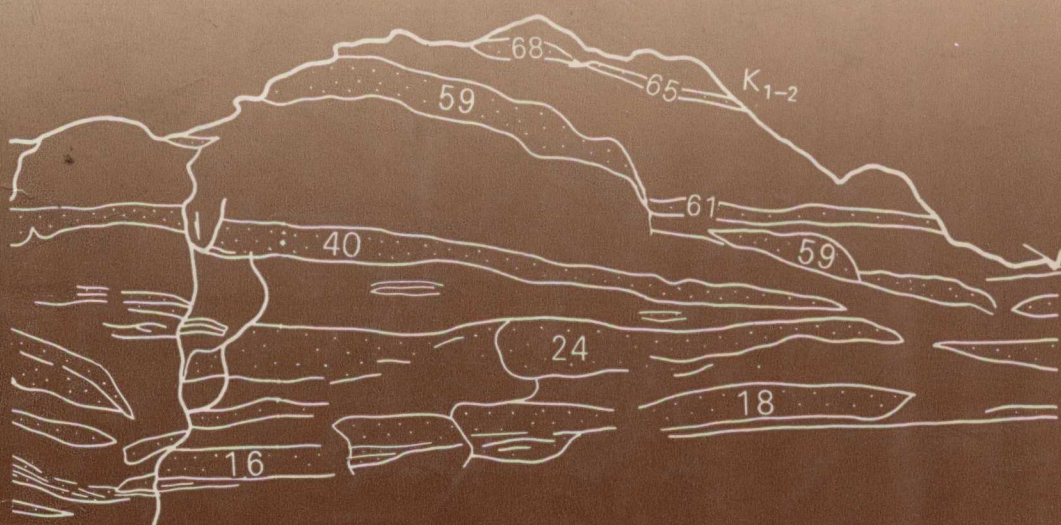


地面—地下对比建立 储层精细地质模型

林克湘 张昌民 著
雷卞军 刘怀波



石油工业出版社

登录号	085435
分类号	P618.130.2
种次号	066

地面—地下对比建立 储层精细地质模型

林克湘 张昌民 著
雷卞军 刘怀波



石油工业出版社

内 容 提 要

书中提供了国内首次将地面与地下资料结合建立油气储层预测模型的实例。第一部分介绍了国内外储层地质模型研究的最新进展,提出了储层研究中储层层次分析的方法;第二部分以我国青海油砂山油田储层为研究对象,系统地阐述了在油田邻近的地面露头区开展的详细地质调查及所建立的一批包括储层结构类型、储集砂体类型、砂体三维几何形态、内部建筑结构要素组合、古流向及采用密网格取样建立的单砂体规模地质模型等定量地质知识库;第三部分详细介绍了利用露头调查信息结合钻井地质和地球物理资料建立油砂山油田精细地质模型。

该书所提供的地质知识库和定量预测地下储层变化的理论依据、研究思路与工作方法可供从事油气田勘探开发的地质工作者、科研人员以及高等院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地面—地下对比建立储层精细地质模型/林克湘等编著.

北京:石油工业出版社,1995.11

ISBN 7-5021-1603-6

I. 地...

II. 林...

III. 储集层,地面地下-石油天然气地质-地质模型-对比研究

IV. P618.130.2

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里2区1号楼)

河北省徐水县激光照排厂排版

北京康利胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开 10.375印张 1插页 266千字 印1—1000

1995年11月北京第1版 1995年11月北京第1次印刷

定价:18元

序

现代化油藏管理要求对储层进行正确的表征。其核心是建立精细的储层地质模型，为油藏数值模拟提供可靠的输入数据。80年代中期以来，储层地质模型研究在国际上引起了日益广泛的重视，已经成为石油开发地质家的主要工作。欧美一些经济大国或投入巨资或组成研究集团合力开展此项研究，其主要目的是为提高采收率服务。

我国“六五”期间开展概念模型研究，“七五”进行静态模型软件研制，“八五”组织预测模型攻关。目前地质模型已应用于油田早期评价、注水开发和三次采油等整个油田开发过程。适应我国陆相储层的特点，在建模思想、工作方法、软件开发等方面已取得了很大的进展。

地质知识库是建立储层地质模型的基础。由于钻井和地球物理资料都有一定的局限性，影响了建模精度。国外近年来投入大量人力物力进行露头调查，建立定量地质知识库，英、美等国曾在一个露头上投资500万美元。但是目前发表的知识库信息不多。同时，国外研究的对象大多为海相储层，对于陆相盆地储集层还得依靠我们自己的工作。

我们非常高兴地看到，江汉石油学院地质系油砂山研究组在“八五”科研攻关过程中出色地实现了将露头调查信息应用于建立储层地质模型的思想。他们通过对青海油砂山露头的详细调查研究，获得一批地质知识信息，并运用于建立油砂山油田储层地质模型。他们第一次在国内实现了露头信息与测井资料结合建立储层预测模型。通过这项研究提出了一整套建立储层地质模型的方法论和工作流程，不仅为油砂山油田提供了一个精细的地质模型，更重要的是研究方法和经验可以推广应用于其它地区。做为一个油田开发地质工作者，值此专著出版之际，我愿十分愉快地为之呐喊，期望着更多的类似著作问世。

裘怿楠

1994年12月31日

前 言

随着世界石油地质研究的进展和石油勘探与开发技术的提高, 储层地质学作为一门新学科逐渐形成了定量储层表征 (Reservoir Characterization) 这一新的研究方向。储层表征的目的是: ①提高老油田的采收率; ②降低新探区勘探成本; ③获得实用性储层建模计算机硬件和软件。储层模型化是储层表征的核心并已成为先进国家油气藏开发与管理不可缺少的工具。80 年代中期以来召开的三次国际储层表征会议, 第十三届国际沉积学大会以及第十三届世界石油大会都把建立定量预测储层空间分布和储层非均质性的地质模型做为储层表征的核心议题, 反映了这一研究领域的重要性与迅速发展。

