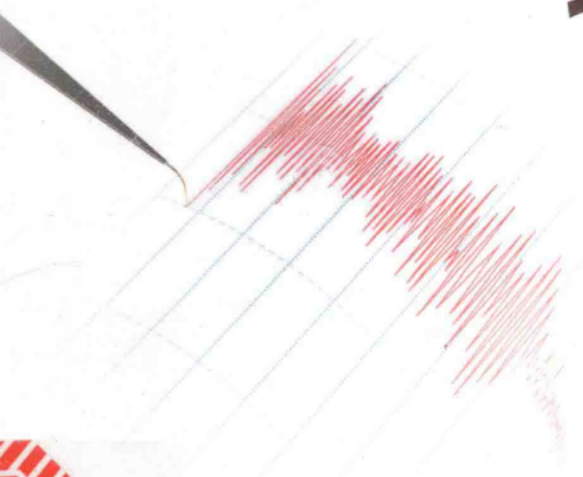




东营凹陷浊积砂体 地震描述技术

于正军 著

DONGYING AOXIAN ZHOUJI SHATI DIZHEN MIAOSHU JISHU



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

东营凹陷浊积砂体地震描述技术

DONGYING AOXIAN ZHUOJI SHATI DIZHEN MIAOSHU JISHU

于正军 著

 中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

东营凹陷浊积砂体地震描述技术/于正军著. —武汉:中国地质大学出版社,2016.1

ISBN 978-7-5625-3303-0

I. ①东…

II. ①于…

III. ①东营凹陷-浊积岩-地震勘探

IV. ①P544

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084700 号

东营凹陷浊积砂体地震描述技术

于正军 著

责任编辑:唐然坤 胡珞兰

选题策划:张晓红

责任校对:周旭

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:227.2 千字 印张:8.875

版次:2016 年 1 月第 1 版

印次:2016 年 1 月第 1 次印刷

印刷:武汉三新大洋数字出版技术有限公司

印数:1—300 册

ISBN 978-7-5625-3303-0

定价:28.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序 言

我国是一个以陆相含油气盆地为主的产油国,在陆相湖盆的沉积中心地区,存在着以各类浊积砂体为主要储集体且储量相当丰富的砂岩岩性油藏,其构成陆相含油气盆地的一大特色。在胜利油田,现已探明五号桩、梁家楼、渤南、牛庄、大芦湖等以浊积岩岩性油藏为主的油田,并且这些油田都分布在济阳坳陷的东部地区,其中尤以东营凹陷最为典型。

东营凹陷浊积岩勘探自 1976—1985 年浊积理论的引进和应用开始,经历了 40 年的勘探实践,尤其是随着大批三维地震资料的采集应用和层序地层学的深入研究,基本揭示了浊积岩的成藏规律,探索形成了浊积岩勘探技术。笔者在前人研究与勘探实践的基础上,以层序地层学为指导,结合当前较为前沿的地震沉积学理论,以地震资料为基础,以地球物理方法为实现手段,分析层序内部结构,建立井震关系以及不同类型浊积岩的地震响应模式;研究形成浊积岩主要发育层系(沙三段和沙四上亚段)不同序级的对比和划分方法;充分发挥了井震结合的优势,完善了浊积岩的地震识别模式的建立方法,形成了浊积岩分序级描述技术。东营凹陷油气勘探实践证明,在浊积岩分序级描述的基础上进行勘探优化部署,可以有效地提高浊积岩油藏的勘探成功率。

随着隐蔽油藏勘探的持续强化,浊积岩已成为东营凹陷重要的、现实的岩性油藏勘探类型,具有较大的勘探空间和资源潜力。因此,作为一个阶段成果,笔者梳理了浊积岩地震勘探的相关技术与成果,希望为后续研究人员提供一份基础资料,为胜利油田的增储稳产尽绵薄之力。笔者十分热爱所从事的油气勘探事业,深深懂得石油勘探是集体工作,拙作只是研究团队共同努力的结果,在此多谢共同奋斗的同事们!

笔 者

2015 年 9 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 区域地质概况	(4)
第一节 盆地演化概况	(4)
第二节 浊积岩勘探概况	(6)
第三章 浊积砂体复杂隐蔽成因机制	(8)
第一节 沉积分布特征	(8)
第二节 地震响应影响因素分析	(15)
第四章 面向浊积砂体的高分辨率处理技术	(34)
第一节 精确近地表静校正技术	(34)
第二节 保幅性综合能量补偿技术	(44)
第三节 提高分辨率组合拓频技术	(49)
第四节 保幅型各向异性 Kirchhoff 叠前时间偏移技术	(53)
第五章 浊积砂体发育层序精细划分方法	(60)
第一节 建立剖面格架	(60)
第二节 层序界面的确定	(60)
第三节 高分辨率层序划分方法	(61)
第四节 层序划分结果	(68)
第六章 浊积砂体地震识别模式	(80)
第一节 砂体预测精度的影响因素	(80)
第二节 砂体地震响应特征	(83)
第三节 砂体地震响应模式	(93)
第七章 浊积砂体分序级精细描述技术	(98)
第一节 砂体描述方法的反思	(98)

