

海上油田精细地质建模

■ 杜玉山 著



HAISHANG YOUTIAN
JINGXI DIZHI JIANMO

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

责任编辑/潘向阳 封面设计/赵志勇

海上油田精细地质建模

HAISHANG YOUTIAN JINGXI DIZHI JIANMO

ISBN 978-7-5114-0425-1



9 787511 404251 >

定价:38.00元

海上油田精细地质建模

杜玉山 著

中國石化出版社

内容提要

本书系统地阐述了海上油田精细地质建模的方法、手段、步骤和技术要点,引入多种建模技术,先后建立了油藏构造模型、岩相模型、沉积微相模型和属性模型,形成了一套全新的适合海上油田大井距的精细油藏地质建模方法。本书可供从事地质矿产勘查、地质工程、矿业开发、测绘工程等系统的生产、科研人员及大专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

海上油田精细地质建模/杜玉山著. —北京: 中国石化出版社, 2010.5
ISBN 978-7-5114-0425-1

I. ① 海… II. ① 杜… III. ① 海上油气田—石油天然气地质—建立模型 IV. ① P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 086193 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

东营石大博雅印务有限公司排版印刷

全国各地新华书店经销

787×1092 毫米 16 开本 10 印张 161 千字
2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷
定价: 38.00 元

目 录

第一章 绪 论	1
一、研究意义	1
二、国内外研究现状	2
三、研究区概况	8
四、技术路线	10
五、主要研究内容	11
第二章 精细等时地层格架的建立	13
第一节 馆上段高分辨率层序地层框架的建立	13
一、标志层的选取	14
二、基准面旋回划分及识别	15
三、馆上段地层基准面旋回划分结果	20
第二节 高分辨率层序框架内单砂体对比方法	20
一、单砂体的对比模式	21
二、单砂体划分结果	23
三、单砂体分布模式	24
第三节 精细等时地层格架的建立	25
第三章 构造格架和构造演化	27
第一节 区域构造特征	27
第二节 构造精细解释	27
一、断裂系统	27
二、馆上段构造特征	32
第三节 砂体微构造特征	32
第四章 馆上段沉积微相定量划分研究	36
第一节 馆上段沉积特征	36
第二节 沉积微相定量识别	39
一、定量划分方法优选	40
二、特征参数的选取	41
三、各微相判别函数的建立	41

第三节 沉积微相展布特征	43
一、剖面沉积微相展布特征	43
二、平面沉积微相展布	45
第五章 储层非均质性定量表征	49
第一节 储层边界识别技术及空间展布研究	49
一、储层边界识别技术	49
二、储层宏观展布特征	55
第二节 储层参数精细解释研究	60
一、测井资料标准化	60
二、测井解释模型的建立	62
三、测井多井处理解释	66
第三节 储层非均质性	67
一、层间非均质性	68
二、平面非均质性	73
三、层内非均质性	74
第四节 隔层夹层研究	79
一、层间隔层研究	79
二、层内夹层研究	80
第五节 储层微观非均质研究	87
一、储层孔隙骨架特征	87
二、孔喉结构特征	88
三、孔隙半径与孔隙分布和渗透率的关系	91
第六节 沉积微相与储层非均质的关系	92
第六章 油水分布规律研究	95
第一节 流体性质	95
一、原油性质及分布规律	95
二、天然气性质特征	96
第二节 油层发育特征	97
一、平面上油层发育特征	97
二、纵向上油层发育特征	102

第三节 油水系统	104
第七章 三维地质模型建立	106
第一节 研究区储层建模方法分析	106
第二节 三维地质模型的建立	108
一、数据准备与处理	108
二、构造模型建立	114
三、储层骨架模型建立	121
四、储层属性模型建立	129
第三节 模拟结果检验	143
参考文献	148

