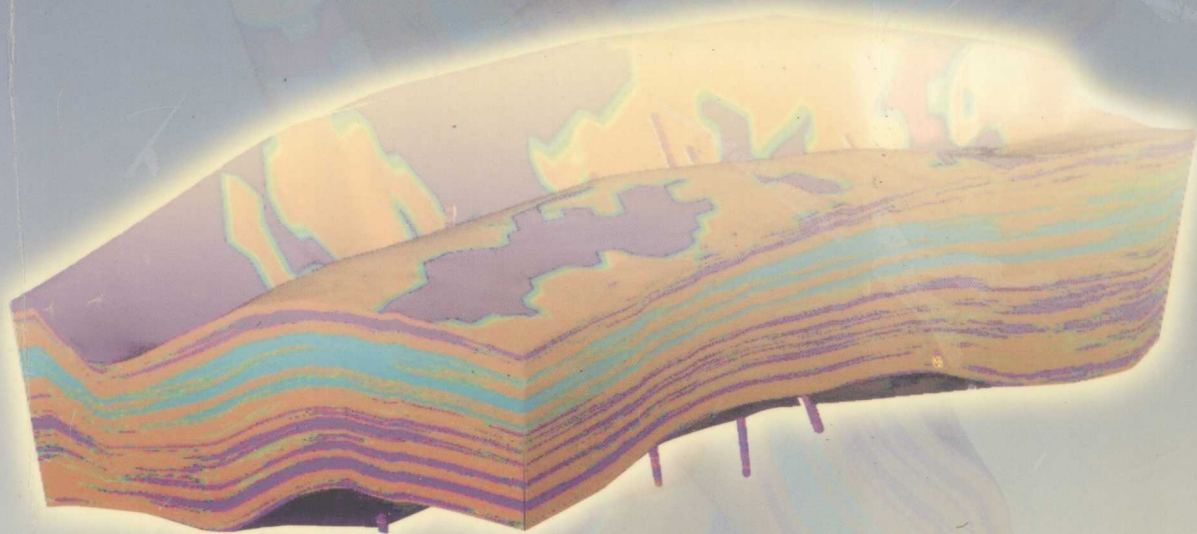


碎屑岩油气储层随机建模

陈恭洋 著



地质出版社

内 容 提 要

储层建模是20世纪90年代以来国内外在油气勘探和开发储层研究与评价中的一个热门课题。本书在综合了近年来国内外最新研究成果的基础上,将物理模拟与数学模拟相结合,尽可能地将各种先进的油藏描述技术和方法与地质统计学相结合,从储层描述的两个层次(储层骨架、储层参数)阐述了储层随机建模的思想和方法体系,并结合具体的实例对碎屑岩储层随机建模方法的可行性进行了论证。主要研究内容包括:①储层建模的基本原理;②储层原型模型的建立;③地震资料确定性建模;④储层地质知识库;⑤储层骨架模型的建立;⑥储层参数预测的条件模拟;⑦两阶段综合建模。

本书可供从事石油地质勘探开发的工程技术人员、科研人员参考,也可作为石油地质专业本科生、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

碎屑岩油气储层随机建模/陈恭洋著.-北京:地质出版社,2000.6
ISBN 7-116-03120-0

I. 碎… II. 陈… III. ①碎屑岩-储油层-研究②碎屑岩-储气层-研究 IV. P588.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第63468号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑:吴智勇 张新元

责任校对:王素荣

*

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092^{1/16} 印张:15.75 彩插:5页 字数:400千字

2000年6月北京第一版·2000年6月北京第一次印刷

印数:1~2000册 定价:48.00元

ISBN 7-116-03120-0

P·2130

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序

《碎屑岩油气储层随机建模》一书是作者在其博士论文的基础上进一步深化完成的。这本书有许多独特之处，将会引起石油地质学者及油气开发工作者的密切关注。

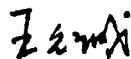
储层建模是当前油气储层研究的世纪新潮流，它是将储层地质形态、结构、参数等进行定量化的一种技术手段，是数学和储层地质紧密结合、通过计算机运作获得油气储层三维地质定量信息的产物。它的产生不是偶然的，而是在非线性数学、计算机软件发展的基础上逐渐完善的。储层建模用一种形象的语言来表达，就是将井或地层的地质信息用非线性数学方法建立数学模式，通过建立软件和计算机运作，获得油气储层的三维信息和图件，这就意味着，几千米以下的地层内幕结构及其定量参数将清晰地显现在石油工作者的眼前。在本书中所采用的数学模型多达 20 余种，其中有许多是非线性数学模型，充分反映了作者在本书中所提出的技术方法能适应 21 世纪油气勘探与开发的需要。

储层原型地质模型的建立是储层建模的重要基础，特别是沉积模型又是油气储层勘探和开发的关键。书中采用了大型水槽模拟实验来确定储层砂体的宽、厚及其平面展布，并由此确定储层原型地质模型，这种需要资金和时间的地质实验项目，在国内外同类型的研究中都是少见的。同时，针对油田覆盖区的特点，结合大量的实例研究，详尽地介绍了地震资料反演的确定性建模、密井网条件下各类砂体储层概念模型的建立等综合确定储层原型模型参数的方法，是油田开展储层随机建模的经济有效、快速的方法。

在随机建模的方法上，针对不同地区的数据构形和不同的建模要求，本书采用了基于地质统计学的岩相模拟方法、储层参数的分形和地质统计学模拟、两阶段的钻井-地震联合三维建模等方法，通过丰富的实例研究，说明了这些方法的应用效果和局限性，基本上概括了当前在石油勘探及开发过程中，地质研究所需的各种建模的技术方法。