第二节	东营三角洲浊积岩分序级描述技术	(99)
第三节	博兴洼陷浊积岩分序级描述技术	(109)
第四节	东营凹陷北部浊积岩分序级描述技术	(122)
第八章	浊积砂体地震描述流程	(125)
第一节	地震描述流程	(125)
第二节	灰质背景下浊积岩储层地震识别	(128)
第三节	技术应用总结	(132)
主要参考文献		(134)

第一章 绪 论

陆相断陷盆地碎屑岩类岩性油气藏是胜利探区隐蔽油气藏勘探的主要类型,从构造单元和砂体成因类型来看,主要包括古近系发育的陡坡带砂砾岩扇体、缓坡带低位扇体、洼陷区浊积扇体、缓坡滨浅湖滩坝砂体及新近系的河道砂体 5 类。浊积岩油藏是隐蔽油气藏的重要类型之一,在济阳拗陷的各富油洼陷内,洼陷区浊积岩油气藏与以上的其他 4 类岩性油气藏对比,其发现时间早、认识程度高、探明储量多、勘探潜力大。

随着隐蔽油藏勘探的持续强化,浊积岩仍具有较大的勘探空间和资源潜力。通过近几年的勘探实践,浊积岩描述难度也越来越大,突出地表现在勘探效益上明显降低。勘探程度高、勘探重点转移、勘探效果变差是近期浊积岩油藏陷入低潮的主要影响因素。如何在前人对其沉积模式、成藏规律研究的基础上,进一步深化砂体的识别与描述、提高勘探成功率是当前该类型油藏面临的突出问题。

从东营凹陷近期钻探情况分析,以沙三段(即沙河街组三段,文中均为简称)为主要目的层系的浊积砂体横向连续性差,单层厚度变化快,地震剖面上很难识别,给此类油藏的勘探带来很大的困难,严重制约了浊积砂体的精细描述工作,并且随着勘探程度的日益提高、勘探理论的日趋完善、勘探技术的飞速发展,过去所形成的技术思路存在的弊端逐渐显露出来。因此,对东营凹陷浊积岩分序级描述技术进行系统、深入的研究,建立不同地区、不同层序浊积岩的地震识别模式和描述方法,对该类油藏下一步的勘探具有重要的意义。

近几年,胜利油田持续开展了浊积砂体的勘探研究工作,研究内容包括地震资料精细处理技术研究、浊积岩发育层序界面的对比与划分、井震关系研究、分序级浊积岩地震描述方法研究等部分,目标是形成一套成熟探区浊积岩储层预测新的工作方法和技术流程。

《东营凹陷浊积砂体地震描述技术》是在前人研究与勘探实践的基础上,以当前较为前沿的地震沉积学理论为指导,利用层序地层学方法来研究浊积岩发育段的地震地质特征,着重探索在钻井资料较少、勘探程度较低的地区和层系利用地震资料来研究浊积岩的地震识别和描述方法。通过两年的攻关研究,总结形成了一套技术系列,并在实际勘探实践中取得了良好效果,展现了东营凹陷浊积岩这一重要岩性油藏类型较为广阔的勘探前景。

浊积砂体描述技术的思路是:针对东营凹陷浊积岩的沉积特点和勘探难点,以三维地震资料精细处理和地震地质综合解释技术为基础,以高分辨率层序地层格架为主线,以沉积规律为指导,以地球物理方法为实现手段,来研究浊积岩的描述技术。通过试验形成以提高资料分辨率为目的的精细处理方法;通过地质统计探讨浊积岩储层预测精度的影响因素;从几何学、运动学、动力学等方面研究不同序级浊积岩的地球物理特征;分析层序内部结构,建立井震关系,建立不同类型浊积岩的地震响应模式;开展储层预测技术适用性分析,研发分序级浊积岩地震描述技术;建立分序级浊积岩描述技术流程,预测新的浊积岩发育区,在此基础上进行勘探优化部署。

该技术有两个关键点:一是地震沉积学理论的研究,通过对地震沉积学理论的研究可确定浊积岩储层的有利勘探区;二是地球物理方法的应用,通过对浊积岩发育区地球物理方法的应用可确定浊积岩砂体的空间展布。

科研人员紧密结合勘探实践,在前人积累的经验 and 素材的基础上,精细组织,主要开展了如下工作。

(1)对浊积岩发育区地震资料进行精细处理,对重点区带的5条骨干剖面开展提高其分辨率的处理试验,根据试验结果进行推广应用。

(2)对东营凹陷300多口钻遇浊积岩的探井分地区分层系进行了钻、录、测井资料的统计分析,分层系完成了储层厚度图。通过分析,归纳了5种岩性组合,其中灰质成分的存在是影响砂体预测精度的重要因素。