第一章 绪 论

一、研究意义

油藏精细地质建模就是首先应用地质、物探、测井及生产动态等多种信息,开展精细油藏描述研究,然后通过先进的建模手段,将对油藏取得的可靠认识准确地以“数学模型”体现出来,建立“三维数字油藏”,以供油藏工程技术人员开展油藏数值模拟、开发调整及跟踪等研究,最终达到改善油藏开发效果、提高油藏采收率的目的。影响油藏精细地质模型准确性的因素很多,诸如油藏的复杂程度、研究区资料的丰富程度、油藏描述研究的深度(即对油藏非均质性认识的可靠程度)、建模方法及技术水平等。建立准确的油藏地质模型,首先要开展精细油藏描述研究,以取得对油藏尽可能可靠的地质认识,这是必备基础;其次,要以先进、适合的建模技术将对油藏的认识准确地反映出来,即恰当的建模处理,这是建模的关键。两者缺一不可。

埕岛油田是我国极浅海海域投入开发建设的第一个大型整装油田,已探明储量数亿吨,年产原油能力在 200 万吨以上。馆上段油藏为该油田主力含油、产油层系,其储量、产油量均占埕岛油田的约 70%。埕岛油田馆上段油藏自 1995 年开始,至 2006 年截止,历时 11 年分阶段分区块滚动投入开发。

伴随埕岛油田馆上段的滚动开发,以往只根据研究目标区进行分区建模,而且开发前期受资料少、对油藏认识深度及建模软件和技术限制,所建模型精细程度不够。埕岛油田馆上段油藏井距大(大部分在 400~500m)、斜井多(占总井数的 80%以上)、钻井及取芯等基础资料较少,对储层连通关系、砂体边界、物性参数、含油性变化等方面研究深度不够,如油砂体边界刻画不够准确,储层内部物性非均质性体现不够精细,含油饱和度模型过于简单等。到目前的开发阶段,油藏工程研究要求地质研究提供越来越精细的、能充分反映储层三维非均质特征的精细地质模型,而原有的各个分区块的地质模型没有很好的从整体上考虑以上这些问题,已经远远不能满足目前开发调整阶段的要求,因此需要进一步开展精细油藏描述研究,最终建立能够反映储层复杂非均质性的全区

整体精细三维地质模型。

在建立油藏精细地质模型基础上，油藏工程研究人员进一步通过油藏数值模拟、油藏工程分析等手段，研究剩余油分布，优化合理的提高采收率措施，编制科学的开发调整方案，最终实现大幅度提高油藏采收率的目标。

二、国内外研究现状

从最初的三维地质建模尝试至今，三维地质建模的研究已有 50 多年的发展历史，已经形成了比较成熟的理论。在 20 世纪 60 年代初期，由法国人马特隆（G.Matheron）领导的巴黎矿业学校地质统计中心提出了区域化变量的理论，并创建了地质统计学（侯景儒等，1998）。进入 20 世纪 90 年代，地质统计学的理论与方法体系在不断的科学探索和实践中的得以丰富和完善，尤其是地质统计学随机模拟技术在石油勘探、开发领域的应用，为这一技术带来了无限的生机。1996 年以来，随着计算机存储的扩大及运算速度的大幅提高，各种随机模拟算法的应用日益广泛，随机建模技术进一步发展，并取得了突破（吴胜和等，1999；胡向阳，2001）。

目前，国外学者主要从储层的物理特性和空间变化规律两方面进行研究。一方面是通过现代沉积考察、露头观测、储层描述和井间地质研究，来建立一维或二维储层地质知识库和原始地质模型，结合成岩作用的演变规律，利用分形和地质统计学方法建立多种经验公式来描述储层的物性特征及其变化规律。另一方面，结合沉积体的成因单元和界面分级揭示其模型的空间特性（尹太举等，2003；钟建华等，2002，2006），利用高分辨率地震技术对储层进行横向追踪，以达到预测砂体空间展布的目的。

国内的储层地质模型研究工作始于 20 世纪 80 年代中期裘怿楠等对我国河流砂体储层非均质性模式的研究（裘怿楠，1992）。地质建模技术和方法虽然起步较晚，但已在关键的技术上取得了很大突破。至今，我国地质工作者积累了大量的建立陆相盆地地质模型的知识库信息。下面简要介绍三维地质建模的分类、方法和策略。

