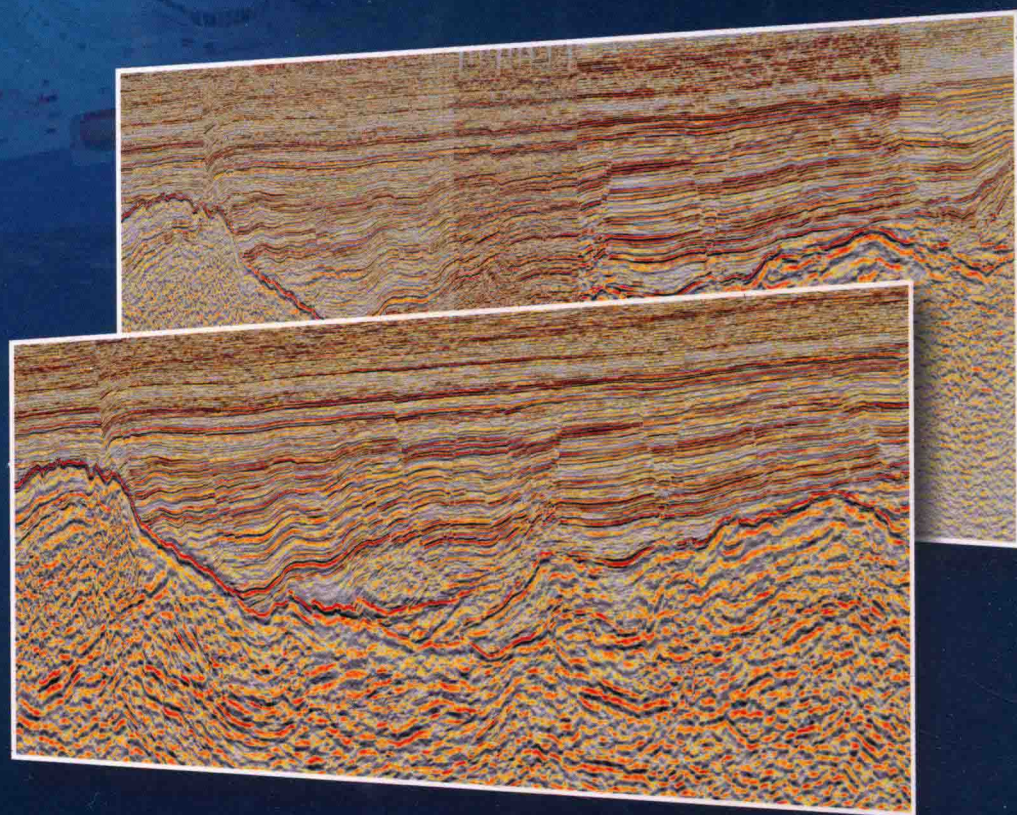


# 渤海油田三维地震资料 连片处理技术与实践

夏庆龙 周 滨 周东红 蒲晓东 李振春 著



科学出版社

# 渤海油田三维地震资料连片处理技术与实践

夏庆龙 周 滨 周东红 蒲晓东 李振春 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书详细阐述了连片处理中的关键技术,以辽东湾叠前连片处理为例,总结了一套适用于大面积、多区块的三维叠前连片地震资料处理体系。本书共分为五章。第一章简要介绍了渤海油田勘探概况,讲述了渤海油田勘探的发展历程;第二章系统阐述了海上连片处理技术与方法原理;第三至第五章系统阐述了辽东湾地震资料连片处理目的与意义、思路与方法以及取得的技术突破,分析了连片叠前偏移处理应用效果,为渤海油田整体三维地震资料连片处理奠定了基础。

本书是近年来渤海油田三维地震资料叠前连片处理技术与实践的系統总结,可供从事油气勘探和生产实践的科技工作者及高等院校有关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

渤海油田三维地震资料连片处理技术与实践 / 夏庆龙等著. —北京: 科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-052504-8

I. ①渤… II. ①夏… III. ①渤海-海上油气田-三维地震法-油气勘探 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 073523 号

责任编辑: 焦 健 韩 鹏 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 5 月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 344 000

定价: 188.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)


# 序

近二十年来，随着油气勘探难度的不断加大，对地震勘探精度的要求越来越高，为了获得地下整体地质结构和油气储层分布的认识，需要进行大范围的区域地震勘探。由于大面积地震数据采集的成本高，该书作者针对过去不同时期、不同仪器、不同采集方式获得的多块地震资料数据，利用先进的地震资料数据处理理论和处理手段，开展了辽东湾地震资料大连片攻关处理，处理结果达到了降本增储的目的，取得了十分显著的效果，为生产实践优选了一大批新的钻探目标，同时也在针对复杂数据体处理技术领域取得了重要进展。

辽东湾大连片处理是中国海上油气田迄今为止已完成的跨年度最长、连片区块最多、满覆盖面积最大的连片处理，该处理项目成功实现了横跨过去 30 年采集的 29 块地震资料、16800km<sup>2</sup> 辽东湾探区的大连片处理。