本书作者思维方法新颖，基础工作扎实，技术方法先进。它表明，我国年轻一代石油地质学家具有宽广的知识面，他们既懂地质，又懂数学，还掌握计算机技术，具备较高的综合科研能力；同时，这本书也充分说明了地质问题通过地震、测井以及各种建模技术，是可以进行三维定量表述的。

我热烈祝贺陈恭洋博士这本书的出版，并盼望他事业有成，不断有新的著作问世。



二〇〇〇年六月十日

前 言

一、当今油气勘探开发所面临的问题与挑战

在当今的石油勘探、开发领域，石油工业面临着许多挑战。勘探上，随着老区勘探程度逐步提高，大的、简单的背斜、断块等构造型油气藏大发现的时代已经过去，进入了发展更复杂的构造油藏、地层-构造油藏及各种地层、岩性油藏的新时代。这类油藏一般与古地理、沉积间断、不整合等因素有关，常常需要充分利用老探井、开发井的地质、测井、岩心分析资料和现代地震信息，在精细地层对比的基础上，进行全沉积盆地、小层段、大比例尺的高分辨率储层段岩性-岩相古地理工业制图，多层大比例尺、高分辨率构造制图以及局部目标的精细解释才能发现。近年发展的不同层次的油藏描述即是这方面应用的一项成功技术。另一方面，即使是简单的背斜、断块等构造型油气藏，在开发早期看来是简单的构造问题，到了后期则显示出极其复杂的构造或岩性问题。随着钻井的增多，动态资料不断丰富，地震测网加密或三维地震资料的覆盖，这些复杂性越来越明显，表现为构造细节依然不清，岩性变化更为复杂，油藏非均质性强烈。

开发上，大批主力油田已进入了中高含水期。对这批油田钻加密井、调整井，提高注水量、排液量来保持稳产，控制递减，在许多情况下是可行的和有效的。但如何使加密井、调整井的开发效益更好？每个开发层系内水驱油效率更高？如何开发好二次采油后期的油田？如何迎接三次采油阶段大规模的到来？老油田的地质工作仍然是基础，尤其是储层地质的研究工作更为重要。但其工作的内容已发生了很大的变化，从早期的发现储油圈闭到强化采油，已出现了四个明显层次的储层地质工作内容（袭铎楠，1993），相应地以建立储层的概念模型、精细的静态模型、功能强大的预测模型和科学的动态模型为核心内容，这其中的变化主要来自我们对油储的不断认识和新技术、新方法的不断涌现，尤其是高性能、高速度、高容量计算机的出现，使科学的油藏管理已成为可能。

二、储层描述方法评述及本书选题的确立

在储层描述的方法上，人们已经习惯了由一批信息，经过一系列的模型转换来得到一个确定地质模型的作法，而往往忽视这种转换中的多解性问题。因此，长期以来，对于地质上的不确定问题，人们都容易达成一个共识，就是寻求对研究结果和解释结论自圆其说的心理平衡，因而体现在描述模型和描述方法上的简单化。如以往对油区砂体和储油砂体的分布及其物性特征变化的制图多是在井点控制下，通过线性内插（如三角网法、距离反比、距离加权等方法）勾绘出来的，所建立的储层地质模型只强调与已钻井点的高度拟合，其预测功能极差，表现为随着钻井数目的增加，井网加密前后，仅砂体的形态就变化很大，油砂体分布图需不断进行修改。

在储层参数场的建立上，无论是测井解释还是地震处理，经常采用线性模型或确定的非线性模型对参数进行转换，对其转换误差缺乏足够的评价和有效的把握。

总之，随着勘探开发工作的深入和新技术方法的不断涌现，找油者的期望值也在不断

提高。如何利用少量的井点信息和廉价而丰富的地震信息来获取尽可能真实的油藏地质模型, 开发具有较强预测功能的各种有效方法与技术, 已为众多的勘探家们所探求。人们早已认识到井点各项地质和测井资料具有很高的垂向分辨率, 但横向的变化不能大范围外推; 地震信息具有较高的横向连续性, 但其纵向分辨能力又极差, 二者都在预测精度上受到了方法本身的局限。近年发展了许多约束反演技术, 已使油田发现期间的预测卓有成效, 但对开发阶段要求高精度的油层非均质特征的描述仍显得无能为力。因此, 各种模拟手段大显身手, 在充分揭示地质复杂性、不确定性和非均质性方面取得了大量的研究成果, 在现代油藏管理中发挥了巨大的作用。但模拟方法类型繁多, 适用范围各异, 如何开发对实际地质条件具有针对性的储层建模方法体系和软件系统, 提高模型的预测精度就成为了人们最关心的问题, 也是本书的基本出发点。

概括地讲, 模拟方法分为物理模拟和数学模拟两大类。物理模拟主要侧重于沉积机理研究, 揭示沉积体形成过程中各种变量间的定量关系, 开拓人们认识客观沉积体系的视野。它已成为建立储层原型模型的重要手段之一。

数学模拟又分为动力学模拟和统计模拟。动力学模拟也有人称之为仿真技术, 是在确定的边界条件下, 根据沉积学与水动力学的基本原理, 采用数学方法, 通过计算机实现来模拟沉积过程, 展现沉积体的形成过程与分布特征。该类方法与物理模拟有一个共同之处, 就是确定沉积事件与储层地质模型之间的因果关系, 是一种从理性到感性的认识过程。这样的逻辑思维在理论上是可行的, 但在实际地质建模中, 由于针对具体地质情况, 难以准确地获取有关沉积事件的各项边界条件, 也无法考虑到沉积过程中的各种随机地质因素, 这就使得这两种模拟方法在工程应用上缺乏针对性。

