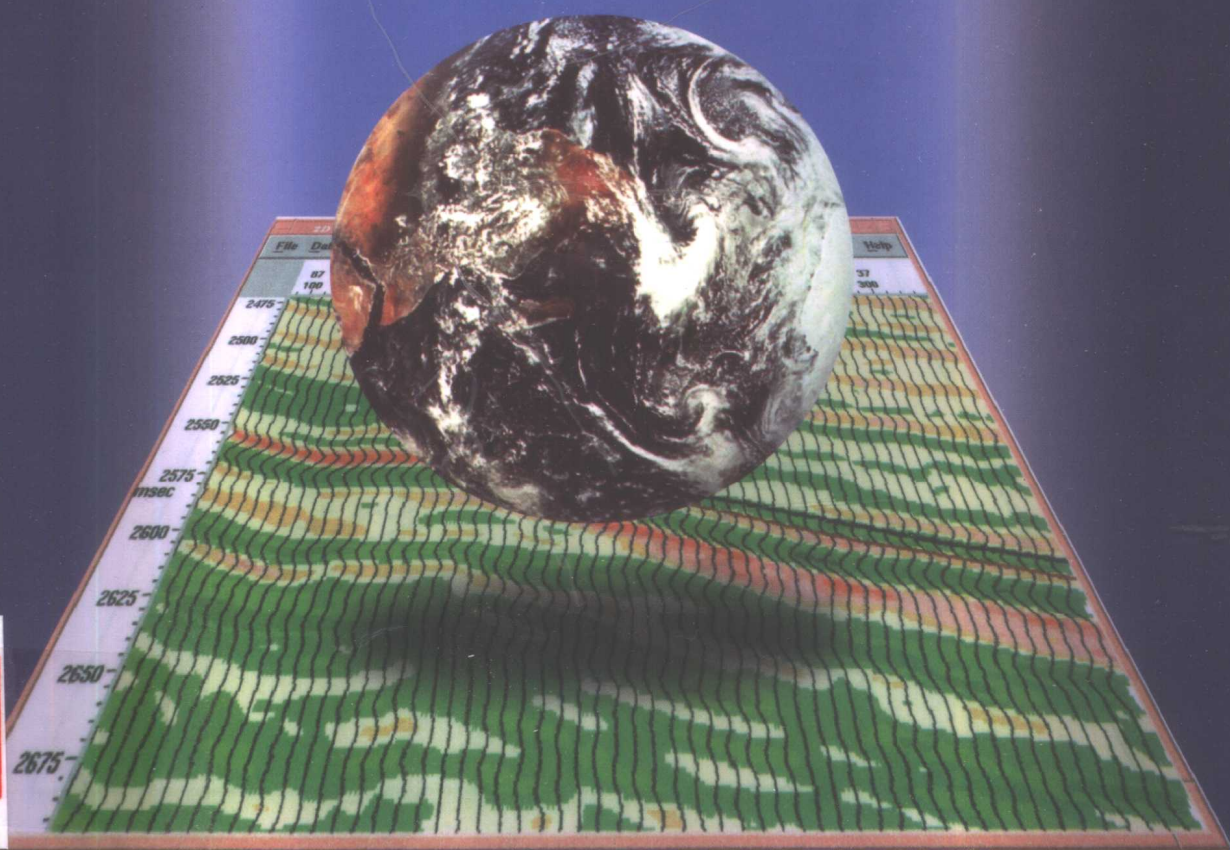


# 储层预测技术及应用实例

中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司 编



北京)  
30.2

石油工业出版社

# 储层预测技术及应用实例

中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司 编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书汇集了 11 篇论文,较全面地反映了近几年我国储层预测技术的进展,涉及面较广。每篇论文不仅提供了应用实例,而且还从原理上对储层预测方法进行分析和探讨,并提出了各种方法的应用范围和限制条件。论文的内容既涉及碎屑岩,又涉及碳酸盐岩等不同岩性的储层预测,应用领域从勘探阶段向开发阶段延伸,应用的地区从东部油田、中部油田到西部油田。

本书可供油气勘探和开发系统的技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

储层预测技术及应用实例/中国石油天然气股份有限公司  
勘探与生产分公司编.—北京:石油工业出版社,2000.9  
ISBN 7-5021-3115-9

- I. 储…
- II. 中…
- III. 储集层—研究
- IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 70481 号

石油工业出版社出版  
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)  
河北省徐水县印刷厂排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 270 千字 印 1—1000  
2000 年 9 月北京第 1 版 2000 年 9 月河北第 1 次印刷  
ISBN 7-5021-3115-9/TE·2382

定价: 28.00 元

# 《储层预测技术及应用实例》

## 编 委 会

主 任：赵政璋

副主任：何志新 阎世信

委 员：王喜双 曾 忠

李景明 欧阳永林

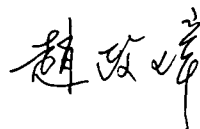
# 序

随着我国石油石化企业的重组，特别是中国石油天然气股份公司海外上市的成功，股份公司油气勘探的大环境发生了历史性的变化。如何以经济效益为中心，以商业储量为目标，大幅度增加油气储量，为股份公司的持续稳定发展提供足够的资源保障，是新形势下勘探工作面临的新课题。

我国陆上含油气盆地石油地质条件的大量研究表明，低渗透油气资源在我国油气资源总量中占有很大的比例。特别是随着半个世纪以来勘探工作的不断深入和勘探程度的不断提高，低渗透储量的重要位置越来越突出。如何面对这一地质现实，依靠科技进步，在低渗透中找相对高渗透，在低丰度中找相对高丰度，在低产中找相对高产的储层，成了近期急需解决的技术问题。

