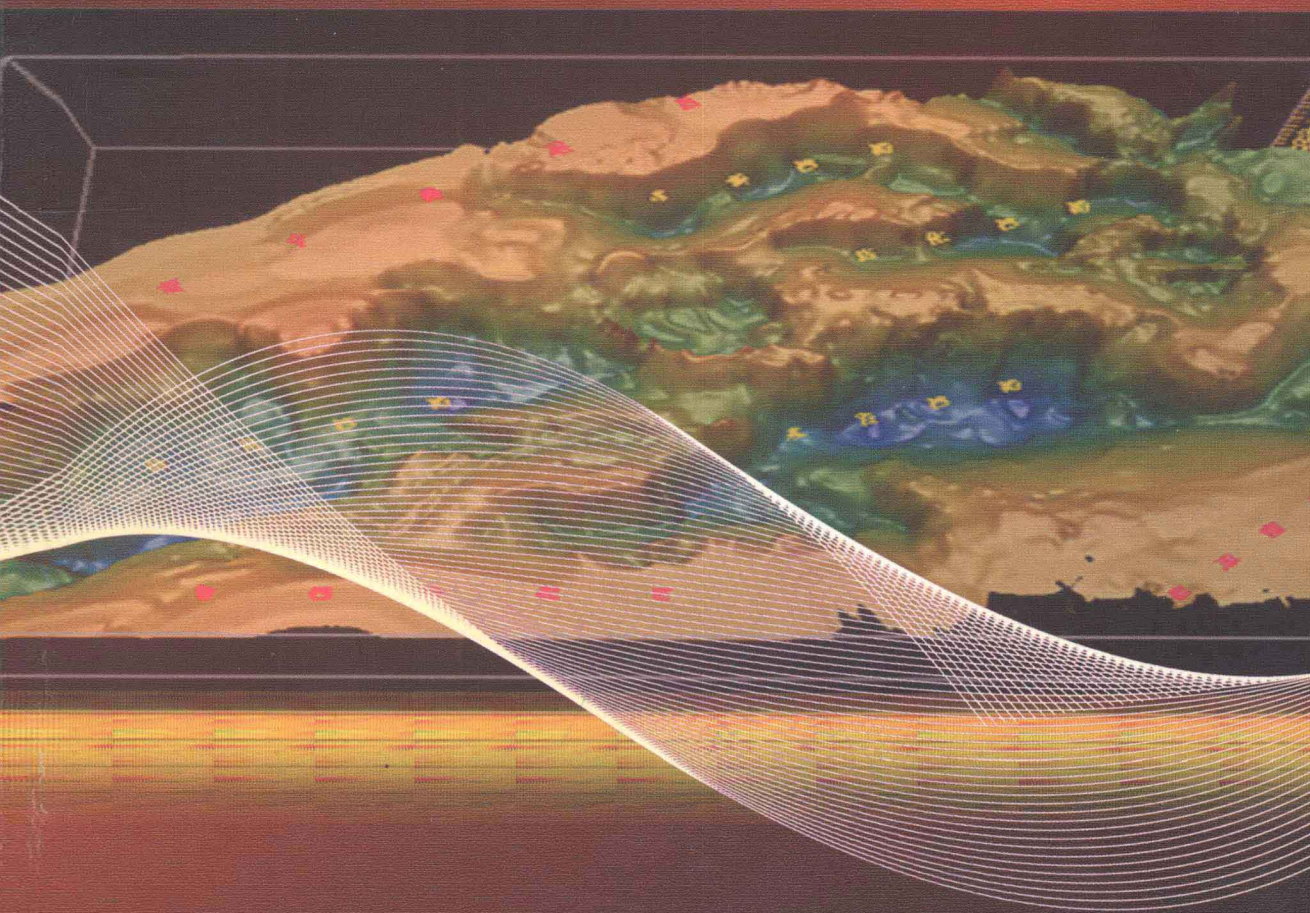


油气藏地震正演模型与分析

张 勇 韩文功 苏朝光 著



石油工业出版社

PETROLEUM INDUSTRY PRESS

油气藏地震正演模型与分析

张 勇 韩文功 苏朝光 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是以油气藏地震响应模式定量分析为核心,以指导油气藏勘探开发为主旨,紧密结合胜利油田勘探开发实践,应用数值和物理联合模拟技术,对陆相储层中常见的复杂构造、岩性、地层等3大类9种典型油气藏建立了精细地质模型,进行了系统的地震正演模型与分析研究,建立了一系列地震响应模式,制作了一套各种类型典型油气藏地质模型地震响应特征的图集,将地震正演记录与实际地震资料进行了很好的对比分析,实现了低序级断层、微构造、地层、岩性、储层物性和流体的精细预测与描述,为油田勘探开发人员,进行正确的地震资料地质解释和在地震解释中依据地震响应特征判识油气藏,提供了非常有价值的宝贵资料,取得了显著的勘探和开发成效。

本书可供石油勘探和开发专业技术人员使用,也可作为大专院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油气藏地震正演模型与分析 / 张勇等著.
北京:石油工业出版社,2009.12
ISBN 978-7-5021-7523-8

- I. 油…
- II. 张…
- III. 油气藏—地震勘探—研究
- IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 215585 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.cn
发行部:(010) 64523620
经 销:全国新华书店
印 刷:石油工业出版社印刷厂

2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷
787×1092毫米 开本:1/16 印张:12.5
字数:320千字 印数:1—1000册

