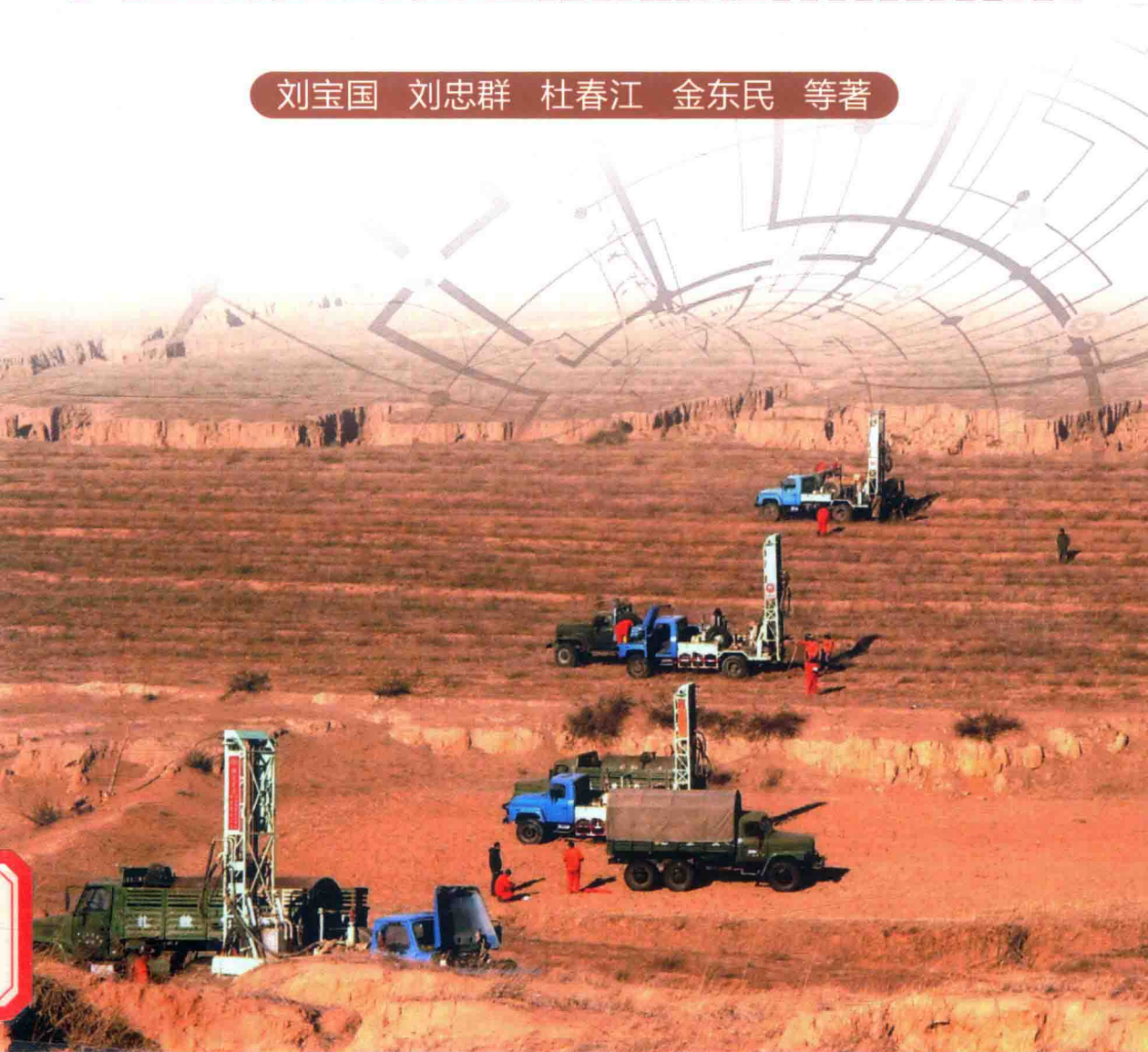


HUANGTUYUAN SANWEI DIZHEN SHUJU CAIJI JISHU

黄土塬三维地震数据采集技术

刘宝国 刘忠群 杜春江 金东民 等著



石油工业出版社

黄土塬三维地震数据采集技术

刘宝国 刘忠群 杜春江 金东民 著
李文玉 冯永强 张宣堂 龙利平

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对黄土塬的表层结构特征及黄土的物性特征进行了解剖,从而得出黄土塬地震数据采集的难点、产生原因及对策。对黄土塬激发爆炸过程、药形、药性、激发介质等影响采集能量下传的关键因素进行了系统的分析,形成了以“黄土塬高效激发理论”为核心的黄土塬地震数据采集激发理论。基于高精度卫片矢量化三维地震数据采集优化设计等配套技术上有了长足进展,形成了成熟的黄土塬三维地震数据采集关键技术系列。

本书可供地震数据采集专业技术人员、大专院校师生、科研院所科研人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

黄土塬三维地震数据采集技术/刘宝国等著.

北京:石油工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-5183-1539-0

I. 黄…

II. 刘…

III. 黄土高原-三维地震法-研究

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 249667 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

编辑部:(010) 64523736

图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:16.75

字数:420 千字

定价:120.00 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

黄土，一种广泛分布在地球表面的普通土壤，但在中国，它却缔造了一个奇迹。在总面积 $64\times 10^4\text{km}^2$ 的范围内，黄土绵延不断，堆积出一个广袤的高原，这就是地球上唯一的黄土高原，地域横跨青、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫 7 省区大部分或一部分地区，可谓“挽黄河臂膀，依太行身躯”。鄂尔多斯盆地南部的黄土塬更是黄土高原中的“奇中之奇”，海拔 800~1600m，黄土厚度之大、地形起伏之剧烈、水土流失之严重，世所罕见。诗人形容它：“黄天厚土大河长，沟壑纵横风雨狂。”

