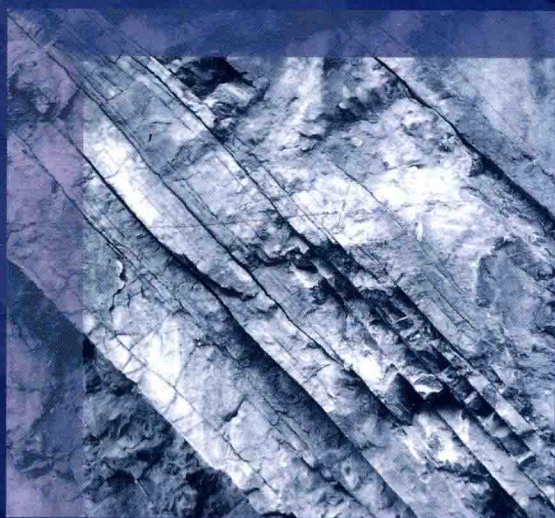


SHENCENG SHALIYANTI
YANSHI WULI XINGZHI YU SHIBIE FANGFA

深层砂砾岩体 岩石物理性质与识别方法

罗红梅 著



石油工业出版社

深层砂砾岩体 岩石物理性质与识别方法

罗红梅 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书讨论了深层砂砾岩体岩石物理性质与地球物理识别的研究思路及研究内容,剖析了东营北带砂砾岩体构造、地层及沉积特征,研究了具有复杂组分结构的砂砾岩体岩石物理模型,深入探讨了基于扩展 Wyllie 速度模型的地震敏感属性优选及有效储层地球物理识别方法,并介绍了砂砾岩体油藏的预测及目标筛选。

本书可供从事石油地质、地球物理等专业的科研人员及石油院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深层砂砾岩体岩石物理性质与识别方法/罗红梅著.
北京:石油工业出版社,2016.5

ISBN 978-7-5183-1206-1

I. 深…

II. 罗…

III. 砂岩油气田-岩石物理性质-研究-东营市

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060778 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)64523541 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

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8.75

字数:208 千字

定价:66.00 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

东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体的勘探大致经历了3个阶段:第一阶段(1994—1997年)勘探发现期,以寻找中浅层构造油藏为主;第二阶段(1998—2005年)勘探深化期,对中浅层沉积特征和油气富集规律的认识逐渐深化;第三阶段(2005年至今)勘探高潮期,以寻找中深层岩性油藏为主。2005年以来,先后部署的盐22井、永920井、盐222井、盐227井和永928井等一批探井均取得成功,显示了位于陡坡带东部的盐家砂砾岩体巨大的勘探潜力。但由于勘探层系埋深加大、沉积和成藏复杂以及受地震资料品质的限制,影响了对该类油藏的准确认识,制约了储量的进一步升级。

砂砾岩扇体通常具有沉积厚度大、多期叠置、岩性变化快、储集空间类型及其孔隙结构与演化规律复杂、储层非均质性强等基本特点。在测井曲线上,一方面,砂砾岩体岩石组分对测井响应的贡献不同,造成其不同相带、不同岩相的速度变化复杂;另一方面,砾岩扇体的岩电标志不明显,用常规的测井资料不易划分岩性,进而难以建立地质模型。同时,受埋深增大和地震资料品质的影响,常规地震资料识别砂砾岩体的精度降低,应用地球物理参数对储层进行准确描述还有较大的不确定性。因此,如何将地质、地球物理资料有机地结合,构建一种适用的方法对砂砾岩体进行有效地识别和储层描述,是生产中急需解决的地质难题。

笔者充分利用已有的勘探、开发成果和丰富的地质、地球化学和地球物理资料,从砂砾岩组构的微观特征观测入手,开展岩石力学性质的测试分析,构建了适合于东营北带砂砾岩的岩石物理模型,确定了不同沉积相带地层速度;借助波动方程正演模拟、地震资料针对性处理、高分辨率储层反演等技术方法,在正确识别并系统研究砂砾岩体空间展布特征的基础上,探索建立了适合于深层复杂砂砾岩储集体的地球物理识别、物性预测及含油气性评价等多种方法。本书把岩石物理模型与地震预测紧密结合起来,不仅对砂砾岩体的勘探、开发具有较高的实用价值,而且为其他类型地质体的刻画提供了有益的参考。本书研究内容对正确地建立断陷盆地陡坡带砂砾岩体的空间展布模式,形成和完善盆地深层储集体的地震地质综合预测方法具有重要的理论意义;同时,对于准确预测东营北带砂砾岩有利储集体的分布规律,提高油气勘探成效有重要的实际应用价值。由于古近纪箕状半地堑背景下的陡坡砂砾岩体储层在渤海湾盆地普遍发育,研究认识和成果具有重要的推广应用价值。

本书依托中国科学院地质与地球物理研究所承担的国家油气重大专项“深层油气、非常规天然气成藏规律与有利勘探区评价技术”(2011ZX05008-004)课题,并得到胜利油田勘探开发研究院的大力支持。在此特别感谢中国科学院地质与地球物理所罗晓容研究员,胜利油田宋国奇教授、王永诗教授和刘书会教授,他们在本书的完成中给予了悉心的指导。

由于笔者学识有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 深部砂砾岩有效储集体的形成与分布	(2)
第二节 岩石物性与地震属性参数的关系	(3)
第三节 深部储集体预测技术及流程	(6)
第二章 区域地质概况	(8)
第一节 构造特征及演化	(8)
第二节 地层发育特征	(11)
第三节 深层砂砾岩体的沉积特征	(14)
第三章 深层砂砾岩体岩石物理模型研究	(21)
第一节 岩石物理特征分析	(21)
第二节 扩展 Wyllie 速度模型的构建	(29)
第三节 砂砾岩体硬岩模型研究	(42)
第四节 新模型方法的实际应用	(48)
第四章 砂砾岩体岩电特征及地震属性敏感参数研究	(55)
第一节 砂砾岩储层岩电性特征分析	(55)
第二节 砂砾岩体模型正演及地球物理响应特征	(59)
第三节 砂砾岩体敏感地震属性参数的优选	(68)
第五章 砂砾岩体的地球物理空间分布预测	(76)
第一节 基于点约束贝叶斯稀疏脉冲反演的储层预测	(76)
第二节 基于伽马随机模拟的岩性识别方法	(90)
第三节 基于岩性体自动追踪的储层描述方法	(96)
第四节 基于射线弹性叠前反演的储层物性预测	(104)
第六章 实际应用及成效	(110)
第一节 深层砂砾岩体储层预测研究	(110)
第二节 有利勘探目标优选及成效分析	(120)
附录	(125)
参考文献	(129)