近年来的勘探实践表明，以地震资料反演为基础，多学科有机结合进行储层预测是解决上述问题的有效途径之一。目前不仅已形成了一些商业化的反演软件，为地震资料工业化反演提供了技术保障，而且多学科有机结合进行储层预测已经在生产中见到了明显效果。储层预测技术在油气勘探中的重要作用越来越引起了油气勘探工业者的极大关注。

为及时总结这方面的成果，勘探与生产公司及时组织召开了储层预测研讨会，不仅对近年来流行的反演方法从理论上进行了分析和探讨，而且对陕甘宁盆地探区的应用情况进行了认真总结和交流。本文集收录了这次会议的主要论文，代表了近年来陆上油气勘探储层预测的基本水平。论文内容既有理论深度，又有较强的生产实用性。论文的作者既有来自生产第一线的技术人员，又有科研院所的专家。本文集的出版对储层预测技术在油气勘探中的推广应用必将产生重要的推动作用。



2000年7月10日

# 目 录

鄂尔多斯盆地上古生界含气砂岩储层横向预测描述技术及效果·····	(1)
地震解释成果在鄂尔多斯盆地中生界石油勘探中的应用·····	(23)
鄂尔多斯盆地中北部储层预测技术及应用·····	(43)
靖边地区下古生界储层预测与开发井位优选·····	(57)
松辽盆地南部大安北地区青一段储层横向预测·····	(66)
四川盆地东部飞仙关组鲕滩储层地震预测技术及其应用·····	(73)
储层预测技术及其应用·····	(95)
精细油藏描述技术方法研究·····	(116)
几种主要波阻抗反演方法的比较及效果·····	(137)
储层预测技术及应用实例·····	(148)
地震反演的应用与限制·····	(154)
储层预测研讨会侧记·····	(160)

# 鄂尔多斯盆地上古生界含气砂岩储层 横向预测描述技术及效果

韩申庭 王大兴 夏正元 史松群

(长庆石油勘探局)

## 引 言

鄂尔多斯盆地上古生界二叠系含气砂岩地震储层横向预测经过三年多的实践,形成并推广了两套成熟而有效的技术系列:以波形特征分析、测井约束反演及 AVO 天然气检测等为代表的地震储层横向预测技术系列;以深化岩心刻度测井、多井建模、AVO 纵横波反演、储层属性分析和储层表征等为代表的地震气藏描述技术系列。确立了在勘探阶段和开发阶段应用地震地质综合布井的原则。

三年来在勘探阶段提供的完钻完试井 29 口,获工业气流井 21 口,成功率 72.4%,1999 年在榆林开发区提供 9 口生产井均获成功,成功率 100%,少钻 5 口开发井完成了原计划的产建任务。

鄂尔多斯盆地上古生界二叠系天然气气藏属低孔低渗三角洲砂岩隐蔽气藏,勘探难度大、风险高。而此类岩性储集体又是盆地内主要勘探目标。如何进行储层综合预测,地震目标处理技术是关键。为此,设置了储层地震横向预测和气藏综合描述技术研究专题。它要求在同一地质目标、同一计算机平台上,以钻井、地质、测井资料为基础,利用地震精细处理成果,采用特殊处理手段,进行储层的空间分布特征综合研究及储层物性和含气性初步研究,以提高天然气勘探开发的成功率和综合效益。

储层预测区范围:西起苏里格庙,东到神木,南起靖边,北到乌审召。范围内的四个上古生界二叠系主要勘探目标区,即舍利庙区的陕 173 井块、陕 165 井块、陕 147 井块和陕 188 井块,乌审旗区的陕 231 井块和陕 239 井块,榆林区、榆林南区和神木区(图 1),面积约 24000km<sup>2</sup>。

储层预测区概况:鄂尔多斯盆地上古生界主要勘探目标区位于靖边以北的毛乌素沙漠和横山—神木地区的黄土塬区,以及沙漠与黄土塬的过渡区(次生黄土发育),低降速层厚达几十米至上百米。榆、靖、乌地区内地震测线是 1995 年以来上古生界工业化评价勘探采集的高分辨率直测线为主,1993~1994 年采集的高分辨率直测线为辅,测网密度(1×1~2×4) km。而横、神地区则以沿沟弯线测线为主,测网密度(4×6~6×8) km。上古生界工业化评价勘探(1995 年)以前,主要针对下古生界目的层的探井 50 口,通过选井选层试气,在 8 口井在上古生界获工业气流,成为上古生界的主要目标勘探区。目的层主要为上古生界二叠系下石盒子组盒 8、山西组山 1 和山 2 陆相砂岩储集体,气藏属于低孔低渗的岩性圈闭气藏。