黄土高原不但是中华民族古代文明的发祥地之一，目前也是我国越来越重要的能源基地，正源源不断地向全国提供石油、天然气、煤炭和电力，是我国当之无愧的“锅炉房”。

中国石化华北油气分公司（以下简称华北油气分公司）在鄂尔多斯盆地南部拥有麻黄山西、镇泾、彬长、旬邑—宜君、富县等具有典型黄土塬地貌特征的 5 个区块，面积 12241.3km^2 ，石油资源量 $20.23\times 10^8\text{t}$ 。石油探明储量 $21323.68\times 10^4\text{t}$ 、控制储量 $31298.20\times 10^4\text{t}$ 、预测储量 $34022.26\times 10^4\text{t}$ ，三级储量合计 $86644.14\times 10^4\text{t}$ 。总资源探明率为 10.5%，勘探开发潜力巨大。

由于该区主要油气藏类型为岩性、岩性+构造复合圈闭油气藏。主要目的层的沉积环境为河流、三角洲—湖泊环境。含油性的差异多受沉积相控制，其中属三角洲平原相的河道砂体，以及由分支河道等微相叠置复合性砂体的含油性较好，其他低能环境下的砂体含油性较差。储层的基本特征，单层厚度一般为 5~12m，最大可达二十几米。平均孔隙度为 8%~10%，平均渗透率为 1mD 左右，属低孔低渗致密储层范畴。主要目的层的沉积环境直接控制砂岩体的产状和储层物性特征以及油藏展布。因此，勘探的主要目标可以定义为“在相对低孔低渗的致密砂岩中寻找高含油饱和度的‘甜点’”。属于隐蔽油藏勘探和开发，勘探开发难度大，急需可靠的三维地震勘探解决如下问题：

- (1) 面向延安组/延长组的各油层组精细构造解释，包括断裂系统解释；
- (2) 针对不同油层组的反射构造特征解释、储层预测和选区评价；
- (3) 含油性（流体）预测与微小断裂、裂隙发育带预测；
- (4) 水平井部署建议、水平井轨迹动态调整。

20 世纪 90 年代，原中国石化华北石油局三普在镇原、泾川、延安、旬邑、宜君地区开展了弯线二维地震数据采集，资料品质良好，但由于都是沿沟布设，测线无法闭合。对于直测线而言，由于该区属典型的黄土塬区，黄土厚度最厚可达 400 多米，塬、梁、峁、坡、沟并存，地形起伏剧烈，机械设备无法进入，施工设备需人背肩扛，成本高、效率低。加之对黄土塬表层物性及结构认识的模糊，一直以来无法解决短、中、长周期静校正问题，厚黄土、斜坡带的激发能量下传问题，炮间能量、信噪比差异大的问题，表层结构的调查问题，复杂干扰波问题，等等。难以为油气田勘探、开发提供可靠的依据。这一时期中国、美国、加拿大、欧洲等国内外的地球物理服务公司都曾试图破解这一难题，但并未取得实质性的进展。

针对黄土塬区地震数据采集问题，华北油气分公司在该区开展了大量的二维、三维地震

数据采集攻关试验工作，并与吉林大学等联合开展了黄土塬区斜坡带的激发、接收正演模拟研究，与长江大学联合开展了基于地理数据模型的黄土塬三维观测系统优化研究。2004年在麻黄山地区进行了二维直测线（宽线）地震数据采集；2007年在镇泾巨厚黄土塬区进行了二维直测线攻关试验，2008年批量生产。这一时期二维地震勘探资料品质在信噪比、分辨率方面都有很大的提高，通过二维地震资料的解释，基本查明了工区区域构造形态，发现了一批局部构造和断裂。但是由于该区储层非均质性强，岩性变化快，河道横向摆动改道、分岔和合并频繁，纵向多期河道砂体叠置，二维地震勘探难以精细刻画砂体发育状况，储层物性和含油性展布特征的预测更加困难。勘探、开发主要依靠钻井揭示砂体发育状况进行部署，可以说物探（地震）技术走在了勘探、开发的后面。

2009年在镇泾黄土塬区进行了三维地震数据采集先导试验；2006—2011年，华北油气分公司在鄂南黄土塬区相继完成5项三维地震数据采集项目。通过以上采集技术的应用，黄土塬区资料信噪比明显提高，原始资料分辨率有8Hz的拓展。其中，2011年度的镇泾工区1158km²的三维地震数据采集项目取得了令人“震撼”的成果（中国石化油田事业部专家评价），2012—2013年在镇泾、彬长、旬邑—宜君地区开展了大面积的三维地震数据采集，共计2420km²，有利地支持了油田的勘探、开发。

本书共分七章，第一章通过介绍三维地震勘探的可行性与必要性，阐述了华北油气分公司在黄土塬开展三维地震勘探的背景。第二章对黄土塬的表层结构特征及黄土的物性特征进行了解剖，从而得出黄土塬地震采集的难点、产生原因及对策。第三章对黄土塬区表层结构精细调查方法及其适用性进行了分析、总结。第四章通过多年的攻关试验结果，对黄土塬激发爆炸过程、药形、药性、激发介质等影响采集能量下传的关键因素进行了系统的分析，形成了以“黄土塬高效激发理论”为核心的黄土塬地震数据采集激发理论，在理论上实现了重大突破，资料信噪比明显改善。依据以上技术创新与突破，成功申请了以“利用组合震源激发提高黄土塬地区地震勘探分辨率的方法”为核心的技术发明专利。并通过黄土塬斜坡带激发与接收正演模拟理论及模拟结果，为黄土塬地震数据采集提供了理论基础及试验方向。第五章详细描述了华北油气分公司在黄土塬激发、接收照明分析技术、基于高精度卫片矢量化三维地震数据采集优化设计等技术上的长足进展，形成了成熟的黄土塬三维地震数据采集关键技术系列。在观测系统设计与优化辅助技术研究过程中，形成的黄土塬区观测系统正演模拟技术，已获得“一种地震采集观测系统设置方法”专利。第六章介绍了在野外地震资料采集过程中，工程工艺不断提高，黄土塬成井技术、新型聚能炸药的研制等实用技术成为支撑黄土塬地震勘探采集技术突破的基础，并对黄土塬单点高密度采集及多波多分量勘探等新技术、新方法进行了适用性分析和探讨。第七章阐述了黄土塬三维地震资料采集成果在实际生产中得到了充分应用，为油田的快速建产和新增产能建设作出了重要贡献。三维地震勘探成果的应用，深化了地层和储层认识，为水平井的优化部署、水平井的轨迹调整提供了技术支撑，为工程工艺优化提供了可靠依据，提高了压裂改造的针对性和有效性，投产效果得到了明显提升，华北油气分公司所属区块鄂南低渗特低渗大型岩性油藏水平井的规模化有效开发将成为现实。