该书以辽东湾大连片处理为例，针对不同三维区块之间能量、频率、极性、相位、时差等方面的差异以及区块间的边界效应，为了实现运动学和动力学特征一致性处理和无缝拼接，阐述了海上三维叠前地震资料连片处理中的关键技术，剖析了典型实例。主要内容有如下几个方面：①海上干扰噪声压制、数据规则化、基于方位角的倾角时差校正、海上多次波压制和整体偏移成像等海上常规处理技术；②结合辽东湾探区的地质地震特点，形成了连片处理的思路与方法，重点分析了连片处理基本流程中的数据完整性检查、多域组合噪声衰减、双检合并、预测反褶积、数据规则化、拉东域多次波衰减、整体连片处理、速度分析、叠前时间偏移和偏移后处理等方法技术；③针对海量数据处理、拼接条件复杂和构造范围广、变化大等处理难点，形成了海量数据处理措施、连片处理关键技术、三维立体交叉速度解释和低频保护等针对性技术；④分析了连片叠前偏移处理应用效果，重点剖析了连片叠前偏移处理成果和地质应用效果。

该书的出版为海上油气田大连片处理提供了系统的技术支撑和宝贵经验，既有重要的理论指导意义，又有实际的应用价值。相信大连片处理技术与实践的推广应用，会为我国海上油气田“降本增储”做出巨大贡献，为广大油田企业在低油价条件下如何实现“降本增效”提供了新的思路。本人愿意将该书推荐给从事油气勘探科研和生产实践的同行们。

中国科学院院士 

2016 年 7 月 25 日

# 前 言

三维叠前连片处理技术是对区域内不同时期采集的多块三维地震资料进行高精度叠前拼接的处理技术，目的是消除不同三维区块之间采集因素、能量、频率、极性、相位、时间及信噪比等运动学和动力学特征方面的差异以及区块间的边界效应，提高地震资料的品质，为后续的大面积三维地震解释提供高质量的成果数据体。

高精度叠前时间连片处理技术可以实现资料间“无缝拼接”，有效规避边界效应问题，提高整体成像精度。以此为基础资料进行精细解释得到的全部资料覆盖区构造图，有利于寻找和发现遗漏的构造单元或地层岩性圈闭，支撑了油田区可持续勘探发展需要。三维连片处理技术能节省大量的重采集费用，降低勘探和后期开发成本，创造巨大的经济效益，因而，开展三维叠前连片处理研究具有重要的理论意义和实用价值。

本书以辽东湾叠前连片处理为例，阐述了连片处理中的关键技术和应用效果，总结了一套适用于大面积、多区块的三维叠前连片地震资料处理体系。辽东湾区域 29 块三维、两万余平方千米，各个区块资料基本在不同的年度采集，受施工等因素影响，导致各块之间在能量、相位、频率、时间等方面都存在差异，使得勘探开发人员无法获得辽东湾探区统一、系统、全面的地质认识。传统的叠后连片处理存在诸多的不足，因为直接利用叠后资料做连片处理，只能使两种资料叠加剖面趋于一致，并不能使叠前数据的频率、相位和振幅真正做到一致，连片处理效果不理想，处理后导致两块资料间存在严重的边界效应，无法满足高效和整体勘探的要求，也无法有利支持交接位置的精细滚动评价。为解决上述问题，以服务辽东湾探区的中长期勘探需求，提出将横跨过去 30 年采集的 29 块三维地震资料，约 200T 的海量数据进行三维叠前连片处理，这在渤海乃至整个中国海油尚属首次。

本书共分为五章。绪论部分简述地震资料连片处理技术的发展概况，由夏庆龙编写；第一章简要介绍渤海油田勘探概况，由夏庆龙、周滨、周东红编写；第二章系统阐述海上连片处理技术，由夏庆龙、周滨、蒲晓东、李振春、王志亮、张建峰、龚旭东、王旭谦、倪雪灿编写；第三章简述辽东湾地震资料连片处理目的与意义，由夏庆龙、周滨、周东红、王志亮、张建峰、陈昌旭编写；第四章阐述辽东湾地震资料连片处理思路与方法，由夏庆龙、周滨、陈继宗、王旭谦、倪雪灿编写；第五章介绍辽东湾地震资料连片处理技术突破，由夏庆龙、周滨、周东红、蒲晓东、王志亮、张建峰、龚旭东、陈昌旭、张志军编写。全书由夏庆龙统稿。

本书是近年来渤海油田三维地震资料叠前连片处理技术与实践的系统总结，所取得的创新性研究成果与总结出的一套适用于大面积、多区块的三维叠前连片地震资料处理技术体系，为其他三维连片处理提供了有效的技术指导。