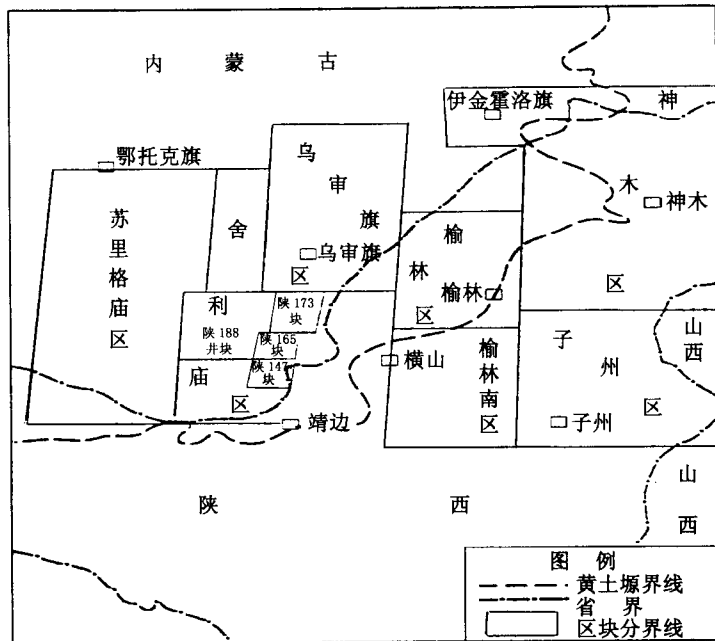


图1 鄂尔多斯盆地上古生界天然气勘探区块位置示意图

## 上古生界含气砂岩的基本地质特征

鄂尔多斯盆地上古生界主要储集层发育于下石盒子组盒8、山西组山1和山2陆相砂岩储集体。在上古生界沉积时期——早二叠世，由于华力西运动，沉积环境（古地貌、古气候）发生重大变化，即由石炭纪的海相沉积演变为二叠纪的陆相沉积，沉积格局由东西分异转变为南北分异。古地形呈北高南低的不对称状，北部物源区的不断抬升，使得整个早二叠世，物源相对稳定，陆相碎屑供给充分，大量的陆源碎屑源源不断地汇入湖盆，在盆地形成广阔分布的湖泊—三角洲体系。由于地势较为平坦，分流河道及网状河水系发育，因而三角洲平原成为三角洲砂层集中发育区。早二叠世早期——山西期为温暖潮湿气候条件下的含煤沉积，是一套深灰—浅灰色陆源碎屑沉积，到早二叠世晚期——下石盒子期，气候干热，植被大量减少，发育一套灰白—黄绿色陆源碎屑沉积。

(1) 山西组。储层预测区内主要发育三角洲平原分流河道砂体以及前缘河口砂坝砂体，分流河道砂体厚度从几米至数十米不等，横向一般变化较大，呈近南北向延伸的透镜状砂体群，砂岩粒度变化较大，垂向上砂体相互叠置，表现出网状河沉积的特点，砂体自北向南厚度逐渐变薄。在分流河道之间的支间沼泽及分流间湾发育区，形成上古生界煤层、暗色泥岩及泥质岩沉积。储层岩性以中—粗粒岩屑石英砂岩、含砾粗粒石英砂岩为主，其次为含泥中—粗粒岩屑砂岩、含泥岩屑砂砾岩。岩性分段性明显，其中石英砂岩段占储层总厚度的70%以上，石英含量大于90%，岩屑砂岩段石英含量77%~85%，而且自下往上岩屑和杂基的含量不断增加。孔隙类型主要为粒间孔、高岭石晶间孔、溶蚀粒间孔和微裂缝。在储层的物性方面，石英砂岩分选一般较好，以硅质胶结为主，平均孔隙度6.7%，平均渗透率



$3.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩屑砂岩颗粒排列杂乱，压实压溶交代蚀变作用显著，平均孔隙度 5.6% ~ 6.2%，平均渗透率  $0.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(2) 下石盒子组。储层预测区内主要发育着曲流河砂坝及三角洲平原分流河道砂体。曲流砂坝的侧向加积作用，往往形成近南北向复合砂体发育带，而分流河道的侧向迁移，其透镜状砂体的不断分岔合并构成分流河道的复合砂体横向变化大。受沉积相带的控制，下石盒子组自下往上分流间湾的泥质岩类沉积范围逐渐扩大。储层岩性主要为岩屑质石英粗砂岩，其石英含量明显低于山西组砂岩，一般 65% ~ 70%，岩屑含量基本稳定在 20% ~ 30% 左右，其成份主要是火成岩岩屑和变质岩屑，杂基也比较发育，一般 8% ~ 20%。从盒 8 到盒 5 石英含量逐渐减少，长石含量增加，其中盒 5 长石含量达 15%。孔隙类型主要为各类溶蚀孔隙、微孔隙和微裂缝。在物性方面，虽然具有相对较高的孔隙度，一般 8% ~ 10%，但是渗透率较低，一般为  $0.2 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。勘探结果证实控制上古生界气藏形成的关键因素是良好的储集层。

## 乌审旗—舍利庙区上古生界含气砂岩 储层横向预测技术及效果

### 储层地球物理特征

鄂尔多斯盆地长庆气田乌审旗—舍利庙区的主要气层是上古生界下石盒子组盒 8 和山西组山 1 的砂岩储集层。

盒 8 段砂岩储层速度为 4400 ~ 4600m/s，密度为  $2.4 \sim 2.6 \text{g/cm}^3$ ，波阻抗  $11000 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ ；泥岩速度 4000 ~ 4300m/s，波阻抗  $9360 \sim 10250 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 。山 1 段砂岩储层速度 4500m/s，密度  $2.5 \text{g/cm}^3$ ，波阻抗  $11000 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ ；泥岩速度 4100 ~ 4400m/s，波阻抗  $11000 \sim 12000 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 。

盒 8 和山 1 气层的主要电性特征，归纳起来是“二低、二高、一大、一中”，即低自然伽马、低密度，高电阻率、高补偿中子，大自然电位幅度、中高波阻抗。

这两套砂层分别可形成中—弱振幅反射。储层预测的困难是气层厚度较薄，储层预测的陷阱是储层含气后其速度降低到与粉砂质泥岩、泥岩的速度相近。一般情况下，山 1 段砂岩储层和盒 8 段砂岩储层反射在常规剖面上追踪困难，需借助于高分辨率反演技术来识别。

### 砂体厚度的预测技术

利用高分辨率地震资料，结合地质、钻井、测井等信息，对地震地质层位进行准确的标定，通过模型正演建立盒 8、山 1 砂体地震解释模式，对盒 8、山 1 地层地震波形特征进行分析，定性预测出盒 8 砂体分布。同时，利用 Parm、Seislog、Strata 等地震岩性反演技术，定量预测出盒 8、山 1 砂体的厚度。