1. 三维地质模型的分类

目前，国内外学者从不同的观点出发，提出了许多储层模型的分类方案，存在着许多不同类型的储层地质模型。Haldorsen 等（1990）根据研究对象的随

机特征, 将随机模型分为离散模型、连续模型和混合模型, Deautch等(1996)根据模拟单元的特征, 将随机模型分为基于目标的随机模型和基于象元的随机模型。此外, Journel等人(1994)讨论了不同的模拟算法, 如序贯模拟、误差模拟、概率场模拟、矩阵分解、模拟退火等, 并从实用角度入手, 综合考虑模型和算法, 将随机模型进行了综合分类。综合上述划分方案, 将地质模型从以下几方面进行分类。

(1) 以储层属性和模型所表征的内容分类

这是国外比较通用的分类方案。这种分类方案将储层地质模型分为两大类, 即储层离散属性模型和储层参数模型(吴胜和等, 1999; 吕晓光等, 2000), 其中前者主要包括储层相带模型、储层砂体骨架模型、流动单元模型、裂缝分布模型, 后者主要包括储层孔隙度、渗透率及含油饱和度分布模型。

(2) 储层参数模型

储层参数模型是储层参数如孔隙度、渗透率、含油饱和度等连续性变量在三维空间上的变化和分布模型, 属于连续性模型(Continuous Model)的范畴。孔隙度模型反映储存流体的孔隙体积分布; 渗透率模型反映流体在三维空间的渗流性能; 含油饱和度模型则反映三维空间上油气的分布。这三种模型对于油藏评价及油气田开发均有很重要的意义。

(3) 层次化储层地质模型分类

以 Vande Graaf 的为代表的不同尺度规模(尤少燕等, 2005)的储层地质模型, 具有不同的精度要求和解决问题的能力, 规模越小, 其精度越高(李阳, 2004)。

根据油藏描述的不同需要, 将储层地质模型分为单砂体模型、单井模型、二维模型和三维模型(贾爱林, 1995)。

(4) 以不同的油田勘探开发阶段分类

中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院的裘怿楠先生根据油田勘探开发不同阶段对地质工作的不同要求, 将储层地质模型划分为概念模型、静态模型和预测模型三大类(裘怿楠, 1989, 1991, 1992)。

2. 三维地质建模的方法

储层建模有两种基本途径, 即确定性建模(Deterministic Modeling)和随机建模(Stochastic Modeling)(胡向阳等, 2001)。

确定性建模是对井间未知区给出确定性的预测结果,即试图从具有确定资料的控制点(如井点)出发,推测出点间(如井间)确定的、惟一的、真实的储层参数。确定性建模方法主要有储层地震学方法、储层沉积学方法及地质统计学克里金方法。

随机建模是指以已知的信息为基础,以随机函数为理论,应用随机模拟方法产生可选的、等概率的储层模型的方法,主要有标点过程、序贯高斯模拟、截断高斯模拟、序贯指示模拟、分形模拟等。这种方法承认控制点以外的储层参数具有一定的不确定性。针对同一地区,应用同一资料、同一随机模拟方法可得到多个模拟实现。通过各模型比较,可了解由于资料限制而导致的井间储层预测的不确定性,以满足油田开发决策在一定风险范围内的正确性。

3. 随机模拟方法简介

储层本身是确定的,但是在资料不完善以及储层结构空间配置和储层参数空间变化复杂的情况下,人们难以掌握任一尺度下储层确定的且真实的特征或性质,也就是说,在确定性模型中存在着不确定性,亦即随机性。因此,应用随机建模方法进行储层建模,会更符合油藏实际。

(1) 随机模拟原理

随机模拟以随机函数理论为基础(李少华等,1999;王家华等,1999;穆龙新等,2000)。随机函数由一个区域化变量的分布函数和协方差函数(或变差函数)来表征。

随机模拟的基本思想是从一个随机函数 $Z(u)$ 中抽取多个可能的实现,即人工合成反映 $Z(u)$ 空间分布的可供选择的、等概率的高分辨率实现,记为 $\{Z(l)(u), u \in A\}, l=1, \dots, L$,代表变量 $Z(u)$ 在非均质场 A 中空间分布的 L 个可能的实现。

