

储层研究中的层次分析法

张昌民

(江汉石油学院地质系 湖北江陵 434102)

油气储层研究中的层次分析法,包括层次表征和层次建模两方面的内容。考虑油气储层的层次性规律,以地层学、沉积学、事件地质学和构造地质学为理论依据,以露头调查、现代沉积研究、室内实验、地震地层和层序地层学解释、测井解释、地层测试为手段,以现代数学地质和计算机模拟、图形显示技术为工具,通过层次划分、层次描述、层次解释、层次建模和层次归一五个步骤实现储层研究的目的。

关键词 储层研究 层次表征 层次建模

作者简介 张昌民 男 29岁 博士研究生 储层沉积学

一、储层表征和储层地质模型研究进展

石油地质的学科分工愈来愈细,生、储、盖、圈、运、保几乎都成了独立的学科分支,其中最引人注目的是储层地质学。从总体上看,储层研究是从宏观的盆地或区域生储盖组合,向微观范围的孔隙结构和孔隙形态研究方向发展;从定性的储集性好坏,向定量的绝对孔渗参数描述方向发展;从狭义的储层地质特征三大率,向广义的油藏动态预测方向发展,从而使储层研究成为贯穿“石油生产复杂游戏三个层次(包括早期勘探开发、二次采油和三次采油)”中必不可少的工作。为了反映这一新动向,提出了储层表征(reservoir characterization)这个新词,并逐渐取代了储层描述。

1985年在美国达拉斯召开的首届国际储层表征技术讨论会,将储层表征定义为“定量确定储层性质,识别地质信息及其空间变化的方法。研究的内容包括了地质特征、物性参数分布及空间可变性、模拟参数的确定及流体流动等。1989年和1991年召开了第二届和第三届国际储层表征技术研讨会,内容涉及非均质性研究、矿场研究、资料获取、井间地区储层模型和油田最优化管理等几个部分,前三项内容都是围绕建立储层地质模型而展开的。储层地质模型是储层表征的最高阶段。

模型是把某一具体物理现象按一定比例尺直观表现出来,它具有量化的意义,根据地质研究的详细程度可以把储层地质模型分为概念模型、静态模型和可预测模型^[1]。三种模型各适用于油田开发的不同阶段,研究的重点是三维地质模型,其核心内容是建立地质知识库和计算机内插外推技术。1990年第13届国际沉积学大会,1991年的AAPG年会和世界石油大

会都把储层地质模型列为重要议题，同时在英国、法国、荷兰、西班牙、挪威、美国开展大量协作攻关和国际性的联合行动；另一方面，计算机盆地模拟技术、定量沉积地层学技术日趋成熟，分形几何学和地质统计学的发展，为宏观储层研究提供了理论基础和建模手段。

二、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、含油气构造分析、沉积学研究都离不开层次性的划分。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等提出了由大到小的非均质性系列谱图，Weber^[2]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、大陆裂合和造山运动，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明显的地质差异，造成古生代、中生代和第三纪含油气盆地之间具有重要差异性^[3]，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，由其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^[4]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。

三、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层次，则界系统组段依次可划分为第2、3……6层次。再次级的层次还将包括亚段、油层组、亚组和小层（单

层),依次排列为第7、第8和第9层次的内容。第9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^[5]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、11、12、13、14和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,依据研究对象可以自行确定。据地质特征地质现象的复杂性确定层次的划分,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} 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二级层次实体,在各二级层次实体内部,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的结构要素分析法^[4]进行实施,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,它们所代表的级别。层次界面可以是板块边界、构造层界面、构造面,也可以是整合、不整合或假整合界面、沉积间断面、相变面、岩石顶底界面,层系组或层系界面,纹层界面,甚至可以是颗粒接触界面。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,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,则采用小比例尺的地质图件,既可反映高级的层次界面,也可以对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;岩芯分析是认识小规模直到微观层次的物质基础;试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) 渐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 1 所示, 如果用 $A_n B C_n D_n$ 的空白区表示渐变过程, 用 $E_n A_n D_n F_n$ 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 $F_n D_{n+1}$ 表示渐变过程, 竖线 $D_n F_n$ 表示突变过程, 而斜线 $A_1 D_n$ 表示层次间的套合, 将各不同层次的复杂的渐变突变结果表示为一个渐变的过程。