(3)完成了东营凹陷的60多口重点探井的合成记录的标定,明确了浊积岩发育层段的地震反射特征,完成了T₃、T₄、T₅、T₆反射层解释成图及沙三上、沙三中和沙三下地层厚度图。

(4)利用录井资料、地震资料进行大量的统计分析,从发育部位、发育层序、几何学、动力学和运动学5个方面总结了沙三上、沙三中、沙三下地震响应模式,建立了分序级地震识别模式。同时探索了利用自然电位作为系数对声波进行约束来剔除灰质成分的方法。

(5)优选10条骨干剖面建立东营凹陷层序地层格架,以不整合面作为界面划分了3个二级层序;针对主要目的层沙三段,以下超面和顶超面为三级层序界面,划分了3个三级层序;以地震反射特征和倾角方位角的突变界面将沙三中划分了8个四级层序,沙三上划分3个四级层序。

(6)解释四级层序界面11个,对四级层序地层进行了厚度成图和古地形恢复工作,预测浊积岩发育有利相带。

(7)着力探索空间上精细描述浊积砂体的方法,利用层序地层学方法精细划分五级层序,利用三维立体自动追踪技术快速解释4个五级层序界面。在此基础上,结合精细标定,应用调谐频率计算储层厚度的方法,精细预测砂体空间展布,进而刻画砂体边界。在东营三角洲发育区、博兴洼陷、北部物源浊积岩等地区开展了分序级描述研究。

(8)利用建立的地震识别模式,结合分序级描述方法预测新的浊积岩发育区,查清东营凹陷浊积岩油藏的分布规律及规模,提供了有利的勘探目标。

通过技术研究和生产实践,主要取得了4项技术创新和成果。

(1)形成了针对浊积岩的高分辨率精细处理技术,提高了资料品质:建立了一套以保幅性能量补偿和组合拓频为主的提高分辨率的精细处理技术系列,进一步提高了浊积岩发育层段的成像精度及地质分辨能力。

(2)构建了浊积砂体层序精细划分方法,识别出发育相带:明确了由压力和储层厚度控制的分区分序级划分原则,研究了相位、数据双驱动式细小层序划分方法,准确预测出浊积砂体的发育区带特征。

(3)形成了浊积砂体地震识别模式的建立方法,明确了数理基础:明确了隐蔽浊积砂体弱反射的成因机制,分析了复杂隐蔽浊积砂体地震响应特征及数理基础,建立了浊积岩的地震识别模式。

(4)开发了复杂隐蔽浊积砂体分序级精细描述技术,实现了定量评价:建立了隐蔽储层的识别特征和井震关系,形成了以子波分解、盲源分离为主的复杂隐蔽浊积砂体地震预测技术,

开发了叠前、叠后多信息定量描述有利储层的方法,明确了东营凹陷浊积砂体油藏的规模潜力。

在勘探实践的基础上形成了一套复杂隐蔽浊积砂体地震勘探技术系列,有助于提高隐蔽油气藏地球物理技术水平,有效提高了勘探开发效益,为山东“黄蓝战略”的稳步推进做出了贡献。

第二章 区域地质概况

第一节 盆地演化概况

东营凹陷的形成和发展大致经历了 7 个阶段(图 2-1)。

基底形成阶段,具有太古宇厚 12km 的片麻岩和角闪岩系列(亦称褶皱基底或变质基底)和下古生界(济阳拗陷缺失元古宇)稳定的 1200~1400m 海相碳酸盐岩建造及上古生界海陆交互碳酸盐岩、煤层及碎屑岩沉积(亦称地台期建造)双重基底,与渤海湾盆地基本一致。