本书的撰写与出版得到了中国石油大学（华东），中海石油（中国）有限公司天津分

公司，中海油服物探事业部等诸多单位领导和专家的支持与帮助；另外本书的编写还得到了中国石油大学（华东）印兴耀教授，吴智平教授的指导与关心。同时，中海石油（中国）有限公司天津分公司王志亮、张建峰、龚旭东、陈昌旭、张志军，以及中海油服物探事业部陈继宗、王旭谦、倪雪灿等参与了本书的编写工作。在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，本文难免有许多不足之处，恳请各位专家和读者批评指正。

夏庆龙

2017年4月

# 目 录

序	
前言	
绪论	1
第一章 渤海油田勘探概况	4
第一节 渤海勘探的发展历程	4
第二节 渤海地震勘探采集方法	7
一、定位导航技术	8
二、激发技术	17
三、接收技术	23
四、常用的观测系统	24
参考文献	26
第二章 海上连片处理技术	28
第一节 海上常规处理	28
一、海上常规处理流程	28
二、海上常规处理技术	29
第二节 海上干扰噪声压制	39
一、海上干扰噪声特点	39
二、海上干扰噪声压制技术	39
第三节 数据规则化技术	48
一、基于方位角的倾角时差校正法	49
二、加权抛物拉东变换法	52
三、迭代加权最小二乘法	54
四、反漏频傅里叶变换法	58
五、借道与三角剖分联合法	59
六、非均匀傅里叶变换与贝叶斯参数反演联合法	61
第四节 海上多次波干扰压制	64
一、多次波的产生、分类及基本特征	64
二、多次波干扰的识别方法	70
三、多次波压制技术	70
四、OBC 双检合并技术	89
第五节 一致性处理技术	95

一、面元网格和方位角一致性处理 .....	95
二、子波零相位化处理 .....	96
三、时差一致性处理 .....	99
四、能量/振幅一致性处理 .....	100
五、相位一致性处理 .....	101
六、频率一致性处理 .....	103
七、速度场一致性处理 .....	104
第六节 偏移成像 .....	106
一、叠前时间偏移处理 .....	106
二、叠前深度偏移处理 .....	111
参考文献 .....	118
<b>第三章 辽东湾地震资料连片处理目的与意义</b> .....	122
第一节 项目背景 .....	122
一、辽东湾区域地质概况 .....	122
二、辽东湾地区地震资料情况分析 .....	125
三、辽东湾现有地震资料存在的问题 .....	127
第二节 原始资料品质分析 .....	129
一、北部区块 .....	133
二、中部区块 .....	137
三、南部区块 .....	140
第三节 连片处理的目的和意义 .....	144
参考文献 .....	148
<b>第四章 辽东湾地震资料连片处理思路与方法</b> .....	149
第一节 连片处理思路 .....	149
第二节 连片处理的基本流程 .....	150
一、数据完整性检查 .....	151
二、多域组合噪声衰减 .....	154
三、双检合并 .....	164
四、预测反褶积 .....	166
五、数据规则化 .....	180
六、 $\tau$ - $p$ 域多次波衰减 .....	181
七、连片处理 .....	190
八、速度分析 .....	201
九、叠前时间偏移 .....	204
十、偏移后处理 .....	205
参考文献 .....	206
<b>第五章 辽东湾地震资料连片处理技术突破</b> .....	207
第一节 辽东湾地震资料处理难点 .....	207



---

一、海量数据处理 .....	207
二、拼接条件复杂 .....	207
三、构造变化大 .....	208
第二节 处理难点的针对性技术 .....	208
一、海量数据针对性措施 .....	208
二、针对性连片处理技术 .....	210
三、三维立体交叉速度解释 .....	210
四、低频保护技术 .....	211
第三节 连片叠前偏移处理应用效果分析 .....	213
一、连片叠前偏移处理成果效果分析 .....	213
二、地质应用效果分析 .....	219
参考文献 .....	231

# 绪 论

## ——地震资料连片处理概述

半个世纪以来,渤海油田的勘探工作主要经历了四个阶段,包括以凸起潜山为主的摸索阶段(1966~1984年)、以古近系为主的勘探阶段(1985~1994年)、以新近系为主的勘探阶段(1995~2005年)以及多层系立体勘探阶段(2006年至今)。渤海油田勘探的前三个阶段,不同时期任务各不相同,并且在十一五之前,受海上地震采集技术以及装备的限制,渤海三维地震采集年作业能力只有几百平方千米,因此地震勘探的主要区域集中在有利构造的重点区域,以满足勘探工作的需求。渤海油田自2006年进入多层系立体勘探阶段以后,海上地震资料采集以“整体部署、分步实施”为战略目标,逐年开展大面积三维地震资料采集及处理工作(夏庆龙,2016)。

渤海油田的三维连片处理技术是伴随着三维资料处理技术和计算机技术的不断进步而发展的,从20世纪90年代末期开始,经历了三个重要的阶段:三维叠后连片处理,三维叠前连片处理,大面积三维叠前连片处理。

### (1) 1998~2007年,三维叠后连片处理阶段。

20世纪90年代末,在渤海油田勘探程度相对较高的地区,三维地震资料由多块相邻的野外采集工区组成,不利于对构造的整体认识。但由于计算机能力和处理技术的限制,只能对地震资料进行叠后连片处理。