随着勘探技术的不断进步和勘探程度的不断提高,中国东部陆上的主要含油气盆地如渤海湾盆地、松辽盆地等都进入了精细勘探阶段,盆地中浅层油气勘探的主要对象逐渐由构造油气藏转向岩性地层等隐蔽油气藏,油气勘探难度逐年加大(潘元林等,2003)。近年来的油气勘探实践证明,盆地深层蕴藏着丰富的油气资源,在研究和勘探程度较低的盆地深层开辟增储上产的新领域已成为油气勘探必然的发展趋势。然而,与盆地中浅层相比,深层的油气勘探对象更为复杂,勘探难度更大,前人积累的经验和技术方法往往难以直接应用于深层油气勘探实践,其中盆地深层有效储集体的准确识别和预测是深层油气勘探急需解决的重要应用基础性问题。

东营凹陷是渤海湾盆地东南部的一个典型的“箕状”断陷,由利津、博兴、牛庄、民丰4个次级洼陷和北部陡坡带、中央背斜带及南部斜坡带等构造单元组成(李丕龙等,2004)。东营凹陷北带是受陈南边界断层控制的陡坡构造带(简称东营北带),古近系沙河街组发育规模宏大的砂砾岩体,扇体多期叠置、横向呈扇形连片分布,厚度达800m以上,属低孔低渗储层(孔凡仙等,2000),长期以来是东营凹陷的重要勘探对象。目前,东营北带共完钻探井1600多口,发现了胜坨、单家寺、滨南、盐家等16个油气田,上报砂砾岩体类储层探明储量近 7×10^8 t,占该区总储量的48%。

近10年来,砂砾岩体成为东营北带深层油气勘探的重要目标,也是东营凹陷储量发现的最大贡献者(张善文等,2008)。一方面,深层砂砾岩体油藏不断获得突破,并发现了新的含油层系。如胜坨地区坨765井、利津地区新利深1井、民丰地区丰深1井等在4000m以下获得了工业油气流,证实了东营凹陷深层巨大的勘探潜力。同时,在沙四段盐上层段发现了扇根遮挡型的砂砾岩体油藏。如2005年完钻的盐22井钻遇油层79.4m,此后的永920井和盐222井等相继获得成功,其中盐222井在3710.2~3994.0m解释油层25层372.3m,创砂砾岩体钻遇油层厚度之最。这表明大型水下扇在缺少构造背景的条件下,同样能形成大规模的岩性油气藏。2009年,东营北带沙四段整体上报探明石油地质储量4000多万吨,展示了东营北带深层砂砾岩体勘探的重要地位。

然而,随着东营北带砂砾岩体的勘探逐渐向深层复杂型岩性油气藏转变,由于勘探层系埋深加大,地震资料品质变差,砂砾岩体有利储集相带和物性变化难以把握,影响了对该类油气

藏分布规律的准确认识,制约了油气勘探的进一步深入。深层砂砾岩储集体的识别取决于对砂砾岩体内幕强非均质性的岩石物理性质及其地球物理响应的正确认识,涉及的关键难点主要体现在3个方面:

(1) 受盆地陡坡带构造演化与地层充填等复杂地质过程的控制,深层砂砾岩体的成因复杂,加之地震资料分辨率、信噪比低等客观因素的限制,地震剖面上砂砾岩体的成像效果不够理想,砂砾岩体识别和解释困难。

(2) 深层砂砾岩属低孔低渗储集体,地球物理响应特征受多种因素影响,砂砾岩非均质性、砾石成分复杂、砾石大小和形态不均等对储层岩电性、地震反射特征造成很大的影响,砂砾岩体岩石物理性质与地球物理参数之间关系需要准确厘定。

(3) 目前相对成熟的地球物理描述技术都无法直接应用于砂砾岩体储层的有效预测,储层的空间分布及连通性难以准确把握,影响了深层砂砾岩油气藏的评价。

第一节 深部砂砾岩有效储集体的形成与分布

东营凹陷北部陡坡带发育多种成因类型的砂砾岩扇体,砂砾岩扇体的形成受到多种因素的控制,国内学者对此进行了大量的相关研究,并获得了很多成果与认识。总体上,前人认为砂砾岩扇体的分布主要受古构造、古气候、湖平面升降变化等因素控制(孔凡仙,2000;武恒志,2001;毕义泉,2002;谢风猛等,2002;王宝言等,2003;姜素华等,2003;鄢继华等,2005)。古构造的控制作用主要体现在断裂活动对砂砾岩发育的控制,即断裂活动强弱、边界断裂结构控制了凹陷的形态、规模、物源、水系,进而直接影响砂砾岩体的成因类型、规模、形态和分布(姜素华等,2003;孔凡仙,2000;王宝言等,2003)。古气候变迁主要影响沉积物的类型,因为在不同的气候条件下,地表具有不同的干湿度、植被面貌和地球化学环境等,从而使风化剥蚀、搬运和沉积条件均有很大的差别,并最终导致沉积物类型的不同。特别是周期性的气候变化与幕式构造运动共同控制了层序体系域的分布及内部构成,在不同时期沉积的砂砾岩体类型和发育程度有很大的区别(姜素华等,2003;王宝言等,2003;王居峰,2008)。湖平面相对升降是控制砂砾岩体成因类型的主要因素之一,湖平面的周期性变化对断陷湖盆的沉积物堆积过程起着重要的作用,特别是陡坡带的断裂活动频繁,构造抬升、下沉使边缘地带湖平面的变化更加复杂,造成水动力条件的复杂多样性,以至于陡坡带的不同部位发育不同类型的砂砾岩体(王宝言等,2003;王居峰,2008)。

不同类型的陡坡带和断裂组合型式下,形成了不同的砂砾岩体分布模式,总体特征为:盆缘沟谷控制扇体发育的位置,构造坡折带控制砂体的厚度,构造坡折带之下砂体明显加厚,砂体的展布方向受控于坡折断裂的走向。同时,由于陡坡带构造样式的不同,在湖盆沉积各个时期,其发育了不同类型的砂砾岩体,陡坡带的构造样式和湖平面的相对变化控制了砂砾岩体的时间分布序列(程日辉,1999;张立强,2005;高祥成,2008),随着湖平面的上升,一般表现为冲积扇、扇三角洲、近岸水下扇、湖底扇的沉积演化序列。

胜利油田勘探开发研究院提出了针对东营凹陷北带东部半地堑的充填模式。民丰洼陷裂谷期沉积地层(孔店组、沙河街组及东营组)构成了一个三重层序:下部主要为冲积—河流相沉积,中部主要为深—半深湖相体系,而上部则主要为浅湖—河流相沉积体系。这种三重层序