随机模拟可分为条件模拟与非条件模拟,若用观测点的数据对模拟过程进行条件限制,使得观测点的模拟值忠实于实测值(井数据、地震数据、试井数据等),就称为条件模拟;否则为非条件模拟。

(2) 随机模拟方法

随机模拟方法的基本算法可分为序贯模拟、误差模拟、概率场模拟和优化算法(模拟退火及迭代算法)四种,其中序贯模拟和误差模拟是最常用的。

随机模拟方法从建模思路还可分为, a. 基于目标(Object-based)的方法:

标点过程, b.基于象元 (Pixel-based) 的方法: 序贯高斯模拟、截断高斯模拟、序贯指示模拟、分形模拟。

① 标点过程 (布尔模型)

标点过程的基本思路是根据点过程的概率定律, 按照空间中几何物体的分布规律, 生成这些物体的中心点的空间分布, 然后将物体性质 (即marks, 如物体几何形状、大小、方向等) 标注于各点之上。

标点过程的模拟过程是将物体“投放”于三维空间, 亦即将目标体投放于背景相中 (图1-1)。因此, 这种方法适合于具有背景相的目标模拟。如冲积体系的河道和决口扇 (其背景相为泛滥平原), 三角洲分流河道和河口坝 (其背景相为河道间和湖相泥岩)、浊积扇中的浊积水道 (其背景相为深水泥岩)、滨浅海障壁砂坝、潮汐水道等 (其背景相为泻湖或浅海泥岩)。