### 河道砂岩体地震反射解释模式

根据鄂尔多斯盆地中部二叠系地层及参数建立了盒 8 或山 1 砂岩透镜体模型，设计该砂岩透镜体的厚度为 0 ~ 20m，用主频为 45Hz 的雷克子波制作地震正演合成记录，砂体在地震响应上有一明显的透镜状反射，砂体底部反射下凹， $T_{P8} - T_{P7}$  时差可反映砂体厚度的变化。据此，我们可用砂体的地震反射结构及形态定性预测砂体厚薄。

### 地震波形特征分析定性预测砂体厚度

首先在各井地震地质层位标定结果的基础上，从井出发，由点到线，在高分辨率地震剖

面上追踪出  $T_{C3}$ 、 $T_P$ 、 $T_{P8}$ 、 $T_{P7}$  等各层地震反射波，再由线到面解释出全区地震剖面上各层地震反射波。根据河道砂岩体地震反射解释模式，分析各井在实际地震剖面上  $T_{P7} - T_{P8}$  地震反射波形特征，并依据四类砂岩储层反射波形与储层厚度的关系，建立起四种解释模式。

#### 定量预测砂体厚度的技术

(1) 道积分。它将界面型的地震道转化为似相对波阻抗曲线，具有直观的地质含义，在地质模型不清或地质模型变化大的地区，应用此项技术对 20m 以上中高波阻抗块砂体的厚度解释取得一定的效果。

(2) Seislog 地震岩性反演技术。Seislog 是一种地震直接反演技术，它是无井约束反演。地震资料经高频补偿、相位校正和子波处理，把地震信号变成反射系数序列，再由地震反射系数与波阻抗之间的关系，从上到下逐步递推出各层的波阻抗。Seislog 地震岩性反演技术的优点是可在无井或少井的地区进行地震岩性反演，但其分辨能力主要取决于原始地震资料的频率。

(3) Parm 地震动力学反演技术。用单井建模，在规则精化约束条件下，交替求取井旁 CDP 道的波阻抗（反射时间的函数）和子波（表现为一参数的形式，它由频率、衰减、相移和归一化来决定）的初步近似值，使均方根误差达到最小来修正此近似值，沿地震测线各道的初始近似值就是用它上一个最接近的地震道反演结果，由此逐道的完成全测线反演。

(4) Strata 地震岩性反演技术。Strata 是一种井约束条件下模型化地震岩性反演软件。在精细处理的 Strata 地震反演剖面上进行储层岩性解释，首先要从井出发，标定出主要目的层层位，如盒 8 段地层的顶界、底界。然后根据速度高低（或波阻抗高低）确定岩性，高速和中速解释为砂岩，低速解释为泥岩。

#### 储层含气性预测技术

目前砂岩储层含气性预测技术包括四大类：亮点（暗点）技术、频谱分析技术、AVO 分析技术和模式识别，这几类技术预测含气性都具有一定局限性和适用范围，对单个地震属性的解释也存在多解性。因此，根据本地区盒 8 和山 1 储层的特点，从已知井出发，总结出对本区储层含气性预测比较实用而有效的一些技术。

#### 储层反射振幅能量分析

在围岩泥岩地震速度不变的情况下，致密砂岩与泥岩之间的反射系数大，含气砂岩与泥岩之间反射系数小，即砂岩含气后反射波振幅相对变弱。应用储层地震反射波振幅能量定性预测砂岩含气性在实际生产中具有多解性。如召 3 井也处于  $T_{P8}$  振幅较弱处，但是该井未获工业气流，主要原因该砂层含泥质较高，与砂岩含气波速降低具有同样的反射振幅特征。因此，还需采用其它技术进行综合预测。

#### 频谱能量特征分析技术

气层对地震波的高频信息具有很强的吸收作用。研究表明：频谱特征值  $F$  与气层物性 ( $h \times \phi$ ) 及气层丰度 ( $h \times \phi \times S_g$ ) 具有一定的线性关系。气层含气丰度与地震波频谱特征  $F$  成反比，含气丰度越高，地震波频谱特征  $F$  值越小。据此，我们用此特征可预测盒 8 段砂层的含气性。96657 测线盒 8 段频谱特征曲线  $F$  (图 2)，在低值段反映了储层的含气性较好，结果陕 235 井获工业气流。该技术要求地震资料质量较好，记录的频带较宽。

#### 人工神经网络技术

地震反射波是地层岩性、物性及含油气性等的综合反应，地层含气后会引引起地震波的一系列异常响应，包括振幅、频率、相位、极性等。因此，可用人工神经网络法建立地震参数

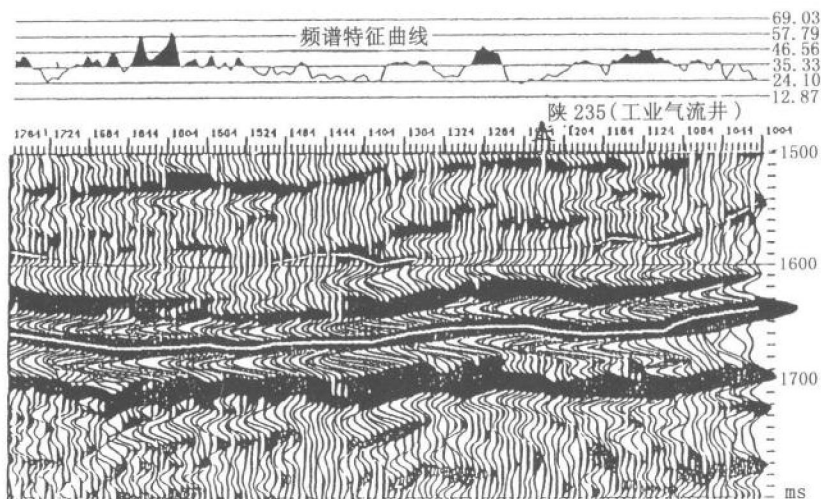


图2 96657测线盒8段频谱特征曲线(上)及地震剖面图(下)