统计模拟主要立足于统计的手段。与前两种方法的不同点在于反向思维, 是根据沉积体的样本信息, 通过统计分析来推断总体的过程, 并且考虑到各种随机因素和不确定性, 采用蒙特-卡罗模拟的思路来建立储层的地质模型。这样的考虑显然具有较强的针对性, 其结果更为客观, 能更好地满足工程上的需求。同时依据采用的算法和数学模型的不同, 已发展了各种模拟技术。本书的研究对物理模拟和统计模拟都进行了尝试。

我国是一个以陆相含油气盆地占主导地位的产油大国。在陆相含油气盆地中, 作为油气储层, 又以陆源碎屑岩中的砂质岩类为主。它控制了绝对优势的石油储量, 理所当然地占有特殊的重要地位 (图 1)。因此, 本书的研究以碎屑岩储层为对象。

三、本书的主要研究内容及成果

本书在综合了近年来国内外最新研究成果后, 将物理模拟与数学模拟相结合, 尽可能地将各种先进的油藏描述技术和方法与地质统计学相结合。从储层描述的两个层次 (储层骨架、储层参数) 来阐述储层随机建模的思想和方法体系, 并结合具体的实例对碎屑岩储层随机建模方法的可行性进行了论证。主要研究内容包括以下 4 个方面:

- (1) 储层原型模型的建立——储层随机模拟的基础;
- (2) 储层骨架预测模型 (相模型) 的建立——储层随机模拟的第一层次;
- (3) 储层参数预测的条件模拟——储层随机模拟的第二层次;
- (4) 两阶段综合建模——将第一、二层次的建模有机地结合。

储层建模 (储层表征) 是 20 世纪 90 年代以来国内外在油气勘探开发储层研究与评价中的一个热门课题, 其中建立具有较强预测功能的储层地质模型和方法体系, 一直是地质

和地球物理工作者所追求的。因而，开展储层建模的理论、方法和应用研究意义重大。为此，本书在这一领域进行了一系列的研究与探索。

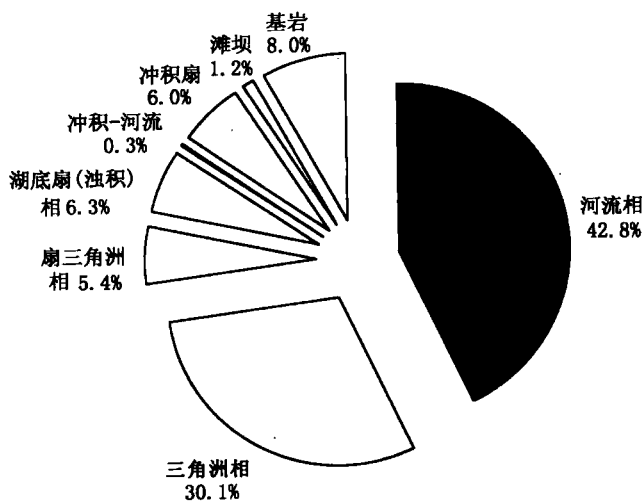


图1 我国已投入开发油田各类储层占储量百分比图
(据袁泽楠等, 1997)

(1) 第一章绪论，从储层建模的实际需求出发，建立了一个从勘探到开发全过程的储层随机建模工作流程和方法体系，比较适用于对碎屑岩油气储层的建模。

第二章简要介绍了书中所涉及到的有关地质统计学、分形理论和随机模拟的基本原理与算法。

(2) 储层原型模型的建立是随机建模的重要基础。作者与其合作者投入了大量的研究工作，本书也以大量的篇幅进行了阐述。

第三章应用湖盆水槽模拟实验手段，将实验模拟结果与实际资料进行了统计和对比分析，取得了随机建模有重要意义的参数。该方法可以作为储层原型模型建立的一条新的途径，本项研究在国内外的报道中并不多见。

第四章通过具体的实例研究，阐述了在现代沉积学知识的指导下，可以通过密井网条件下河流相储层微相级的精细描述，建立起对油田生产具有直接指导意义的和对储层随机建模所必需的储层原型地质模型，具有重要的理论意义和实际意义。

第五章讨论了高分辨率层序地层学的基本原理和应用。该项技术是在90年代发展起来的一项地层分析的新技术，尤其是在陆相地层学分析中具有强大的优势。从全盆地到油藏规模的储层对比和流体流动与储层特性之间的内在联系等方面的研究与应用是以前任何层序地层学研究所难以实现的。基准面旋回的级次性与储层非均质性的结构层次性具有很好的对应关系。因此，高分辨率层序地层学研究在储层建模中的应用就成为了储层原型模型研究的一种重要手段。同时，也是一种替代传统陆相地层组合对比（分级控制、旋回对比）的小层对比新方法，从沉积成因的角度，将组合对比方法从感性阶段上升到了理性的阶段，为开发中后期油田的精细储层地质研究提供了一种新的手段。

第六章针对油田覆盖区的特点，通过常规地震资料的高分辨率处理和高分辨率开发地震资料的反演，对扇三角洲砂体、深水浊积砂体、三角洲水上、水下分流河道砂体等成因

类型的储层进行确定性地质建模，并将地震、测井、地质对比三者密切结合，进行对比分析，充分体现了多学科相互渗透，有效综合的优势。这也是油田覆盖区建立储层原型地质模型的有效方法，这在同类研究中也是少有的。