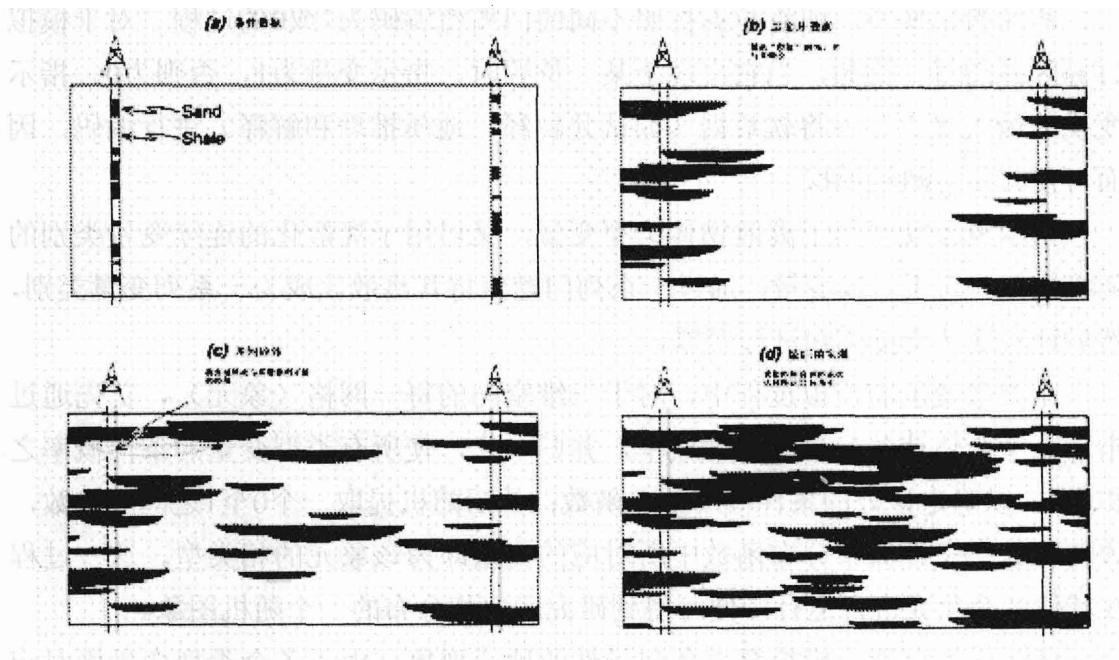


图1-1 标点模拟过程示意图

另外, 砂体中的非渗透泥岩夹层、非渗透胶结带、断层、裂缝均可利用此方法来模拟。

② 序贯高斯模拟

高斯随机域是最经典的随机函数模型, 该模型的最大特征是随机变量符合高斯分布 (正态分布)。

对于符合高斯分布的随机变量（或通过正态变换为高斯分布的随机变量），可以很容易地通过变差函数求取变量的累积条件概率分布函数（ccdf）。从条件概率分布函数中随机地提取分位数便可得到模拟实现。

高斯模拟可以采用多种算法，如序贯模拟、误差模拟（如转带法）、概率场模拟等。在实际应用中，人们多应用序贯模拟算法，即序贯高斯模拟。在该方法中，模拟过程是从一个象元到另一个象元序贯进行的，而且用于计算某象元条件概率分布函数的条件数据除原始数据外，还考虑业已模拟过的所有数据。

高斯模拟是应用很广泛的连续性变量随机模拟方法，它适用于各向异性不强的条件下连续变量的随机模拟。

③ 序贯指示模拟

指示模拟的重要基础为指示变换和指示克里金。

所谓指示变换，即将数据按照不同的门槛值编码为1或0的过程。对于模拟目标区内的每一类相，当它出现于某一位置时，指示变量为1，否则为0。指示变换的最大优点是可将软数据（如试井解释、地质推理和解释）进行编码，因而可使其参与随机模拟。

指示模拟既可用于离散物体类型变量，又可用于离散化的连续变量类别的随机模拟。对于连续变量，通过一系列门槛值将其离散化成为一系列变量类别，然后针对这些变量类别进行模拟。

在类型变量的模拟过程中，对于三维空间的每一网格（象元），首先通过指示克里金估计各变量的条件概率，并归一化，使所有类型变量的条件概率之和为1，以确定该处的条件概率分布函数；然后随机提取一个0至1之间随机数，该随机数在条件概率分布函数中所对应的变量即为该象元的相类型。这一过程在其他各个象元进行运行，便可得到研究区内相分布的一个随机图象。

指示模拟可用于模拟复杂各向异性的地质现象。由于各个类型变量均对应于一个指示变差函数，也就是说，对于具有不同连续性分布的类型变量（相），可给定（指定或通过数据推断）不同的指示变差函数，从而可建立各向异性的模拟图象。因此，指示模拟可用于多向分布的沉积相建模（如三角洲分流河道与河口坝复合体），也可用于断层和裂缝的随机建模。

（4）随机模拟方法的选择

随机模拟方法很多，但没有一种万能的方法能解决所有沉积类型的建模问

题。不同的随机模型有其地质适用性及应用范畴。如对于相模拟来说,如果预知相的几何构型(几何形态和组合方式),则标点过程为首选方法;对于具有排序分布的相组合来说,截断高斯模拟方法最为适合;如果既不知几何构型,相组合又无排序现象,则应选用序贯指示模拟。对于参数模拟来说,基于高斯分布的方法很难控制极值分布的连续性,而指示模拟方法很适合解决这类问题。因此,应该根据研究区的地质特征(地质概念模式)对随机模拟方法进行选择。

4. 储层地质建模的策略

在储层地质建模过程中,为了建立尽量符合地质实际情况的储层模型,应注意采取以下建模策略:

(1) 随机建模与确定性建模相结合

随机建模与确定性建模相比具有一定的优越性,但值得注意的是,随机建模并不是确定性建模的替代,其主旨是对非均质储层进行不确定性分析。在实际建模过程中,为了尽量降低模型中的不确定性,应尽量应用确定性信息来限定随机建模过程,即随机建模与确定性建模相结合建立储层地质模型。一般先采用确定性建模方法建立储层砂体格架模型,然后在储层砂体格架模型的基础上利用随机建模方法建立储层参数模型,在随机模拟的过程中如条件允许还应考虑利用地震资料等软数据加以约束,最后利用掌握的确定性信息对所建立的储层模型进行检验和优选。