1998年,渤海油田首次在PL和BZ地区的三个区块进行了三维叠后连片处理,并取得了较好的效果。随后经过多年的攻关研究与应用,形成了一套成熟的适合渤海油田的三维叠后连片处理技术,并进行了推广应用。1998~2007年期间,渤海油田的连片处理工作量约 $16000\text{km}^2$ 。

### (2) 2008~2013年,三维叠前连片处理阶段。

随着渤海油田勘探与开发的不断深入,对地震资料品质提出了更高的要求,叠后连片处理技术已经不能满足需求。通过对国外地球物理公司的考察调研及技术攻关研究,形成了一套适合于渤海的叠前连片处理技术。

2008年,渤海油田首次在JX和JZ地区的两个区块进行了三维叠前连片处理,并取得了较好的效果。随后进行了推广应用,在2008~2013年期间,渤海油田三维叠前连片处理工作量约 $10620\text{km}^2$ 。

### (3) 2013年至今,大面积三维叠前连片处理阶段。

2013年,渤海油田已基本完成三维地震资料全覆盖,为三维地震资料整体叠前连片处理创造了条件,并以辽东湾地区的三维地震资料叠前连片处理开始,逐步完成渤海油田整体三维地震资料叠前连片处理。对这些跨年代、品质迥异的地震资料连片处理、实现无缝

拼接,既能增强也能革新对渤海油田地下构造的整体认识,同时强化对油田油藏储层细节处的精细把握,以此为基础进行渤海油田地质的再认识、再研究,进一步助推渤海油田的高效勘探和开发。

海上地震资料叠前连片拼接的目的是要真正解决资料之间横向错断,即能量、相位、时差和频率不统一的问题。拼接前首先对原始资料的能量、极性、相位、时差、频率及信噪比等因素进行详细的调查、分析、研究、对比,搞清楚两块资料的差别所在,然后采取一系列统一化技术措施,以达到“无缝拼接”。

首先,采用能量调整技术使两块资料的振幅达到统一。由于球面扩散,大地的吸收衰减作用和不同的震源及接收方式等因素的影响使得地震资料在纵、横向上能量存在着较大差异,通过采用几何扩散补偿方法提高和恢复层间弱反射信号的强度,在此基础上应用地表一致性振幅补偿消除由于激发和接收因素造成的道集间能量的不均衡问题,从而使两块数据以及同一地震数据之间地震记录的能量在时间和空间方向上基本一致。这样就保持地震波组的反射特征和振幅的相对关系,为后续各项保幅处理奠定了良好基础。

其次,对地震资料的地震道的极性进行调查分析,通过对拼接处相同测线叠加效果的对比,调整极性,使其统一。

再次,对资料拼接处叠加剖面的各有效反射层的时间进行对比,提取并消除两块三维资料之间的系统时差,然后对全区采用统一的地表一致性剩余静校正和速度迭代技术,进一步地精细时差调整,使全区的纵、横向上时差问题得到很好的解决。

最后,针对两块资料频率存在的差异,采用不同方式、不同参数的反褶积方法来消除其频率差异。再应用不同参数、不同时窗的地表一致性反褶积技术,缩小资料间原始频率的差异,然后对各块采用不同参数的预测反褶积技术,在消除海上资料鸣震的同时,使全区资料的频率趋于一致。

辽东湾地区由 29 个三维地震采集区块组成,处理面积 16864km<sup>2</sup>,为当时国内面积最大的地震资料叠前时间偏移连片处理项目。所得项目成果对辽东湾的勘探开发具有重要意义,具体表现在以下五个方面:

(1) 大连片资料由辽东湾所有小块三维资料联合拼接而成,经过连片处理实现了整个辽东湾地震资料在频率、相位、能量等方面的统一,为辽东湾的整体研究提供了高品质的资料基础。

(2) 连片处理成果为辽东湾整体构造特征研究、断裂体系分析,构造格局认识提供了全面的信息。

(3) 连片处理的成果解决了小块资料解释层位存在时差不统一的现象,使辽东湾探区全区层位的统一成为可能,为区域沉积研究提供较好的资料基础。准确建立全区等时地层格架,确定沉积体系展布及成因模式,明确辽东湾探区盆地沉积充填特征,为储层研究提供支撑。

(4) 连片处理具有较大的偏移距,解决了小块资料边部高陡目标成像差,构造覆盖不全,成像不清的问题,能够对跨界构造实现精细落实。其中锦州 25-1 油田、辽东湾锦州 20-2N 油气田等都是依靠连片处理而发现的。