定价:98.00元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

地震技术是沉积盆地地质研究与油气勘探、开发的重要技术，特别是三维地震技术，在东部复杂油气田的勘探、开发中发挥了不可替代的重要作用。近年来，东部老油田已逐步进入隐蔽油气藏勘探阶段，对地震技术精度的要求越来越高。为此，以提高地震资料解决实际问题的能力为目标，一方面，以三维地震二次采集为依托，加强高精度三维地震技术的攻关研究；另一方面，在现有地震资料的基础上，充分挖掘和利用地震信息，提高解释应用水平。复杂油气藏地震正演模型研究就是其中的一项重要工作。几年来，中国石油化工股份有限公司油田部组织胜利油田等单位研究人员做了大量工作，取得了很好的应用效果。《油气藏地震正演模型与分析》一书和《陆相断陷盆地油气藏地震响应模式》图册即是这项研究的成果。

《油气藏地震正演模型与分析》从油田勘探开发的实际需求出发，以“综合地震正演模拟指导地震资料解释用于精细勘探和油藏开发”的思路，针对陆相断陷盆地复杂构造、地层和岩性等油气藏的地质特点，系统地进行了从宏观到微观的地震响应定量模拟研究。总结了陆相断陷盆地（济阳拗陷）标准地震反射层特征和地质意义，建立了陆相断陷盆地典型地震地质模型，应用数学、物理地震正演模拟方法，开展不同类型复杂油气藏的精细地震正演模拟，并探索对复杂油气藏地震正演模型应用的量化分析，制作完成了系列的地震模型，深化了地震正演模拟技术在油气勘探、开发中的应用。同时也以图解方式编成了《陆相断陷盆地油气藏地震响应模式》图册。

该项研究成果可有效提高复杂构造油气藏、地层油气藏和岩性油气藏的地震识别能力与地震描述精度，降低地震资料解释的多解性；同时也可作为地震信息向油气开发延伸的切入点，复杂油气藏地震正演模型分析以其系统性、直观性的特点，好学、易用，避开地震勘探原理繁琐的数理推导，可提高油田开发人员应用地震信息解决开发问题的热情和能力，有效地促进地震技术的应用水平。该书对复杂油气藏的勘探、开发具有实际应用意义，值得总结推广。

以此为序。

中国石油化工股份有限公司高级副总裁

王志刚

2009年8月7日

随着油气田勘探开发的不断深入,面对的对象已由以构造油气藏为主,逐步转变为以复杂隐蔽油气藏为主,勘探开发对三维地震资料的依赖程度越来越大,对地震技术精度的要求也越来越高。如何利用现有地震资料,充分挖掘其深层次的地质信息,提高解释应用水平,满足隐蔽油藏勘探开发的需要,成为地震技术应用研究的首要任务。《油气藏地震正演模型与分析》和《陆相断陷盆地油气藏地震响应模式》就是据此需求在相关研究总结的基础上编写而成的。

书中涉及油藏类型主要取自东部陆相断陷盆地。东部陆相断陷盆地是我国石油生产的重要地区,其丰富的油气资源和复杂的地质条件决定了油气勘探开发实践过程的长期性和复杂性。历经数十年的勘探开发,东部老油田已积累了大量的井筒资料和丰富的油藏地质认识,为建立相对精确的油藏地质模型,进而开展地震正演模型技术应用研究提供了充实的物质基础。

2004年以来,中国石油化工股份有限公司油田事业部组织进行了复杂油气藏地震正演模型分析研究。通过将覆盖面大、横向连续性好的地震资料与精度高、微观刻画性好的测井资料有机结合,系统地对复杂构造、岩性、地层等三大类9种典型油气藏进行地震正演模型分析,提高了低序级断层、微构造、地层、岩性、储层物性和流体的精细预测与描述精度,减少了油气藏地震特征识别与解释中的多解性和不确定性,实现了利用现有地震资料更好更有效地指导油气勘探开发。

需要一提的是,书中对于一些复杂油气藏使用了简化模型和简单算法,意在探索复杂油气藏正演模拟分析的思路和方法。

由于篇幅和图件尺寸的限制,实际地震资料和部分正演模型结果将在《陆相断陷盆地油气藏地震响应模式》图集中体现。

参加书稿编写的有张勇、韩文功、苏朝光、高秋菊、闫昭岷、沈财余、张建宁等,最后由张勇、韩文功、苏朝光统编定稿。全书插图由高秋菊、师涛、魏欣伟进行了统一清绘和整饰。

在付梓印刷之际,作者特别感谢中国石油化工股份有限公司高级副总裁王志刚先生在百忙之中为本书作序,以及他多年来对这项工作的关心、重视和对该研究成果的充分肯定!

在项目研究和本书编写、出版过程中,中国石油化工股份有限公司油田部、科技部,胜利油田分公司及其开发处、科技处、物探研究院等单位和相关领导给予了大力支持和帮助。在此对参加、支持、帮助项目研究和专著出版的单位、个人,以及本书所引用参考文献的作者一并表示衷心的感谢。由于笔者水平所限,编写过程中难免出现不当之处,敬请各位读者批评指正。

绪论	1
第一章 油气藏正演模拟基础	7
第一节 地震岩石物理参数研究	7
第二节 数值—物理联合地震正演模拟方法	24
第三节 油气藏类型及特征	36
第二章 复杂构造油气藏地震正演模型与分析	49
第一节 低序级断层地震正演模型与定量分析	49
第二节 微构造油气藏地震正演模型与分析	55
第三节 复杂构造油气藏地震正演模型的应用实例	59
第三章 地层油气藏地震正演模型与定量分析	70
第一节 地层油气藏尖灭线识别存在的误差问题	70
第二节 地层油气藏尖灭线地震正演模型定量研究	73
第三节 地层储层横向变化问题	80
第四节 地层油气藏地震正演模型应用实例及效果	82
第五节 潜山油气藏地震正演模型与分析	94
第四章 岩性油气藏地震正演模型与分析	115
第一节 河道砂体油气藏地震正演模型与分析	115
第二节 滩坝油气藏地震正演模型定量分析	142
第三节 浊积岩油气藏地震正演模型与分析	161
第四节 砂砾岩体油气藏地震正演模型与分析	163
第五章 其他类型地震正演模型与分析	168
第一节 流体替换地震正演模型与分析	168
第二节 典型天然气藏地震正演模型与分析	176
第三节 地震资料各种解释陷阱的地震正演模型及判别	181
后记	189
参考文献	190