反映了构造沉降及对应的沉积旋回,轴向砂体是半地堑充填中的重要砂体类型,但在不同演化阶段有较大差异。

因而,结合三维构造建模及古构造的分析,半地堑的充填历史可能远比前人认识到的民丰地区的“沟扇体系”复杂得多。在沙四上亚段沉积期,民丰地区半地堑存在滩坝及滨浅湖等浅水沉积;陡坡带发育的砂砾岩体存在近岸水下扇、扇三角洲等多种类型;半地堑内发育轴向砂体;冲沟沉积体系体现多物源、多沉积体系、多期叠加的特点。

第二节 岩石物性与地震属性参数的关系

一、弹性波传播理论

岩石是构成地球的最重要的物质,地球的结构和动力学性质必然与岩石的各种物理性质相关。岩石物理学是一门以岩石为研究对象,物理学为研究手段的新学科。从结构上看,岩石是由固体的岩石骨架和流动的孔隙流体组成的二相体,岩石的弹性则是这样的二相体的等效弹性。岩石的弹性不仅取决于固体岩石骨架(矿物)的弹性性质,而且岩石中孔隙的大小(孔隙度)、孔隙的几何形态(裂纹或孔洞)以及孔隙中流体等因素对岩石的弹性性质都会产生巨大的影响。综合上述诸多因素,建立针对岩石弹性的数学物理模型,有助于岩石弹性理论的发展,并更好地指导具体的工程应用。Gassmann, Biot 和 Mavko 等在岩石弹性力学理论研究方面取得了开创性的突破,建立了弹性波在岩石中传播特性的基础理论,为后期岩石物理学的发展奠定了坚实的基础。

迄今,地震波是研究地球内部特征最有效的工具之一。基于岩石中地震波传播性质的地震方法是目前地球物理勘探中最主要的方法(Anstey, 1991),岩石中弹性波速度是联系岩石性质与地质学的有效桥梁(Hearst 等, 2000; Mavko 等, 1998; Schon, 1996)。

随着岩石物理学学科的发展,针对岩石物理问题的发展和不同类型岩石弹性性质等的研究,众多国内外学者通过大量的实验研究建立了各式各样的理论模型。与测井和地震资料相关的岩石物理分析最多的就是流体替代问题, Gassmann(1951)提出关于弹性波在多孔介质中的传播理论,推导出孔隙岩层充满流体的弹性模量公式,并建立了著名的 Gassmann 方程,奠定了后期对沉积岩的弹性特性和物性之间研究的基础。Biot(1956)推导出利用岩石骨架性质预测与频率相关的流体饱和岩石中速度的理论公式,发展了 Gassmann 的流体饱和和多孔隙双相介质理论,奠定了双相介质波动理论的基础,同时 Biot 理论已被推广到各向异性介质。Gassmann 理论适用于低频情况,与 Biot 理论极限情况是一致的,一般称为 Biot—Gassmann 理论。Marion(1990)根据理论边界计算提出孔隙从一种充填相替换成为另一种充填相所造成的弹性模量和速度变化的试探算法,并从骨架速度预测水饱和的岩石速度,进而通过水饱和的岩石速度预测冰冻岩石的速度,实践证明该方法应用效果不错。Geertsma 和 Smit(1961)对 Biot 理论的低频和中频做了近似,根据岩石骨架性质预测饱和岩石相关速度。Nur(1991, 1995)详细论述了流体饱和度、孔隙流体压力、孔隙空间几何形态等各种因素对岩石弹性的影响,并指出双向介质理论在地震勘探领域有重要的应用前景。Mavko 和 Jizba(1991)提出借助于岩石模量和压力的关系来计算流体饱和后岩石高频模量的简单方法。史谔(1990)通过对砂岩岩石弹

性声波速度和饱和度、孔隙流体分布的关系进行分析,认为进水和失水过程显示不同的纵、横波速度与饱和度关系,速度不仅与饱和度有关,还与不同饱和阶段的孔隙流体分布有关,而且也是水和岩石骨架之间的物理及化学作用所致。

著名学者史诒(1990)、邓继新(2009)、葛洪魁(2001)、伍向阳(1999)等作为国内岩石物理方向的领军人物,曾经对各种岩性进行了岩石弹性、含油气性等内容的综合研究,总结出有关弹性性质的许多结论,提出多种不同的经验公式,发展并完善了岩石物理理论。

二、岩石物理理论模型

由于影响岩石物理性质的因素众多,且相互之间的关系复杂,所以在进行研究时需要将实际的岩石进行模型化,把需要研究的问题进行等效转换,只保留影响岩石物理性质的主要因素,而忽略次要因素。常用的岩石物理学模型有层状介质模型、分散状介质模型、离散颗粒堆积介质模型、网状介质模型、连续介质模型等(孙建国,2006)。

层状介质模型是最简单的一种岩石物理模型,考虑岩石的矿物组成,将结构杂乱无章的岩石等效为水平层的集合。该模型最初由 Bruggeman(1935)提出,后期经过专家学者的大量研究,陆续提出了一些分析储层参数和岩石性质之间关系的理论模型。如 Voigt 模型对岩石弹性上限进行了约束;Reuss(1929)模型计算的有效模量是岩石弹性模量的下边界;Hill 对 Voigt 上限和 Reuss 下限做了算术平均,无具体的物理含义,当需要估算模量而不需要考虑该模量所容许的范围时,Hill 模型最为有效。

基于离散颗粒堆积介质模型的考虑,Herz(1881)和 Mindlin(1949)建立了球体接触模型,Hertz—Mindlin 理论制订了判别未胶结砂岩与胶结砂岩的划分界限。Hashin—Strikman(1963)(以下称 H—S)边界利用变分原理推导复合材料的弹性性质,相对于 Voigt—Reuss 边界的范围要窄,H—S 边界能更准确地估算岩石的有效弹性模量,对于双相介质,H—S 边界与 Reuss 模型边界是重合的;K—T 模型(Kuster—Toksöz 模型)把孔隙度和孔隙纵横比与纵横波波速联系起来,由于考虑岩石中的孔隙形状,计算过程较为复杂,但是相对其他模型更为精确;Budiansky(1965),Hill(1965)和 Wu(1966)等提出自相容近似方法,该方法充分考虑了岩石孔隙的形状对弹性的影响,计算过程不再选定一相材料作为基质,而是针对目标解的有效介质作为基质,通过不断改变组成岩石内含物之间的相互作用来求解,适用于大孔隙的岩石,模型计算过程是通过迭代方法进行的,计算量较大。与之对应,Cleary(1980),Norris(1985)和 Zimmerman(1991)建立了微分等效介质模型(DEM),通过往固体矿物中逐渐加入包含物来模拟双相混合物,进一步提高了弹性模量的预测精度。Xu—White 模型精确模拟岩性、孔隙度、泥质含量等因素对岩石波速的影响,并满意地预测了饱和流体后的岩石波速。上述理论和模型采用不同方式计算出弹性模量,对速度预测非常有用,但是绝大部分仅在特定条件下才可以使用。