在储层研究中, 由于地下地质资料受井距和岩心的限制, 迫使沉积和储层地质学家重返露头, 进行露头调查, 利用露头上取得的知识和信息建立储层地质模型。已知的研究实例包括美国怀俄明州粉河 (Powder River) 盆地边缘上白垩统 Shannon 陆棚砂脊露头调查, 美国俄克拉何马州宾夕法尼亚系 Gypsy 露头河流及三角洲砂岩储层综合调查研究; 以及美国大角盆地 Mesaverde 组砂岩露头, 英国约克郡 (Yorkshire) 侏罗系河流三角洲砂岩露头, 西班牙 Roda 三角洲砂岩露头, 西班牙 Lorraine 盆地第三系点砂坝砂岩露头等的综合调查研究。我国储层地质模型研究始于 80 年代早期, 裘怿楠等 (1984) 研究了我国陆相盆地中多种河型河道砂体的非均质模式。此后, 北京石油勘探开发科学研究院与河南油田在“七五”期间建立了双河油田静态模型。进入 90 年代, 随着中国油气储层研究协调小组的成立, 储层模型研究逐渐展开, 先后在大庆油田和吐哈盆地丘陵油田进行了概念模型建模研究。王德发等 (1994) 和李思田等 (1993, 1994) 也分别对阜新盆地白垩系冲积扇露头及鄂尔多斯三叠系三角洲、侏罗系河流砂岩露头进行了调查和地质模型研究。

我们的青海油砂山油田露头调查和储层地质模型研究始于 1989 年, 1991 年被纳入中国石油天然气总公司“八五”科技攻关项目, “中国油气储层评价研究”。油砂山上新统底部露头与邻近油砂山油田的相应层位处于同一沉积体系, 露头上的砂体及砂体组合与地下储层类同, 出露良好, 提供了一个将露头调查信息用于附近油田储层建模的较理想的研究对象。研究工作历时五年, 从区域沉积背景入手, 经过野外露头详细调查和系统采样分析, 建立起砂体地质模型和砂体骨架模型。并利用露头调查信息和钻井地质及地球物理资料建立了油砂山油田储层地质模型, 提交了国内第一份把露头调查与建立地下储层精细地质模型紧密结合的研究报告。本书收入了该项研究的主要成果。

本书第一、二章由张昌民和刘怀波编写, 第三章由张昌民、林克湘和雷卞军编写, 第四章由张昌民、雷卞军和林克湘编写, 第五章由刘怀波、雷卞军编写, 第六、八、九、十章由张昌民和林克湘编写, 第七章由雷卞军、张昌民和林克湘编写, 第十一章由张昌民和林克湘编写, 第十二、十三、十四章由林克湘和张昌民编写。参加部分研究工作的还有屈平彦、马文雄、雷兵足、骆静、唐瑞英、曹耀华、施冬和贺向阳、赵志彬、王鹏、陈华中、李林祥、王健、邱士清、贺清、崔勇、邹向阳、阎祖兵、丁卫星、李炉明、董艳蕾, 在此表示致谢。

研究和编写工作得到了中国石油天然气总公司裘怿楠、薛叔浩、陈丽华、童宪章、吴崇筠、石宝珩、关德范、潘兴国、蒋兰, 中国科学院地质所叶连俊, 地质大学王德发、郑浚茂、李思田, 石油大学 (北京) 信荃麟、赵澄林, 青海石油管理局范连顺、黄平忠、董良生、王桂生、石惠诚、张景源等教授和专家的热情关怀和指导, 在此表示衷心感谢。

由于作者的水平有限, 缺点和错误难免, 敬请指正。

目 录

第一部分 工作原理与研究方法

第一章 建立储层地质模型的基本原理与研究动向	(1)
第一节 储层地质模型的类型	(1)
第二节 建立储层地质模型的方法	(4)
第三节 国内外储层地质模型的研究现状	(5)
第二章 研究工作的方法	(8)
第一节 储层层次分析法	(8)
第二节 研究工作概况	(12)

第二部分 建立油砂山油田储层精细地质模型的露头调查信息

第三章 区域地质与研究区概况	(14)
第一节 柴达木盆地的演化	(14)
第二节 地层划分及研究目的层段的位置	(15)
第四章 柴达木盆地西部下油砂山组 $K_{1-1} \sim K_{1-3}$ 层段 (地面) 沉积体系分析	(18)
第一节 古气候和古沉积环境	(18)
第二节 岩石学特征	(20)
第三节 周期性涨缩湖盆三角洲沉积机理	(21)
第五章 成岩作用与储层孔隙结构	(25)
第一节 成岩作用类型和特征	(25)
第二节 泥岩粘土矿物组成和成岩变化	(28)
第三节 成岩作用和孔隙演化史	(29)
第四节 储层孔隙类型及孔隙结构	(31)
第六章 露头剖面岩石相类型及储层物性特征	(33)
第一节 岩石相类型	(33)
第二节 不同岩石相的孔隙度与渗透率	(37)
第三节 水平渗透率与垂直渗透率的关系	(43)
第七章 储集砂体的类型、三维形态、内部结构和孔渗特征	(44)
第一节 砂体及其古流向的测量和表示方法	(44)
第二节 测量砂体的描述及沉积过程解释	(46)
第三节 砂体和古流向测量的主要成果	(59)
第四节 不同砂体类型的孔渗特征	(62)
第八章 照片镶嵌与剖面横向追踪研究砂体连通性	(65)
第一节 各镶嵌图象的描述与解释	(65)

第二节	砂体连通性的定量确定	(68)
第九章	油砂山剖面泥岩的分形分布	(70)
第一节	资料的采集与处理	(70)
第二节	泥质层段的厚度、含量和自相似性	(72)
第十章	油砂山剖面第 68 层分流河道砂体的沉积学	(74)
第一节	研究方法	(74)
第二节	分流河道砂体的沉积标志	(77)
第三节	第 68 层砂体的建筑结构分析	(78)
第四节	沉积过程的回溯	(81)
第十一章	油砂山剖面第 68 层分流河道砂体储层地质模型	(83)
第一节	砂体粒度、胶结物与孔渗关系	(83)
第二节	渗透率非均质参数	(85)
第三节	储层物性的各向异性	(86)
第四节	运用不同方法和数据密度建立地质模型	(88)
第五节	地质统计学理论与克里金模型	(92)
第六节	用 SGM 软件制做地质模型	(97)