(3) 储层地质知识库是储层随机建模的重要组成部分，也是一个研究区储层地质、地球物理、开发动态等研究的高度综合。知识库的建立本身就是精细油藏地质研究的成果，对油田的开发具有直接的指导意义，同时也是储层随机建模的参数输入。因此，确定储层地质知识库内容的规范和储层地质知识库建立的方法是十分重要的。本书在第七章中进行了较为详细的阐述，可以作为储层随机建模研究的重要参考。

(4) 第八章通过实例的研究，比较系统地介绍了不同资料情况下储层随机建模的实践方法。首先，目标建模是一类比较特殊而重要的建模方法，在承袭了现有三种代表性的岩相模拟方法后，提出了一种基于蒙特-卡罗思想的针对河流相储层的随机目标建模方法。该方法与其他方法的区别在于它具有参数系统简单易得、运算快速准确的优点，十分适合于地质先验知识比较缺乏的井下砂体骨架模型的建立。

其次，通过对储层参数的地质统计分析，提取了相应实验变差函数，并进行理论拟合，以此确定储层参数非均质性特征；运用中点位移法，生成二维分形随机场及二维分形随机数据的克里格残差场；通过储层参数平面分布的克里格场与二维分形随机数据的克里格残差场叠加与处理，得到储层参数平面分布的条件模拟的一次实现，优选出一种满足地质约束条件的实现作为条件模拟的结果，以此作为储层参数定量描述的一种有效的方法，适合于进行二维剖面和平面上的储层参数建模。实例的研究表明，该方法具有很高的预测精度，对各类成因的碎屑岩储层建模具有普遍意义。

在该方法的研究与应用中，根据研究区的实际地质条件，对条件模拟的一些主要参数：如不等厚地层的条件模拟、不规则数据的变差函数计算、断失地层的随机模拟等，提出了相应的特殊处理方法，使储层模型的精度和水平大为提高。

第三，两阶段建模思路和钻井资料与地震信息的联合建模方法，是目前国内外普遍推荐和大量采用的储层随机建模作法。其优点在于信息利用量大、建模思路科学、预测功能强、模型定量化程度高（三维定量）、易于可视化等。可以实施勘探开发全过程的储层建模，模拟的结果经过网格粗化后，可以直接输入到油藏数值模拟器。这是作者开发的一种比较完美的储层建模方法。

(5) 在上述方法研究的基础上，编制了储层随机建模软件包；该软件包由资料预处理、空间结构分析、克里格估计、岩相模拟、分形地质统计条件模拟，分形孔隙分析、两阶段联合建模等模块组成，并经过了大量实际资料的运算，对储层预测的精度完全符合生产要求。

综上所述，本书的研究涉及到了大量的数学、地质、地球物理、计算机技术、地质统计学等多个学科领域，具有相当的广度，并在储层建模系统流程中以物理模拟与数学模拟相结合，地震反演确定性建模与地质对比研究相结合，传统油藏地质研究与先进的高分辨率层序地层学分析相结合等方面颇具特色。全书对储层建模的思想、方法原理、工作流程等进行了比较系统的介绍，是方法论与实践论研究的有机结合。不仅如此，在大量的生产研究中，已成功地解决了油田生产中的一些实际问题，为油田生产提供了相应的技术理论和方法，取得了相当大的经济效益和良好的社会效益。

参加本书各部分研究工作的有：湖盆水槽模拟实验赖志云、张春生、刘忠保；地震资料反演李龙艳、陈传仁、罗忠辉；分形与地质统计学条件模拟钟宝荣、刘逸、李龙艳；高分辨率层序地层学陈波、何贞铭；两阶段联合建模李功权；图件清绘张存善、王雪梅。

四、致谢

我的恩师王允诚教授对我在攻读博士学位时的科研进行了悉心指导，并欣然为本书作序；课题组同志们在科研工作中密切协作；原中国石油天然气总公司勘探局、辽河石油勘探局、大庆石油管理局采油六厂、华北石油管理局采油三厂、大港油田集团研究院、江汉石油管理局和中国海洋南海西部石油公司研究院等单位提供了研究实例和研究经费；江汉石油学院各级领导也给予了大力支持和很多鼓励。在此一并表示衷心的感谢！

最后，特别感谢我的夫人王雪梅和女儿陈琪对我学习、工作和生活上的关心、理解和支持。

陈恭洋

2000年6月于江汉石油学院

目 录

序

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 问题的提出	(1)
一、储层建模的含义	(1)
二、储层问题的极端复杂性	(1)
三、储层随机建模的针对性	(2)
四、储层建模在油藏研究中的地位	(3)
第二节 碎屑岩储层非均质性的层次结构	(3)
一、储层骨架层次——沉积环境决定了砂岩体分布的几何特征	(3)
二、储层骨架控制下建筑结构要素——水动力条件差异为主的产物	(4)
三、孔隙结构层次	(5)
第三节 储层建模的研究现状及研究思路	(6)
一、储层地质模型的种类及研究内容	(6)
二、储层随机建模的方法体系	(9)
三、储层随机建模的研究思路	(11)
第二章 储层随机建模的原理与方法	(16)
第一节 地质统计学的基本原理	(16)
一、变差函数	(16)
二、变差函数的理论模型	(17)
三、克里格插值方法	(18)
第二节 分形理论概述	(22)
一、分形与分形维数	(22)
二、分形维数的测算方法	(23)
三、随机分形	(24)
四、随机分形场的生成方法及实施步骤	(27)
第三节 随机模拟的基本算法	(28)
一、储层随机建模的基本思想	(28)
二、基于目标的随机模拟	(30)
三、二阶段随机建模	(35)
四、条件模拟	(39)
第三章 储层原型模型建立的物理模拟——湖盆水槽沉积模拟	(41)
第一节 实验条件	(42)
一、实验装置	(42)
二、水动力参数	(43)

