期勘探和最新监测勘探的结果，从而确定扫描进度。可以看出，尽管水逼近构造顶部，但也有一些未发生变化的区块，指示可能的废弃油区和侧钻目标

2.2.5 识别水窜问题

图 2-13 对比了同一气田的两个差异剖面。一个是理论模型的期望响应，另一个是实际的四维地震研究结果。如图所示，气田底部发生了很大的变化，这表明，在开采过程中，水位升高造成了波阻抗的变化，这一结果与预测的相差不多。然而，在储层顶部，模型并未预测有异常，但实际地震数据结果表明，该处的确有明显异常。

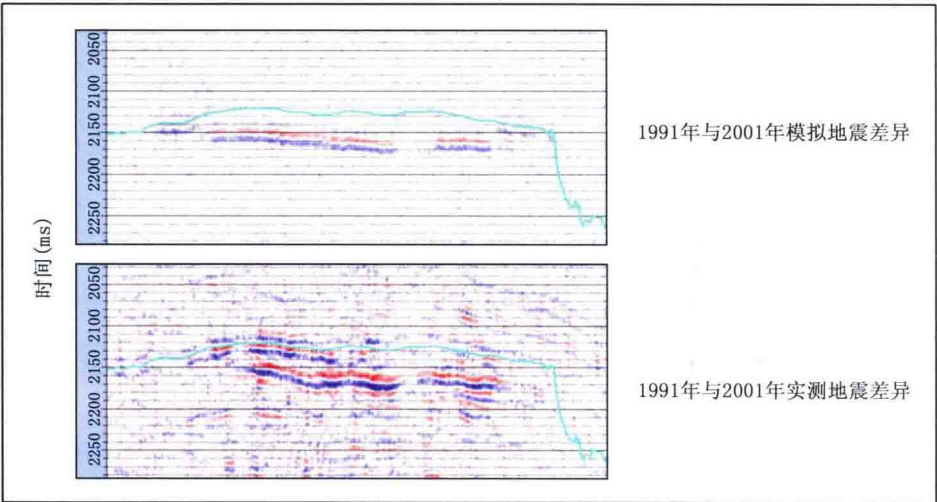


图 2-13 天然气枯竭模拟与实测结果对比图

气田理论模型的合成差值剖面反映了提升的气—水界面变化的简单响应。四维勘探差值既体现了基线气—水提升的影响，又表明了上部储层的变化

修正模型考虑到储层上部的渗透层位出现的水窜。图 2-14 显示了来自初始模型 1 和修正模型 2 的饱和度预测。