(2) 多信息协同建模(廖新维等, 2004)

为了降低储层模型中的不确定性,应尽量应用多种资料(如地质、测井、地震、试井等)进行协同建模。特别是在已知井相对较少的情况下,地震资料的应用有利于降低横向上的不确定性。

(3) 等时建模

为了提高建模精度,在建模过程中应进行等时地质约束,即应用高分辨层序地层学原理确定等时界面,并利用等时界面将沉积体系分为若干等时层。在建模时,按层建模,然后再将其组合为统一的三维地质模型。

(4) 相控建模

直接根据各井储层参数进行井间插值建立储层三维模型,这种方法比较简单,它只适合于具有单一微相分布的储层,对于多相分布或复杂储层结构的储层来说,应采用“相控建模”的方法。即首先建立沉积相、砂体类型格架或流

动单元等模型，然后根据不同沉积相（砂体类型或流动单元）的储层参数分布规律，分相（砂体类型或流动单元）进行井间插值或随机模拟，建立储层参数模型。

目前，国内三维建模应用软件大多为国外较成熟的软件。从20世纪90年代中期引进的三维可视化地质建模软件Earth vision开始，我国的三维地质建模技术就迅速发展起来。随着油田研究的不断深入，三维可视化建模已不能满足油田开发的要求（吴永彬等，2007），RMS、GOCAD、Petrel等国际普遍应用的建模软件也相继引进，我国储层三维地质建模也进入了相控随机建模阶段。如何达到将国外先进的建模软件与我国特殊的地质体相结合，建立准确的、符合油藏客观实际情况的精细地质模型是目前我们亟待解决的问题。

三、研究区概况

埕岛油田地理位置上位于山东省东营市河口区渤海湾南部极浅海水域，水深2~18m，构造位置位于济阳坳陷与渤中坳陷交汇处的埕北低凸起的东南端（王秉海，1993）（图1-2）。

埕岛油田馆上段研究工区面积近100平方公里，探明石油地质储量约2亿吨。2006年底，区内共有实钻井339口，其中直井50口，斜井272口，水平井17口（图1-3）。