本书是几代鄂尔多斯物探人工作成果的总结，是近些年不断攻关试验的成果总结，凝聚了物探工作者的劳动汗水。全书由杜春江统稿完成，在成书过程中，得到了华北油气分公司各位领导、物探总工程师，中国石化石油勘探开发研究院以及原四物的各位领导、同事们的悉心指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于笔者水平有限，不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 黄土塬开展三维地震勘探的可行性	(1)
第二节 鄂南油藏特点及开展三维地震勘探的必要性	(5)
第二章 黄土塬特点	(11)
第一节 中国北方黄土的基本构成	(11)
第二节 黄土塬表层结构特征	(14)
第三节 黄土塬三维地震数据采集难点分析	(27)
第三章 黄土塬表层结构调查方法	(51)
第一节 常规表层结构调查方法	(51)
第二节 适宜黄土塬区的表层结构调查方法	(55)
第三节 黄土塬区野外低速带调查点布设原则	(66)
第四章 黄土塬高效激发理论及激发、接收方式正演模拟技术	(69)
第一节 黄土塬高效激发理论	(69)
第二节 黄土塬激发、接收方式正演模拟技术	(85)
第五章 黄土塬区三维地震数据采集观测系统设计	(152)
第一节 面向油层组的观测系统设计	(152)
第二节 基于照明分析的观测系统优化设计技术	(163)
第三节 基于数字高程模型及高精度卫片的观测系统优化设计技术	(183)
第六章 黄土塬地区地震数据采集配套技术	(214)
第一节 黄土塬地震数据采集成井工艺	(214)
第二节 高性能震源药柱的研制	(221)
第三节 高密度单点采集	(229)
第四节 多波多分量地震数据采集在黄土塬的应用展望	(233)
第七章 黄土塬地区三维地震数据采集技术应用	(236)
第一节 玉都工区三维地震数据采集效果	(236)
第二节 渭北三维区地震数据采集效果	(246)
第八章 结束语	(258)
参考文献	(259)

第一章 绪 论

三维地震在世界各国油气田的勘探、开发过程中都起到了至关重要的作用，但是面对黄土塬这种极低信噪比地区，在鄂尔多斯盆地南部（以下简称鄂南）的巨大资源量面前，地震勘探这个先锋官第一次止步不前了，黄土塬能够开展三维地震勘探吗？人们往往会有两个方面的担心：一是黄土塬能不能得到良好品质的地震勘探资料，解决勘探开发中遇到的问题；二是勘探成本是不是很高，投入产出比是不是合算。下面以华北油气分公司鄂南镇泾区块地震勘探从二维沟中弯线到直测线再到小面积三维逐步推进的一个过程介绍黄土塬区开展三维地震勘探的可行性与必要性。

第一节 黄土塬开展三维地震勘探的可行性

2010 年之前，华北油气分公司在镇泾区块共部署二维地震勘探工作量 1015.85km，其中（图 1-1）：

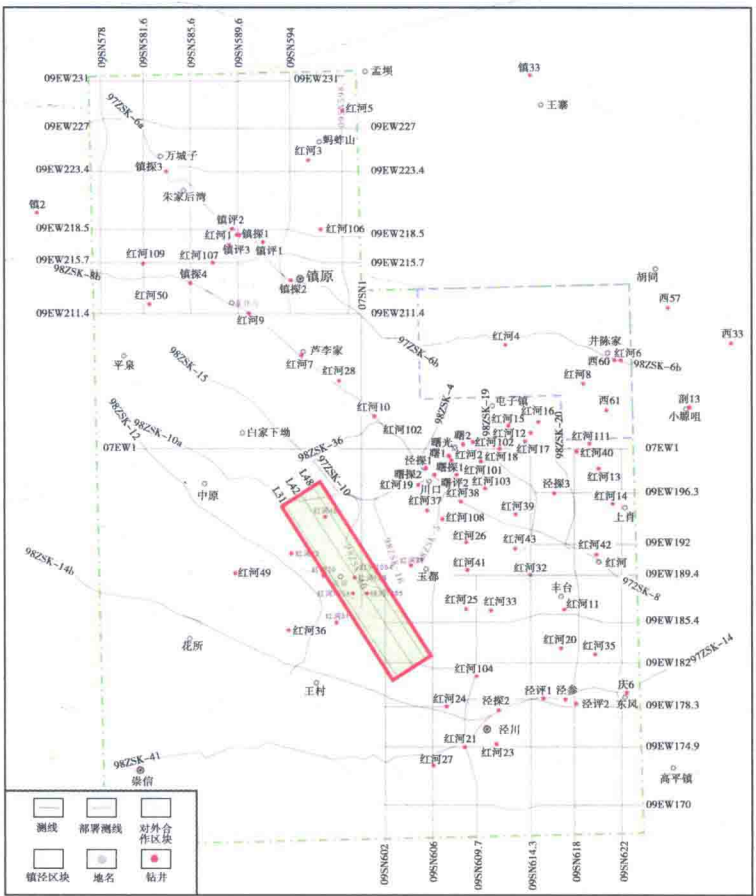


图 1-1 镇泾区块测线部署图（红框内为三维区域）

1997—1998 年：弯线 28 条，满叠长度 405.47km；
 2007 年：试验直测线 2 条满叠长度 50.08km；
 2009 年：直测线 26 条，测网密度 4km×4km，满叠长度 560.3km；
 2009 年：完成川口三维地震满覆盖（96 次）面积 17.024km²。