第二节	实验过程	(44)
一、	废弃河道的产生	(44)
二、	决口扇的形成	(44)
三、	边滩沉积和水下朵体产生	(44)
四、	水下分流河道沉积	(44)
第三节	河流和三角洲沉积体系分析	(45)
一、	河道平面形态特征	(45)
二、	三角洲朵体平面展布特征	(46)
三、	沙体剖面形态特征	(47)
四、	沙体平面展布特征	(50)
第四节	沙体原型模型参数	(51)
一、	粒度参数	(51)
二、	沙层宽度、厚度及宽厚比在微相中的差异	(52)
第四章	密井网条件下储层原型模型的建立	(55)
第一节	沉积微相研究的基本方法步骤	(55)
一、	沉积相的划分方案	(55)
二、	沉积微相研究的基本步骤	(57)
第二节	大庆喇嘛甸油田三角洲水下分流河道砂体研究	(57)
一、	岩石相类型划分	(59)
二、	岩石相组合及微相特征	(60)
三、	测井相模式的建立	(63)
四、	测井微相识别	(64)
第三节	港东开发区明化镇组下段河流相砂体的研究	(68)
一、	岩石相类型	(69)
二、	岩石相组合类型与沉积微相	(71)
三、	曲流河沉积的垂向模式	(72)
四、	测井相分析	(72)
五、	微相的剖面 and 平面分布特征及沉积演化	(77)
第四节	冀中拗陷高阳油田河流相与湖相砂体的研究	(81)
一、	高 30 井岩心描述	(83)
二、	沉积相组成与特征	(85)
三、	沉积相平面展布特征	(89)
四、	河流沉积形成与演化	(92)
五、	沙一段滨浅湖砂岩储层	(92)
第五章	高分辨率层序地层学与储层精细描述	(95)
第一节	从层序地层学到高分辨率层序地层学	(96)
一、	海相方面	(96)
二、	陆相方面	(97)
三、	高分辨率层序地层学	(98)

第二节 高分辨率层序地层学的基本原理	(99)
一、基本术语	(99)
二、基本原理	(102)
三、基本法则——等时对比法则	(104)
第三节 高分辨率层序地层学在储层研究中的应用	(109)
一、研究的内容和方法	(109)
二、港东开发区二区一断块	(110)
三、高 30 断块	(116)
四、W 油田	(119)
第六章 地震资料反演的确定性建模	(131)
第一节 地震反演的基本原理和步骤	(132)
一、地震-地质层位和储层标定	(132)
二、建立初始波阻抗模型	(132)
三、迭代反演计算	(132)
四、储层参数的确定	(134)
第二节 扇三角洲储层常规地震资料反演建模	(134)
一、鸳鸯沟斜坡扇和深水浊积体系的砂体骨架模型	(134)
二、高升北部地区侧向上倾尖灭的砂体骨架模型	(136)
第三节 常规地震资料高分辨率处理及反演建模	(138)
一、地震高分辨处理方法	(138)
二、月东构造地震高分辨率处理步骤与效果分析	(145)
三、波阻抗宽带约束反演	(147)
四、储层参数的预测	(151)
第四节 高分辨开发地震资料反演建模	(154)
一、储层标定	(154)
二、约束反演	(155)
三、储层地质解释	(156)
第七章 储层地质知识库	(158)
第一节 储层地质知识库的建库方法	(159)
一、储层地质知识库的建库步骤和基本内容	(159)
二、根据沉积微相研究确定与储层骨架有关的地质知识库参数	(159)
三、根据储层评价确定与储层参数有关的地质知识库参数	(167)
四、根据地质统计所确定的知识库参数	(169)
五、地震似然函数(拟函数)	(170)
第二节 W 油田储层地质知识库的建立	(171)
一、根据油藏地质研究所确定的知识库参数	(171)
二、根据地质统计所确定的知识库参数	(177)
三、地震-岩性概率统计参数	(180)
第八章 储层随机建模的研究实例	(187)

第一节 目标建模的应用实例	(187)
一、研究方法	(187)
二、资料统计分析	(188)
三、剖面骨架预测模型的建立	(189)
四、模型的生成与分析	(194)
第二节 连续型储层随机建模实例	(197)
一、平面克里格估计的实例分析	(197)
二、平面条件模拟实例分析	(200)
三、剖面条件模拟	(214)
第三节 两阶段随机建模实例	(224)
一、两阶段随机建模的基本步骤	(224)
二、W 油田开发前期储层定量模型的建立	(226)
三、高 30 断块油田开发中期储层定量模型的建立	(228)
四、港东开发区二区一断块开发后期储层定量模型的建立	(230)
结语	(232)
参考文献	(234)
图版说明及图版	(236)

第一章 绪 论

第一节 问题的提出

一、储层建模的含义

“储层建模”，顾名思义就是建立储层的地质模型，其目的就是通过油气勘探和开发过程中取得的地震、测井、钻井等方面的资料，对储层的各方面特性进行描述，达到储层评价的目的。与目前现场广泛采用的勘探阶段和开发准备阶段油藏描述的重大差别就是要求建立全定量化的储层地质模型，是前者研究的进一步深入。就“描述”本身的含意而言，应具有下述三方面的特点。