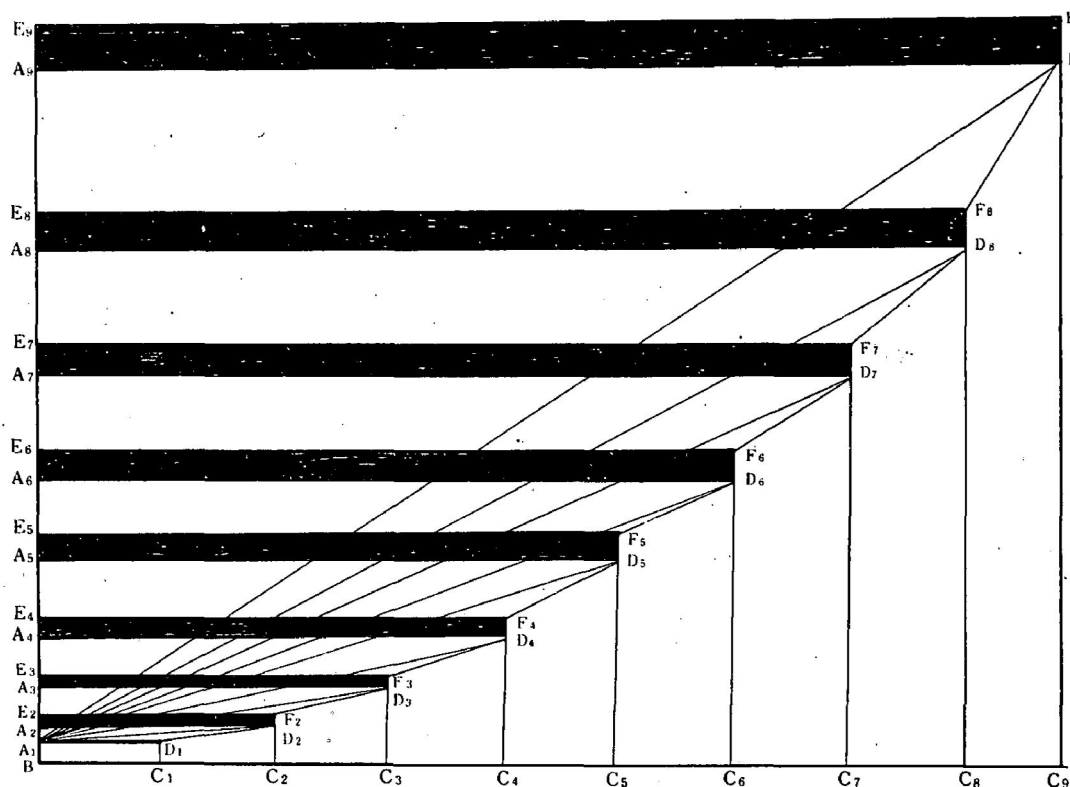


图 1 表示层次性及渐变突变关系的理想图示

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

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

可以首先建立盆地整体演化过程中形成的充填模式、充填序次;然后建立各地层单位的沉积模式,指出有利的储层分布部位,运用盆地数值模拟技术建立定量地质模型。

(2) 油层组规模的地质模型:包括沉积体系模式、微相模式;在此基础上建立砂泥岩和砂体分布三维格架模型,研究砂体形态、大小、连续性和连通性。此一规模的建模工作已经在我国许多油田展开,但大多是概念模型,还未达到静态模型和可预测模型。

(3) 砂体规模的地质模型:在确定不同砂体几何形态基础上,研究砂体内部的建筑结构要素、层理、岩石学、孔隙几何学特征,包括层内非均质性、微观孔隙特征和基本岩石相类型和物性特征,是最低规模上的模型。

盆地规模的充填模型是宏观模型,主要用于勘探评价阶段。油层组规模的地质模型主要用于指导油田开发和管理;如果一个油层组含有几个层次或几个同级层次的层段,则要考虑建立不同层次或不同段的地质模型。进入二次和三次采油阶段,需要研究砂体内部的非均质性,建立砂体内部的地质模型。目前国际上攻关的重点是这一级别的地质模型,它包括①砂体内部建筑结构模型,即建筑结构要素的形态、大小、相互配置关系,泥岩夹层的分布等;②建筑结构要素内部构成特征,包括组成各要素的内部构成特征的岩石相类型、规模,纵向和横向相互关系及其储集性能;③层理规模的地质模型,包括纹层间沿层系界面和层系内部的渗透率非均质性。因为交错层对油井动态具有直接影响^[6],所以近年来采用微渗透率仪直接测定交错层理直到纹层规模的渗透率特征,有人在长15 m的岩芯上测量了16000个渗透率值,测点间距达2 mm的网络,结论认为即使最均质的岩石也需大约10 cm的取样间隔;④显微规模的模型,交错纹层中有些纹层的矿物具有明显的定向排列或定向性不太明显,这就造成顺纹层方向的渗透率有较大差异,表现出不同的面孔率和孔隙喉道形态,使用SEM和定向薄片可以揭示这类特征。由上可见,层次划分和采样密度对所建模型的正确性具有极大的影响。