绪 论

一、油气藏地震正演模型研究的背景和意义

东部陆相断陷盆地是我国石油生产的重要地区，其复杂的地质条件和丰富的油气决定了油气勘探开发实践过程的长期性和复杂性。以胜利油田所在的济阳坳陷为例，经过 40 年的高速勘探开发，近几年来油气田勘探开发已经进入一个新的阶段，即由初期的以构造型油气藏为主，变为以复杂隐蔽油气藏为主。由于勘探层系多、油藏类型多，油气资源勘探潜力依然雄厚，仍然保持每年 $1 \times 10^8 \text{t}$ 的新增探明石油地质储量。但复杂断块、低序级断层、微构造、地层超覆、地层不整合、河道砂体、浊积岩、滩坝、砂砾岩体等油气藏已成为油田勘探开发的主体目标。构造更加复杂，储层更加隐蔽，勘探开发的难度不断加大，对勘探技术不断提出挑战。

针对该时期的地质和油气藏特点，石油勘探开发业界已做了很多的工作。就地球物理技术的发展和应用而言，三维地震技术在陆相断陷盆地复杂油气藏勘探开发中发挥了不可替代的作用已是不争的事实，特别是自 20 世纪 90 年代起高精度三维地震采集技术的发展，三维地震大连片处理技术、叠前成像处理技术的进步，地震反演技术、地震属性分析技术、储层预测技术的应用，使得以地震资料为主的油气藏预测、描述和评价技术取得长足发展，并在油气藏勘探开发中发挥重要作用。

那么，如何进一步挖掘地震资料的潜力？怎样进一步提高地震资料解释的精度？这是我们面临的实际问题，也是笔者几年前所思考的问题。针对该阶段的特点，我们选择地震正演模型分析技术作为一个切入点，这是因为该阶段已积累了大量地震资料、井筒地质资料、油藏地质资料。结合已有的认识，可以建立起相对精确的油藏地质模型，包括岩石物理参数模型和空间几何模型。利用地震正演模型技术可建立起不同油藏的地震正演模型，为地震资料正确的地质解释和依据地震响应特征判识油气藏提供直观有效的分析资料。勘探开发地质人员很容易将地震正演记录与实际地震资料进行对比分析，减少油气藏地震特征识别与解释中的多解性和不确定性。

油气藏地震正演模型与分析针对复杂油气藏勘探开发的实际问题，以油气藏地震响应模式的分析为基础，建立陆相储层中常见的各种复杂油气藏类型的地质模型，用地震正演模拟方法建立一系列地震响应模式，将地震资料覆盖面大、横向连续性好与测井资料精度高、微观刻画性好的优势有机地结合起来，扬长避短，从而提高地震资料解释的精度，降低地震解释风险。

因此，“油气藏地震正演模型与分析”项目得到了中国石油化工股份有限公司的高度重视和大力支持，从 2004 年开始进行了两期的攻关研究。通过油气藏地震正演模拟分析实现了低序级断层、微构造、地层、岩性、储层物性和流体的精细预测与描述，更好地发挥了地震资料的作用，促进了油田勘探开发地质人员更好地应用地震勘探技术指导不同类型油气藏的勘探开发，提高了油气藏勘探开发的地质效果和经济效益。

二、油气藏地震正演研究的主要内容

(1) 油气藏正演模拟基础。

以地震岩石物理参数为基础,以典型油气藏地质模型为核心,以地震正演技术为手段,从地震地质的基本关系出发,开展数值模拟、物理联合正演模拟研究,形成陆相断陷盆地复杂油气藏地震精细正演模拟技术。

(2) 复杂构造油气藏地震正演模型与分析。

通过开展低序级断层、微构造油气藏地震正演模型研究,建立复杂构造油气藏地质模型。通过模型特征分析,建立复杂构造油气藏的有效地震响应识别特征及相应的地震模型定量识别量版。

(3) 地层油气藏地震正演模型与定量分析。

主要针对地层油气藏地层超剥尖灭线预测误差较大的勘探开发难题,开展地层油气藏超剥尖灭线正演模型定量研究,建立精细描述图版,提高尖灭线描述精度。

(4) 岩性油气藏地震正演模型与分析。

建立河道砂岩、滩坝油气藏、浊积岩、砂砾岩体油气藏等复杂岩性油气藏地质模型,通过正演模型与分析,总结其地震响应与识别特征,提高复杂岩性油气藏预测精度。

(5) 开展其他类型如流体替换、叠前属性应用的地震正演与分析,同时开展地震资料各种解释陷阱的地震正演模拟及判别。

三、工作量情况与研究成果

(1) 工作量情况。

“油气藏地震正演模型与分析”项目以陆相断陷盆地复杂隐蔽油气藏成藏理论为指导,以精细地震地质模型为基础,以数值模拟和物理联合地震正演模拟技术为手段,以油气藏地震正演模型分析为技术目标,自2004年至2008年,通过4年多的研究与探索,完成了大量的实物工作量(表1),形成了针对陆相断陷盆地3大类9种油气藏(图1)的“数值模拟和物理模拟联合模拟研究方法”、“复杂构造、地层、岩性三大类油气藏的地震响应模式定量研究”、开展了流体替换、叠前属性、天然气藏、速度陷阱等地震正演模型分析与识别,取得良好的油气勘探地质效果与经济效益。