1. “描述”的预测性

“描述”的本义在于通过取自地下油气藏储层的零星信息，对储层几何形态、成因、类型、容积、渗流能力等各个主要侧面，进行客观真实的再现。如果说一个“客观”的描述真正达到了其真实性，那么，由该描述所建立的储层地质模型应该具有强大的预测能力。它不仅预测本油气藏中未揭示部分的特征，还可以应用于类似油气藏储层的预测，这一预测功能就可成为我们找油与开采中的强有力的工具。

2. “描述”的层次性

由于油气勘探开发具有明显的阶段性，在不同的阶段新投入的勘探开发工作量及所取得的资料信息差异很大。因此，各阶段储层描述的精细程度具明显的差异，这就反映出了储层描述的层次性。当前，由储层描述所建立的储层地质模型大致有三大类（裘怿楠，1993）：即概念模型，多用于评价和开发设计阶段；静态模型，应用于开发实施及早、中期开发阶段；预测模型，应用于二次采油开发后期和三次采油阶段。

3. “描述”的量化

即所描述的储层特性应尽可能地以定量的参数形式加以表述，易于成像，并且应以三维可视化最终目标。这是目前一般油藏模拟中的基本要求。

二、储层问题的极端复杂性

储层问题既是油气勘探开发中的热点，同时也是研究中的难点，储层空间分布变化的复杂性、局部随机性和变异性是研究者们所共知的。但究其原因，这种复杂性主要来自于以下几个方面。

1. 储层自身的复杂性

主要表现为储层的宏观的和微观的非均质性。非均质性为一种局部变异性，任何地质体的均质是相对的，非均质性才是一切地质体的根本属性，其基本表现就在于任何一个储层参数的空间分布特征或参数间的关系都不能用一个确定的物理或数学模型加以表述。即

储集体与其他地质体一样是一个复杂的非线性的动力学系统 (Journel *et al.*, 1993; To-
doeschuck *et al.*, 1992)。

另一方面, 尽管储层的分布和特性受到一定地质规律的控制, 但地质演化过程中的大量不确定性事件, 形成了储层大量的不确定性特征。因此, 储层作为一种地质体, 具有结构性 (地质规律控制) 和随机性的双重属性。

(1) 结构性

从地学角度看, 储层参数 (如储层的空间几何形态、储层物性、储层渗流特征等) 的空间分布受控于一系列的地质成因规律。因此, 在空间上两个相邻位置 (如井点之间) 上的储层参数具有一定的相关性, 并且这一相关性在空间各个方向上又具有明显的差异性 (各向异性), 体现出明显的结构性特征。

(2) 随机性

尽管任何储集体皆为确定的实体, 但由于受到人们认识能力上的限制, 仅能取得来自储层的微弱信息 (零星的钻孔, 精度极低的地球物理信息, 等等), 且这些信息的取得具有很大的随机性, 表现为在勘探开发的任何时期, 依据取得的地下零星信息所揭示的地下储层参数空间分布特征, 只不过是对于地下储层实体所作的一次随机抽样, 任何一次储层描述都是这一随机抽样的一次实现, 即只能是对地下储层实体的一次尽可能的逼近, 而真正的实体模型是永远无法再现的。

2. 信息的不完全和信息的不精确

就是用来揭示储层完整全貌 (几何形态) 和真实特性 (储集性能) 的实际资料太少, 即使是在即将进入的大规模三次采油阶段 (井距在百米级或更密), 相对于地质体分布面积和体积来讲, 由井孔所揭示的信息也只能占很小的一部分。同时, 还要受到分析手段和获取资料的技术限制, 又很难全面地提取这些井点信息。因此, 由我们所掌握的这些微弱的储层信息是难以准确地描述储层实体特征的。

三、储层随机建模的针对性

由于储层的极端复杂性, 使我们很难根据有限的信息来确定性地把握储层的静态属性和动态作为。这样, 我们以往的和今后要作的针对储层的一切研究工作和由此所得到的储层特性分布关系具有很大的不确定性 (随机性)。所以, 最好的办法是把信息与储层特性之间的关系也视为一种不确定性的关系。如肯定地回答某一空间位置上储层厚度的准确数值时的风险总要比回答厚度的最小、最大、最可能值时的风险要大。又如, 对储层参数间的数量关系 (如孔隙度与渗透率、声波时差与孔隙度的关系) 的确定很难用一个绝对准确的表达式来建立, 最好用区间相关性来表述。

解决不确定性问题的有效手段是统计方法。而传统统计学主要解决独立性随机变量的数量关系, 对地质问题的结构性显得不相适应, 因而产生了基于区域化变量理论的地质统计学。这就是应用随机模型来认识不确定性问题的基本思想。由此建立的储层地质模型视为随机实现, 以一定程度的把握性 (概率) 来确定建模结果。同时, 在每次建模中所得到的结果也首先应是一系列等可能 (等概率) 的储层地质模型组, 它们之间的相互差别就充分反映了由于资料信息不全或不够准确以及研究方法和模型的简化等所带来的不确定性 (多解性), 然后再通过大量的静态地质知识和统计规律以及动态历史拟合来约束, 确定所