与含油气性的非线性关系,并判识储层的含油气性。判识储层含气性的思路是:从地震资料中提取多种与储层含气性有关的特征参数,组成多维特征矢量,并设计一个非线性网络(我们采用三层BP网络),以井旁地震参数为输入,学习样本为已知井天然气无阻流量,对网络进行训练,使其将各类井的地震特征信息分离,然后通过训练好的网络对全区地震资料进行含气性预测。

### 储层横向预测的主要地质成果

#### 陕173井区

根据探明储量必须保证在同一圈闭或压力系统下计算的要求,目标处理和解释工作的重点是针对单砂体研究。该区采用Parm反演为主、Strata和WSI反演为辅的技术,特殊处理1381.95km,结合测井和钻井的对比结果,经平面上的砂体组合,作出盒8上和盒8下两层砂岩储集体平面预测图。

通过选用质量较好的31条测线、共860.6km的地震资料,进行人工神经网络油气判识和频率法天然气检测,较好地预测了该区盒8砂体天然气富集区、天然气较富集区及含气性较差的范围,该区存在一北北东向(陕191—陕179—陕173—陕148—陕167)、宽约4.5~7.7km的天然气较富集区。

1996年在陕173井区,采用地震目标处理和储层横向预测的六项技术为储量面积圈定和有效厚度计算提供了可靠依据,在鄂尔多斯盆地上古生界首次提交了天然气探明储量。

#### 乌审旗区

(1) 盒8砂体展布。1997~1999年利用储层波形特征分析法和Strata地震岩性反演等横向预测六项技术,特殊处理解释3801.25km/111条,作出了乌审旗区上古生界二叠系盒8下砂岩厚度图,预测该区存在4条北北东向砂体厚带:陕231井西砂带、陕231井砂带、陕239井砂带和陕235井砂带,砂带宽4~10km,砂厚一般10~15m,厚度最大可达30m。

(2) 山1砂体展布。用地震波形分类和Strata地震岩性反演预测了乌审旗区的山1砂岩展布,该图揭示乌审旗区存在一较大的北北东向山1砂岩带,砂带宽5~11km,厚度最大可达25m,主砂带由北向南沿陕199—陕235—陕176—陕239—陕178一线展布。

(3) 乌审旗区盒 8—山 1 储层含气性预测。通过选用质量较好的 42 条测线共 1352.27km 地震资料, 进行人工神经网络油气判识, 结果该区 4 条砂带中, 以陕 231 井砂带、陕 191 井砂带和陕 235 井砂带含气性较好, 陕 231 井西砂带含气性较差。

1998 年该区勘探上古生界的同时兼探下古生界, 在马五 4 提交了天然气控制储量, 陕 231 井在盒 8 试气日获几十万立方米, 成为长庆天然气勘探的重要发现。1999 年在陕 231 井块盒 8 气藏和陕 239 井块盒 8 气藏提交了天然气控制储量。

#### 舍利庙区

(1) 陕 165 井块。陕 165 井区是 1999 年度提交天然气探明储量的区块之一。由于区内井距偏大 (近 9km), 因此井间储层预测显得尤为重要。为此, 用道积分、Seislog 地震岩性反演、测井约束地震反演等技术, 特殊处理解释 450km, 较为准确地预测出了陕 165 井区盒 8 段砂层的平面展布规律, 区内的主体砂带是陕 167—陕 165 砂体, 该砂体带由于河道砂体侧向的叠合, 使其宽度最大处达 5~6km, 厚度也可达 30~35m。1999 年在该主体砂带上圈定了含气面积, 提交了天然气探明储量。

(2) 陕 147 井块。该区块 1999 年特殊处理解释 610km, 提供的陕 223 井钻遇盒 8 砂厚几十米, 陕 224 井钻遇盒 8 砂厚几十米, 钻遇山 1 砂厚几十米 (气层), 产量待试。从预测的盒 8 砂层平面展布看, 区内存在 2 个主要砂体带, 砂体宽度 4km 左右, 平均厚度 15m 以上。在陕 147 和陕 25 井之间已经部署了评价井陕 225, 其钻探结果有待证实。该井块 1998 年在盒 8 气藏提交了天然气控制储量。

(3) 陕 188 井块。区内原有两口探井陕 188 井和桃 1 井。以山 1 段为主要地质目标, 通过陕 188 井的层位标定和正演, 建立山 1 砂层的反射模式, 从而追踪山 1 砂体带的横向变化。通过特殊处理解释 1545km, 勾绘出了山 1 上部砂层的厚度图。1999 年提供的桃 2 井, 山 1 砂层厚度几十米, 试气获工业气流。另外部署的评价井桃 3 井目前正在钻探。

#### 储层横向预测的效果分析

1996~1999 年地震目标处理针对上古生界二叠系下石盒子组盒 8 和山西组山 1 砂岩储层提供的完钻井 18 口, 砂岩厚度预测符合标准的占 77.8%, 完试井 13 口, 有 8 口井获工业气井流, 钻探成功率为 61.5% (表 1)

表 1 1996~1999 年乌审旗—舍利庙区地震预测提供勘探井位效果

序号	井名	钻探目的层	地震预测砂厚 (m)	实钻砂厚 (m)	厚度预测误差 (m)	目的层试气	其它层试气
1	X1	盒 8	15	18	3	工业气流	
2	X2	盒 8	12	16	4	未试	山 1 工业气流
3	X3	盒 8	10	2	-8		山 1 低产
4	X4	盒 8	30	29	-1	工业气流	
5	X5	盒 8	20	18	-2	工业气流	
6	X6	盒 8	20	13	-7	气显示	马五 <sub>4</sub> 气显示
7	X7	盒 8	20	17	-3	未试	马五 <sub>4</sub> 工业气流
8	X8	盒 8	20	18	-2	工业气流	山 1 低产