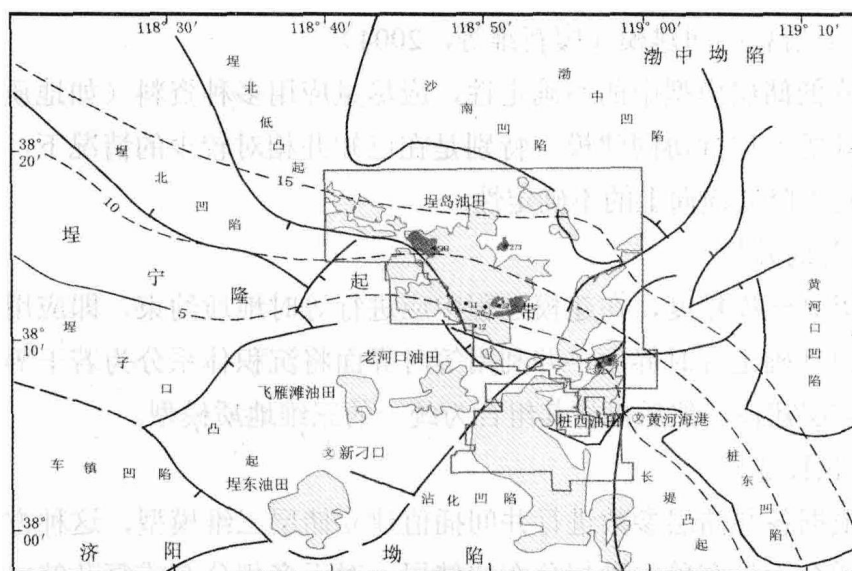


图1-2 埕岛油田构造地理位置图

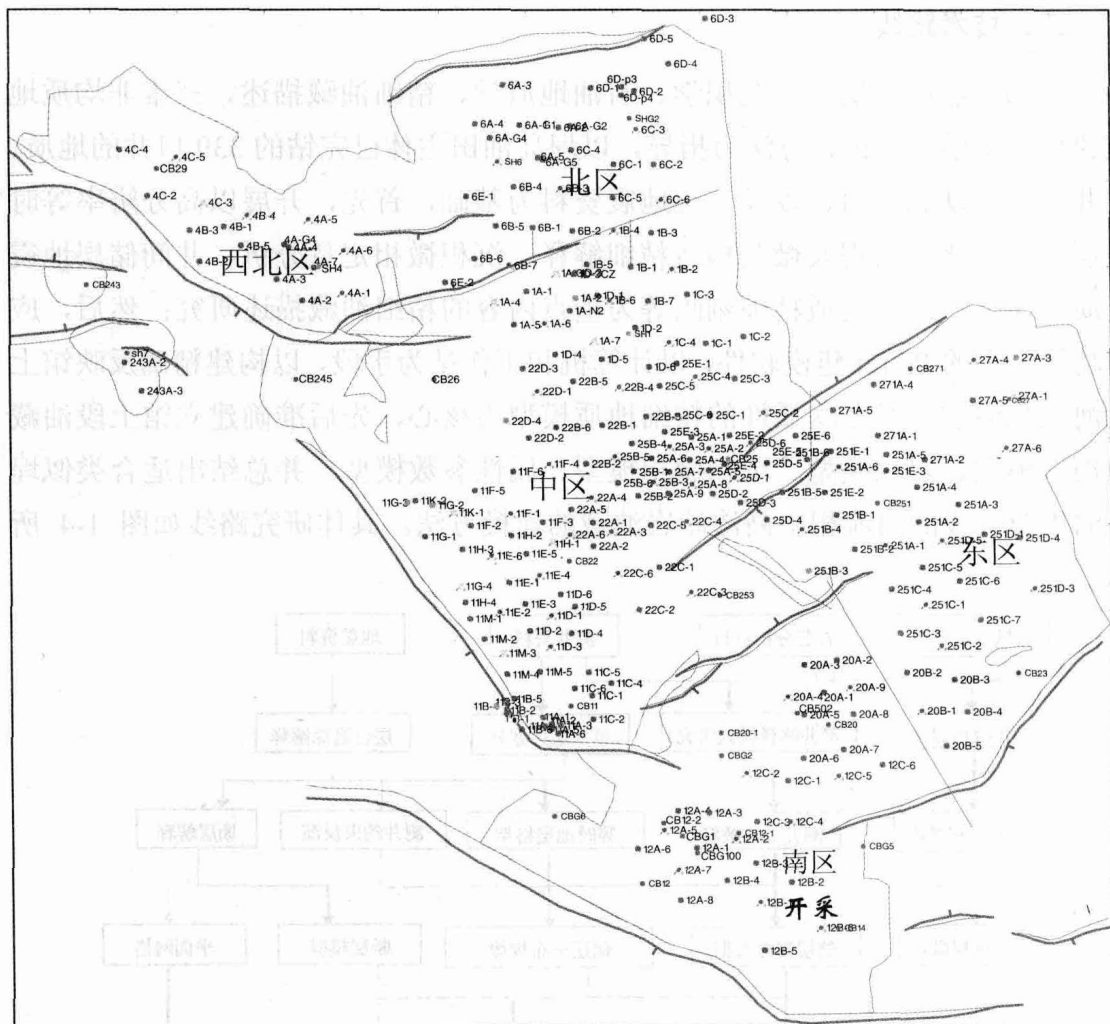


图 1-3 埕岛油田馆上段井位图

埕岛油田馆上段为一套河流相沉积的砂泥岩地层，由上到下泥质减少，砂质增多。上部以厚层的泥岩夹粉、细砂岩为主；中部为砂泥岩互层；下部岩性粗，以厚层块状砂岩、含砾砂岩为主，夹薄层泥岩和粉砂岩。

埕岛油田馆上段整体构造形态是一个受断层控制的北西走向的长轴背斜，构造简单，顶部平缓、翼部较陡，地层倾角 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ （胜利油田石油地质志编写组，1993）。