(5) 辽东湾探区主要分布有辽西潜山带和辽东潜山带等多个潜山圈闭群。潜山规模

大、岩性的多样性与多块三维地震资料品质的差异性相重叠,整体研究难度很大。通过连片处理,统一的地震资料能为潜山整体研究提供资料基础。

本书结合具体实例,通过三维叠前连片处理及相关目标处理,解决了勘探评价过程中存在的八个方面的问题。

(1) 不同区块间时差与相位差的问题。由于不同资料的采集时间、采集方式及采集参数的差异,不同区块间存在时间与相位的差异,这是本次连片处理解决的首要问题。

(2) 高陡产状地层(断层)归位与成像问题。通过利用不同时期采集得到的地震资料,对同一区域进行精细研究,较好地解决了高陡产状地层(断层)归位与成像问题。

(3) 基底及潜山内幕成像的问题。通过三维连片处理,使得基底及潜山内部的同相轴连续性增强,进一步提高了分辨率和成像质量。

(4) 复杂断裂区断层归位的问题。将不同区块的资料进行连片处理,可以使断层归位更加准确,绕射波更加收敛,从而进一步提高成像质量,为后续的地震资料解释提供高质量的成像剖面。

(5) 中深层地震分辨率问题。通过三维资料的连片处理,可以对区块做进一步的目标处理,由此提高成像分辨率,尤其是提高中深层的分辨率,为接下来的储层预测提供高分辨率的成像剖面。

(6) 采集足迹问题。早期海底电缆采集足迹比较严重,经过连片处理后能得到较好压制。

(7) 剩余多次波干扰的问题。通过三维连片处理,可以有效地衰减多次波,处理后剖面有效波更加突出,同相轴的连续性得以增强,构造形态更加真实可靠,为储层预测提供了高精度的地震剖面。

(8) 探区南北三维采集方向差的问题。通过三维连片处理,可以得到全部工区资料覆盖区的整体构造图,有效地解决了探区南北三维采集方向差的问题。

本书分为五章。第一章简述渤海油田勘探概况,首先回顾渤海勘探的发展历程,接下来分析渤海地震勘探采集方法,重点介绍定位导航技术、激发技术、接收技术和常用的观测系统;第二章详细阐述海上连片处理技术,首先给出海上常规处理流程和海上常规处理技术,接下来重点介绍海上干扰噪声压制、数据规则化技术、基于方位角的倾角时差校正、海上多次波压制一致性处理和整体偏移成像等海上常规处理技术;第三章简述辽东湾地震资料连片处理目的与意义,分析辽东湾区域地质概况和地震资料特点,结合现有地震资料的品质和存在的问题,阐述连片处理的重要性;第四章阐述辽东湾地震资料连片处理思路与方法,重点介绍连片处理基本流程中的数据完整性检查、多域组合噪声衰减、双检合并、预测反褶积、数据规则化、拉东域多次波衰减、整体连片处理、速度分析、叠前时间偏移和偏移后处理等方法技术;第五章介绍辽东湾地震资料连片处理技术突破,以及连片处理中的难点与措施,分析海量数据处理、拼接条件复杂和构造范围广、变化大等处理难点,阐述海量数据针对性措施、连片处理关键技术、三维立体交叉速度解释和低频保护等针对性技术。另外,本章还分析了连片叠前偏移处理应用效果,重点剖析了连片叠前偏移处理成果效果和地质应用效果。

# 第一章 渤海油田勘探概况

## 第一节 渤海勘探的发展历程

渤海是中国唯一的内海，面积约  $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，水深  $5 \sim 30 \text{ m}$ ，其位于渤海湾盆地的中东部。渤海湾盆地大小约  $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中包含任丘、冀东、胜利、辽河、大港、渤海和中原等油田区块。作为国内油气年产量最多的盆地，截至目前，其包含的七个油田区块累计产原油  $8300 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中，渤海油区的勘探面积达  $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，该油区拥有储量大于  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  的大型油田九个，中型油田 33 个，2010 年产油气  $2900 \times 10^4 \text{ t}$ ，成为中国最大的海上油田。尤其是“十一五”以来渤海油田勘探坚持以深浅兼顾的多层系立体勘探思路为指导，发现了多个亿吨优质油田群（图 1.1）。