所建模型可以是物理模型,也可以是数学模型,或者二者兼具。通过直观的物理模型显示数学上的定量关系,建模的数学方法是目前攻关的重点之一。

5. 层次归一

包括两方面的内容,第一是地质模型的套合归一,第二是运用数学地质方法进行层次归一。

各层次的地质模型只是零散的、孤立的,还需要找出它们的关系,套合成一个有机的统一整体。大尺度的模型反映不了小范围的详细情况,小尺度模型又仅仅是全豹中的一斑。套合过程要根据各层次模型在空间上的相互关系进行组合,综合考虑哪些是储集有效部分,哪些是非储集部分,哪些是高渗带,哪些是低渗带,哪些砂体连通,哪些不连通,哪些隔层或夹层分布广,哪些分布有限,由此做出一个整体模型,通过计算机系统进行显示和统一管理,供勘探和开发中选择开发方案、加密井网、调整井别和实施三次采油中使用。美国德克萨斯大学的Gogging等人^[7]在亚历桑那州的佩基(Page)砂岩中,首先确定了一个风成砂岩的层理类型分布的地质模型,然后再研究各种层理类型的渗透率变化方式,做出了一个风成砂岩的储层地质模型。笔者等在青海油砂山地区,通过层次表征和层次建模方法,建立不同级别的地质模型,然后再相互套合形成一个高精度地质模型。

要建立有预测功能的各级地质模型,必须借助于数学地质这个工具,传统的多元统计手段很难考虑到地质体本身的结构性。近几年来地质统计学方法受到了人们的重视,它是以变差函数作为基本工具,在研究区域化变量的空间分布结构特征规律的基础上,选择各种合适

的克里格 (Kriging) 法, 以达到更精确的估计, 或对区域化变量进行条件模拟的一门数学地质的独立分支学科^[8]。地质统计学可以考虑空间上地质体的变化范围和不同方向的变异程度, 可以通过变差函数的套合将不同尺度的变化统一起来建立模型, 具有较好的预测功能。

另一种有潜力的手段是分形几何学方法^[9]。分形理论在研究油气田的分布、泥质岩层的厚度和数目关系、沉积环境和沉积相、孔隙的三维形态、成岩次生孔隙、裂缝的分布、注水过程的指进现象等方面已经显示了其作用。

计算机数据管理和图形显示技术是层次归一的重要一环, 各层次模型组成一个模型库, 用图形显示技术根据工作需要直观显示某一层次的模型, 直接为勘探开发提供依据, 这将是层次归一技术的一个重点任务。

四、结 论

(1) 储层研究中的层次表征和层次建模 (简称层次分析法), 反映了地质现象和地质理论的客观规律, 考虑了油田勘探开发各阶段的需要, 旨在定量化地描述储层分布特征、形成机制, 建立适合于不同工作层次的地质模型。

(2) 储层层次表征和层次建模思想是根据油气储层的成因特点, 以地层学、沉积岩石学、动力沉积学、过程沉积学、事件沉积学、比较沉积学、构造地质学等为主要依据, 以露头调查、现代沉积、室内实验、地震地层、层序地层、测井解释、地层测试等为基本手段, 以现代数学地质理论方法和计算机技术为工具, 通过层次划分、层次描述、层次解释、层次建模和层次归一等五个步骤实现储层研究的目的。

本文反映了笔者在学部委员童宪章教授, 石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院裘亦楠总地质师指导下博士论文的学术思想。裘亦楠老师的学术教导为本文的形成奠定了基础, 贺自爱教授级高级工程师和俞惠隆副教授审阅了初稿并做了重要的指导性修改, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 裘亦楠. 储层地质模型. 石油学报, 1991, 12 (4): 55—62.
- 2 Weber K J. How heterogeneity affects oil recovery. In Lake L W, Carroll H B, eds., Reservoir characterization. Orlando: Academic Press, 1986. 487—543.
- 3 朱 夏. 朱夏论中国含油气盆地构造. 北京: 石油工业出版社, 1986. 94—121.
- 4 米阿尔 A D. 河流沉积体系分析. 见: AAPG 进修丛书 (20). 北京: 石油工业出版社, 1987. 33—35.
- 5 Miall A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth Science Reviews*, 1985 22 (2): 261—308.
- 6 Lord M E, Collins R E. Effects of crossbedding on well performance. SPE19587, San Antonio; [s. n.] 1989. 1—9.
- 7 Gogging D J, et al. Patterns of permeability in eolian deposits: Page sandstone (Jurassic), Northeastern Arizona. *SPE Formation Evaluation*, 1988, 3 (6): 297—306.
- 8 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学. 北京: 地质出版社, 1988. 8—181.
- 9 刘 洪. 当代新科学扫描. 科技导报, 1991, (2): 17—21.

HIERARCHY ANALYSIS IN RESERVOIR RESEARCHES

Zhang Changmin

(Geological Department, Jiangnan College of Petroleum, Jiangling, Hubei)

Abstract

Hierarchy analysis in reservoir researches is a new methodology including hierarchy characterization and hierarchy modelling. The method made good use of stratigraphy, sedimentology, event geology and structural geology as theoretical grounds, outcrop, recent sediment survey, flume experiment, seismic stratigraphy, sequence stratigraphy, log interpretation, formation test as means, and modern geomathematics, computer modelling as tools to do hierarchy analysis. The analysis process in reservoirs can be done by determination, description, interpretation, modelling and combination of hierarchy.