埕岛油田馆上段油藏自 1995 年第一个区块投入开发，2006 年底第 8 个区块投入开发。

四、技术路线

本书以层序地层学、沉积学、石油地质学、精细油藏描述、三维非均质地质建模等多学科理论、方法为指导,以埕岛油田主体已完钻的 339 口井的地质、测井、生产动态资料,以及三维地震资料为基础,首先,开展以高分辨率等时地层精细对比、宏观及微观构造精细解释、沉积微相定量分析、井间储层地震反演、储层三维非均质精细刻画等重点内容的精细油藏描述研究;然后,应用功能强大的 Petrel 建模软件,以计算机和工作站为手段,以构建精确反映馆上段河流相储层三维非均质性的精细地质模型为核心,先后准确建立馆上段油藏的构造模型、岩相模型、沉积微相模型、属性参数模型,并总结出适合类似埕岛油田馆上段的河流相中高渗砂岩油藏的建模方法。具体研究路线如图 1-4 所示。

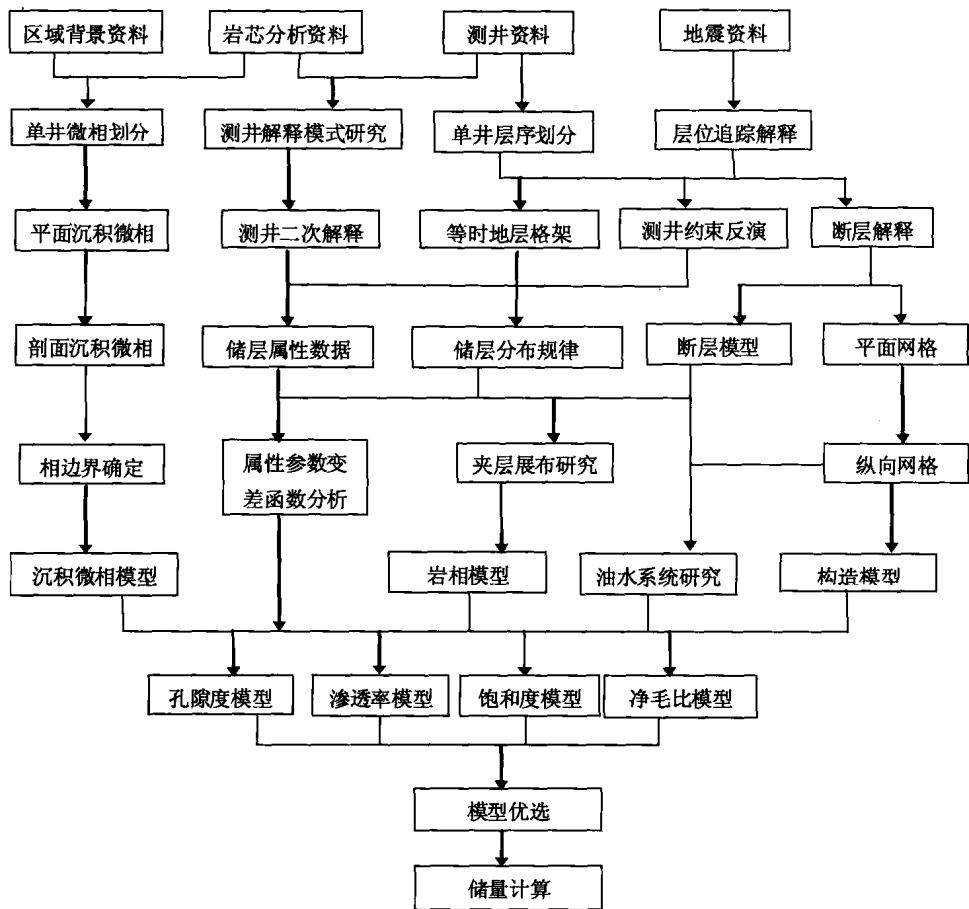


图 1-4 埕岛油田馆上段油藏地质建模流程图