续表

序号	井名	钻探目的层	地震预测砂厚 (m)	实钻砂厚 (m)	厚度预测误差 (m)	目的层试气	其它层试气
9	X9	盒 8	20	18	-2		
10	X10	盒 8	11	6.5	-4.5		
11	X11	盒 8	20	24	4		
12	X12	盒 8	15	19	4	工业气流	
13	X13	盒 8	15	8	-7	工业气流	
14	X14	盒 8	15	12	-3		
15	X15	盒 8	15	13	-2	气层 3.2m, 待试	
		山 1	18	14	-4	低产	
16	X16	盒 8	20	16	-4	气层 5.0m, 待试	
		山 1	15	16	1	工业气流	
17	X17	盒 8	15	13	-2	气层 4.3m, 待试	
		山 1	15	18	3		
18	X18	盒 8	15	14.2	-0.8	待试	
		山 1	15	11.8	-4.2	气层 12m, 待试	

说明: 1. 提供的完钻 18 口, 砂层厚度预测符合标准的占 77.8%;

2. 完试 13 口, 获工业气流井 8 口, 钻探成功率 61.5%。

## 榆林—神木区上古生界含气砂岩储层 横向预测描述技术及效果

### 储层横向预测技术及效果

#### 储层地球物理特征

鄂尔多斯盆地长庆气田榆林区主要气层是上古生界二叠系山西组高阻抗砂岩储集层, 整个山西组地层 90~110m, 山西组储层主要发育在山 2 段, 山 2 段砂岩储层平均声波时差  $210\mu\text{s}/\text{m}$ , 速度  $4750\text{m}/\text{s}$ , 密度  $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ , 波阻抗  $11900 (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ , 属高阻抗砂体; 暗色泥岩速度  $3500\sim 4000\text{m}/\text{s}$ , 密度  $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ , 波阻抗  $8500\sim 9500 (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ ; 煤层速度  $2500\text{m}/\text{s}$ , 波阻抗  $6000\sim 7000 (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 。

山西组山 2 段气层的主要电性特征, 归纳起来是“三低二高一”, 即低自然伽马、低密度、低补偿中子; 高电阻率、高波阻抗; 大自然电位幅度。

针对山 2 段的岩性解释困难在于, 一是山 2 三角洲平原砂体的分支或伸入靠近湖岸的部位, 致密粉砂质泥岩与砂岩的速度相近; 二是早二叠世早期的含煤沉积在局部地区断断续续分布, 造成类似砂岩体反射的假象。因此, 要谨慎运用波阻抗解释法和波形特征分析, 必须与 AVO 分析技术相结合, 综合判识岩性及厚度。

#### 储层横向预测技术

经过 1996~1997 年的实践形成了一套山西组高阻抗砂岩储层横向预测技术系列 (图

3)。其主要内容是：以高分辨率的地震采集技术和目标处理技术为基础，以岩性反演处理技术（Strata、ANN、RM 等）为骨干，以砂体综合解释技术为核心，以高阻抗微降法与高阻抗砂岩储层 AVO 分析法相结合为主要手段进行钻前含气性检测，采取的关键技术有：