第三部分 油砂山油田 $K_2 \sim K_{1-3}$ 层段 (地下) 精细地质模型

第十二章	油砂山油田地质概况及勘探开发研究现状	(100)
第一节	构造特征	(100)
第二节	油砂山油田勘探开发工作的回顾	(101)
第三节	资料收集	(101)
第十三章	油砂山油田 $K_2 \sim K_{1-3}$ 层段 (地下) 小层沉积相、砂体类型及其分布	(103)
第一节	层组划分与对比	(104)
第二节	沉积相及测井相	(108)
第三节	油砂山油田沉积相平面分布	(110)
第四节	砂体类型及其物性特征	(116)
第十四章	油砂山油田迷宫式储层地质模型的建立	(118)
第一节	建模思想与工作流程	(118)
第二节	建立原型模型	(119)
第三节	油砂山油田 $K_2 \sim K_{1-3}$ 层段 (地下) 砂体骨架横剖面预测模型的建立	(122)
第四节	油砂山油田 $K_2 \sim K_{1-3}$ 层段 (地下) 砂体骨架平面预测模型的建立	(132)
第五节	油砂山油田分流河道砂体渗透率分布模型的建立	(141)
参考文献		(150)
图版及说明		(154)

第一部分 工作原理与研究方法

第一章 建立储层地质模型的基本原理与研究动向

近几年来,世界和我国石油工业都面临着两个迫切的问题:①老油田大都进入开发成熟期,需不断调整开发方案,提高采收率;②新的探区数量日益减少,而且大都分布在自然条件恶劣的边远地区,勘探和开发成本极高,要求能够在仅有少量井眼的条件下尽早地对开发可行性进行评价。这两个问题的解决都要求对储层进行预测,做出精细、准确、全面的描述。

现代化的油藏开发管理就是通过改善资料收集系统,提高资料质量和数量,搞好油藏描述,通过各种驱替机理的研究(包括搞清二、三次采油的各种注入剂驱替原油的机理),然后用油藏数值模拟技术对开发可行性进行预测和模拟,分析已经历的过程的合理性以及预测各种措施下可能出现的开采动态和效果,最后根据这些分析和预测作出近期和长远的开发战略决策(裘怿楠,1993)。实际上,这一管理过程的核心仍然是油藏描述,因为油藏数值模拟是建立在正确的地质模型基础上的。但实际情况是,虽然数值模拟技术精度很高,但是由于储层地质模型与实际情况相差太大,结果造成了数值模拟中的 GIGO (Garbage in, Garbage out) 现象,即垃圾输入,垃圾输出。由此看来,建立符合实际的油藏储层地质模型已成了现代油藏描述的核心。

正因为如此,自 80 年代中后期以来,对储层地质模型的深入研究在国际和国内都受到广泛重视,得到迅速发展,一些新的理论和技术不断涌现。中国油气储层工作者为储层地质学的发展在这一方面做出了自己的贡献,一些行之有效,反映世界最新技术的建模方法已在国内许多油田实施,为油田开发的科学管理起到了重要的作用。

第一节 储层地质模型的类型

油藏是一个包括构造、地层、孔隙和流体等在内的复杂体系。由于不同的工作者所研究的规模(范围)和工作对象各不相同,因此油藏地质模型的概念在各种文献中的涵义也不尽相同;有必要在此作一简要回顾,以便了解储层地质模型的研究现状和动向。

一、基于不同开发阶段、不同开发研究任务所建立的储层地质模型

裘怿楠(1992)将储层地质模型分为概念模型、静态模型和预测模型。概念模型是针对一种沉积类型或成因类型的储层,把代表性的储层特征抽象出来,加以典型化和概念化,因此它代表了一个地区(油田)某一类型储层的基本面貌,而不是一套或一个具体储层的地质模型。概念模型主要应用于油田开发的早期研究各种开发战略问题。静态模型是针对某一具体油田(或开发区)一个或一套储层,将其储层特征在三维空间的变化和分布如实地加以描

述而建立的地质模型。静态模型是在油田开发以后建立的，主要是把现有井网揭示出的储层面貌描述出来，其基本依据是开发井网所提供的各种参数和控制因素，它不追求井间所插数值的准确程度，对模型的精确程度无法进行估计。预测模型是对控制点间以及以外地区储层参数作一定精度的内插和外推的预测，它要求在常规开发井网条件下把井间的储层参数变化及其绝对值预测出来。这种模型主要应用于三次采油提高采收率阶段或者油田开发调整阶段。

二、基于不同的油藏特征划分的地质模型

S. R. Jackson (1989) 等在研究蒙大那州东南部钟溪油田障壁岛相油藏时所建的地质模型分为沉积模型，成岩模型，构造模型以及地球化学模型四个子模型。沉积模型构成了储层的结构框架，成岩模型丰富了储层层内非均质的内容，构造模型圈定了油藏的轮廓，地球化学模型反映了流体的分布规律，为数值模拟提供了参数。实际上，无论是概念模型，还是静态模型和预测模型都必须考虑上述各种因素，因此，这一分类方法没有揭示模型的精度问题。

三、基于地层的层序性和储层的层次性划分的储层地质模型

这种划分方式目前采用的比较多，是由不同研究者所研究的对象规模不同而提出的，其核心问题是储层的层次性 (Hierarchy)。

W. J. E. Van De Graaff (1989) 将储层的非均质性分为油田范围 (约 1~10km)、油藏范围 (约 0.1~1km)，油藏至成因砂体范围 (0.01~0.5km) 以及小范围 (约 1cm~1m) 储层非均质性等四个级别。

K. J. Weber (1986) 将非均质性分为封闭、半封闭及未封闭断层、成因单元边界、成因单元内部渗透带、成因单元内部隔层、交错层、微观非均质性结构类型、矿物学特征以及裂缝封闭开启等 7 个级别。Haldorsen (1986) 划分为微观的、宏观的、大型的和巨型的等四个级别。类似的划分方案还有许多。在实际工作中每一类，每一个级别都可以做出相应的模型，而这些子模型便构成一个复杂的地质模型系统。