(2) 主要研究成果。

①应用数值模拟和物理模拟联合模拟手段,建立了复杂油气藏地震正演与分析的方法和流程。

根据油气藏精细油藏描述的需要,针对3大类9种油藏的特点,提出了适合陆相断陷盆地油气藏的区域与局部、数学与物理、叠前与叠后相结合的综合定量地震正演模拟方法。开展了数值、物理等不同正演模拟方法研究。以复杂构造、低序级断层、地层和岩性等实际资料为基础,系统地分析了不同的数学、物理模拟方法适应性。完善了油气藏地震响应模式定量分析的方法和流程,克服了应用单一研究方法的缺陷,建立了数值和物理联合模拟研究复杂油气藏开发的流程及步骤,形成了油气藏精细地震正演模拟技术。

②通过复杂构造油气藏地震正演模型与分析,建立了低序级断层和微幅构造地震响应的定量识别图版。

表 1 项目完成模型工作量统计

类 别	亚 类	小 类	个 数
数 学 模 型	胜利典型模型	各构造带模型正演	11
		砂砾岩体含油气模型	12
		浅层河道含油气水	16
		典型模型加噪声分析	26
	构造油气藏模型	低序级断层	15
		复杂构造	19
	岩性油气藏模型	岩性油气藏基础	54
		河流相砂体	5
		砂砾岩体	5
		扇三角洲、浊积岩	9
		滩坝	12
		火成岩、石灰岩、白云岩、泥岩	15
	地层油气藏模型	正演量化研究	14
		地层超覆	90
		地层不整合	22
	潜山油气藏模型	碳酸盐岩潜山	16
		碳酸盐岩岩溶	18
	复合油气藏模型	构造—岩性、地层—岩性	3
	直接油气检测	P2 油层、亮点气层检测研究	44
	地震属性的应用研究	AVO 特征分析	17
		河道砂体、浊积砂体微相研究	9
		流体替换模型分析	8
	地震资料解释陷阱的判别	复杂岩性、构造变化等影响	17
物 理 模 型	基础模型	波阻抗特征及分辨率模型	4
		缝洞地震波特征	1
		裂隙地震波特征	2
	复杂构造模型	大断层模型	1
		斜层模型	1
		穹隆构造	1
		高陡构造	1
	复杂岩性模型	薄砂层含油气	2
		郝家盐岩	1
		断层砂体	1
		Z 字形、扇形薄砂体	2
	面元大小对成像精度影响模型	河道砂体物理模型	2
总 计			476

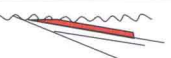
类型	亚类				
复杂构造油气藏	亚类	微构造油气藏		低序级断层油气藏	
	模式				
	实例	KD		DX	
地层油气藏	亚类	地层超覆油气藏	不整合遮挡油气藏		古潜山油气藏
	模式				
	实例	CJZ	CK1		ZX
岩性油气藏	亚类	河道砂体油气藏	滩坝油气藏		浊积岩油气藏
	模式				
	实例	ZX	东营西部		东营北带车镇北带

图 1 陆相断陷盆地复杂油气藏类型

根据复杂断块、低序级断层、微构造的基本地质特征，研究了地震地质精细建模方法，应用地震正演技术，系统建立低序级断层、微构造等复杂构造油气藏的精细地质模型及其地震响应，针对低序级断层建立了定量识别图版和地震特征定量识别描述技术，在复杂构造油气藏勘探开发中发挥了重要的指导作用。

③对地层油气藏地震正演模型进行了系统分析研究，建立了其定量关系图版，形成了地层油气藏超剥尖灭线精细描述方法。

根据陆相断陷盆地地层油气藏三重不整合成因机制，以济阳坳陷地层油气藏为样本，以解决地层油气藏尖灭线预测误差为关键，应用地震正演模拟方法，通过对地层油气藏系统建立模型和地震响应模式的定量研究，发现地层油藏超剥尖灭线的误差与地层和不整合面的夹角有关，从而创造性地提出了地层油藏超剥尖灭线夹角定量外推方法，并制作了相应的外推量版，首次形成了地层油气藏超剥尖灭线精细描述方法，大大提高了地震资料描述精度，有效地指导了地层油气藏勘探开发。

④通过对河道砂体、浊积岩、滩坝、砂砾岩体四类主要岩性油气藏地震正演模型分类分析研究，建立了岩性油气藏地震响应定量识别方法，提高了岩性油藏识别与描述精度。

针对岩性油气藏储层薄、变化快、岩性复杂的特点，通过精细的地震正演模拟技术，量化了不同埋深、不同层系和不同亚相、微相等地震地质条件下复杂岩性气藏的地震地质模型，通过综合模型研究方法模拟并分析了河道砂体、浊积岩、滩坝、砂砾岩体的地震反射特征，建立了岩性油气藏与地震响应的定量解释式，提高了地震资料描述岩性油气藏的精度。

⑤通过流体替换、叠前属性应用、天然气藏、速度陷阱等地震模型分析与研究，提高了油气藏地震油气检测能力和识别速度陷阱的能力。

开展了基于实测数据和 Gassmann 方程流体替换研究，明确了气与水、油与气之间的流体替换地质模型中地震响应规律及叠前地震属性的变化特征，初步建立了储层流体变化的地震响应模式，开展了叠前属性应用和典型天然气藏的地震正演模型分析，有效地提高了油气藏地震油气检测能力。