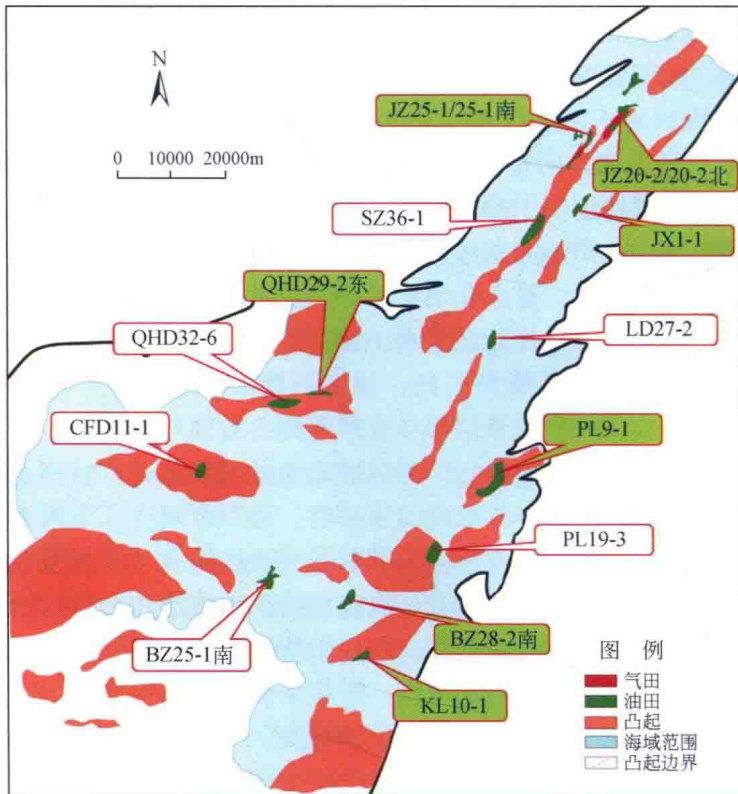


图 1.1 渤海海域主要大油田位置分布示意图  
绿色标注为“十一五”后发现

渤海海域的勘探历程大致可以概括为四个阶段：

(1) 以凸起潜山为主的摸索阶段（1966～1984年）。

海洋石油勘探指挥部成立于1965年8月。它于1966年12月15日完成我国第一座桩基式海上钻井一号平台的设计与建设。我国第一口海洋石油探井H1并于1966年12月31日开钻，次年6月14日在明下段1615～1630m井段喷出原油。渤海海域的油气勘探由此开始进入新的篇章。1971年1月在其相邻的海四油田的沙河街组、馆陶组和明化镇组发现油层。

随后，勘探中采用了“区域甩开、重点突破”的原则。整体解剖了石臼坨凸起、埕北低凸起以及沙垒田凸起等三大凸起区域（姜培海，2001）。当时借鉴陆上勘探经验，在“源控论”的指导下进行油气勘探。在埕北低凸起的西高点部署了第一口探井H7井，获得工业油流。沙垒田凸起为一被凹陷环绕的大型凸起（图1.2），面积约1650km<sup>2</sup>，于1973年在该凸起顶部CFD11-1构造部署了HZ1井，在明化镇组、馆陶组发现了百余米厚的油层，从而认为该区域新近系是有利勘探层系。由于该区新近系整体披覆于凸起之上，且储集性较好，应连片含油，后续在该凸起上整体部署6口探井均为油气显示井，因此，勘探重点区域向石臼坨凸起区转移。该阶段发现的油田主要为以埕北油田为代表的凸起披覆型背斜及潜山油气藏。

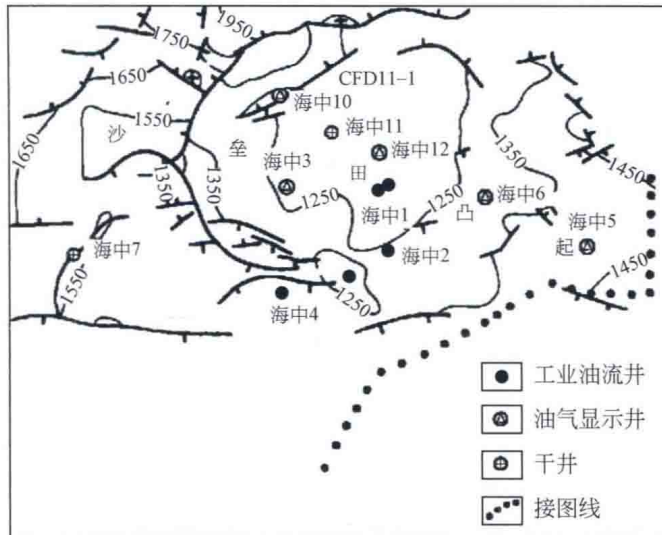


图1.2 沙垒田凸起构造示意图（王向辉，2000）

(2) 以古近系为主的勘探阶段（1985～1994年）。

本阶段，周边陆上油田古近系相继获得重要发现，渤海油田积极借鉴周边陆上油田勘探取得的成功经验，并积极推进对外合作，在“复式油气成藏理论”指导下，展开了以古近系为主的勘探。1979～1984年，在中央的直接关怀和领导下，走上了对外合作的正确道路，埃索等九家外国公司进行了大规模的勘探投入，均无商业发现，合作勘探遭遇挫折（石宝衍，2000；朱伟林，2011）。1986年，转变思路将勘探区域转向辽东湾地区，同年6月在辽西低凸起中段SZ36-1构造上部署钻探SZ36-1-1井，在古近系东营组发现了大套油

层。在深入研究 SZ36-1-1 井的资料和二维地震资料的基础上,以东营组为重点勘探层系,于 1987 年 4 月在 SZ36-1-1 井南 11.3km 处部署了 SZ36-1-2D 井,在东营组发现 200m 厚的油层,发现了绥中 36-1 油田。渤海石油勘探从此走出低谷,经过后期不断勘探开发,截至 1995 年,绥中 36-1 油田探明石油地质储量近  $3 \times 10^8 \text{m}^3$ ,这是当时渤海海域油气勘探 20 多年来发现的唯一的亿吨级大油田。