四、基于储层骨架 (或建筑结构) 划分的储层地质模型

Weber 和 Geuns (1989) 在对储层的骨架特征以及沉积作用概括的基础上，划分了三种储层骨架模型，即千层饼状模型，积木式模型和迷宫式模型。骨架砂体呈席状或板状展布的洪积物，湖泊席状砂，风成砂丘，障壁岛，海滩沉积，浅海席状砂等属于千层饼状；辫状河沉积物，点砂坝，河口坝，风暴透镜体等砂体属于积木式储层；而 N/G 值 (总厚度与砂、砾岩厚度比) 较低的水道沉积为迷宫式储层 (图 1-1)。由于储层骨架模型的差异导致所划分的流动单元模型和模拟模型也不相同。

五、基于数值模拟应用的地质模型划分方法

这种分类方式虽然没有人正式提出过，但都在普遍使用。实际上，从地质模型的建立到数值模拟的实施，要对地质模型进行处理，地质工作者所做的大多数模型是在地层对比或砂体预测的基础上而做的骨架模型 (framework model)，在数值模拟中首先应将其变换为流动单元模型 (flow unit model)，在实际模拟过程中，还要细分一定的规则网块，形成油藏数值模拟模型 (simulation model)。

六、基于不同建模方法称谓的储层地质模型

在建立预测模型时，常采用不同的数学方法，如克里格法、分形几何学方法、高斯法等，从而出现了一些基于建模数学原理而称谓的地质模型，如克里格模型。

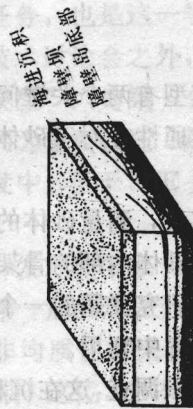
七、基于储层地质模型的显示方式称谓的地质模型

例如剖面模型、平面模型、连井模型、典型剖面模型、局部地质模型、整体地质模型、三

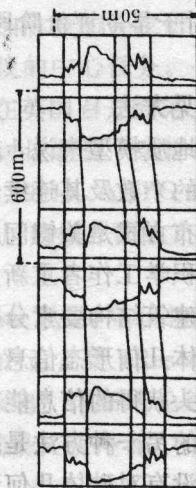
A. 层状油藏类型



a) 连续性明显和厚度渐变的不同层状地层



b) 层状砂岩反映出沉积环境相同



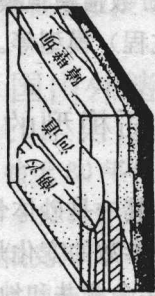
c) 能很好对比较的测井曲线, 显示出砂岩厚度和物性在侧向上逐渐变化

井网	井距, m	井/km ²
矩形	1000	1
三角形	1200	0.8
随机		1.3

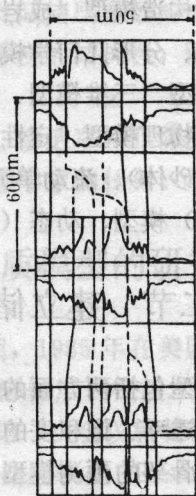
B. 拼合式油藏类型



a) 同时充填而又没有较大间隔层的不同砂岩体, 在相邻的或叠置的砂岩体之间, 局部可出现少量低渗透层



b) 油藏结构的确定需要进行详细的沉积岩石学分析



c) 虽然砂岩/页岩比值很高, 但没有详细的解释, 测井曲线的对比就很困难

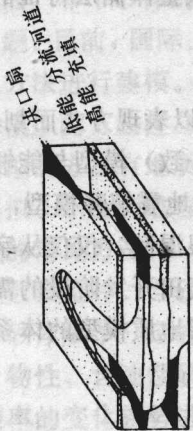
为确定主要砂岩单元的对比所需要的近似平均数据密

井网	井距, m	井/km ²
矩形	600	3
三角形	800	2
随机		1

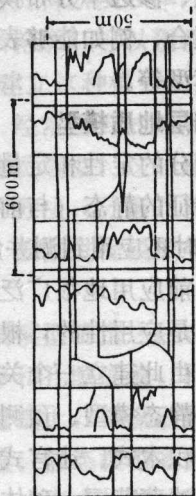
C. 迷宫式油藏类型



a) 剖面中常常出现不连续的豆夹状和透镜状砂岩体的复杂排列



b) 在三维上砂岩局部相互连通, 但仅仅是通过薄层低渗透率席状砂岩部分连通



c) 即使井距为 400~600m, 也难以进行测井曲线对比

井网	井距, m	井/km ²
矩形	200	25
三角形	300	13
随机		32

图 1-1 储层骨架类型和以井密度为函数的储层结构分辨率

维地质模型、二维地质模型、渗透率分布模型、孔隙度分布模型等，而一个实际的模型经常是这些模型中某些类型的混合，例如能够表达油藏整体储层特征的三维渗透率分布模型，或整体的二维连井剖面地质模型等。

八、其它不同特点的储层地质模型

例如依据定量化程度所分的定性和定量模型，以表现方式而划分的数学模型和物理模型，还有人将仅表示油藏地质特征的静态（与前述不一致）模型与能够表示开发过程的动态模型对照起来，在解释储层参数时还应用到测井解释和地震解释模型，至于具体的方法就更多了。

总之，储层地质模型目前应用地很广泛，也很混乱，仅仅从字面上看不出模型的实质性内容。但是，储层地质模型是应用性的，根据油气田开发阶段的需要划分储层地质模型是模型这个复杂体系的根模型，由此建立一个关于储层地质模型的体系：

一级模型：概念模型、静态模型、预测模型；

二级模型：千层饼式、积木式、迷宫式；

三级模型：油田范围、油藏范围、砂体范围、小范围；

四级模型：沉积模型、构造模型、成岩模型、流体流动模型；

五级模型：克里金模型、分形几何学模型、随机模型等；

六级模型：二维平面模型、三维模型、单井模型、连井模型等；

七级模型：数学模型、物理模型、定性模型、定量模型；

八级模型：骨架模型（砂体）、流动单元模型、数值模拟模型；

九级模型：静态（地质）模型、动态（开发过程）模型等。

第二节 建立储层地质模型的方法

一个完整的储层地质模型包括两方面的内容，其一是砂体骨架，即骨架模型；其二是储层参数模型，即孔隙度、渗透率、饱和度的变化。参数的变化是在骨架的宏观控制下的，因此地质家多年来致力于建立骨架的预测模型，然后结合测井和地震地质解释填入物性参数。有时当骨架模型的建立有困难时，可直接用一些数学方法来预测参数的空间变化。但这种预测的风险性是很大的，不过相对于早期评价阶段全油田规模和开发阶段的砂体内部规模的变化，这种方法也是科学的。