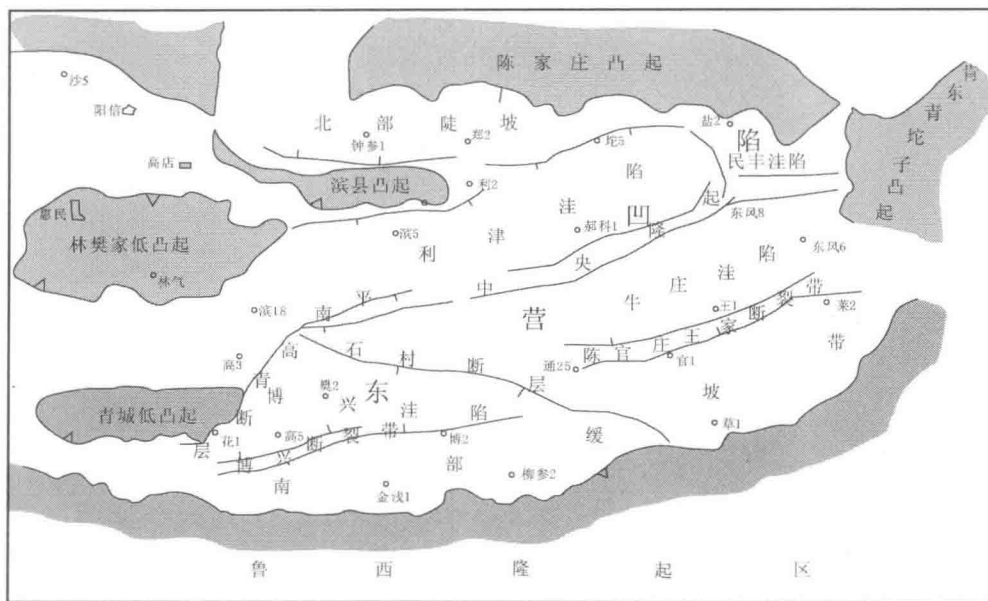


图 2-1 东营凹陷构造及地理位置示意图

裂前隆起阶段(三叠纪—中侏罗世),发生于三叠纪的印支运动,发生了北西向挤压构造,造成区内地势起伏不平。中、下侏罗统煤系地层在本区零星分布。

第一裂陷成盆阶段(早侏罗世—早白垩世),亦称为燕山运动Ⅱ幕,陈南断层、石村断层等均产生于该时期。典型的简单半地堑盆地内充填了一套红色碎屑岩及安山岩建造。

晚白垩世区域隆起阶段,强烈的隆起造成了大型区域地层不整合接触。

第二裂陷成盆阶段(古新世末—渐新世),表现为强烈的断陷与扩张。在这个大的完整的裂陷旋回中,包含着3个裂陷子旋回,分别对应孔店组、沙四段—沙二下亚段和沙二上亚段—东营组3个沉积旋回,由此产生了3套重要的烃源岩和储层,成为东营凹陷聚烃成藏的物质基础。该阶段除控凹断层继续发展外,一系列沉积断层遍布全区,使半地堑内构造面貌变得异常复杂。

渐新世末区域大隆升。

拗陷阶段(新近纪—第四纪),区内断层基本不再控制沉积,所有凹陷与凸起同时下沉,包括东营凹陷在内的整个渤海湾盆地由裂陷变为整体拗陷阶段。

据钻井揭示,东营凹陷发育太古宇、古生界、中生界和新生界。缺失元古宇,下古生界上奥陶统、志留系、泥盆系、下石炭统、上二叠统、三叠系和新生界古新统。具体地层发育特征与沉积简史见表2-1。

表2-1 东营凹陷沉积简史

界	系	统	组	代号	厚度(m)	岩性	沉积环境
新生界	第四系	全新统	平原组	Qp	250~350	黄色、灰色黏土夹细砂	泛滥平原
		上新统	明化镇组	Nm	100~1200	棕黄色、棕红色泥岩夹浅灰色粉砂岩	泛滥平原
		中新统	馆陶组	Ng	300~400	下段厚层灰白色砾岩、含砾砂岩、砂岩,夹绿色、紫红色泥岩;上段紫红色、灰绿色泥岩与粉细砂岩互层	下段辫状河,上段曲流河
	古近系	渐新统	东营组	Ed	100~800	灰绿色、灰色、少量杂色泥岩与砂岩、含砾砂岩不等厚互层	河流三角洲
			沙一段	Es ¹	0~450	灰色、深灰色、灰绿色泥岩,夹砂岩、生物灰岩、白云岩等	湖泊
			沙二段	Es ²	0~350	红色、灰绿色泥岩,灰色泥岩与砂岩、含砾砂岩互层,夹碳质泥岩	河流-三角洲
			沙三段	Es ³	700~1200	下部深灰色泥岩、褐色油页岩,夹少量薄砂岩、砂岩、白云岩;中部厚层深灰色夹薄砂层;上部灰色泥岩与厚砂岩,夹碳质页岩、含砾砂岩	三角洲深湖-半深湖-水下扇
		始新统	沙四段	Es ⁴	1500	下部紫红色、灰绿色泥岩,夹砂岩、薄层灰岩;中部蓝灰色泥岩、灰白色石膏,夹泥质白云岩、杂色泥岩;上部灰色泥岩,夹灰岩、砂岩、油页岩	半封闭盐湖-半深湖
			孔一段	Ek ¹		棕红色砂岩与紫红色泥岩互层	冲积平原浅湖
			孔二段	Ek ²		灰色、深灰色泥岩夹砂岩	湖泊
			沙河街组				

续表 2-1

界	系	统	组	代号	厚度(m)	岩性	沉积环境
中生界	上侏罗统一上白垩统			J ₃ —K ₂	200~500	杂色泥岩、砂砾岩夹中基性火山岩	火山喷发 河流冲击
	中下侏罗统			J ₁₊₂		灰绿色、紫红色泥岩与砂岩和砾岩互层	河流-湖泊
古生界	中下二叠统			P ₁	100~200	底部黑色泥岩、砂岩夹煤层；中部灰色泥岩、砂岩夹煤层；上部红色泥岩夹砂岩	陆相海陆交互
	上石炭统			C ₁	200~250	深灰色泥岩、砂岩夹煤层	海陆交互
	中下奥陶统			O ₁₊₂	400~600	白云岩、角砾状灰岩、深灰色灰岩、豹皮灰岩	浅海陆棚
	寒武系			Є	600~800	底部紫红色页岩夹白云岩；中部鲕粒灰岩、疙瘩状灰岩、竹叶灰岩；顶部白云岩	陆棚台地
太古宇泰山群				Ar		花岗片麻岩	