一、二维弯线地震数据采集效果

从图 1-2 沟中弯线单炮记录可以看出，由于激发、接收都在沟中，克服了黄土表层的影响，激发、接收条件好，单炮记录经 $F-K$ 滤波后，浅、中、深目的层反射波组齐全，连续性好。从该区监控剖面（图 1-3）也说明黄土塬区深层地震地质条件良好，具备得到良好地震资料的基础条件。

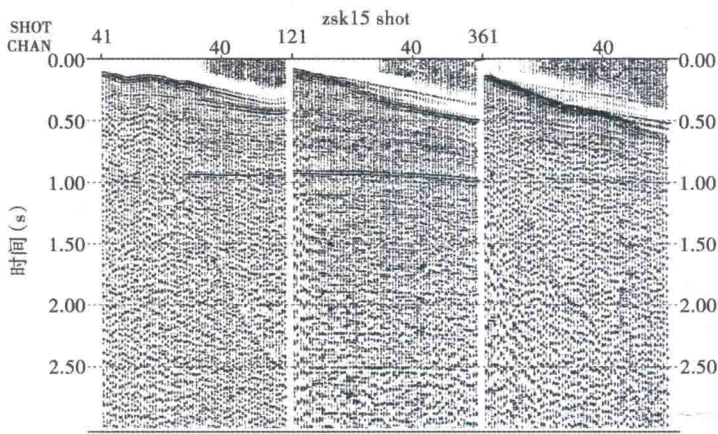


图 1-2 镇泾黄土塬区沟中弯线单炮记录

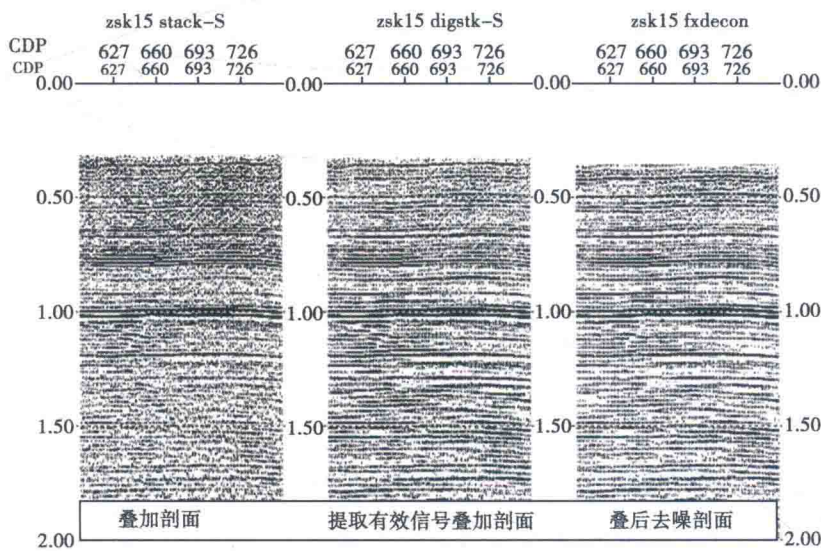


图 1-3 镇泾黄土塬区沟中弯线叠后剖面

二、二维直测线地震数据采集效果

图 1-4 为黄土塬区二维直测线不同激发方式的单炮记录，从中可以看出，只要采用合适的激发方式，黄土塬直测线仍然可以取得良好的地震资料。

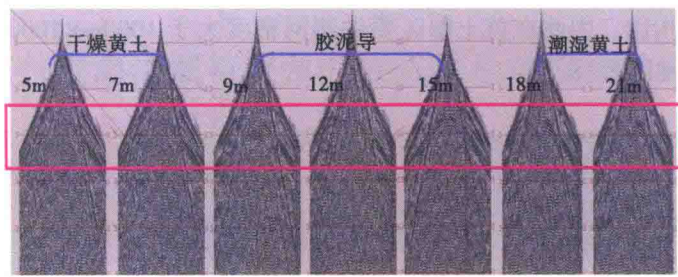


图 1-4 镇泾某直测线不同激发方式单炮记录（静校正后 40~80Hz 扫描记录）

经叠后处理（图 1-5），剖面反映的地质构造形态清楚，各类干扰波得到较好压制，剖面的信噪比较高；目的层清晰，连续性较好。

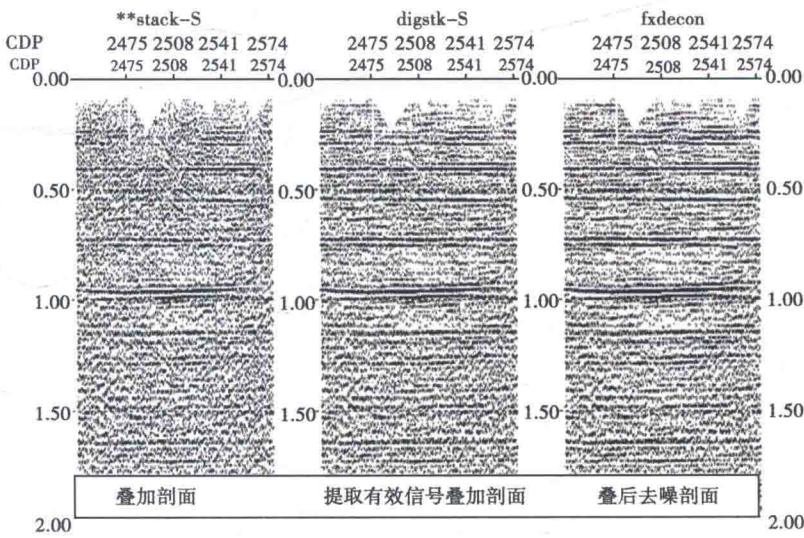


图 1-5 镇泾黄土塬直测线叠后剖面

从二维直测线效果来看，如果采用合适的采集方式，也能克服黄土塬的影响，因此直测线可以，黄土塬区开展三维地震勘探在技术上也是可行的。

三、二维地震勘探与三维地震勘探成本分析

（1）直接成本对比分析。

目前，在镇泾地区，观测系统为 3600—20—20—20—3600，覆盖次数 90 次的二维直测线单价为 8 万元/km 左右；观测系统为 28L4S154T154F 的三维地震单价为 50 万元/km² 左右。假设要控制宽度为 2km 的河道砂体的展布，那么对于二维地震来讲，测网密度至少要达到 1000m×1000m（图 1-6），1km² 需要 4 条测线，费用 32 万元，直接费用比三维地震低，