分散状介质模型假设岩石中存在一种基本的物质,而其他物质以分散的形式分布于其中。网状介质模型由不同半径、不同截面形状和不同曲折程度的管状物体相互连接而成,这种模型能较好地逼近自然界的孔隙性岩石的内部结构。分散状介质模型和网状介质模型主要是为了研究岩石的电性性质,对岩石的导电性做出解释。

连续性介质模型则假定岩石矿物成分是按一定规律连续性分布的,可以对岩石进行比较逼真的描述,结合离散颗粒堆积介质模型发展了岩石物理模型。

三、岩石物理应用研究

前人针对岩石物理应用开展了广泛的研究,并通过大量实验进行了验证。西北大学(2010)承担的国家“863”课题“佐普立兹(Zoeppritz)弹性阻抗储层预测技术”、“973”课题“深层煤矿床快速探测的地震判识标志”等,针对砂岩和碳酸盐岩开展了广泛的岩石物理测试,利用等效介质理论进行了横波速度预测方法研究。甘利灯(2002)对高尚堡油田沙三油层,进行了四维地震技术及其在水驱油藏监测中的应用研究。魏建新(2008)利用各向异性理论曾对变质灰岩、砂岩、裂隙大理石等岩性进行了研究,认为可以从横波方向和速度值判断出纹理砂岩和裂隙大理岩样品存在不同程度的速度正交各向异性和裂隙方向等特征。

对于东营凹陷北部陡坡带砂砾岩储层微观结构方面的相关研究,主要以岩石学分析为基础,确定成岩作用对孔隙发育的影响程度,对储层进行定性和定量评价。袁静(1999)对永安镇地区砾岩体储层微观特征进行了研究,指出砾岩储集岩的孔隙类型多样,孔隙结构复杂,总体表现为孔隙度较低,孔隙连通性较差,渗透率偏低,以低孔隙度、低渗透率储层为主。徐晓晖(2003)对东营凹陷北部陡坡带西段水下扇体进行了储层特征研究,从微观上分析该砂砾岩体储层的孔隙类型和孔隙结构特征,并对影响储层物性的主要成岩作用进行描述,得出该类储层与袁静一致的结论。另外,操应长(2010)等对东营北带砂砾岩体进行了储集物性及影响因素等方面的研究。

地震波传播不仅与反射层的构造形态及厚度等因素有关,而且与反射层的岩石物理性质密切相关,岩石物性参数及孔隙流体性质变化等因素对地震波响应有一定的影响。前人针对岩石物性与地震属性之间的关系开展过一定的研究,张宏(2009)进行了基于模型的岩石物性与地震属性之间关系的研究,李凤君(2005)等分析了地层物性变化对地震属性的影响。杨志芳等(2009)综述了近年来国内外地震岩石物理在岩石、流体基础研究、烃类检测等方面取得的主要进展,为建立岩性参数、物性参数与地震速度、密度等弹性参数之间的关系提供了研究手段。

断陷盆地陡坡边界断裂下降盘广泛发育的砂砾岩非均质性极强,相对于疏松砂岩而言,具有岩石结构致密、岩石成分复杂、纵向单层厚度大、横向相变快的特点。前人对济阳拗陷古近系砂岩进行了系统的岩石物理测试(马中高,2008),建立了适合不同条件下的岩石物理模型,为地震属性的岩性解释和流体反演等奠定了基础。但砂砾岩,尤其是近岸水下扇扇根亚相一扇中亚相部位的砾石含量较高的粗相带,由于发育大量不同尺度、不同成分的砾石,粒度从细砾、卵石、粗砾甚至是巨砾、块砾均有发现,砾石成分主要包括变质岩、火成岩及碳酸盐岩,导致岩石速度与砂泥岩差异较大,利用现有砂岩的岩石物理模型难以准确描述这种砾石含量较高且致密的砂砾岩的岩石物理性质。砂砾岩胶结致密、孔隙度极低,加之大量砾石成分的影响,如何更好地构建速度模型和经验公式是该项研究的关键环节和难点。同时,由于砾石、基质等影响产生的岩石物理参数改变及其导致的地震属性特征变化等尚缺乏深入的研究。

第三节 深部储集体预测技术及流程

一、预测技术现状

地震储层预测技术是近 20 年随着地震采集方法和装备改进、处理技术不断提高,而迅速发展起来的储层预测方法。该技术综合利用地质、钻井、测井和地震等信息,以地震资料为主定量描述含油气储层的空间展布和几何形态,并对储层的微观特征进行横向预测。目前,储层预测技术主要包括地震反演技术和地震属性分析技术两大类。

砂砾岩扇体的地球物理识别与描述包括两个方面:一方面是利用地震相进行砂砾岩扇体的识别。不同类型的砂砾岩扇体,由于沉积的地质条件不同,加之物源的距离、水体深度、水动力条件和形成机制等各方面的差异而导致其形态、规模、岩性和物性都有所不同,因此各类扇体具有不同的地震相特征(王金铎等,1998;孔凡仙,2000;曹树春等,2000;马丽娟,2004;乔俊,2005;白钢,2005;陈萍,2006);另一方面是地震属性分析技术对砂砾岩扇体的识别预测描述,包括:层位标定技术识别砂砾岩扇体顶底界面(孔凡仙,2000;曹树春等,2000;白钢,2005),时频分析技术进行砂砾岩扇体旋回划分(高永进,2010),相干体分析技术、三维可视化技术等方法刻画砂砾岩体的边界(刘书会,2003;陈萍,2006;王树刚,2009),测井约束地震反演技术精细地描述储层的平面展布、埋深以及物性的变化规律(马丽娟,2004;白钢,2005;陈萍,2006)。