第二节 浊积岩勘探概况

浊积岩油藏是隐蔽油气藏重要类型之一，在济阳拗陷 4 个凹陷中均已发现了浊积岩油藏并取得了良好的勘探效果。如较为典型的代表为东营凹陷，其在沙三段中下部发育了多套浊积砂体，这些砂体夹于巨厚的生油岩中，周围又临近民丰、牛庄、利津等生油洼陷，成藏条件非常有利。自牛庄油田发现以来，东营凹陷沙三段岩性油藏逐渐得到重视。进入 20 世纪 90 年代以来，沙三段岩性油藏已成为各采油厂勘探重点，通过勘探相继发现了郝家、史南、胜坨、东辛等地区大量的岩性油气藏，至今已累计探明储量近 2×10^8 t。近几年，每年找到的岩性油藏探明储量也在千万吨以上，成为东营凹陷增储上产的主要勘探目标之一。

包括东营凹陷在内的济阳拗陷浊积岩勘探自 1976—1985 年浊积理论的引进和应用开始，通过 1985—1990 年油藏描述技术攻关，经历了 40 多年的勘探实践，尤其是随着大批三维地震资料的采集和应用以及层序地层学研究，初步揭示了浊积岩的成藏规律，基本形成了浊积岩勘探技术。东营凹陷浊积岩勘探历程可分为以下几个阶段。

(1) 1961—1964 年，营 2 井在构造油藏勘探的同时首次钻遇浊积岩油藏，拉开了东营凹陷岩性油藏勘探的序幕。这期间，营 4 井、营 6 井也钻遇了沙三段浊积岩油藏，但此时东营凹陷还处于大规模的构造油气藏勘探阶段，岩性油藏也是个别井钻遇，还未引起充分的重视。

(2) 1966 年，牛 1 井、营 11 井等继续钻遇沙三段浊积岩油藏，这一类型的油气藏被高度重视起来。

(3) “七五”期间，在牛庄地区开始了浊积岩油藏描述。

(4) “八五”期间，东营凹陷浊积岩勘探在局部获得突破：1994 年，史 100 加深沙三段浊积岩油藏勘探在史南地区获得突破；1995 年，丰 11 沙三段浊积岩油藏勘探在民丰地区获得突

破;1998年,河89沙三段浊积岩油藏勘探在现河庄地区获得突破;东营凹陷浊积岩油藏勘探以局部突破为契机,开始了全面勘探阶段。

(5)2002年,随着胜利油田浊积岩油藏勘探程度日趋成熟,开始了以牛871先导试验区为首的精细勘探阶段。

(6)2005年,东营凹陷掀起以牛庄洼陷东坡王58井区为代表的沙四段浊积岩勘探热潮。

东营凹陷在沙三中下时期凹陷中心为深湖-半深湖相沉积,发育了大套的油页岩与泥岩,是良好的生油岩和盖层。此时东营三角洲大规模向西推进,在沙三段中下部发育了多套的浊积岩,并且浊积岩夹于巨厚的生油岩中,成藏条件非常优越。该区浊积岩发育的主要有利区带为东营凹陷中央隆起带及其周缘洼陷带,依据古地貌可划分为:洼陷型、同生断层下降盘型、斜坡型等构造活动相对稳定的地区。多年来,已陆续发现了坨142、辛158、牛871等沙三段高产砂体油藏区块,主要有以下几种类型:

(1)块砂之下的薄层砂岩,即常说的席状砂岩,产能也很高,像坨103、坨144区块等。

(2)滑塌浊积砂,沉积环境比席状砂深,主要是三角洲前缘砂体、席状砂体经滑塌作用二次搬运后,沉积入深湖相泥岩中。其主要的沉积场所是向斜洼地及断层下降盘的转折处,极易形成上倾尖灭及透镜体砂岩油藏,像坨143、坨74区块等。这些砂体一般都经过长途搬运,分选好,储层物性好。位于复杂断裂带辛170的成功开发,大大拓展了东营凹陷东部地区沙三段岩性油藏的勘探空间。

东营凹陷以沙三段为代表的浊积砂体局部已呈叠合连片的趋势,但是在该类砂体的钻探过程中,预测精度不高、砂体的地震响应特征不明确制约了该类砂体的进一步勘探。虽然基于三维地震的储层预测技术较多且发展较快,但通过现有技术的应用和实践,发现存在以下问题仍未能解决:①理论方面,不明确地震属性与地下地质信息的对应关系;②技术方面,针对不同成因浊积岩的描述技术有待进一步完善;③应用方面,预测结果存在多解性。