### (3) 以新近系为主的勘探阶段 (1995 ~ 2005 年)。

以潜山为主的阶段,没有获得规模性油气田,以古近系为主的阶段,虽然取得勘探重要进展,但受储层物性及储层预测方法制约,整体成效不佳。针对渤海海域晚期构造活动强烈等特点,创新建立“晚期成藏理论”,勘探重点转向新近系。同时,绥中 36-1 稠油油田的成功开发,坚定了新近系勘探的信心,推动了凸起区新近系油气的积极勘探,自营勘探发现秦皇岛 32-6 亿吨级油田,带动合作勘探发现,掀起了新近系勘探高潮。该阶段自营发现了 QHD32-6、NP35-2、BZ29-4;与 PHILLIPS 合作发现 PL19-3、PL9-1、PL25-6;与 Kerr-McGee 合作发现 CFD11-1、CFD12-1;与 CHEVRON 合作发现 LD27-2;先自营,后与 Texaco 合作发现了 BZ25-1 油田等 10 个大中型的油气田,累计探明原油地质储量  $20 \times 10^8 \text{t}$ 。这一重大成果为渤海油田 2005 年建成  $1 \times 10^7 \text{t}$  产能奠定了基础。

### (4) 多层系立体勘探阶段 (2006 年至今)。

随着凸起区勘探程度增加,构造圈闭越来越少,圈闭规模不断减小,勘探难度逐渐增大,新近系勘探进入低潮,勘探再次陷入困境,需要创新勘探思路,丰富勘探理论发展新的勘探技术。本阶段以寻找规模优质油气田为指导思想,将勘探领域从凸起稳定区转向活动断裂带,创新提出“活动断裂带油气差异富集理论”,加强区域研究、整体解剖,开展多层系立体勘探。通过大面积的三维地震勘探和区域研究,全面再认识了渤海海域油气的成藏特征,找到了一批大中型高产优质油气藏,发现了五个亿吨级优质油田群,分别为锦州油田群、金县油田群、石东油田群、莱北油田群和黄东油田群,新增石油地质储量达  $14 \times 10^8 \text{m}^3$ 。过去以稠油为主的储量结构得以改变,整体产能也得到有效提高。

渤海海域凸起区的浅层为稠油主要分布区。针对这一现状,对勘探思路进行调整,由凸进凹地寻找轻质油;同时拓展中深层,寻找凹内陡坡带优质储层。这一思路的调整,打破了过去储层认识上的埋深禁区,在渤中凹陷石南陡坡带中深层新探明油当量约  $2 \times 10^8 \text{m}^3$ ,发现了位于莱州湾凹陷陡坡带的垦利 10-1 亿吨级大油田。近五年来,随着渤中 28-2 南等大中型油田群的发现,使该勘探区新增三级储量约  $3 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

近年来,对郯庐断裂带等地区进行连片采集处理的基础上,重新认识了古近系优质储层的形成机理和分布。随着锦州 25-1 等大中型优质油气田的发现,郯庐断裂带周边累计新增石油地质储量超过  $4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

渤海海域勘探程度相对最高,但我们没有满足于现状。通过不断研究,不断在新区取得重大突破,使勘探领域得到有效的扩展。一系列前新生代盆地以及沉积较厚的中、古生界地层广泛分布在中国近海,目前的研究表明该区域具有较大的勘探潜力。同时也需要着眼未来,坚持研究和探索勘探远景区。要坚持依靠勘探思路的创新和技术的进步,不断拓

展勘探领域, 不断促进中国近海的油气勘探的发展。

## 第二节 渤海地震勘探采集方法

1965年渤海油田开始二维地震采集普查、概查工作, 当时地震采集作业方式利用打井放炮, 光点地震仪接收, 虽然技术落后, 效率低, 资料品质差, 但对渤海油田勘探发展意义十分重大; 随着地震采集技术不断发展, 渤海油田地震采集先后经历了光点记录、模拟磁带地震记录, 到1978年全部以数字地震仪替代了模拟磁带地震仪。1983年使用Geco-Alpha地震船在渤中28-1构造首次进行三维地震采集, 面元网格 $100\text{m} \times 100\text{m}$ , 从此拉开渤海油田三维地震采集勘探的序幕。1984~1998年期间, 渤海油田加大地震采集投入, 引进国外先进技术与装备, 包括全球卫星定位导航系统, 千道以上数字采集系统, 光导纤维数字传输电缆以及现场实时质量控制处理系统, 逐步实现了高质量、高效率、低成本的多源、多缆的二维、三维、高分辨率地震资料采集。1996年首次进行海底电缆双检(一个水检, 一个陆检)地震资料采集, 双检地震资料采集能够有效衰减鬼波影响, 拓宽地震资料频带, 当时海底电缆地震采集作业观测系统较为简单, 采用2线12炮平行束线作业, 采集方位较窄, 无横向覆盖。2008年引入GeoRe5海底电缆多分量(一个水检分量和三个相互正交的陆检分量)地震资料采集, 检波器不但能够接收地震纵波信息, 而且能够接收转换波信息, 采用片状观测系统采集, 方位较宽, 有一定的横向覆盖次数。2009年开始, 引入408ULS轻型海底电缆双检装备, 进行8线4炮正交束线观测系统的采集作业, 该作业方式炮检距分布均匀, 具备一定横向覆盖次数适合于极浅水及过渡带采集, 通过对采集装备升级改造和技术的不断攻关, 地震资料采集作业效率与资料品质得到了逐步提升。2010年开始, 引入基于MEMS(微电子机械系统)技术的SeaRay300型全数字多分量海底电缆装备, 进行片状与束线观测系统采集作业。2013年, 随着渤海油田一次三维全覆盖完成, 渤海油田逐步开启基于地质目的为导向的目标采集处理工作, 在KL构造区开展的海底电缆高覆盖定向采集、在JZ油田区开展的海底电缆宽方位地震采集以及在BZ油田区开展的高密度海底电缆地震采集均取得了明显的效果。