针对砂砾岩体厚层叠置、期次难以划分;储层非均质性强、有效储层难以预测两个地质问题,从地球物理的角度探索了适应性的技术方法。其中,自主研发的基于高阶谱的多尺度时频分析技术,实现了大尺度的沉积旋回分析及小尺度的砂体成像,识别精度可达到 4 级旋回、厚度 30m,满足了巨厚砂砾岩体单井期次划分和横向追踪对比的需要;基于优势属性建模的波阻抗反演技术等多项技术的开发和综合运用,实现了对砂砾岩体产状、发育规模和有效储层展布的预测;利用叠前属性反演技术对砂砾岩体含油性进行了探索性研究。

二、预测内容及流程

针对东营北带砂砾岩体的勘探现状以及国内外砂砾岩体研究的进展及存在的问题,从以下 4 个方面对深层砂砾岩体空间分布预测开展研究。

1. 深层低渗砂砾岩岩石物理参数特征研究

选择陡坡带不同沉积类型的砂砾岩体样品,开展岩石物理参数的系统测试分析。基于岩心观察、成像测井资料,以岩心样品的弹性参数实验室测试为手段,通过统计分析,获得砂砾岩各类岩性中砾石大小、砾石、基质及胶结物等的成分及含量等认识,在统计认识的指导下,有针对性地补测岩石样品,获得不同成分砾石条件下的岩石物理参数,分析砂砾岩体岩石物理参数与储层非均质性等内在联系,分析其与经验关系、理论模型的异同,建立针对深层砂砾岩体的储层较强非均质性条件下砂砾岩体多参数的岩石物理分析量版。

2. 储层岩电性特征及地震属性敏感参数分析

以岩石物理分析为基础,统计研究区内典型井各类岩性包括基质及砾石成分、含量差异等所形成的测井响应特征,建立各岩性与测井响应间的对应关系。结合岩石物理参数分析,以校

正后的测井资料和地质资料为约束条件,在合成地震记录与实际地震资料的标定下,开发模型正演模拟方法,分析由于储层微观变化所对应的测井及地震响应特征,总结能够表征有较强非均质性的砂砾岩体变化的地震敏感参数。

3. 砂砾岩体的地球物理识别及空间分布预测

探索先进的地震资料处理技术,改善地震资料品质,为准确识别储层提供高质量的地震资料。依据岩电性特征及储层地震敏感参数分析结果,探索针对砂砾岩体的优势地震属性分析方法,对主要沉积期的砂砾岩储层的分布特征进行平面预测;开展剖面和平面的高分辨率储层波阻抗反演及基于伽马随机模拟的岩性反演方法的探索,开发有效的岩性体自动追踪技术,结合钻井井间砂体对比,研究砂砾岩体的空间展布特征、厚度和纵横向上的相互叠置关系等。

4. 实际应用及成效

针对东营北带砂砾岩体的解剖所建立的上述研究技术系列,可以进一步应用于复杂储集体发育特征预测、油气运移输导体系分析、可能的圈闭类型及发育部位预测等方面的研究中,为岩性及构造—岩性油藏等复杂储集体的研究提供借鉴。在研究认识的指导下,结合实际井的勘探结果对本研究形成的认识进行充分的检验,证明研究成果的成效性。

上述研究内容及技术路线相互间的关系可以如图 1-1 所示的技术路线框图展示。

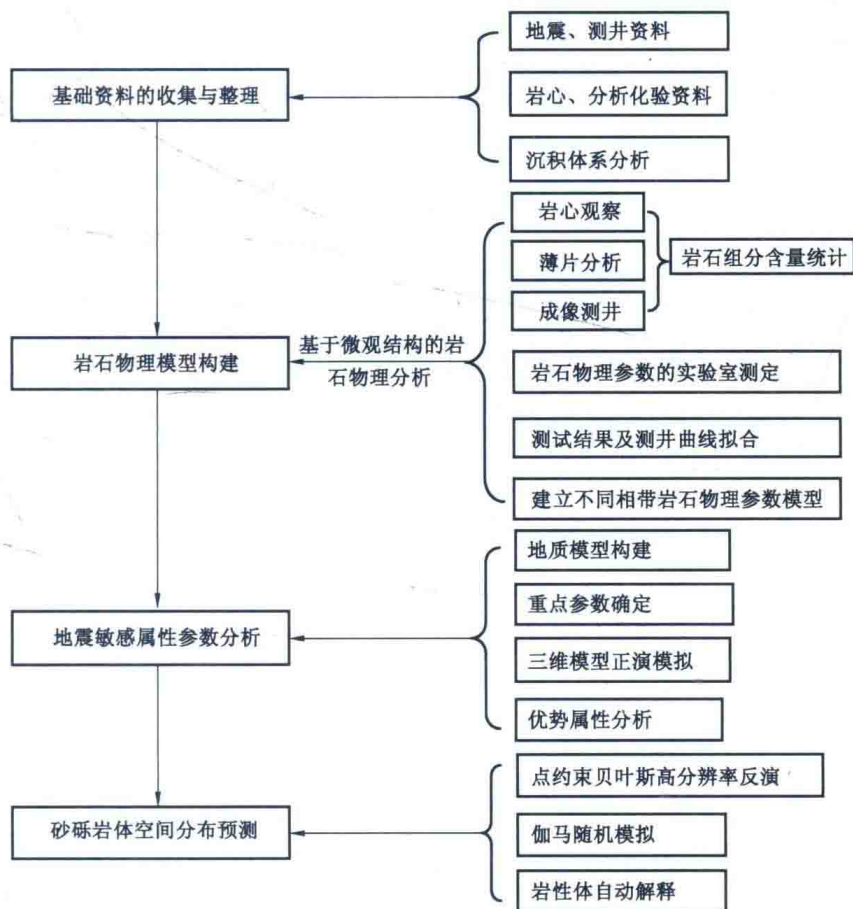


图 1-1 研究技术路线框图

研究目标区位于济阳坳陷东营凹陷北部陡坡带(图 2-1),西起滨县凸起,东到青坨子凸起,南起洼陷带,北到陈家庄凸起,呈近东西向展布,勘探面积约 2000km²。研究区是东营凹陷重要的含油气区带,预测剩余资源量在 13×10^8 t 以上,勘探潜力巨大,也是近年来胜利油区最重要的增储阵地。在多年的油气勘探过程中,前人曾开展了大量的基础地质研究工作,本章在系统整理前人研究成果的基础上,着重对研究区的构造背景、地层充填和沉积特征进行梳理和总结,以此作为砂砾岩体岩石物理性质和地球物理预测方法研究的基础。