但只能了解工区的大的构造格架。如果要控制宽度为 1km 的河道砂体的展布, 那么对于二维地震来讲, 测网密度至少要达到 500m×500m (图 1-6), 1km² 需要 6 条测线, 费用 48 万元, 与三维地震费用基本相当。如果要控制宽度为 0.5km 的河道砂体的展布, 那么对于二维地震来讲, 测网密度至少要达到 250m×250m (图 1-6), 1km² 需要 10 条测线, 费用 80 万元, 这时做二维地震已经很不合算了, 而构造的精细程度和对断裂系统的刻画二维地震也远远不能和三维地震相比。因此在黄土塬区要做测网密度大于 1000m×1000m 的二维地震, 直接成本就已比三维地震要高。

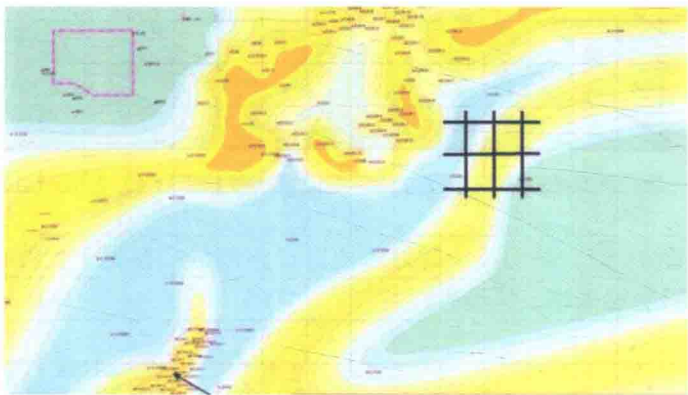


图 1-6 镇泾某区河道砂体展布图

(2) 勘探开发效益对比。

表 1-1 为镇泾三维地震实施前后, 完钻井开发效果对比, 三维地震成果利用前, 完钻 28 口, 砂岩钻遇率 85.9%, 油层钻遇率 62.2%, 水平段平均日进尺 68m, A 靶点平均调整 0.7 次/井, 水平段轨迹平均调整 1.8 次/井三维地震成果利用后, 完钻 36 口, 砂岩钻遇率 90.9%, 油层钻遇率 79.6%, 水平段平均日进尺 83.4m, A 靶点平均调整 0.2 次/井, 水平段轨迹平均调整 0.3 次/井。

三维地震勘探无疑是高效的, 它仅占百万吨产能投资的 5%, 却可以大幅提高水平井有效砂体和微断裂、裂缝钻遇率、钻井成功率和钻井效率, 优化注采井网, 达到高效、快速建产目的。

表 1-1 三维地震勘探实施前后开发效果对比表

分类	井数	参数	设计水平段长 (m)	实钻水平段长 (m)	砂岩段长 (m)	砂岩钻遇率 (%)	砂岩显示段长 (m)	油层钻遇率 (%)	水平段完钻天数	水平段日进尺 (m)	轨迹调整次数	A 靶点调整次数
三维地震勘探前	28	平均值	1032.9	898.0	801.0	85.9	572.3	62.2	15.1	68.0	1.8	0.7
		最小值	450.0	121.0	48.0	39.7	48.0	22.2	4.0	20.2	0.0	0.0
		最大值	2000.0	1729.6	1689.6	100.0	1173.0	100.0	34.0	149.3	6.0	1.0
三维地震勘探后	38	平均值	1118.2	1057.9	969.7	90.9	859.8	79.6	14.6	83.4	0.3	0.2
		最小值	550.0	376.8	181.0	48.0	124.6	23.8	7.0	14.5	0.0	0.0
		最大值	1800.0	1712.5	1656.0	100.0	1283.0	100.0	36.0	170.1	3.0	2.0

(3) 三维地震勘探还具有重要的后续研究价值，一块三维地震资料起码要使用 15~20 年，它的价值可想而知。

综上所述，在黄土塬区开展三维地震勘探技术可行，投入产出比合算，实施三维地震勘探可谓“万事俱备只欠东风”，那么这个“东风”是什么呢？就是鄂南油田勘探开发的巨大需求。

第二节 鄂南油藏特点及开展三维地震勘探的必要性

一、二维地震勘探的应用成果

从部署图（图 1-1）中可以看出，受当时条件的限制，二维地震测网密度（4km×4km）比较稀疏，并且有近一半是弯线，测网无法闭合。尽管如此，二维地震勘探还是取得了丰富的成果。