⑥取得了显著的勘探开发成效。

“油气藏地震正演模型与分析”的技术攻关成果与生产紧密结合,提高了油气藏勘探开发的成功率。2004年以来,在CJZ、CD地区、BX南坡、ST地区、P2井区等多个地区推广应用,取得了一系列勘探开发突破和进展。提供井位127口,见油层井98口,钻探成功率77.1%。上报探明石油地质储量 $16179.5 \times 10^4 \text{t}$,上报控制储量 $8578.42 \times 10^4 \text{t}$,上报预测储量 $7968 \times 10^4 \text{t}$,累计建产能 $122.95 \times 10^4 \text{t}$,4年累产原油 $269.45 \times 10^4 \text{t}$,应用效果良好,勘探开发效果显著,取得显著经济和社会效益(表2至表5)。

表2 SL探区2004—2008年模型应用区块井位统计表

区 块	部 署 探 井	见 油 层 井	钻探成功率
BX 南坡	L113、L118、L117、G891、G890、G892、G893、BX24、B106、G894、G898、G897、G896、G900、C52、C111、CX103、F140、F141、F142、F150	L117、L118、G891、G890、G892、G893、BX24、G894、C52、C111、CX103、CX141、CX142、	77.1%
YXT 油田 D359 区块	DX361、DX364、DX365	DX361、DX364	
CJZ 油田 C311 区块	C27-2、C27-1、C315-1、C315-2、C315-3、C313、C318、C319、C320	C27-2、C27-1、C315-1、C315-2、C315-3、C319、C320	
JJD 油田 X38 块	X381	X381	
ST 地区	TX825、T173、T720、T139	TX825、T720	
DY 西部地区	B436、B444、F144、F143、F145、F146、F147、F148、F149、F152、L75、G899、G901、G902、B241、CH110、F151、F153、F159、F161、F154、F155、F156、F157、F158、F160、F163、F162、F164、FS1、L751、L752、L753、L76、C112、C113、B437、B438、L57、F165、F168、L77、C114	B436、B444、F144、F143、F145、F146、F147、F148、F149、L75、G899、G901、G902、B241、C110、F151、F153、F154、F155、F156、F158、F159、F160、F161、F163、F162、FS1、L751、L752、L753、L76、C112、C113、B437、B438、L57、F168、L77、C114	
TP 油田 Z200 块	Z200、Z202、Z203	Z200、Z203	
TP 油田 Z130 块	Z130、Z131、Z132、Z133、Z134	Z130、Z131、Z134	
ST 地区	T764、T765、T174、T175、T176、T744	T764、T765、T174	
CD 地区	CB103、CB34、CB324、CB273、CB41、CB811	CB34、CB41、CB324、CB273、CB273	
CJZ 油田 C22 区块	C22、C220、C221、C222、C223、C224、C225、C226、C227、C228	C22、C220、C221、C223、C225、C226、C227、C228	
ST 地区	T766、T767、TS6、TX179	T767、TX179	
LN 油田 J2 区块	J204、J201、J207、J203、J208、J201、J211、J205、J206	J204、J201、J207、J203、J208、J201、J211	
SH 油田 T301 块	T304、T305、T306、X104	X104、T304、T305、T306	
合 计	127	98	

表 3 SL 探区 2004—2008 年模型应用区块控制储量统计表

年度	区 块	层 系	油藏类型	控制面积 (km ²)	控制储量 (10 ⁴ t)	备 注
2004	SJS 油田	Es ₃ [±]	地层—岩性	1.8	796	
2005	JJD 油田 X38 块	Es ₃ [±]	构造—岩性	11.7	934.8	
2007	CD 油田	Ng	岩性油藏	10.86	1513.26	
2007	LJL 油田 L75 块	Es ₄ [±]	岩性	121.99	5334.36	
总 计				146.35	8578.42	

表 4 SL 探区 2004—2008 年模型应用区块预测储量统计表

年度	区 块	层 系	油藏类型	预测面积 (km ²)	预测储量 (10 ⁴ t)	备 注
2006	ST 油田	Es ₄	构造—岩性	25	2478	
2006	SH 油田 306 块	Es ₃	构造、构造—岩性油藏	4.3	500	
2007	LJL 油田 L76 块	Es ₄ [±]	岩性	180	4990	
总 计				209.3	7968	

表 5 SL 探区 2004—2008 年模型应用区块新增探明储量、产能建设统计表

年度	区 块	层 系	油藏类型	(km ²)	探明储量 (10 ⁴ t)	建产能 (10 ⁴ t)	累产 (10 ⁴ t)
2005	YXT 油田 D359 块	Es ₂	构造—岩性油藏	5.00	773.27	5.2	15.6
2005	CJZ 油田 C311 区块	Ng ₂	构造—岩性油藏	10.33	1708.39	14.1	42.3
2005	CJZ 油田 C373 区块	Ng ₂	构造—岩性油藏	20.97	2951.00	17.8	53.4
2005	WZ 油田	Es ₃ [±]	构造—岩性	3.40	1977.66	9.7	29.1
2005	ST 油田	Es ₃ [±]	构造—岩性	2.62	54.49	2.5	7.5
2005	ST 油田	Es ₃ [±]	构造—岩性	0.70	42.99		0
2005	SH 油田 3—10 块	Es ₃ [±]	构造—岩性油藏	4.40	260.00	1.95	5.85
2005	LN 油田 J2 块	Es ₃ [±]	构造—岩性油藏	2.50	210.00	2.5	7.5
2006	G89 块	Es ₄ [±]	岩性	83.90	3689.00	21.8	43.6
2006	CJZ 油田 C22 区块	E ₃ d ₃	地层油藏	3.78	200.77		0
2006	CD 油田	Ng+Nm	岩性油藏	2.36	492.22	10.7	21.4
2006	TP 油田	N ₁ g ₂ [±]	岩性—地层油藏	3.73	272.88		0
2006	P2 井区	沙湾组	岩性油藏	1.25	205.10	20.6	41.2
2007	F159 块	Es ₄ [±]	岩性	75.26	3284.00		
2007	ST 油田	Es ₃ [±]	岩性	2.59	57.73	2.0	2.0
总计				222.79	16179.50	108.85	269.45