建立的最优化地质模型，这就构成了储层随机建模的主导思想。

对于储层参数体系的客观描述，根据其参数的特征采用针对性的研究方法，才有可能得到比较满意的效果，比如：

1. 地质统计学方法可以很好地解决储层参数结构性和随机性问题

经典统计学所研究的变量原则上是可无限重复或进行大量观测的，而且要求每次抽样必须独立进行；此外，经典统计学研究的对象应是随机的变量，且服从某个已知概率分布，它并不考虑各个变量值的空间分布规律（结构）。这些要求在地学领域中是很难满足的，而地质统计学理论和方法是针对这些问题而产生的，它以区域化变量理论为基础，以变差函数为基本工具来研究那些展布于空间并且呈现出一定结构性和随机性的自然现象，储层参数的空间分布问题上正好符合这一自然现象。

2. 分形分析方法可有效地描述储层参数的非均质特征

地学领域中的分形分布特征已为大量研究者所证实（Hewett, 1986^①；Behrens and Hewett, 1988^②；Todeschuck *et al.*, 1992），油气储层参数也不例外，用参数的分形特征可以十分精确地描述储层参数空间分布的非均匀程度，这是以往任何传统的线性统计学方法所不能达到的。

四、储层建模在油藏研究中的地位

简单地讲，储层建模是将目前油田普遍采用的储层描述向量化推进一步 [国外谓之“储层表征” (Characterization)]。如果说储层描述是油藏描述的核心，那么储层建模则是油藏数值模拟的基础，是定量地确定油藏数值模拟所需要的输入资料，即把以储层建模为核心的油藏描述的最终成果直接作为油藏数值模拟的初始参数。因此，储层建模在油藏研究中的地位是介于油藏描述与油藏模拟之间，是将二者通过计算机技术直接连接起来，并达到互相渗透，互相修订。其核心就是建立三维定量的储层地质模型，而其中最引人注目的则是具有相当井间预测能力的储层建模技术。

第二节 碎屑岩储层非均质性的层次结构

一、储层骨架层次——沉积环境决定了砂岩体分布的几何特征

从一般概念上讲，陆相沉积的上游沉积砂体较下游沉积的砂体具有较强的宏观非均质性（图 1-1）。从隆起的物源区到平坦的深湖区，由重力、风暴和水流所产生的沉积物具有千姿百态的沉积样式。近物源区的冲积扇体沉积具有扇根、扇中、扇端沉积之分；而作为油储的主要沉积单元——水道砂岩体具有频繁改道、多层空间叠置的非均质特征，其岩石特征表现为极低的结构和成分成熟度，更表现为较差的孔隙结构特征和非均质性极强的物性特征；上游的网状河道则形成平面上和剖面上众多的透镜状砂体分布，其油储特征也十

① Hewett T. A., 1986, Fractal distributions of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport. *SPE* 15386.

② Behrens R. A. and Hewett T. A., 1988, Conditional simulation of reservoir heterogeneity with fractals. *SPE* 18326.

分复杂；中下游的蛇曲河流，河道侧向加积和频繁改道，使砂体空间分布规律难以掌握，河道进入水下后，尽管相对稳定，但河道砂体的分布范围比较局限，没有相当密度的井网是难以控制的；而到了深湖区的浊积体沉积更是难以把握的一类重要油储类型。图 1-2 为一个三角洲前缘分流河道的砂体骨架随机预测模型，极好地反映了砂岩储层的宏观非均质性。

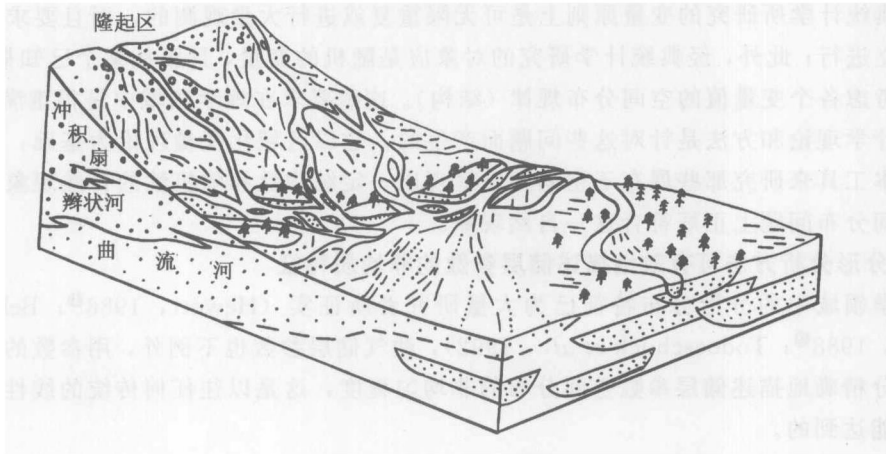


图 1-1 砂岩沉积环境模式图
(据 Miall, 1985)

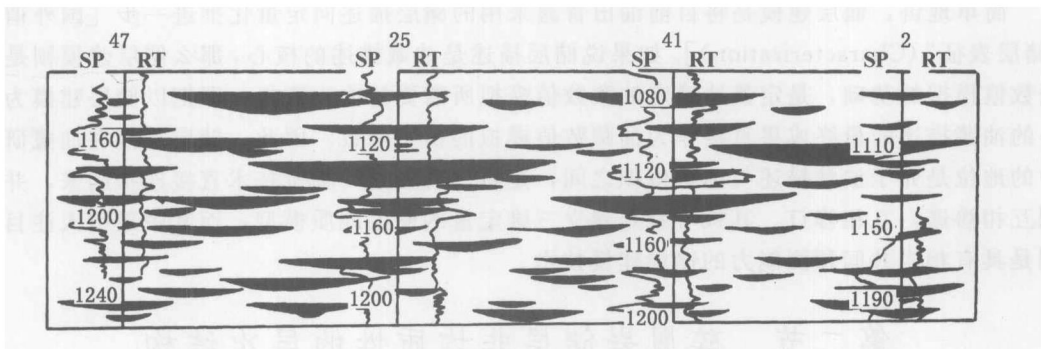


图 1-2 河道砂岩剖面骨架模型

二、储层骨架控制下建筑结构要素——水动力条件差异为主的产物

即使是同一沉积单元中，也具有较强的非均质性。Miall (1985)^① 在对河流沉积的建筑要素分析中，用图 1-3 模式化地描述了不同沉积单元的建筑要素，揭示出了沉积体内部由于沉积物粒度、结构、构造等产生的储层非均质特性。