(1) 通过二维地震资料的解释，基本查明了工区区域构造形态（图 1-7），发现了一批局部构造和断裂。

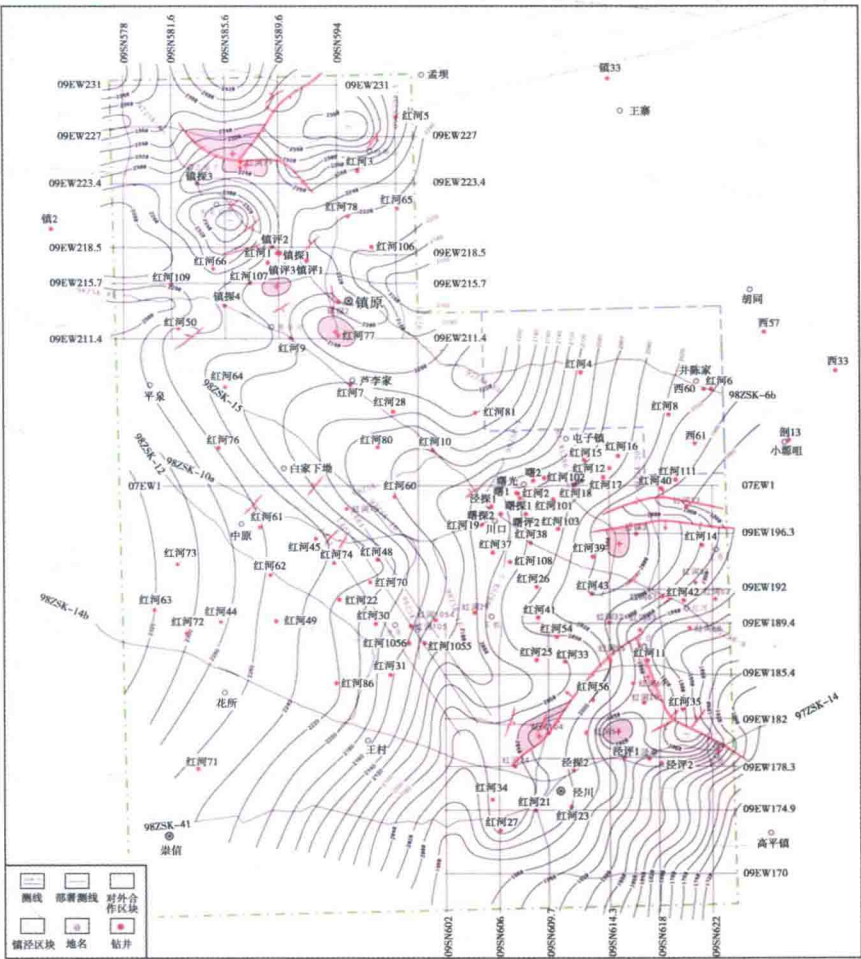


图 1-7 镇泾区块长 8 油层组顶面（T_{6c}）等深度图

区域构造形态整体上呈东高西低的态势。局部构造圈闭面积小（一般在 10km^2 以下）、闭合幅度低（一般在 30m 以下）。

（2）通过二维地震勘探发现工业油流井（探井或评价井）均分布在中部的 NW 向隆起区上，鼻状隆起的轴部或其侧翼，说明构造对油气富集影响作用明显。

二、油田储层的特点及二维地震勘探局限性

近年来，镇泾区块长 8、长 9、长 6、延安组多套层系在不同区域不断获得新发现、新突破，正逐渐形成纵向多层含油，平面叠合连片的立体勘探开发新局面。2008 年施工的红河 26 井在长 81 压裂后自喷原油 $36.2\text{m}^3/\text{d}$ ，获得重大突破，指明了今后的勘探重点层系。2010 年底，镇泾区块第一口水平井 HH37P1 井日产原油 16.7t ，拉开了超低渗透油藏水平井开发试验的序幕，随后在区块内不同井区部署的 HH37P2 井、HH42P3 井、HH36P1 井、HH73P23 井、HH12P1 井、HH74P1 井和 HH55P1 井相继获得高产油流，水平井成果在镇泾区块全面开花，特别是 HH37P2 井初期日产油高达 151m^3 ，为鄂南超低渗透油藏的效益开发提供了有效手段，标志着镇泾区块进入快速发展阶段。

但是由于镇泾区块中生界以岩性油气藏和低幅度局部构造油气藏两种类型为主，受盆地演化过程及古沉积环境的控制，油藏横向变化极为剧烈。延长组主要发育辫状河三角洲沉积体系，延安组主要发育河流相沉积体系，无论是延长组还是延安组，均体现出河道窄、储层薄、相变快、非均质性强的特点（图 1-8），延长组水下分流河道宽度仅为 $1\sim 2.5\text{km}$ ，主砂体厚度以 $10\sim 20\text{m}$ 为主，是多期水下分流河道垂向叠加的结果，延安组油藏分布小而零散，为典型的岩性—构造复合油藏，主砂体厚度以 $5\sim 15\text{m}$ 为主。延长组长 8 储层孔隙度范围为 $4.4\%\sim 14\%$ ，渗透率为 $0.1\sim 0.64\text{mD}$ ，为典型的低孔低渗油藏，延安组储层孔隙度范围为 $4.9\%\sim 16.6\%$ ，渗透率为 $0.1\sim 54.7\text{mD}$ ，储层物性条件相对较好。另外，地面露头调查、钻