第一章 油气藏正演模拟基础

在地震正演模型建立前，首先要确定本区的大量建模参数，选取适用有效的建模方法和流程，对油气藏地震剖面特征进行大量的剖析，初步明确油气藏的类型及特征。这也是油气藏地震正演模型的基础，因此本章主要包括地震岩石物理参数研究，数值—物理联合模拟方法和油气藏类型及特征。

第一节 地震岩石物理参数研究

地震岩石物理学是油气勘探开发的基础工作，它是用地震及测井资料研究储层和油气预测的理论基础，岩石物理学在从地震数据中导出储层和流体特性及油藏参数的研究中，起到关键基础作用。在勘探中，它是用地震属性预测岩性及叠前反演预测油气的物理基础。开发地震中，它可以使人们快速理解储层流体变化所引起地震响应的变化，是连接地震和油藏工程的纽带。岩石物理分析主要研究地球物理勘探所获得的物理量与地下储层参数的对应关系，这二者对应关系的确定程度必然影响到地球物理探测结果的储层解释能力及其效果。对于地震技术来说确定地震波特点除激发、接收条件外主要受岩石的弹性模量、密度和吸收等特性的影响，而这些特性又与岩石成分、孔隙度、埋深、孔隙内流体性质、压力、岩层的不均匀性以及其他的地质特性密切相关，了解岩石物性与地震波特性的关系可以更好地研究储层性质（岩性、物性）及其状态（饱和度、孔隙压力等）。利用岩石物理技术研究的成果，可以提供各种对储层识别及含油气性分析的敏感岩石物理参数，建立适用于研究地区的预测标志。根据岩石的岩性、物性与波速的关系，饱和水、饱和油和饱和气时岩石类型的波速特征，横波波速反映的岩石各向异性特征等，建立适合本地区、本储层的具体预测标志，有效指导储层反演技术，根据所得的规律去预测其他未探明地区的含油气性，为勘探开发提供依据。同时，还可以为地震正演模型建立提供对储层识别及含油气性分析的敏感岩石物理参数。

正演模拟是全面认识地震波在各种介质中的传播特点、帮助解释观测数据并搞清地质构造的有效手段。结合岩石物理分析及地震正演技术对地震响应研究，对储层、流体的叠前叠后地震反射特征、道集特征进行分析，同时通过正演模拟分析，可以对反演算法影响因素等进行分析，从而调整算法和流程参数，提高储层反演的精确度。

一、岩石物性参数与地球物理参数的关系

地震包含有纵、横波信息，而纵波和横波反映介质弹性性质的不同方面，如何利用纵、横波速度信息来更好地认识地下岩性及流体是地球物理勘探需要解决的反问题。因此建立岩石物理参数与地球物理参数即地震波速度及弹性参数的关系，获得不同岩石类型、不同流体性质下岩石的有效弹性模量和敏感参数，是应用纵波速度和横波速度及相关弹性参数

识别储层参数的关键。

（一）岩性变化对纵横波速度、密度的影响分析

岩性的变化对速度、密度的影响是非常复杂的，分两种情况考虑：泥质含量影响骨架速度、孔隙度和泥质含量影响骨架速度，孔隙度不变。表 1-1-1 列出岩石的矿物组分、孔隙以及流体参数，在孔隙、流体参量保持不变的条件下，改变泥质含量在矿物组分中的比例，利用给定的岩石弹性模量计算模型求得的不同泥质含量时岩石的密度、纵横波速度。表 1-1-2 和 1-1-3 分别给出了孔隙度不变和孔隙度改变情况下弹性参数随泥质含量变化特征。分析发现岩性的变化对纵横波速度及密度的影响是非常复杂的，难以定性，但对纵横波速度比和泊松比的影响是相对比较稳定的：当泥质含量增大时，纵横波速度比和泊松比都有增大的趋势。

表 1-1-1 砂岩密度、纵横波速度随泥质含量变化

矿物组分			基质参数				流体参数				有效介质参数			
石英	正长石	泥质	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	石油	天然气	水	v_p (m/s)	密度 (g/cm ³)	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)
70	25	5	5776.3	3543.1	2.6275	15	70	0	30	1356.5	0.790	3150.7	1718.3	2.3519
70	20	10	5576.9	3373.4	2.6290	15	70	0	30	1356.5	0.790	3062.0	1636.0	2.3531
70	15	15	5390.9	3219.2	2.6305	15	70	0	30	1356.5	0.790	2979.6	1561.3	2.3544
70	10	20	5216.9	3078.4	2.6320	15	70	0	30	1356.5	0.790	2902.4	1493.0	2.3557
70	5	25	5107.5	2903.5	2.6340	15	70	0	30	1356.5	0.790	2830.2	1430.5	2.3570

表 1-1-2 泥质含量影响孔隙度

v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)	泊松比	纵横波速度比	泥质含量 (%)
2410	1220	1.99	0.327	1.98	3
2370	1170	2	0.338	2.03	6
2350	1130	2.03	0.35	2.08	9
2350	1120	2.05	0.353	2.1	12
2380	1120	2.1	0.357	2.12	16
2430	1145	2.13	0.359	2.12	20

表 1-1-3 泥质含量不影响孔隙度

v_p (m/s)	v_s (m/s)	ρ (g/cm ³)	泊松比	纵横波速度比	泥质含量 (%)
2679	1565	2.039	0.24	1.71	2
2540	1442	2.03	0.26	1.76	4
2462	1371	2.027	0.28	1.80	6
2354	1272	2.02	0.29	1.85	8
2269	1193	2.013	0.30	1.90	10
2094	1022	1.998	0.34	2.05	15