一、建立骨架模型的常见方法

对于油田和油藏规模的地质模型来说，骨架模型有两个关键问题，一个是砂体的大小和延伸方向，另一个则是砂体的个数及其连续性和连通性。对于砂体规模的地质模型来说，砂体内部的建筑结构要素及分布方式是关键问题。

为了解决上述问题，沉积学工作者重新走上露头，测量砂体的走向、宽度、厚度，建立经验公式，通过对砂体内部建筑结构要素分析建立砂体内部的骨架模型，通过大规模露头和相邻密集浅钻井资料取得砂体几何形态信息。本项研究课题的一个主要目的正是如此。这种方法所面临的主要矛盾是露头获得的信息能否在油田中套用。

取得砂体几何形态信息的另一种方法是现代沉积调查，这在沉积学界已经进行了多年，但以前许多调查项目的结果并没有对砂体几何形态预测给予多大的重视，现代沉积调查结果与油田实际资料仍然有很大差距。

在周边没有露头可以对比的含油气盆地，高成熟区密井网解剖，通过成对井，成仁井等

的解剖,取得类似露头上可以获得的砂体宽厚比的资料以及砂体内部建筑结构要素的信息。

砂体宽厚比信息获得之后,单个砂体的形态(轮廓)可以预测出来,重要的问题是砂体的数目和连通性及连续性问题。目前,国际上用于建立这种模型的方法大多数是在砂泥岩比、宽厚比控制下运用随机模拟方法进行建模。因此,经常用到的储层随机模拟,并不是指油藏数值模拟,而是用随机条件模拟的方法建立储层地质模型,这样建立的模型叫随机模型,其过程又叫随机建模。随机模拟的方法有地质统计学方法、分形几何学方法、马尔柯夫随机场法、高斯场模拟法、退火模拟、示性点过程模拟、镶嵌过程模拟等方法。

二、建立储层参数模型的常见方法

在早期评价建立储层参数模型时,当砂体骨架模型确定之后,对于一定类型的砂体按砂体类型与渗透率的关系对各砂体赋予一定的渗透率和孔隙度值,即可以满足要求。对于已开发的油田,在岩性、电性、物性、含油性研究的基础上,根据砂体对比结果及沉积学理论按照相带的非均质特点及渗透率的变化趋势进行插值。静态模型参数分布一般是在已知井点资料的控制下,运用不同的插值程序软件进行插值,或者人工勾绘等值线图。预测模型的参数赋值和成型方式与静态模型相同,但在预测控制点间储层参数的方法上具有本质区别,预测模型能够定量揭示出控制点间地质体和储层参数本身的结构性,而且能通过条件模拟方法检验预测方法本身的可靠程度,进行误差检验。

无论哪一种方法都必须有可靠的控制点参数,渗透率和孔隙度、饱和度的解释必须是可靠的,正确地解释控制井点的物性参数是地球物理学家的任务。

第三节 国内外储层地质模型的研究现状

储层地质模型研究的热潮始于 80 年代中后期,1985 年在美国达拉斯召开了第一届国际储层表征技术讨论会,1989 年 6 月召开第三届国际储层表征技术讨论会,1991 年 11 月第三次国际储层表征技术研讨会在俄克拉何马召开。第一次会议就将储层表征定义为“定量地确定储层性质、识别地质信息及空间变化的方法”。储层表征(Reservoir characterization)这一新概念的出现,将油藏描述中静态研究的结论上升到与开发过程的动态信息相结合,主要目标针对油田开发动态过程,特别是二次和三次采油阶段的开发研究任务。储层地质模型已成为目前储层表征中的主要任务,也是这一学术会议的中心任务。

除了这三次储层表征技术讨论会之外,90 年在英国召开的第 13 届国际沉积学大会将“储层沉积学和建立储层地质模型”列为第一个技术讨论题目(裴泽楠,1990),第 13 届世界石油大会也把储层地质模型列为重要议题(裴泽楠,1991),AAPG 的 91 年年会首次将分形、统计和混沌学应用于勘探开发中,至于 SPE 关于储层建模方面的文献这些年更是好戏连台,层出不穷。

壳牌公司资深的油田开发地质学家 K. J. Weber 从 80 年代初就注意到沉积构造对流体流动的影响,80 年代中期在第一届储层表征研讨会的论文集(Reservoir Characterization I)中所发表的长篇宏论“储层非均质性对采收率的影响”详细地论述了不同层次非均质性特征(Weber 1986),80 年代后期,这位 AAPG 杰出成果奖获得者,稍后又提出了“建立碎屑岩储层模拟模型骨架”(Weber,1989)。

美国德州大学奥斯汀分校石油工程系的 L. W. Lake 教授作为储层表征国际研讨会两次会议论文集的主编,从 80 年代后期同他的学生和同事们在建立储层地质模型研究方面做了大

量的工作。Lake 和他的学生 D. J. Gogging 等成功地从理论和技术上解决了野外便携式微渗透率仪 (minipermeameter) 的应用问题, 运用微渗透率仪在亚历桑那州北部佩基风成砂岩上进行密网格采样 (Gogging 等, 1988), 用地质统计学变差函数理论研究风成砂岩的渗透率分布模式, 在 90 年代发表的有关此项研究的文章中, Gogging 等用分形几何学方法建立风成砂岩储层地质模型, Lake 等人将地质统计学模型和分形几何学模型应用黑油模型进行模拟, 发现分形几何学模型与原型模型有较好的相似性。