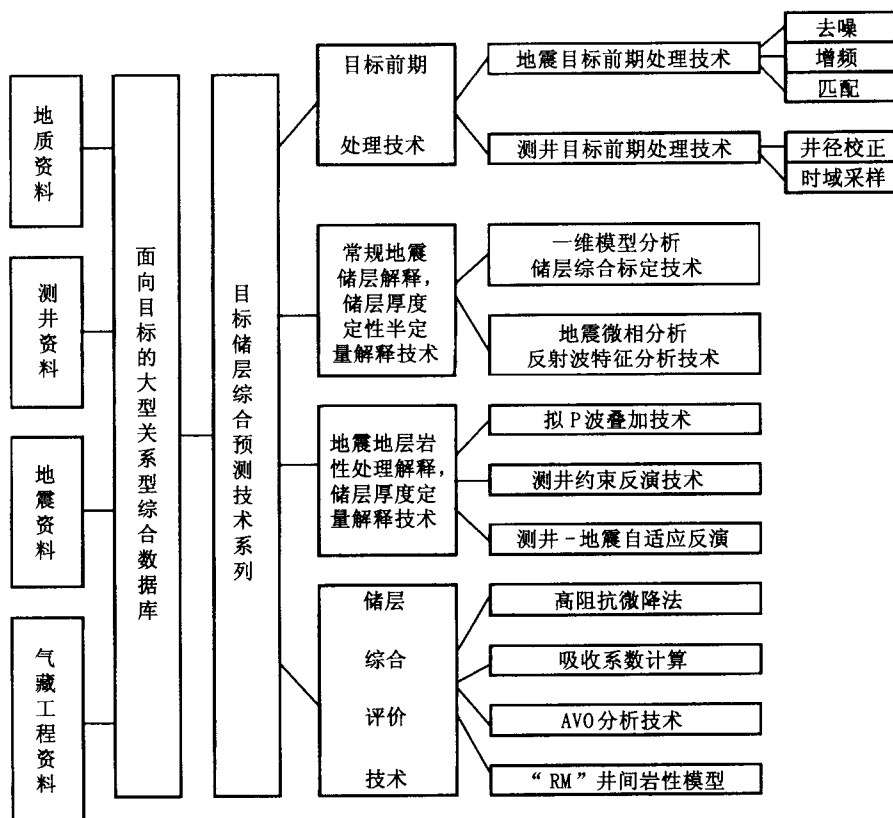


图 3 榆林区地震储层横向预测技术

(1) 储层反射波波形特征分析技术。以  $T_{C3}$  反射波为标准，标定山西组砂岩储层反射，并依四类砂岩储层反射波形与储层厚度的关系，建立四种解释模式。

(2) 匹配处理技术。使二维主测线与相交测线、井旁地震道与合成记录达到最佳拟合。

(3) 拟 P 波叠加技术。由拟 P 波叠加技术得到的零炮检距反射系数真实地反映了岩层界面两侧的波阻抗变化，可以提高地震预测的精度。

(4) 测井约束地震反演技术。一种采用最优化算法的高分辨率迭代反演技术，在榆林区可定量预测 8m 以上的砂层厚度。

(5) 测井—地震自适应联合反演技术。实现高分辨率的多地层参数（如速度、密度、孔隙度、泥质含量等）剖面的直接反演，见表 2。

(6) 地震约束井间岩性模拟技术。实现地震约束井间岩性剖面模拟（图 4）。在榆林区结合岩性反演预测的砂体平面分布可在三维空间立体描述山西组砂岩储集体的空间展布形态。

表 2 三类高分辨率地震反演技术对比表

分 类	Strata 基于模型的测井 约束地震反演	Parm 井约束条件下的 地震动力学反演	WSI (ANN) 测井—地震 自适应联合反演
计算原理	用单井，多井，假井建立横剖面模型，采用最优化共轭梯度算法迭代求解	单井，单道细化建模迭代和子波求解，并依次逐道外推	神经网络自适应建立测井与地震的线性与非线性映射关系，进行相关参数转换
反演基础	褶积模型	褶积模型	信息论
判别准则	合成剖面与实际剖面残差剖面能量最小	正演记录道与实际记录道相关性最大	测井地震转换数据间的相关性最大
视分辨率	一个采样间隔	一个采样间隔	一个采样间隔
输出结果	声速，声阻抗	声速，声阻抗	声波时差，泥质含量等
适应范围	不同勘探程度，构造简单（或仅发育正断层），同一沉积相带的稀井广探地区	构造简单平缓，井网较密，勘探程度较高的地区	构造相对简单，同一沉积相带，有已知井控制的勘探程度较高区

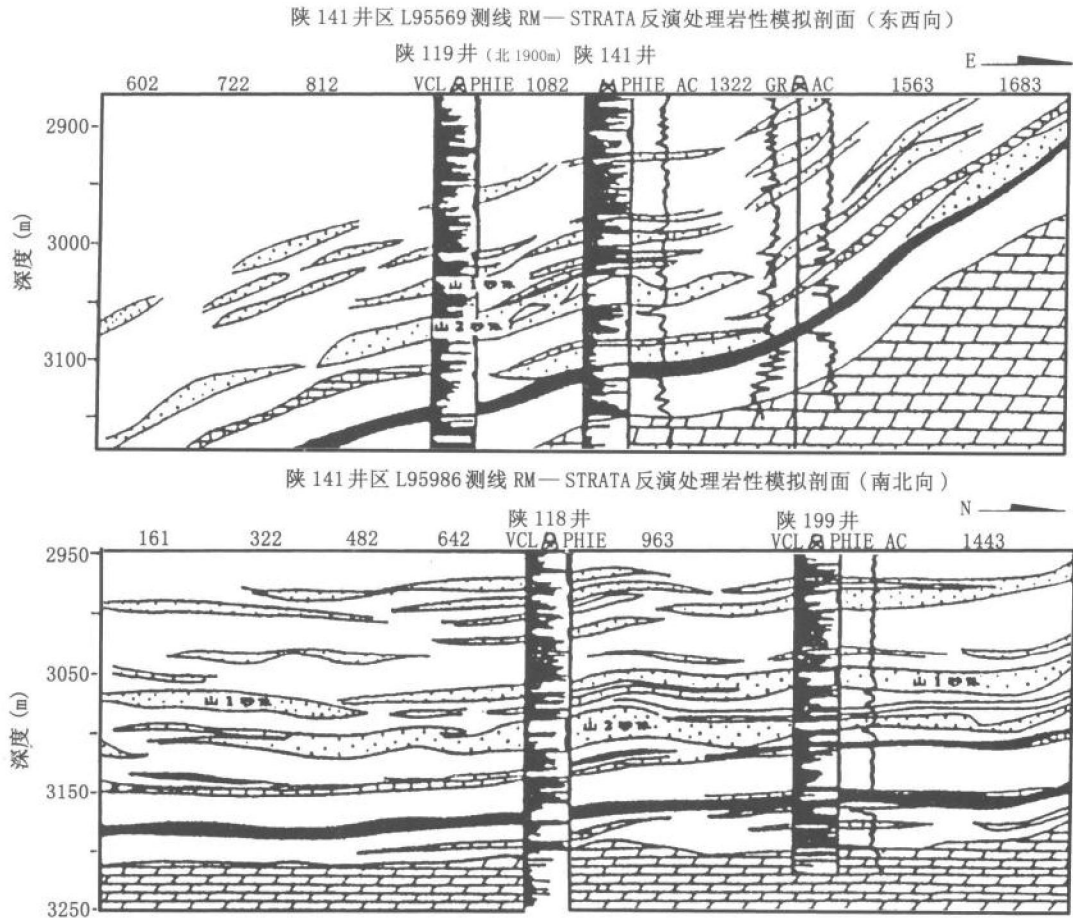


图 4 榆林区过陕 119 井 RM—Strata 反演处理岩性模拟剖面

(7) 吸收系数计算技术。该项技术可用于岩性解释和油气预测及地震资料处理中的衰减补偿。

(8) 高阻抗微降法含气性检测。在反演波阻抗剖面上解释的高阻抗砂岩层中寻找波阻抗稍微下降的低阻抗带，定性作为含气储层发育的证据。该法简单直观，但是无法区分高阻抗砂质泥岩、泥质砂岩和含气砂岩储层。