(二) 孔隙度对岩石弹性模量的影响

表 1-1-4 列出了岩石的矿物组分、孔隙以及流体参数,保持矿物组分和流体参量不变,改变孔隙度的大小,利用给定的岩石弹性模量计算出了不同孔隙度时岩石的密度、纵横波速度。

表 1-1-4 砂岩密度、纵横波速度随孔隙度的变化

矿物组分			基质参数				流体参数					有效介质参数		
石英	正长石	泥质	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	石油	天然气	水	v_p (m/s)	密度 (g/cm ³)	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)
70	25	10	5576.9	3373.4	2.6290	5	70	0	30	1356.5	0.790	4015.1	2289.3	2.5371
70	20	10	5576.9	3373.4	2.6290	10	70	0	30	1356.5	0.790	3421.0	1869.7	2.4451
70	15	10	5576.9	3373.4	2.6290	20	70	0	30	1356.5	0.790	2817.5	1485.0	2.2612
70	10	10	5576.9	3373.4	2.6290	25	70	0	30	1356.5	0.790	2640.6	1379.2	2.1693
70	5	10	5576.9	3373.4	2.6290	30	70	0	30	1356.5	0.790	2508.0	1301.7	2.0773

图 1-1-1 显示了岩石密度、纵横波速度随孔隙度大小变化的曲线。随着孔隙度的增加纵横波速度有减小的趋势。

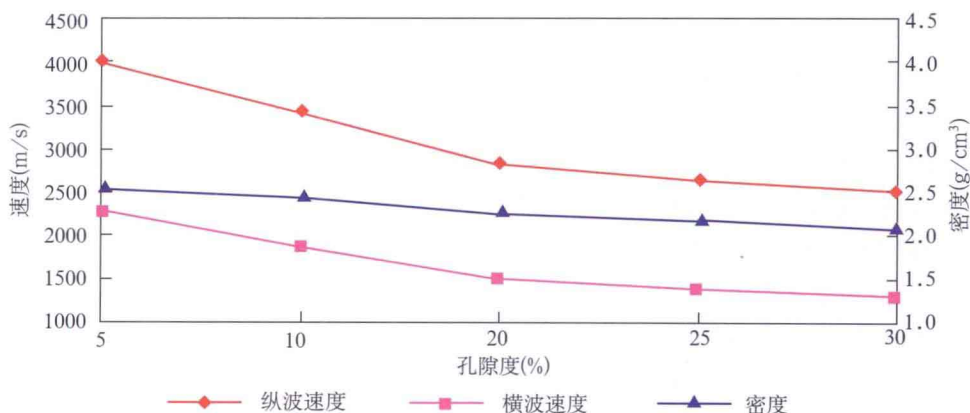


图 1-1-1 岩石密度、纵横波速度随孔隙度的变化

随着孔隙度的增大,纵横波速度和密度减小、纵横波速度比和泊松比增大。

在实际中,孔隙中是充填着不同的流体的,泥质含量、孔隙度和流体共同对岩石的弹性参数产生影响。在其他条件不变的情况下,分别计算了饱和油、气、水的情况下,孔隙度对纵、横波速度比的影响,图 1-1-2 为砂岩孔隙中分别填充油、气、水和泥时的纵、横波速度比值随孔隙度的变化曲线:

从图 1-1-2 中可以看到,孔隙中所含流体性质不同,孔隙度大小对岩石弹性性质的影响是不同的。孔隙中所含流体为含气体与液体时,对岩石弹性性质的影响是相反的,即所含流体为含气体时,纵、横波速度比随孔隙度增大而减小,减少幅度比较大;含油时,纵、横波速度比随孔隙度增大而减小,减小幅度比较小;而填充水时速度比值随着孔隙度增大

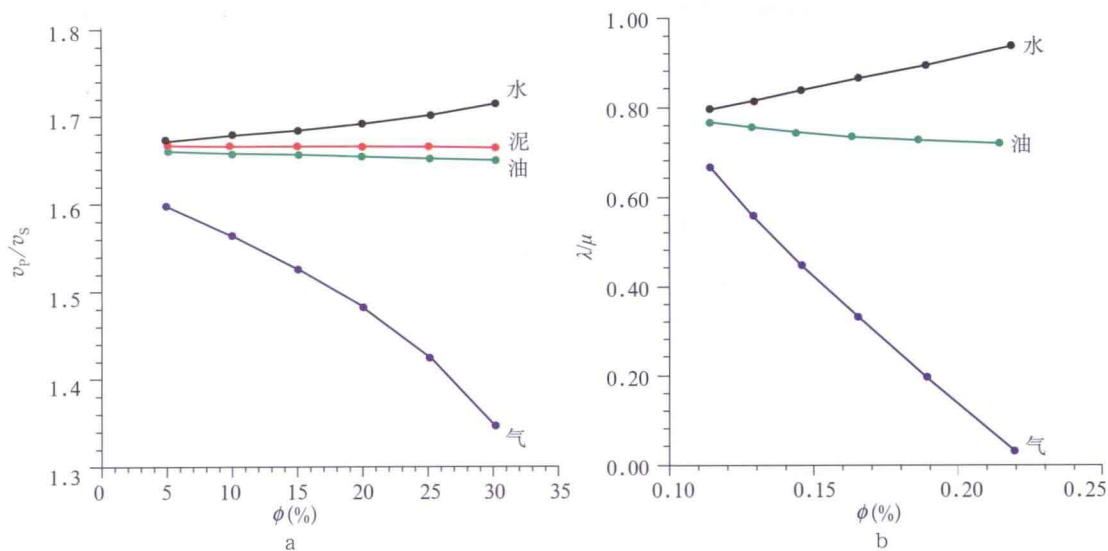


图 1-1-2 砂岩弹性性质随孔隙度变化的关系 (不同孔隙填充物)