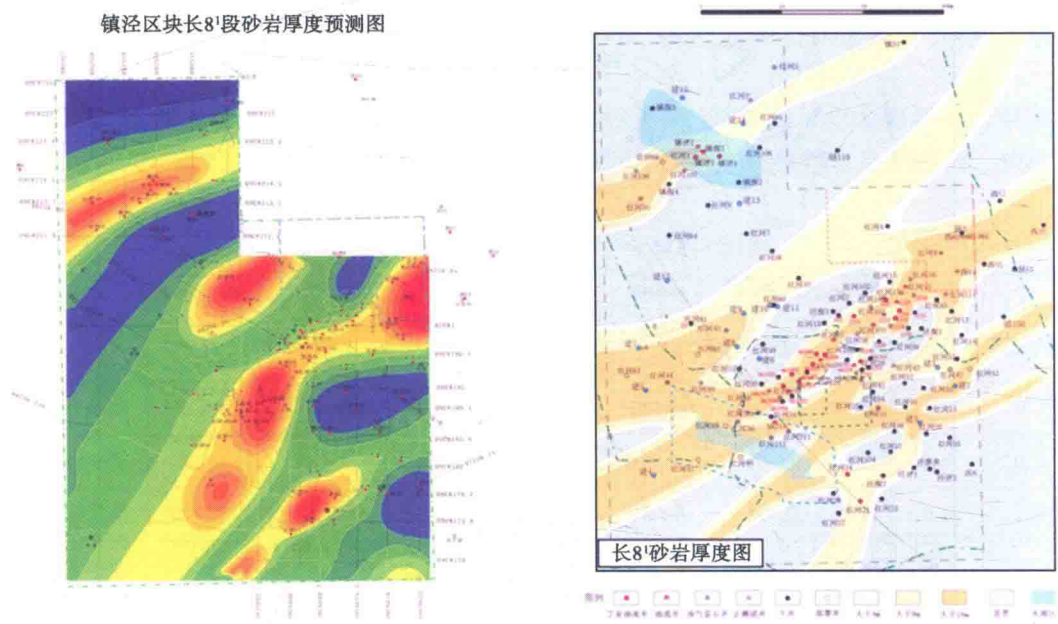


图 1-8 镇泾区块二维长 8¹ 砂体厚度图

井岩心分析、二维地震解释等资料表明，镇泾区块断裂较为发育，这为本来就很复杂的隐蔽性油藏又增加了一个复杂的因素。复杂条件下的油藏勘探、开发进度和效益在很大程度上依赖于储层及构造描述精度的高低。基于镇泾区块处于盆地边部的特点，储层分布较盆地内部更加多变和复杂，华北油气分公司在镇泾区块局部实施了 4km×4km 密度的二维地震勘探，以此来弥补钻井密度的不足，取得了一定的效果。但是仍然存在以下问题：

(1) 本区储层非均质性强，岩性变化快，河道横向摆动改道、分岔和合并频繁，纵向多期河道砂体叠置，二维地震勘探难以精细刻画砂体发育状况。况且，二维地震测线的间距已经大于河道宽度。勘探、开发主要依靠钻井揭示砂体发育状况进行部署，或者甩开勘探，造成勘探周期长、成本高、成功率偏低。

(2) 由于二维地震勘探对叠置砂体和单砂体的空间展布预测比较困难，储层物性和含油性展布特征的预测更加困难，使得开发上低效开发井比例过高，影响产能建设（图 1-9）。

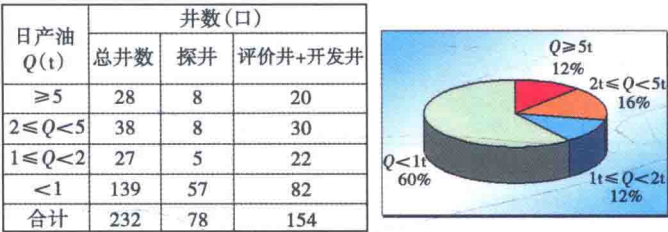


图 1-9 镇泾区块评价井、开发井效果图表

- (3) 二维地震勘探对低幅度构造的描述精细程度不够，影响了对构造控油因素的认识。
- (4) 由于二维资料的局限性，一些先进的地震处理解释方法和技术无法加以应用，或者应用效果受到影响，从而影响地震勘探的效果。

三、三维地震勘探的效果及必要性

2009 年，川口地区只完成了 17km² 的三维地震勘探（图 1-1），通过应用表明：

- (1) 三维成果构造细节信息更加清晰（图 1-10、图 1-11），能发现和落实微幅度构造圈闭和小断裂，为构造、地层等控油因素的研究提供了有用信息。
- (2) 三维地震勘探有利于河道砂体的识别和预测，能够更准确地预测和描述河道砂体展布细节（图 1-12），能有效降低钻探风险，提高勘探开发效益（表 1-2、图 1-13）。

表 1-2 钻遇砂体符合率统计表

振幅	总井数 (口)	符合率 (%)	砂体最厚厚度 (m)	砂体最薄厚度 (m)	砂体平均 (m)	符合井数 (口)	不符合井数 (口)
黄区	44	97.73	26.46	5.6	17.44	43	1
绿区	2	50.00	19.5	4.9	12.2	1	1

(3) 一些先进的三维地震处理、解释方法和技术的应用如多属性参数的提取与分析、相干体的应用、层切片的解释、全三维地震解释、可视化立体显示、岩性反演、有色反演、时频三元色预测技术、含油性预测等（图 1-14），将大大提高地震勘探的效果。