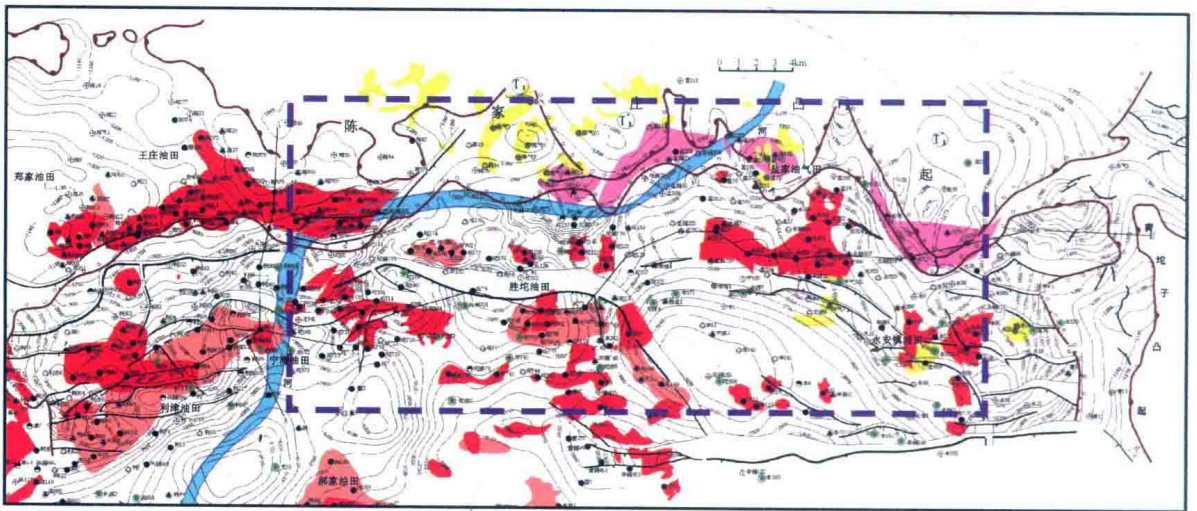


图 2-1 东营凹陷北带深层砂砾岩体勘探形势图(据胜利油田勘探开发研究院,2012)

第一节 构造特征及演化

东营凹陷是渤海湾盆地东南部一个北陡南缓的“箕状”断陷湖盆,北部陡坡带属于东营凹陷的一个二级构造单元。研究区受边界主断裂的控制,具有地势陡、坡降大的特点,而坡降度、产状因不同构造演化阶段断裂活动的影响,呈规律性的变化,造成了陡坡带湖相沉积发育及演化的差异。

一、构造特征

东营北带总体表现为陈南边界断层控制的陡斜坡构造,断面坡度一般在 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$,且剖面形态呈上陡(倾角 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$)、下缓(倾角 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$)的铲形。由于长期继承性活动,古近系底面落差均在 2000m 以上,一般为 3000~4000m,最大可达 6000m,造成坡脚很深,但水平距离较窄,一般只有几千米,最大仅十几千米。横向上由近东西向的滨南段(30km)、北东向的利津段(32km)、近东西向的陈南段(44km)及北西向的青南段(38km)组成,长约 144km。断面东陡西缓,东部永北、青西、青南地区断面倾角较大,可达 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,古近系底面落差中间大、两头小,中部胜坨地区为北东向断层与北西向断层的交汇处,落差最大可达 6000m,向西至滨南地区降为 5000m,向东至永北、青西地区降至 3000~4000m。

依据地震资料解释获得的沙四上亚段纯下顶界(T_7 反射层)构造图显示(图 2-2),深部层系古近系沙四段的构造格局与地层沉积明显受到边界断层形态及二级断裂的影响。区内的二级、三级断裂均以盆倾正断层为主,部分断层切入基底。断层走向呈近东西向和北东向,形成平行断阶式组合。二级断裂主要有两条,其中胜北断层延伸 20 余千米,断距 200~800m;利津断层东西方向延伸 10 余千米,最大断距 700m。这种构造特征使得河流入湖后能量急剧下降,来自北部陈家庄凸起和西部滨县凸起的物源短距离搬运,沿利津、胜北断裂上升盘和下降盘发育多种成因的砂砾岩扇体。

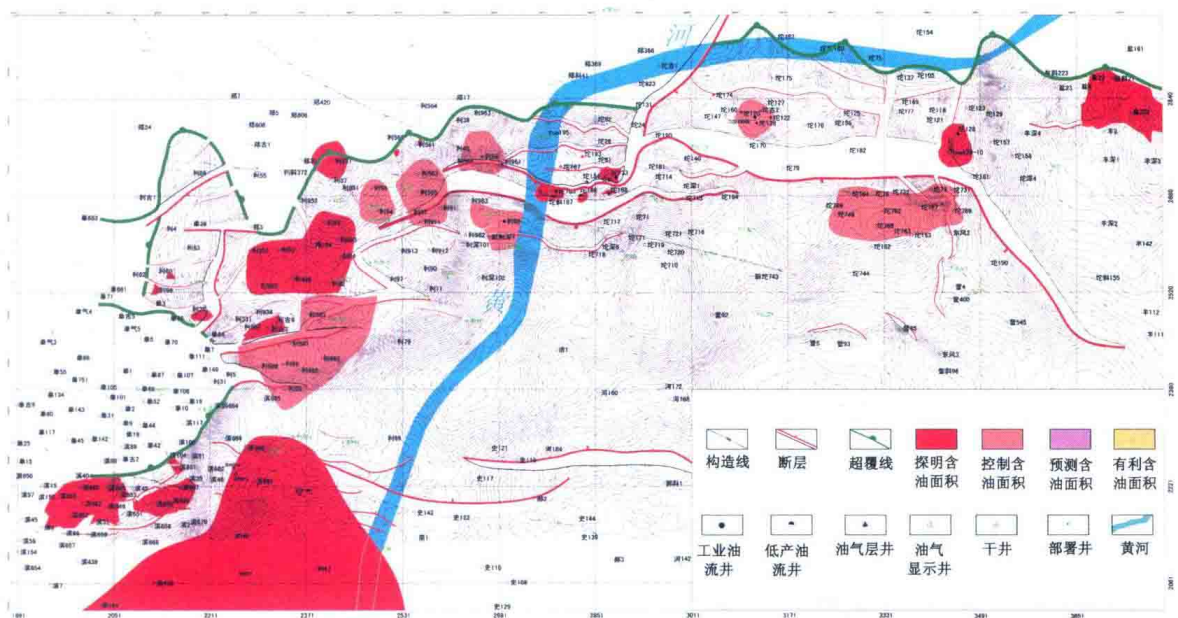


图 2-2 东营北带中西段沙四纯下顶界面(T_7 反射层)构造图

陡坡带断裂活动对地层沉积的控制作用主要表现为:断裂活动控制了凹陷的形态和规模。东营凹陷北部陈南边界断裂的强烈活动造成陡坡带“山高水深”的构造格局,这为砂砾岩扇体近物源沉积所需的碎屑物质形成及搬运提供了沉积背景。同时,断裂控制了物源和水系。断裂活动造成了地势高差很大,使上升盘成为剥蚀区,而沿断裂带附近发育的横张断裂决定了上升盘水系的流动方向,从而发育了一系列沿凸起边缘呈裙带状分布的近岸水下扇体。另外,断