Lake 教授的学生, 现在挪威 Norsk Hydro 公司供职的 H. H. Haldorsen 和他的同事最早在 1990 年 (Haldorsen and Damsleth, 1990) 就在 JPT 上对随机建模的原理做了介绍。Haldorsen 在建立随机储层模型方面发表了许多文章, 对这一领域有较深的造诣, 并撰文总结了储层表征所遇到的问题 (Haldorsen, 1993)。

一些国家甚至跨国集团近年来致力于储层地质模型研究, 美国能源部研究院调查了怀俄明州粉河盆地 (Power River Basin) 边缘出露的上白垩统陆架砂脊露头, 通过研究储层空间变化的特征并预测储层性质空间变化的规律, 为该盆地中 Hartzog Draw 油田、Heldt Draw 油田、壶丘油田以及其它小油田的上白垩统 Shannon 砂岩建立储层地质模型 (Jackson et al., 1991)。美国俄克拉荷马大学的一些沉积学家也对俄克拉荷马州西北部的 Gypsy 砂岩露头进行了详细调查, 同过定量地描述露头上的砂体几何形态和砂体内部建筑结构, 对覆盖区进行浅钻和雷达勘探, 邻区钻实验井等来进行建立河流三角洲砂体的储层地质模型研究。

针对北海的石油储层, 欧州和美国的一些学者进行了大量的露头调查工作。例如, 通过研究美国大角盆地 Mesaverde 组砂体为对比英国的北海 Brent 组储层服务; 研究西班牙下第三系露头内页岩夹层分布, 为北海 Forties Frigg 油田和意大利的 Cellino 组储层提供知识库等。除此之外, 法国集团在西班牙研究 Roda 三角洲露头, 荷兰 Delf 技术大学在西班牙 Lorance 盆地一个第三系点坝砂体内研究点坝内渗透率变化及层间渗透率变化。

一个引人注目的跨国研究集团是由英、法、荷、挪威等国专家组成的研究组织 (Heresim Group), 从字面意思来看是进行非均质性模拟, 其中一项工作是研究英格兰的克郡 (Yorkshire) 的河流三角洲露头为建立北海 Brent 组的地质模型提供知识库。围绕这些工作已经发表了一系列文章 (Ravenne 等, 1989, Cartigny 等, 1990)。除了利用直升飞机等装备进行悬崖大尺度照片镶嵌 (Photomosaic) 研究和数字化处理之外, 在悬崖内部钻了 18 口浅井, 并进行测井对比, 建立了一个三维的定量原型地质模型, 一个名称为 Heresim 的储层表征软件已经在 Beicip-Franlab 公司推向市场。

从国外已发表的资料看, 大量的人力物力集中在通过露头调查建立建模的知识库, 在 BP (布列颠石油公司)、法国石油研究院, 以及 Heresim 集团已经积累了相当数量的知识库信息, 但是这些具体的数据和资料都未见诸公开。另有一批主要是数学家, 数学地质工作者在致力研究预测物性分布和随机建模的计算机软件, 已发表的文献中已经介绍了大大小小的软件不下十数个, 但许多软件仅限于一个方面或解决某一个小问题, 有些是在微机上实现的, 有些可用于大型计算机和 workstation, 相比之下国内前几年引进的 SGM 软件显示的功能太少。

我国的储层地质模型研究工作始于 80 年代中期 裘怿楠等 (1985) 对我国河流砂体储层非均质性模式的研究工作, 在这一具有里程碑意义的研究报告中第一次研究了我国陆相盆地中六种河流砂体的三维网块化储层概念模型。此后在胜利、河南、辽河、吉林等油田的新油田开发和老油田调整中应用了概念模型。例如, 王寿庆 (1981) 研究了双河油田储层非均质特征与非均质模型。进入 90 年代, 随着 1989 年中国油气储层协调领导小组编制的中国油气储

层研究大纲的实施, 储层模型研究逐渐全面展开, 储层地质工作者为了积累建立陆相盆地地质模型的知识库, 为了编制适合中国油田实际情况的建模软件而奋力攻关。

沉积学工作者重新走上露头, 返回大自然是国际上近年来储层地质模型研究的一大特点。从 1989 年以来, 中国地质大学王德发教授率领的研究小组在内蒙古海湖进行现代沉积调查 (王德发等, 1993), 在阜新地区进行露头研究, 在承德地区研究河流沉积剖面。李思田教授在鄂尔多斯盆地进行侏罗系河流砂体的露头调查工作 (李思田等, 1993, 李桢等, 1993)。吐哈石油会战指挥部和总公司石油研究院在吐哈盆地进行露头调查为建立丘陵油田概念模型提供知识库 (穆龙新等, 1992)。北京大学等在玉门和新疆开始类似的露头调查。大庆石油学院利用大型地面探槽研究现代沉积砂体内的非均质性, 建立地质模型。做为此项研究中的一员, 江汉石油学院的露头调查组在南襄盆地唐河西大岗剖面 and 青海油砂山地区进行研究工作 (刘怀波等, 1993)。

在缺乏露头的地区, 利用密井网建立知识库由总公司研究院与大庆研究院在大庆油田萨北, 萨中地区已成功地进行 (叶良苗等, 1993)。

编制建模软件是储层地质模型研究的又一特色。南海石油研究院的温道明工程师从 1988~1991 年进行储层预测模型研究, 在对克里金趋势面、曲面样条, 距离加权等方法反复对比验证的基础上, 提出了一种减弱非均质程度预测法 (温道明等, 1993), 对平面上储层参数的预测成功率达到 70% 左右。他可能是国内第一个将变差函数理论、地质统计学方法成功地与沉积学中砂体不同层次非均质性联系起来的人。北京石油研究院刘明新教授研制的分形几何学软件已在吐哈、大庆、塔里木等油田地质模型研究中成功地得到应用。石油研究院的陈立生博士研究的 Geomodeling 软件也在辽河、大港、吐哈、中原等油田的实际资料处理中得到推广。西安石油学院王家华教授在“七五”基础上研制成功的 GASOR 1.0 已经进入商品化阶段。江汉石油学院王冠贵、陈佩珍教授等也在储层参数预测方法上做了大量出色的工作。石油大学油藏研究所也在工作站上开发了一套建模软件。胜利油田等已经开发了一套从地层对比到建立地质模型的一个完整软件系统。