海上地震采集工作是以地震船队的组织形式进行的, 主要包括定位导航、激发和接收三部分。定位导航是由全球定位系统(GPS)、差分全球定位系统(DGPS)、相对全球定位系统(RGPS)和导航定位软件组成的, 用于指引地震船行驶方向、确定船位、测定震源位置和电缆上地震检波器位置, 实时控制放炮接收的一套测量系统(邓元军等, 2016b)。地震接收仪器安装在船上, 用于接收海上专业电缆或是检波器采集回来的地震资料。震源由船拖曳的专业设备激发, 在航行中按设计炮点位置连续激发产生地震波。



## 一、定位导航技术

### (一) 全球卫星导航定位系统介绍

#### 1. GPS 定位系统

全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 是美国从 21 世纪 70 年代开始研制, 历时 20 年, 于 1994 年全面建成, 具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位能力的新一代卫星导航与定位系统。它是美国第二代卫星导航系统, 是在子午仪卫星导航系统的基础上发展起来的, 采纳了子午仪系统的成功经验。GPS 系统包括三大部分: 空间部分——GPS 卫星星座; 地面控制部分——地面监控系统; 用户设备部分——GPS 信号接收机。

#### 2. GLONASS 定位系统

格洛纳斯卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GLONASS) 是由苏联 (现由俄罗斯) 国防部独立研制和控制的第二代军用卫星导航系统, 它也由 24 颗卫星组成, 原理和方案都与 GPS 类似, 不过, 其 24 颗卫星分布在三个轨道平面上, 这三个轨道平面两两相隔  $120^\circ$ , 同平面内的卫星之间相隔  $45^\circ$ 。每颗卫星都在 19100km 高、 $64.8^\circ$  倾角的轨道上运行, 轨道周期为 11 小时 15 分钟。地面控制部分全部都在俄罗斯领土境内。GLONASS 用户设备 (即接收机) 能接收卫星发射的导航信号, 并测量其伪距和伪距变化率, 同时从卫星信号中提取并处理导航电文。接收机处理器对上述数据进行处理并计算出用户所在的位置、速度和时间信息。与美国的 GPS 系统不同的是 GLONASS 系统采用频分多址 (FDMA) 方式, 根据载波频率来区分不同卫星 (GPS 是码分多址 (CDMA), 根据调制码来区分卫星)。每颗 GLONASS 卫星发播的两种载波的频率分别为  $L1 = (1602 + 0.5625K) \text{ MHz}$  和  $L2 = (1246 + 0.4375K) \text{ MHz}$ , 其中  $K=1 \sim 24$  为每颗卫星的频率编号。所有 GPS 卫星的载波的频率是相同的, 均为  $L1 = 1575.42 \text{ MHz}$  和  $L2 = 1227.6 \text{ MHz}$ 。

#### 3. 伽利略定位系统

伽利略定位系统 (Galileo Positioning System), 是欧盟一个正在建造中的卫星定位系统, 有“欧洲版 GPS”之称, 也是继美国现有的“全球定位系统” (GPS) 及俄罗斯的全球导航卫星系统 (GLONASS) 外, 第三个可供民用的定位系统。

伽利略定位系统是世界上第一个基于民用的全球卫星导航定位系统, 在 2008 年投入运行后, 全球的用户将使用多制式的接收机, 获得更多的导航定位卫星的信号, 将无形中极大地提高导航定位的精度, 这是“伽利略”计划给用户带来的直接好处。伽利略定位系统是欧洲自主、独立的全球多模式卫星定位导航系统, 提供高精度, 高可靠性的定位服务, 实现完全非军方控制、管理, 可以进行覆盖全球的导航和定位功能。伽利略定位系统还能够和美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 系统实现多系统内的相互合作, 任何用户将来都可以用一个多系统接收机采集各个系统的数据或者各系统数据的组合来实现定位导航的要求。