而增大。填充流体情况下，纵横波速度与孔隙度的关系与干孔隙条件下是不同的。填充物为泥时，纵、横波速度比值受孔隙度的影响较小。

(三) 不同流体性质（油、气、水）对岩石弹性性质的影响

地震响应的变化源于地下地层结构和岩石弹性性质的变化两方面的因素，对于岩石弹性性质而言，影响的因素非常多，也很复杂，主要有压力、温度、孔隙度及孔隙形态、流体类型及其饱和度等。这里主要研究不同孔隙度下，含流体性质及其水饱和度对岩石弹性性质的影响，即确定不同饱和状态时岩石的有效弹性模量。同时岩石物理参数的正演和反演方法为有效地研究不同流体性质（油、气、水）对岩石弹性性质的影响提供了基础。

下面分别利用 B-G 和 K-T 两个模型研究不同含水饱和度情况下储层岩石的弹性性质变化。表 1-1-5 至表 1-1-7 列出了相同岩石的矿物组分和孔隙参数，通过改变流体参数来计算的岩石的密度、纵横波速度。

表 1-1-5 列出的流体性质是油水两相。在不同含油饱和度条件下，计算的岩石密度、纵横波速度。

表 1-1-6 列出的流体性质是气水两相。在不同含气饱和度条件下，计算的岩石密度、纵横波速度。

表 1-1-5 砂岩密度、纵横波速度随油水饱和度变化

矿物组分			基质参数				流体参数					有效介质参数		
石英	正长石	泥质	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	石油	天然气	水	v_p (m/s)	密度 (g/cm ³)	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	90	0	10	1338.4	0.730	3040.9	1662.3	2.3476
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	50	0	50	1377.2	0.850	3085.2	1656.0	2.3656
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	30	0	70	1401.5	0.910	3109.0	1652.9	2.3746
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	10	0	90	1430.8	0.970	3134.7	1649.7	2.3836

表 1-1-6 砂岩密度、纵横波速度随气水饱和度变化

矿 物 组 分			基 质 参 数				流 体 参 数				有 效 介 质 参 数			
石英	正长石	泥质	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	石油	天然气	水	v_p (m/s)	密度 (g/cm ³)	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	0	90	10	1018.0	0.1012	2803.0	1696.0	2.2532
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	0	70	30	1023.0	0.3005	2847.7	1685.6	2.2831
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	0	50	50	1023.7	0.5005	2886.6	1674.7	2.3131
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	0	30	70	1023.9	0.7002	2920.3	1663.9	2.3431
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	0	10	90	1024.2	0.9000	2949.8	1653.4	2.3731

表 1-1-7 砂岩密度、纵横波速度随油气饱和度（水：10%）变化

矿 物 组 分			基 质 参 数				流 体 参 数				有 效 介 质 参 数			
石英	正长石	泥质	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	石油	天然气	水	v_p (m/s)	密度 (g/cm ³)	v_p (m/s)	v_s (m/s)	密度 (g/cm ³)
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	20	80	10	954.0	0.6600	2891.3	1666.0	2.3370
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	50	50	10	959.5	0.4502	2861.3	1677.4	2.3050
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	70	20	10	975.3	0.2405	2828.2	1688.9	2.2740
75	15	10	5582.6	3420.9	2.6330	15	90	10	10	989.1	0.1705	2816.0	1692.9	2.2636

表 1-1-7 列出的流体性质是油气水三相（水的饱和度为 10%）。在不同含气饱和度条件下，计算的岩石密度、纵横波速度。

一般而言，在小孔隙度的条件下，不同流体对岩石弹性模量的影响较小，当孔隙度增大时，对岩石弹性模量的影响增大，并且流体性质的影响差别明显。气体对岩石弹性模量的影响明显大于液体。

1. 油水替换对储层弹性波速度的影响

图 1-1-3a, b 分别显示了层段 1 和层段 2 砂岩这两种孔隙度情况下，用 B-G 和 K-T 两种模型理论预测的纵波速度随含水饱和度的变化曲线。从两图中均可以看出：

(1) K-T 模型预测的纵波速度受含水饱和度变化的影响较 B-G 模型预测的要大。这主要因为 K-T 模型中考虑了孔隙的纵横比。

(2) 大孔隙介质中水替换油对纵波速度的影响较大。在完全饱和油到完全饱和水的情况下，K-T 方法预测的 P 波速度最大变化幅度约为 1.8% ($\phi=13.5$) 和 7.1% ($\phi=27.9$)，而 B-G 方法预测的 P 波速度最大变化幅度约只有 0.5% ($\phi=13.5$) 和 5% ($\phi=27.9$)。在水饱和度从 0 变到 60% 的情况，不同孔隙度情况下 K-T 方法和 B-G 方法计算 P 波速度的变化分别为：① $\phi=13.5$ ：K-T 方法预测的 P 波速度变化 1%，比相应的 B-G 方法计算结果的 (0.3%) 大 0.7%；② $\phi=27.9$ ：K-T 方法预测的 P 波速度变化 3.9%，比相应的 B-G 方法计算结果的 (2.6%) 大 1.3%。

图 1-1-3a, b 分别是层段 1 ($\phi=13.5$) 和层段 2 ($\phi=27.9$) 的纵、横波速度随含水饱和度变化的相对变化量曲线。如图 1-1-3a 所示，孔隙度 $\phi=13.5$ 用 K-T 方法预测的纵波速度在完全饱和油和完全饱和水时的相对变化值或变化幅度分别为 1.8% 和 7.3%；B-G 方法