与国外研究水平相比, 在地质知识库方面我们已经积累了大量的信息, 不存在研究水平上的差距。但是中国含油气盆地是陆相盆地, 而且盆地之间差别大、沉积体系变化频繁、砂体类型多样以及盆地间、体系间可对比性较差。仅就砂体宽厚比关系来说, 从这一盆地与另一盆地相比就很难对比, 甚至同一套地层间砂体类型也不相同, 这样给地质知识的应用提出了许多限制条件。因此, 还应针对不同地区、不同类型砂体做大量工作。

在储层地质模型建模软件研究方面, 突出的差距表现在随机建模的软件研究方面, 其它软件的研究也都处于追踪阶段。到目前, 至少缺乏一套可用于建立随机骨架模型的应用软件, 已经进行的工作尚不成熟。

第二章 研究工作的方法

第一节 储层层次分析法

一、层次表征与层次建模的理论依据

层次性是地质现象本身的特征之一,也是地质理论的普遍规律。大地构造、含油气构造、沉积学都离不开研究层次性问题。中外学者大都注意到储层非均质性是按一定的级别而相互联系的。Pettijohn 等 (1973) 提出了碎屑岩由大到小的非均质性系列谱图; Weber (1986) 提出了在油田评价和开发阶段定量认识非均质性的分类体系; 裘亦楠 (1990) 把储层非均质性划分为五个不同级别的内容,并对如何进行按级别的描述作了深入的阐述。如果采用全信息的观点,将宏观到微观作为一个连续的谱系,可以考虑划分出以下的级别。

(1) 全球规模的储层研究 指全球范围的海平面升降事件、大陆裂谷和造山运动,这些事件导致板块开合和沉积盆地形成。全球构造运动可以分为古全球构造阶段、过渡阶段、中间阶段到新全球构造阶段,各阶段形成的含油气盆地具有不同的地质特征,从而导致古生代、中生代和第三纪含油气盆地之间具有明显差异性,其储层类型和分布规律亦明显不同。

(2) 板块规模的储层研究 板内不同断块因不同的位置而具有不同的演变过程,形成不同的沉积盆地。中国东部板内盆地与西部盆地性质明显不同,东部以张性断陷盆地为主,西部以拗陷盆地为主。板内范围的储层研究就是要总结板块不同部位的盆地类型、形成、发展和消亡的历史,总结盆地形成过程中沉积特征的差异性和规律性,寻找有潜力的新盆地。

(3) 盆地规模的储层研究 盆地规模的储层研究旨在弄清区域的储层分布相带类型及空间分布的趋势,指出可能的储层相类型、埋深范围。Miall (1987) 曾把盆地演化方式归纳为 9 种类型,这 9 种类型相互组合构成了盆地充填格架。

(4) 拗陷规模的储层研究 在确定拗陷和隆起区的基础上,弄清拗陷内沉积体系展布和砂体沉积相和微相,按照储层沉积学工作流程和非均质性研究的五个方面 (裘亦楠 1990) 进行描述。

因此,储层表征与储层建模中要分层次对储集层的性质、类型、分布作出描述和表征,然后结合各种手段建立适于不同层次的模型。表征是手段,建模是目的,尽可能定量地表述储层的地质特征。

二、层次分析的方法

储层研究中的层次表征与层次建模 (简称层次分析法),可以简单地概括为层次划分、层次描述、层次解释、层次建模和层次归一。划分层次的目的在于分层次描述,对描述的结果进行成因上的解释,找出规律性的结论,建立适合不同层次的模型,借助地质和数学的方法及计算机技术,使不同层次的特征统一在一个体系中进行层次归一,达到预测的目的。

1. 层次划分

目前储层地质工作的对象,大都是在含油气盆地和拗陷隆起区进行的,因此可以将地层

学的基本单位界、系、统、组、段等作为基本层次,若盆地基底为第1级层次,则界系统组段依次可划分为第2~6级层次。再次级的层次还将包括油层组、砂层组和小层(单层),依次排列为第7、第8和第9级层次的内容。第9级层次的小层便是一个成因单元砂体,仍然可划分出不同的层次。Miall曾将河流砂体内部的界面(层次)划分出六级谱系。砂体内部的砂坝界面、冲刷面或再作用面,交错层层系组、层系和纹层界面,直到颗粒级别,这样可以划分出第10~15级层次。勘探阶段以第6级以上宏观规模为主,开发阶段以第7级以下微观规模为主。

层次编号是一个开放的可变系统,依据研究对象地质情况的复杂程度,可以自行确定层次级别的划分方案。复杂地区层次性可多,简单的地区层次性可少,不同层次的内容以一定的界面相互区别开来。

在研究青海油砂山储层地质模型时,研究的地层范围是 K_{1-1} 和 K_{1-3} 之间的层段,则以 K_{1-1} 和 K_{1-3} 标志层作为1级界面,研究的内容属1级层次的实体。而 K_{1-2} 又可以与 K_{1-1} 和 K_{1-3} 同时做为2级界面,将研究的对象分为两个2级层次实体。在各2级层次实体内部,尚有一些区域上较稳定的薄粉砂岩层和泥岩层,它们又成为3级界面,来划分3级层次实体。再下级层次是成因单元砂体和其它非砂体的界面,作为第4层次界面,划分出4级层次实体。砂体内部的层次划分运用Miall(1985)的结构要素分析法进行,依砂体类型不同划分不同的沉积界面和层次实体。

2. 层次描述

每个层次都具有两个要素,即层次界面(boundary surface)和层次实体。界面可以是简单的接触面,也可以是一个标志层。因此,层次描述要弄清这些界面的形态、起伏、连续性、分布范围和厚度变化以及它们所代表的级别。层次界面可以是板块边界、构造层界面和构造面,也可以是整合、不整合或假整合界面、相变界面、层系组或层系界面、纹层界面,甚至可以是颗粒接触界面。此外,微量元素异常沉积界面、碎屑岩地层中的泥灰岩、区域上稳定的泥岩、古风化壳以及生物碎屑层等也都是具有一定意义的界面。层次实体描述中要根据研究需要,对层次实体的几何形态、空间分布、相互关系以及其内部结构进行描述,力求确定三维特征。