裂活动的强弱程度、边界断裂结构不同直接影响了砂砾岩扇体的成因、规模和分布。

二、构造演化及沉积充填序列

1. 构造演化阶段

根据古近系的地层和构造发育特征,将东营凹陷北带构造演化分为5个阶段。

(1)初始断陷期($E_k-Es_4^{\downarrow}$ 发育期)。东营凹陷北部的陈南主断裂继承了中生代末期的特点,持续强烈活动,对地层分布和凹陷格局起了控制作用,地壳开始断陷。

(2)深陷期($Es_4^{\uparrow}-Es_3^{\uparrow}$ 发育期)。以强烈的基底沉陷为特征,伴随济阳运动I幕发生,块断运动加剧,盆地沉降幅度大,湖盆水位逐渐加深。胜北断层开始形成,随着断层的持续剧烈活动,沙三中亚段沉积后期受陈南断层和中央背斜的双重作用,断层下降盘沉积了巨厚的沙河街组。

(3)裂陷收敛期($Es_3^{\uparrow}-Es_2$ 发育期)。裂陷活动进入晚期之后,大量次级断裂对初始构造带进行了改造。胜利村和坨庄背斜及其上部地堑逐渐发展成型。由于早期充填,水体变浅,盆地开始收缩。

(4)再次拗陷期(Es_1)。由于济阳运动II幕的发生,湖盆再次沉降和扩张,但与深陷期相比,沉降幅度与速度都小得多。由于该时期凹陷边界断裂活动减弱,盆地性质由断陷向断拗转化。

(5)萎缩期(Ed)。断陷湖盆再次收缩变浅,东营运动末期,利津—胜坨地区的主要构造格局已经定型。

2. 沉积充填序列

东营凹陷古近纪作为完整的构造演化旋回,陡坡带砂砾岩体沉积从形成、发育及消亡具有一定规律性,沉积充填序列表现为:冲积扇体系从孔店组、沙四段沉积至沙三段、沙一段及东营组呈后退式分布,由下部洪积扇沉积逐渐演变为近岸水下扇体沉积,形成退积为主、垂向加积为辅的特点;向上呈向前进积、垂向加积的推进过程,直至再反向演变为陆上的冲积扇体系。而重力流沉积在湖相、冲积扇沉积体系的控制下,分布于深水部位,在冲积扇前方或侧翼向沿陡坡带形成纵向加积的有序排列。这种完整或不完整的沉积序列,与陡坡带特殊地势紧密相关,并决定了砂砾岩体从洼陷至盆缘呈多期叠置(图2-3)。

在断陷初期,陡坡带以滨浅湖最为发育,且湖盆下降速度与沉积速度大致相当。因此,在临近湖岸地带形成了近源快速沉积的洪积扇体,滨浅湖地带则主要发育扇三角洲和辫状河三角洲。

随着盆地演化逐渐向断陷后期和深陷期过渡,陡坡带主断裂边界坡度加大,湖盆的沉降速度大于沉积速度,成为非补偿性沉积湖盆,其水体也逐渐加深,早期滨浅湖相演变为半深湖—深湖沉积,而滨浅湖相沉积仅在陡坡带范围很窄的区带分布,因此早期扇体纵向上逐渐向重力流机制为主的近岸水下扇、浊积扇体过渡发育。当构造演化逐渐进入平稳期和萎缩期,湖盆沉降速度又小于沉积速度,物源补给充分,湖盆成为过补偿状态,陡坡带湖相体系则又呈现反向相变,因此,扇体发育亦呈现反旋回的演化相变,湖盆逐渐被三角洲体系所占据。

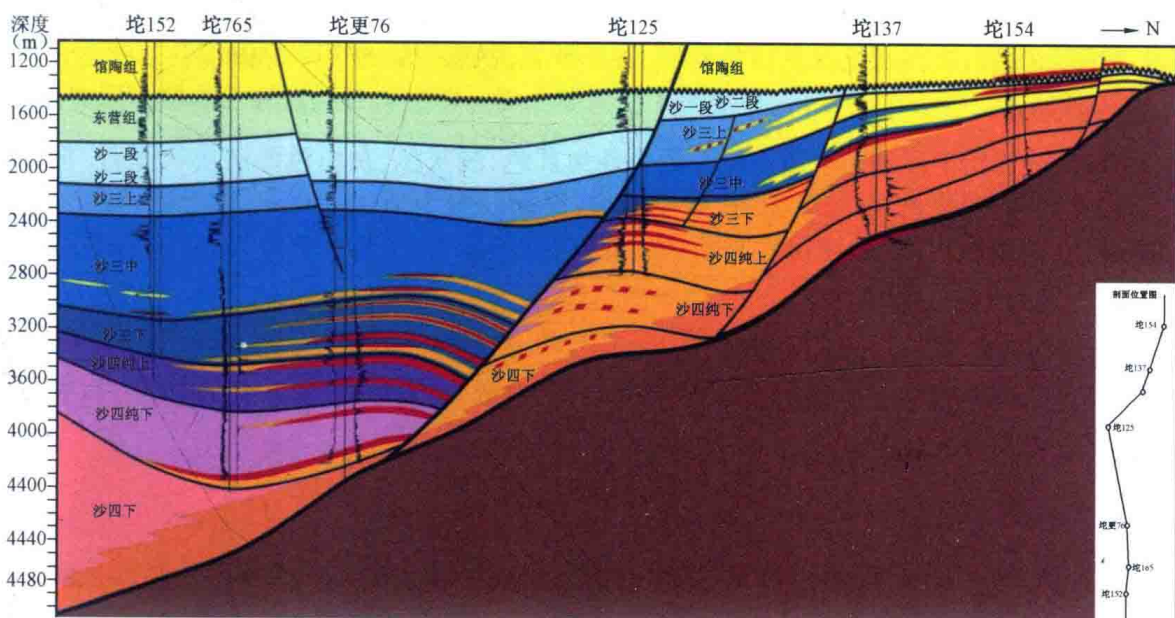


图 2-3 东营北带中西部地区南北向地质剖面(据胜利油田勘探开发研究院,2011)