这些问题的存在严重制约了浊积砂体储层预测技术的应用和推广,随着从地震数据中提取的属性不断增多,对储层预测精度要求越来越高,地下地质情况越来越复杂,储层描述内容越来越丰富,人们仅凭经验选择地震属性已不适应油田工程的实际需要。因此,有必要将目前繁多的三维地震储层预测技术和效果进行总结,探寻其技术原理和数理基础,开发并完善其技术流程和每项技术的适用条件,才能充分发挥三维地震勘探的优势,为浊积砂体油藏勘探开发奠定良好的基础。

第三章 浊积砂体复杂隐蔽成因机制

浊积砂岩储层描述首先要基于扎实的地质基础研究与地球物理基础研究。地质基础研究的内容包括勘探目的层的沉积体系、地层分布、构造特征、物源方向等,而地球物理基础研究有研究区平均速度的分析、地震剖面的极性判别、地震响应特征等内容。只有在做好上述工作的基础上,所预测的各种储层结果才能在实际生产中发挥应有的作用。

第一节 沉积分布特征

一、形成条件

浊积岩是由浊流沉积作用形成的地质岩体。浊流理论是 20 世纪 50 年代以来地质学领域取得的重大成就之一。东营凹陷是一个典型的陆相断陷湖盆,浊流沉积集中发育在沙三段中下部沉积时期,是裂谷盆地断陷扩张最强的时期。

浊积砂体在地理位置上多处于深水地区,其成因机制可以是洪水重力流直接注入深水区而成,也可以是三角洲前缘或扇三角洲前缘沉积物顺坡滑塌快速堆积而成,它的形成条件包括气候、足够的水深和足够的坡度角等。

(1)气候:干旱、半干旱的气候条件有利于母岩机械风化和季节性洪水的形成。中国东部古近纪沙三段沉积以前主要为干旱一半干旱的古气候,具有形成湖底扇相沉积的有利条件。

(2)足够的水深:足够的水深是重力流沉积物形成后不再被冲刷破坏的必要条件,其形成深度必须在风暴浪底深度以下。

(3)足够的坡度角:足够的坡度角是造成沉积物不稳定和易受触发而做块体运动的必要条件。根据计算结果指出,当地形坡度达到 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 时,只需要密度流与湖水间有足够的密度差,就具备了形成沉积物重力流的充分条件,也就是说,密度对坡度有补偿作用。

二、成因类型

从岩性特征及丰富多样的沉积构造可以看出,东营凹陷沙三中亚段砂岩成因类型较为复杂,结合物源供给方向及断层活动特征,将其归纳为 3 种主要类型,即滑塌浊积岩、深水浊积扇砂岩和重力流水道砂岩。

1. 滑塌浊积岩

滑塌浊积岩主要发育于沙三中亚段中上部的地层中,其特点是岩性细,以粉砂岩-细砂岩

为主,夹于大套暗色泥岩之中,发育段呈砂泥岩互层,粒度概率曲线多呈平缓的弧形。砂岩中见大量的准同生变形构造,并有递变层理、冲刷面、液化构造等,多含暗色泥砾和泥岩撕裂屑,反映了沉积物滑动再沉积的特点,其成因与三角洲前缘斜坡的地形特征有关。岩芯观察结果表明,该区滑塌浊积岩发育有滑移、块体搬运、液化及浊流 4 个阶段的沉积物。

2. 深水浊积扇砂岩

由于利津洼陷的持续下陷,造成该区沉积和沉降中心逐渐向西北迁移,这为沉积在盆地南部边缘的浅水沉积物再次搬运创造了条件。与滑塌浊积岩相比,深水浊积扇砂岩具有岩性粗、分布广、层位稳定和单砂体分布面积大等特点。

根据史 102、史 103、史 111 等井的岩芯观察,其岩性主要为厚层状砂岩、含砾砂岩等,粒序层理发育,单层多具正粒序,从下到上依次可见底部冲刷构造、块状层理或粒序层理、平行层理、波状层理等沉积构造,粒度概率累积曲线总体显示粒级粗、分布宽、组分间混合度大、分选差、斜率低等特点, $C-M$ 图上点群平行于 $C=M$ 基线分布,史 102 井比较典型,见有扇根、扇中、扇端 3 种亚相的沉积物。

3. 重力流水道砂岩

该类型砂岩在区内分布比较局限,只发育于郝 2 北断层及郝 2 断层下降盘的史 115 井—史 122 井区,层位属沙三段中上部。根据史 115 井岩芯观察,3074.4~3075.0m 井段见一冲刷面,冲刷面之上为含砾不等粒砂岩,再向上为粉砂岩夹薄层泥质条带,呈砂泥互层平行层理。