比例尺在层次描述中十分重要。研究大范围、长时段的地层,采用小比例尺的地质图件,即可反映高级的层次界面,也可以使相应的层次实体一目了然,显示大尺度的旋回。从盆地断裂期的粗碎屑充填到拗陷期湖相沉积,最后演化到衰亡期的河流陆相充填旋回,在大比例尺图上是无法辨别的,但若描述砂体内部的建筑结构要素,甚至层理或纹层级别的特征,通常需要1:100,1:1甚至放大数倍才能直观表现出来。

露头上的层次描述比较容易,而地下界面的识别则取决于资料解释的分辨率。地震地层学是认识和描述大规模层次界面的主要手段,问题是地震分辨率仍然不高,多解性十分突出。测井解释是认识中等和部分小规模层次特征的依据;岩心分析是认识小规模直到微观层次的物质基础;测井解释的探边可以提供部分层次边界的信息,多种方法相互配合才能较好地进行层次描述。

3. 层次解释

层次解释的目的在于揭示层次实体、层次界面的分布规律及不同层次间的内在联系,进行成因分析。

事件地层学是一个重要的层次解释工具。运用事件沉积学观点进行层次解释时要把握以

下几点：①事件的时间尺度和空间尺度并非总成正比关系，长时间的事件不一定涉及的空间范围更大，而短时间的沉积事件不一定涉及的范围就小。例如，稳定的湖泊水体可以在相当长的时期保持不变，而干涸作用则可以在很短的时期内完成，前者影响范围小，后者影响范围大；②长时间事件形成的地层厚度，不一定大于短期事件沉积的厚度。地层沉积纪录中许多厚度大的地层，往往是灾变性的快速堆积，而沉积历史很长的却是厚度不大的泥岩或页岩。也就是说，罕见的并不是突变的，常见的也不一定代表正常的沉积过程；③突变、渐变与量变、质变的关系。渐变不等于量变，质变不等于突变。沉积环境质的变化可以在渐变中完成，也可以在突变中产生。一条河道的变化，可以在侧积作用的渐变中进行，也可以在一次洪水事件后突然完成。在低层次小范围中看来是突变的，不连续的质的变化，在高层次大范围内却是一个渐变的过程。如图 2—1 所示，如果用 $A_nB_nC_nD_n$ 的空白区表示渐变过程，用 $E_nA_nD_nF_n$ 的暗色区表示突变过程，长方形的厚度表示渐变比突变延续的时间长，纵轴代表时间轴，长方形的宽度表示层次的高低，它是一个能量、时间及沉积记录厚度的综合指标。所以，用横轴代表层次，斜线 F_nD_{n+1} 表示渐变过程，竖线 D_nF_n 表示突变过程，而斜线 A_1D_n 表示层次间的套合，将各不同层次复杂的渐变突变结果表示为一个渐变的过程。

层次解释中要充分运用泥沙运动力学、现代沉积、露头调查和模拟实验结果，旨在定量地解释沉积过程。

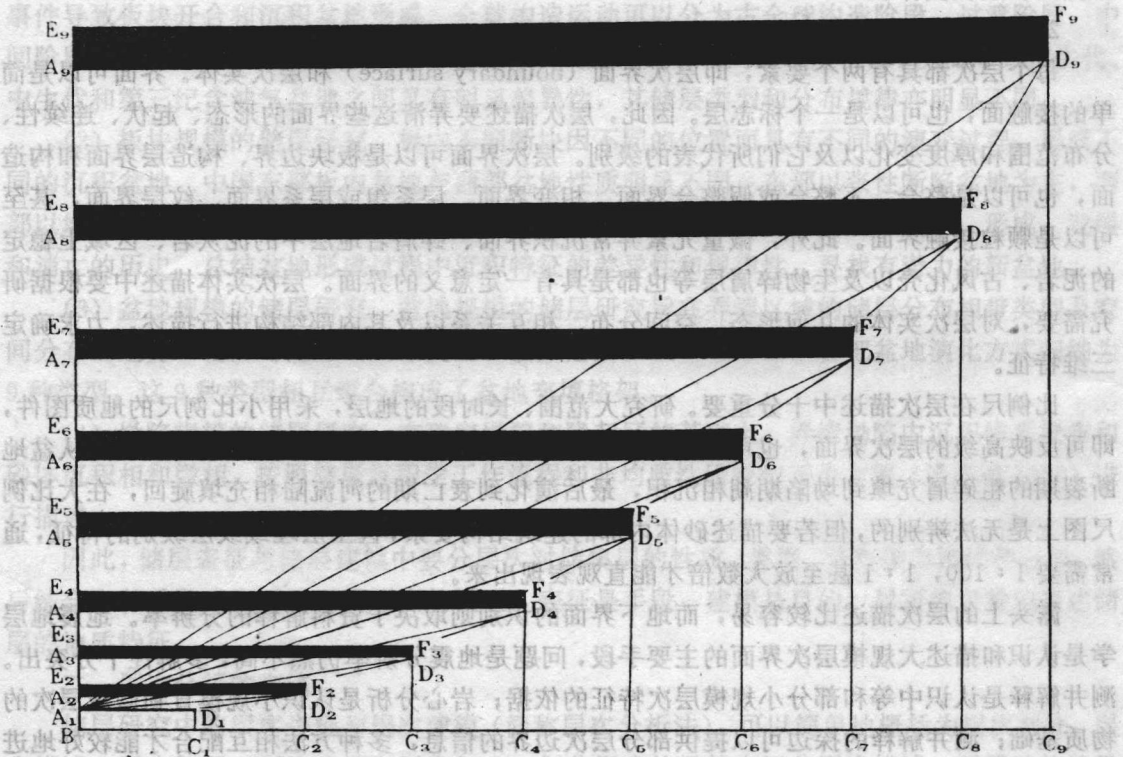


图 2—1 表示层次性及渐变、突变关系的理想图示

4. 层次建模
盆地以上级别的建模目前尚不成熟，盆地内及其更小规模的层次建模应包括以下内容：
(1) 沉积盆地的充填模型 如果一个盆地由时代不同的几套（几个层次）地层组成，则