第二节 地层发育特征

一、新生界的总体特征

地震和钻井资料揭示,东营凹陷北带新生界自下而上包括:古近系沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组及第四系平原组。各套地层的岩性特征概述如下。

1. 沙河街组

沙河街组共划分为 4 段,包括沙四段、沙三段、沙二段、沙一段。沙四段上部岩性为深灰色泥岩与灰褐色油页岩不等厚互层,夹灰褐色砾状砂岩及棕褐色富含砾砂岩,厚度为 300m 左右。沙三段下部岩性为深灰色泥岩与灰褐色油页岩不等厚互层,夹少量灰色石灰岩及白云岩,厚度一般为 100~300m;沙三段中部岩性以灰色、深灰色巨厚泥岩为主,或夹有多组浊积砂岩或薄层碳酸盐岩,厚度一般为 200~300m;沙三段上部岩性为灰色、深灰色泥岩与粉砂岩互层,夹钙质砂岩、含砾砂岩、油页岩及薄层碳质页岩,厚度为 120~150m。沙二段下部岩性为绿色、灰色泥岩与砂岩、含砾砂岩互层,夹碳质泥岩,厚度为 430~560m;沙二段上部岩性为灰绿色、紫红色泥岩与灰色砂岩的互层,夹钙质砂岩及含砾砂岩,厚度为 210~250m。沙一段岩性主要由灰色、深灰色、灰褐色泥岩、油泥岩、碳酸盐岩和油页岩组成,厚度一般为 200~240m。

2. 东营组

东营组分为 3 段,包括东三段、东二段和东一段。东三段中、下部为浅灰色、灰白色砂岩,含砾砂岩夹灰绿色砂质泥岩及褐灰色泥岩;上部为灰绿色、少量紫红色泥岩夹细砂岩,厚度一般为 150~180m;东二段岩性以灰绿色及深灰色泥岩、砂质泥岩为主,夹薄层灰白色及浅灰色

粉砂岩、钙质粉砂岩,少量白云质灰岩,厚度一般为 120 ~ 150m;东一段岩性为灰绿色及紫红色泥岩、粉砂质泥岩,夹浅灰色及灰白色砂岩、含砾砂岩,厚度一般为 70 ~ 140m。

3. 馆陶组

馆陶组分为馆下段和馆上段。馆下段岩性为灰色、浅灰色、灰白色厚层块状砾岩、含砾砂岩、砂岩夹灰色、灰绿色、紫红色泥岩、砂质泥岩,厚度一般为 200 ~ 500m;馆上段岩性为紫红色、暗紫色、灰绿色泥岩、砂质泥岩与粉砂岩互层,夹细砂岩,下部砂岩较发育,上部泥岩较发育,厚度一般为 120 ~ 380m。

4. 明化镇组

明化镇组岩性为棕黄色、棕红色泥岩夹浅灰色、棕黄色粉砂岩及部分海相薄层。与下伏馆陶组呈整合或假整合接触,厚度一般为 650 ~ 1000m。

二、深部层系的地层分布特征

东营北带深层的沙三下亚段和沙四上亚段整体表现为向北部陈家庄凸起层层超覆的特点,地层展布具有一定的继承性,自北部陈家庄凸起向南部洼陷逐渐加厚,埋深 1700 ~ 4700m;地层厚度呈现出南厚北薄,东厚西薄的分布格局。

沙三下亚段主要为一套深灰色湖相泥岩、砂砾岩,地层厚度大,一般 200 ~ 600m,中西部二台阶之上自西向东发育有利 93、利 85、利 96 - 坨 193、坨 174 等多个地层厚度较大的区域,最厚可达 800m(图 2-4)。沙三下亚段沉积时期,由于北部边界断层的持续活动,下降盘地层强烈下陷,形成深湖区;同时凸起上大量物源下卸,直接深入湖中,形成砂砾岩体堆积。因断层活动强度的差异,胜北地区下陷最大,发育较东西两侧更大规模的扇体。利津断层下降盘在断层根部厚度大,但沉积中心位于南部利津洼陷内部。

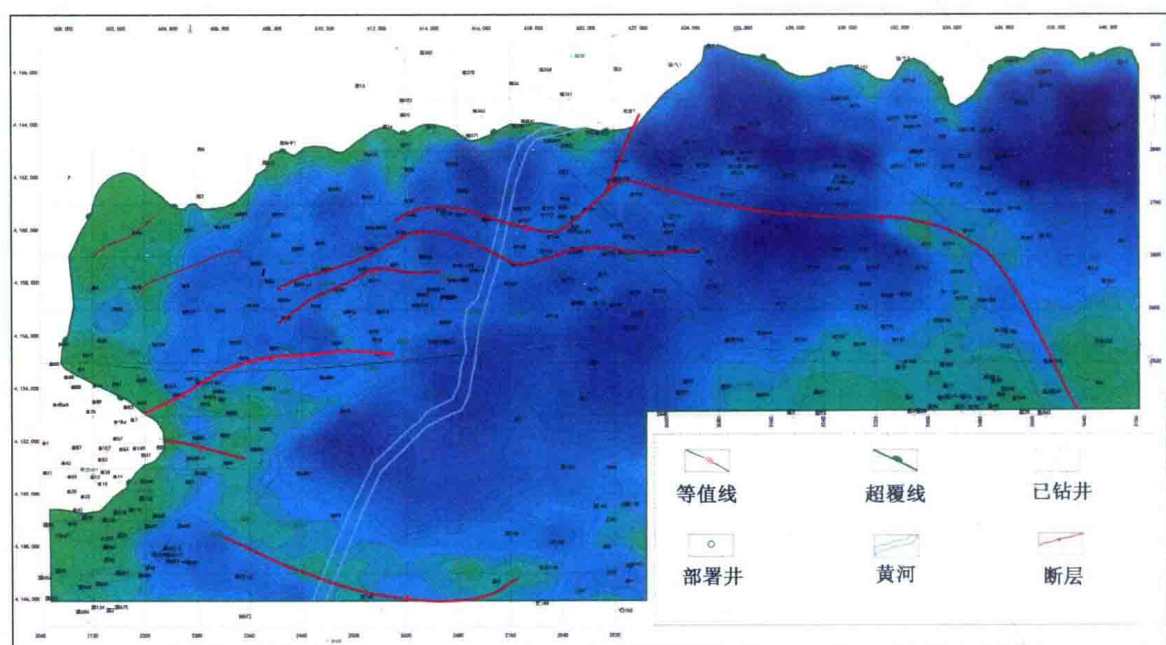


图 2-4 东营北带中西部沙三下亚段等厚图