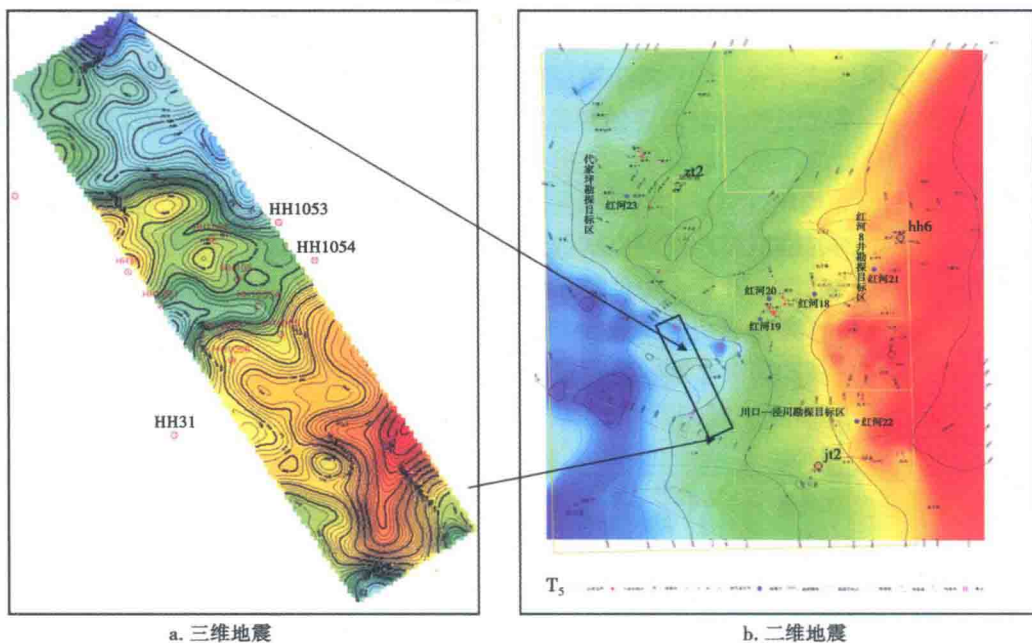


图 1-10 三维地震与二维地震 T_5 反射层（延安组底）构造图

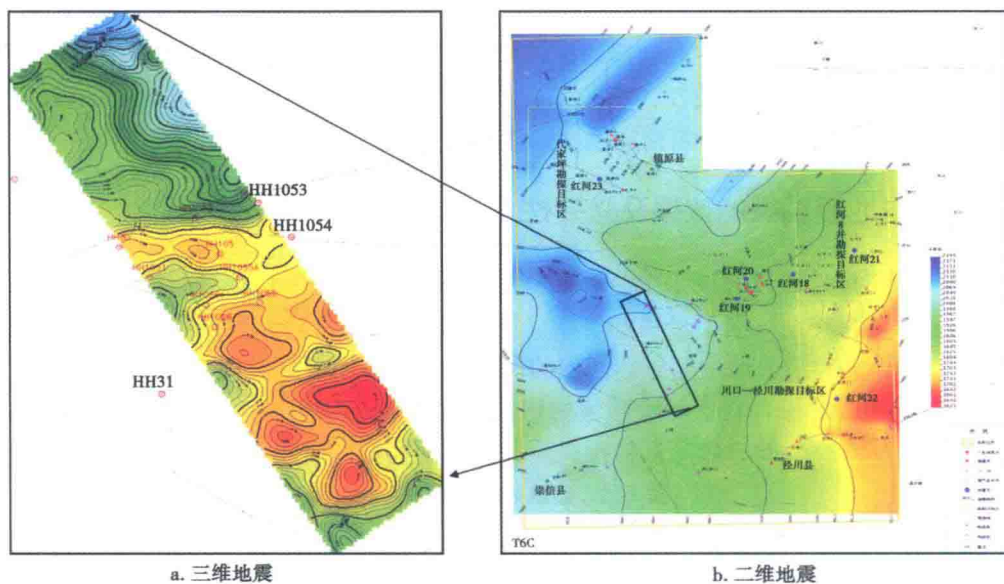


图 1-11 三维地震与二维地震 T_{6c} 反射层（长 7 段底）构造图

(4) 随着水平井在鄂尔多斯盆地南部的成功应用，三维地震勘探也必将对水平井部署建议、水平井轨迹动态调整起到越来越重要的作用。

因此，三维地震勘探能使区内构造成果更加精细与准确，进一步发现和落实微幅度构造圈闭和小断裂，准确地预测和描述河道砂体展布细节，作为一项发展成熟的地球物理技术，具有其他任何资料无法比拟的地下横向分辨能力，大牛地气田开发的成功经验也揭示了三维

第二章 黄土塬特点

按照成因类型和形态特征来看，华北油气分公司区块内镇原—泾川、彬县—长武以及陕北富县一带的黄土塬都属于古缓倾斜基岩平地上覆盖厚层黄土形成的塬，面积数平方千米至数十平方千米，小于陇东董志塬、陕北洛川塬和陇中白草塬。巨厚的黄土经过长期的雨水冲刷，形成了沟、梁、塬、峁、坡交错的复杂地形、地貌（图 2-1）。

长期以来，物探工作者对黄土塬的直观印象就是“沟壑纵横，黄土厚度大、干燥、疏松，激发、接收条件差，资料信噪比极低，地震数据采集难度很大”。但是经过对黄土塬的仔细研究，会发现以往对黄土塬还存在很多误区。例如黄土的厚度虽然大，但它是有规律的层状结构，在这些层中也可以找到很好的激发层位。黄土也不是几百米都干燥、疏松，反而每个黄土塬都是一座巨大的“黄土土壤水库”。因此黄土塬也有许多可以利用的地方，只有了解黄土塬才能“因地制宜”解决黄土塬的地震数据采集难题。

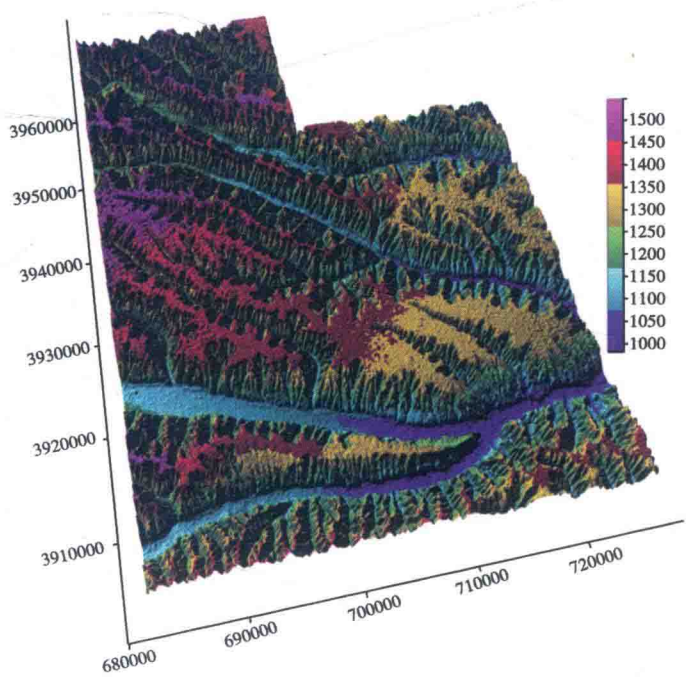


图 2-1 典型黄土塬地形、地貌图

第一节 中国北方黄土的基本构成

我国地质学家刘东生院士认为：原生黄土成因是借助风力，将西北戈壁、沙漠及其外缘地表的细颗粒物质，搬运到黄土高原及其以东的地区堆积，再经黄土化作用，成为现在的原