(9) 高阻抗砂岩储层 AVO 分析法 在 CDP 超道集上寻找极性反转点，可以根据其出现的炮检距大小，半定量预测储层的含气性，如陕 211 井井旁 CDP 超道集上出现极性反转点的炮检距就比陕 117 井小，前者高产而后者中产。由于榆林区的 AVO 技术预测效果好，因此该方法在山西组高阻抗砂岩的含气性检测中有推广应用的价值。

#### 储层横向预测的效果分析

榆林区山西组储层的地震横向预测是一项高保真度高信噪比高分辨率地震勘探野外采集、资料处理、特殊处理和岩性解释四大环节联系为一个整体的系统工程。各个环节关键技术措施的实施有力地保证了榆林区地震资料的质量，整体上提高了储层横向预测的可信度和精度（表 3）。1996~1998 年特殊处理 99 条 2850.4km，共提供探井井位 16 口，完钻完试 16 口，其中 13 口获工业气流，钻探成功率 81%。由此榆林区以山 2 储层为主，山 1、盒 5、马五 1 和太 1 储层为辅发现了一个大面积多层系复合含气的大气藏。

表 3 1996~1999 年榆林神木区山西组砂岩地震提供勘探井位效果

井名	钻探目的层	地震预测砂厚 (m)	实钻砂厚 (m)	厚度预测误差 (m)	天然气检测方法	山 2 试气	其它层试气	预测失败原因
Y1	山 2	26	27	+1	高阻微降法	工业气流		
Y2	山 2	21	23	+2	高阻微降法	工业气流	马五 <sub>1</sub> 工业气流	
Y3	山 2	20	16	-4	高阻微降法	工业气流	山 1 工业气流	
Y4	山 2	17	2	-15	高阻微降法		太 1 工业气流	测线头、跨相带反演井距大
Y5	山 2	17	8	-9	高阻微降法	气显示		记录质量差，砂层泥质成分多
Y6	山 2	18	14	-4	高阻抗 AVO	工业气流	马五 <sub>1</sub> 工业气流	
Y7	山 2	20	22	+2	高阻抗 AVO	工业气流		
Y8	山 2	20	18	-2	高阻抗 AVO	工业气流		
Y9	山 2	30	37	+7	高阻抗 AVO	工业气流		
Y10	山 2	34	37	+3	高阻抗 AVO	工业气流		
Y11	山 2	35	37	-2	高阻抗 AVO	工业气流	盒 8 低产	
Y12	山 2	30	32	+2	高阻抗 AVO	工业气流	盒 5 工业气流	
Y13	山 2	20	6	-14	高阻抗 AVO	工业气流		
Y14	山 2	18	8	-10	高阻抗 AVO	工业气流	太 1 低产	



井名	钻探目的层	地震预测砂厚(m)	实钻砂厚(m)	厚度预测误差(m)	天然气检测方法	山2试气	其它层试气	预测失败原因
Y15	山2	18	15	-3	高阻抗 AVO	工业气流		
Y16	山2	20	4	-16	高阻抗 AVO		盒8低产	跨相带约束反演横向井距大
Y17	山2	15	14	-1	高阻微降法	待试	盒8待试	
Y18	山2	15	12	-3	高阻微降法	待试		

说明: 1. 提供的完钻井 18 口, 砂层厚度预测精度符合标准的占 72.2%;

2. 完试 16 口, 获工业气流井 13 口, 预测成功率 81%。

### 勘探阶段榆林区山西组砂岩储层横向预测的布井原则

(1) 推广以波形特征分析、Strata 波阻抗反演和 AVO 天然气检测为代表的成熟而有效的储层横向预测实用技术。

(2) 超前安排地震勘探和储层预测, 随着测网密度和完钻井数增加, 将新测线及新完钻井按新的闭合回路测网重新处理, 并在同一沉积相带建立较为客观的地震模型, 提供下一轮井位, 形成“滚动式”勘探的良性循环。

(3) 从失败井(陕 202)吸取经验教训: 必须坚持在高质量的地震剖面上定井, 强调地震原始单炮记录要有反射、中间处理成果合理、最终叠加剖面上储层段内幕反射闭合, 并且井旁道与合成记录匹配, 从而确保了最终决策资料的可信度。

(4) 合理确定勘探井距, 提高勘探效益。因该区地震采集品质好, 储层预测可信度高, 从而为实施稀井广探奠定了坚实的基础。布井原则为: 沿砂体走向以“之”字型布井, 在预探阶段, 井距 10~13km, 在此基础上, 提交控制储量, 在评价阶段, 井距 6~8km, 在此基础上提交探明储量。最终探明井距平均 7.4km。

长庆气田榆林区采用实用的横向预测技术, 坚持稀井广探, 在高品质的地震剖面上实施“滚动式”布井, 形成了长庆式上古生界的勘探方法和技术系列。

### 气藏描述技术及效果

鄂尔多斯盆地上古生界砂岩气藏描述是在深化储层横向预测的基础上, 以大型的关系数据库平台为基础, 紧密结合地质、测井和地震资料, 在榆林区形成了一套较适用的气藏描述技术系列, 见图 5。

### 岩石物理学参数测定

以往地球物理参数是由测井分析获得的。由于测井资料的局限性, 井径不规则、泥浆污染等因素使得对岩石的地球物理参数(纵横波速度和泊松比等)很难求准, 特别是缺乏长源距声波测井的榆林地区。为此, 我们挑选了陕 211、陕 117、陕 203 和陕 173 井山西组的 30 块岩样到中国科学院地球物理研究所地球动力学高温高压开放实验室, 进行井下状态的模拟实验测量。

经过实验得出, 在相同状态下(自然风干时)纵横波的关系式为

$$v_p = 1.6068v_s - 19.157$$