显然，砂岩储层的沉积环境决定了砂岩储层直观上的从大尺度的分布形态，到小尺度的结构、构造上的非均质特征，进而形成储层岩性、物性上的非均质性。储层后期的改造则是在此基础上进一步增强某一方面特性的不均一性。因此，对砂岩储层非均质性认识的根本应首先立足于沉积成因和沉积环境的研究。

^① Miall A. D., 1985, Architectural element analysis; a new methods of facies analysis applied to fluvial deposits, Earth-Science Reviews, 22 (1985) 261-308, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam Print in The Netherlands.

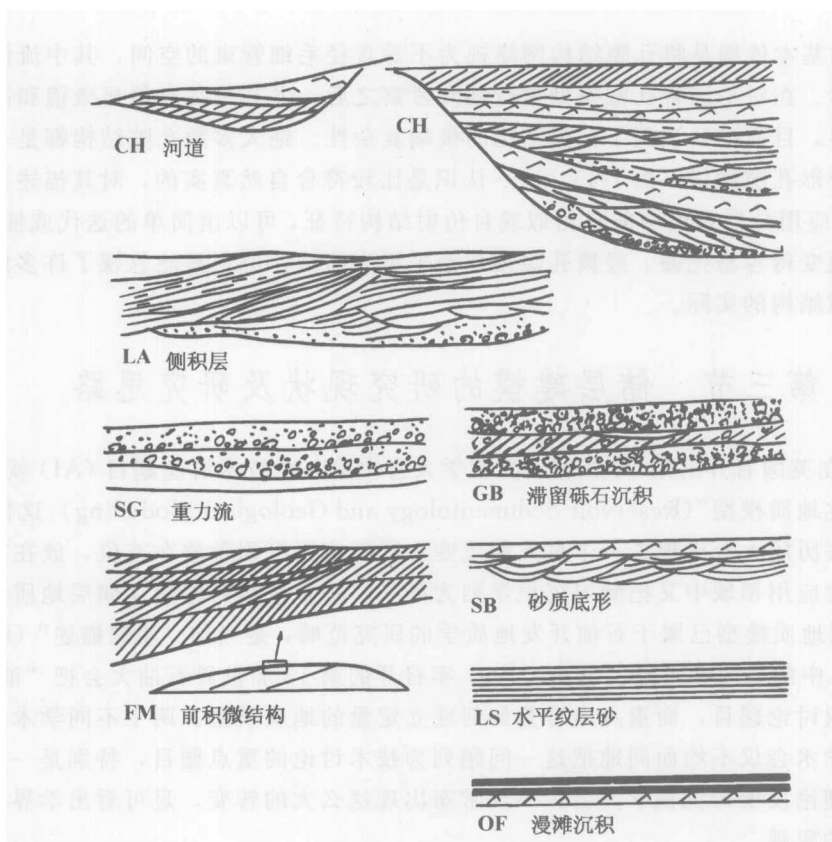


图 1-3 河流沉积的建筑结构要素模式图
(据 Miall, 1985)

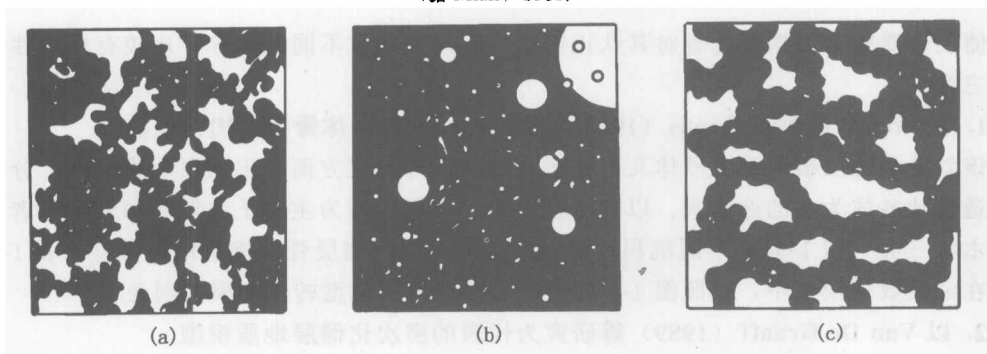


图 1-4 分形孔隙的二维模型示意图
(据王域辉, 1994)

(a) 分形粗糙多孔表面; (b) 光滑孔隙的幂律分布; (c) 胶体颗粒网络

三、孔隙结构层次

孔隙结构作为储层评价的最小尺度，已经形成了大量的评价技术和手段，具备了比较系统的评价参数体系。最为完善的要数毛细管孔隙结构模型的研究，压汞法已成为油田生产部门最常规的储层评价方法。其评价参数系统已成为成藏机理研究和开发潜力分析中必不可少的依据。