据粒度资料分析,其岩性以不等粒砂岩和粉砂岩为主,碎屑颗粒分选为中偏差,多呈次棱角状。岩石薄片鉴定结果也证明,其陆源矿物组分与周围井相同层位砂岩相比存在较大差异。结合郝 2 断层的构造发育史分析,这套砂岩是沿断层下降盘断槽发育的重力流水道沉积物。

三、沉积特征

1. 岩性特征

受区域构造运动及区内断层活动的影响,东营凹陷沙三中沉积时期该区的沉积和沉降中心不断发生迁移,造成了各砂组岩性特征及砂泥岩组合特征的差异:在沙三中沉积早期,即沙三中 4 砂组沉积时期,继承了沙三下的深湖相背景,以暗色泥岩沉积为主,砂泥比为 1:8~1:30。岩性组合以暗色质纯泥岩和灰质泥岩为主,砂岩主要发育在东部的河 142 井—河 4 井区,如河 4 井沙三中 4 砂组上部见一单层厚度 18.0m 的块状砂岩;沙三中 3 砂组沉积时期,砂岩明显增多,砂泥比最高可达 1:1(河 139 井),其岩性组合为泥岩、灰质泥岩、砂质泥岩,夹薄层粉砂岩、砂岩,或呈互层状,南部史 103 井区见含砾砂岩;沙三中 2 砂组沉积时期,地层厚度明显减薄,但砂岩相对较为发育,砂泥比最大可达 1:0.6,南部岩性组合以砂、泥岩互层为主要特征,多见含砾砂岩,北部砂岩相对较少,以厚层泥岩夹薄层砂岩或二者呈薄互层为特点;沙三中 1 砂组沉积时期,除史 109 井—史 112 井区砂岩较少外,其他地区砂岩普遍发育,特别是南部沉积区砂岩叠合连片分布,砂岩最大厚度达到 33m,但对整个沙三中 1 砂组沉积期而言,物源供给不如沙三中 2 砂组沉积期充足,砂岩百分含量最高只有 30%,并且南北差异较为明显:南部沉积区砂岩主要发育于下部,多为呈正韵律特征的厚层状粉砂岩,见少量砂岩和含砾

砂岩,北部沉积区砂岩不发育,岩性主要为深灰色泥岩、灰质泥岩,夹少量薄层粉砂岩;沙三中上砂组沉积时期砂岩主要发育于东北部沉积区(如史 115 井砂泥比达 1:1.8),且主要位于该砂组的中下部,以厚层砂岩、粉砂岩及含砾砂岩夹薄层泥岩为特征,上部为中厚层泥岩、砂质泥岩夹薄层粉砂岩,南部沉积区砂岩不发育,砂泥比最大为 1:5,以厚层暗色泥岩、灰质泥岩沉积为主,夹薄层粉砂岩、含砾砂岩。

2. 沉积构造特征

通过对探井岩芯资料的详细观察与描述发现,沙三中亚段岩石中的沉积构造非常发育,归纳起来有以下几种。

1) 层理构造

主要有水平层理、块状层理、交错层理、递变层理和波状层理等。

水平层理:主要有两种类型,即纹层状水平层理和砂泥互层水平层理。纹层状水平层理广泛发育于沙三中亚段和上亚段的暗色泥岩、灰质泥岩中,它由明暗相间的细层水平叠合而成,细层连续性好,纹理清晰;砂泥互层水平层理由互层的水平层状砂岩条带和泥岩条带组成,见于史 102 井沙三中 1 砂组下部的砂质泥岩中。

块状层理:无任何层内构造特征,广泛发育于沙三中亚段的砂岩、粉砂岩及暗色泥岩中。

交错层理:见于史 112 井沙三中上部砂岩中,由泥质岩或碳屑显示层理面。

递变层理:在工作区北部史 112 井、史 115 井区的沙三中上砂组,南部史 101 井区的沙三中 1 砂组及史 111 井区的沙三中 2 砂组均有发现,递变层理的厚度一般为 4~6cm,最厚 12cm。史 111 井还见有多个递变层理重复出现,相互间存在较为明显的冲刷面。

波状层理:在碳屑富集或砂泥岩互层的地层中,可见到波状起伏的纹理,出现波状层理的地层厚度一般在 10cm 左右,波纹的成分为泥质或碳屑,波状不规则起伏延伸,延伸长度多为 2~5cm。

2) 准同生变形构造

准同生变形构造是史南地区沙三中亚段最常见的沉积构造,在各砂组中均广泛分布,根据其变形程度可分为塑性变形构造、滑动构造和搅混构造 3 种类型。

塑性变形构造:多出现于泥岩和砂质泥岩中,变形程度微弱。它是原具有水平层理的沉积物在重力滑移时经轻度扭曲后形成的,变形段的顶底以未变形的水平层理为界,其中的变形层仍保持着原水平层理的纹层。

滑动构造:是斜坡上的沉积物在重荷作用下沿斜坡面产生滑动和滑塌,使层理弯曲变形产生各种褶皱,甚至破碎的一种沉积构造。该沉积构造多出现于砂泥岩互层的岩层中。

搅混构造:是沉积物沿斜坡下滑,特别是沿砂、泥岩界面滑动过程中,彻底破坏了滑动面附近沉积物的原沉积构造,砂质层和泥质层被揉皱混杂到一起所形成的一种沉积构造。在本区北部的史 115 井、史 117 井,中部的史 108 井,南部的史 102 井、史 103 井等的砂岩集中段均有发育,一般出现在砂层的底部,有泥包砂、砂包泥和砂泥混杂 3 种类型。

3) 其他沉积构造

区内沙三中亚段砂岩中常含有泥砾和泥岩撕裂屑,泥砾呈扁平状、球状和棱角状,可出现于砂层的任意部位,粒径 0.5~0.7cm 不等。泥岩撕裂屑多分布于砂层的中下部,呈长条棱角状,大者可达 4~5cm 长、2~3cm 宽,小的仅为 0.4~0.5cm 的丝状泥屑。

在递变层理的底部及砂泥岩接触面上可见冲刷面,冲刷面的波状起伏均较小,上、下岩性为不连续的突变关系。

在史 108 井、史 111 井等区域,一些与砂岩相邻的泥岩中见有砂质岩脉呈不规则弯曲状延伸,其穿刺深度一般为几厘米至十几厘米,砂墙厚 2~5cm 不等。同时还有一些砂墙出现在砂岩中,是由砂墙与其围岩成分、颜色的不同或由砂墙内碳屑的定向排列反映出来的。

在史 112 井沙三上亚段 3028.2m 深度的砂质泥岩中,见有砂球和砂枕构造。砂球的个体较小,直径一般为 0.3~0.5cm,呈圆球状。砂枕个体较大,高 0.5~1.5 cm,长度可达 5cm,呈扁平椭球状,近水平方向展布。

另外,在与砂岩底面接触的薄层暗色泥岩中,可见泥岩呈火焰状凸入砂岩之中,这种火焰构造通常与侵蚀作用和重力负荷作用有关。

总的来说,沙三中的下部沉积时期,沉积构造以大量的块体搬运作用下产生的搅混构造、滑动变形构造为主,兼有与浊流活动有关的沉积构造,它们反映了多物源供给的特点;沙三中的上部沉积时期,自下而上分别有与前者相同的沉积构造及未经改造的具重力流特征的沉积构造。

四、沉积微相特征

1. 沉积微相类型及相标志

根据单井相分析、剖面对比相分析及地震相分析,认为东营凹陷沙三段主要发育有深湖-半深湖、深水浊积扇和三角洲 3 种沉积相类型。根据成因的不同,可将深水浊积扇划分为有水道的远源深水浊积扇、以断层作为补给水道的浊积扇及与三角洲有关的滑塌浊积扇 3 种类型。其中以断层作为补给水道的浊积扇及与三角洲有关的滑塌浊积扇包括中扇和外扇两个亚相,有水道的远源深水浊积扇则发育有辫状水道、辫状水道间、中扇过渡带和外扇等微相类型;三角洲相在本区主要发育三角洲前缘和前三角洲亚相,三角洲前缘亚相又可进一步划分为河口坝、远砂坝及三角洲前缘过渡带 3 种微相。下面就浊积扇主要亚相和微相类型及其划相标志从岩性特征、储集层特征等方面分别进行介绍。

1) 辫状水道微相

岩性特征:以厚层含砾砂岩、细砂岩、粉细砂岩为主,夹薄层灰色、深灰色泥岩及粉砂质泥岩。石英含量一般在 37%~50%之间,长石占 25%~35%,岩屑为 14%~24%。岩屑成分有变质石英岩岩屑、花岗片麻岩岩屑、安山岩岩屑及粉砂质泥岩岩屑等。

结构及构造特征:碎屑颗粒多呈次棱角一次圆状。概率累计曲线呈两段式,跳跃组分一般占 50%~80%,悬浮组分占 20%~50%,跳跃组分与悬浮组分的截点 Φ 值在 2.0~3.0,分选中等到差。C-M 图上主要表现为点群平行于 C=M 基线分布。沉积构造类型丰富多样,含砾砂岩和细砂岩中发育平行层理、斜层理、交错层理、粒序递变层理,粉砂岩及泥质粉砂岩中发育平行层理、斜波状层理、变形层理及泥岩撕裂屑,尤其是含砾砂岩及细砂岩中的粒序递变层理极为发育,且多表现为“AAA”序、“ABAB”序、“ABC”序及“BCBC”序等。暗色泥岩中平行层理较为普遍,并见有泥质条带。

生物化石:细砂岩及粉砂岩中偶见生物化石碎片及植物碳屑。

储集层特征:辫状水道发育区砂层累加厚度一般在 10~30m,单砂层厚度一般为 6~14m。