

油藏储层非均质性研究综述

张云鹏^{1,2}, 汤艳³

(1 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074; 2 中国地质大学资源学院, 武汉 430074; 3 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

摘要: 储层非均质性研究是精细油藏描述的核心内容, 自产生以来已经取得了显著发展。阐述了储层非均质性研究的发展过程, 概述了储层非均质性的分类及描述, 并系统总结了目前研究储层物性特征和储层非均质性的方法, 包括有储层野外露头分析、沉积体系分析、层次界面分析、结构单元和流动单元分析、高分辨率层序学研究、统计学方法以及现在比较推崇的劳伦兹曲线法等, 指出了描述储层非均质性的相关参数和应用的关键, 以期老区块的剩余油开发以及新探区油气开发有利区带的预测提供科学依据。

关键词: 储层非均质性; 储层描述; 剩余油开发; 劳伦兹曲线法; 渗透率变异系数

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

储层非均质性研究是油藏描述中最核心的内容^[1]。在油田开发中后期, 储层中的剩余油高度分散, 挖潜难度越来越大。储层的不同层次不同规模的非均质性是造成剩余油高度分散的主要地质因素^[2], 因此, 必须深入研究储层各层次的非均质问题, 更加精细地进行储层描述和预测, 这是深度开发油田, 提高采收率的基础和关键^[1,3]。

1 研究现状

储层非均质性的研究开始于 20 世纪 70~80 年代, 国际上 1985、1989、1991 年分别召开了 3 届储层表征技术讨论会, 从而掀起了储层研究的热潮。从六七十年代的沉积环境分析和相模式研究到 20 世纪 80 年代的沉积体系分析和以 Cross 发起的高分辨率层序地层学研究, 从以高密度开发井网为基础的精细地质模型研究到储层露头精细研究和随机建模技术, 国内外的储层非均质性研究已形成了许多比较成熟的理论和技术, 其研究

内容与领域在不断加深, 同时, 有关储层非均质性的研究技术和方法也在不断地向定量化、精细化的方向发展^[4]。近十年来, 世界上各大石油公司和科研院所不惜重金开展露头精细解剖, 力图建立各类储层的原型模型, 积累地质知识库, 这已成为当前这一研究领域的最新热点, 最为成功的国外项目当属 BP 进行的 Gypsy 剖面研究^[5]。在微观储层非均质性研究方面, 地质统计学变差函数理论及分形几何学等理论已展示出广阔的应用前景^[6-8], 并为随机建模等模拟技术的发展奠定了理论基础。

2 储层非均质性表征

2.1 储层非均质性的分类

储层非均质性的划分方案很多, 其分类依据主要有规模、成因和对流体的影响程度等几个方面。Pettijohn 等根据规模大小划分出 5 个层次: ①油藏规模的沉积相及造成的层间非均质性; ②油层规模的沉积微相和相变关系; ③砂体内韵律性、沉积结构构造等非均质性; ④岩心规模的孔隙度、渗透率等各向异性; ⑤显微尺度的孔隙结构、

收稿日期: 2010-09-04

作者简介: 张云鹏(1981—), 男, 在读博士, 主要从事盆地构造、沉积方面的研究。E-mail: ypzhang518@tom.com

类型、矿物学特征等。而 Weber 根据非均质性成因给出了如下的分类系统^[3] (图 1)。

1 封闭、半封闭 不封闭断层	
2 成因单元边界	
3 成因单元内部 渗透分带	
4 成因单元内部 夹层	
5 纹层交错层理	
6 微观非均质性 结构类型	
7 封闭、开启的 裂缝	

图 1 储层非均质性类型分类(据文献 [1])

Fig. 1 Classification of the reservoir heterogeneity
(from reference [1])

2.2 储层非均质性的描述

储层非均质性的描述和分析主要是反映其对油藏流体流动影响的程度和方式。一般要求分层次描述储层的非均质性,影响因素及其对流体运动、油田采收率的可能影响,包括定性和定量描述^[1]。

2.2.1 定性描述

首先是地质特征的描述,如断层、裂缝、层理和夹层等。主要是要考虑规模大小问题,可以借助的资料包括岩心资料、成像测井(FMI)、高分辨率地层倾角测井等,在此基础上再进行储层非均质性分析。对于 10~100 m 范围的中型非均质性,必须依赖于野外露头类比、现代沉积类比或密井网解剖建立的原型模型、地质知识库等;米级及更小的小型非均质性仅在岩心中可以分辨出,建立沉积模型,正确识别沉积环境和成岩历史是较为有效的方法和手段。微观非均质性还需要借助薄片鉴定和扫描电镜的观察。

2.2.2 定量描述

一些直接测量手段可能用于非均质性的定性

描述,但多数情况下仅能通过建立模型来表征^[8]。

3 储层非均质性的研究方法

3.1 储层露头研究

露头储层研究具有直观性、完整性、精确性和可检验性等优点^[1]。露头研究的总体思路是在野外实测和室内测试所得大量资料的基础上进行沉积学分析、成岩分析、物性分析,获得储层原型模型,积累地质知识库,建立储层地质模型,以达到预测地下储层的目的。

3.2 沉积体系分析法

沉积体系分析法的有关理论和方法最早起源于美国学者对海湾盆地的研究。其从本质上讲属成因地层学,即在认识沉积环境和其他同沉积地质背景的基础上,解释大型沉积体的相互关系。这一分析方法的基础是 Walther 相律和相模式概念在整个沉积盆地范围的应用和引申^[1]。沉积体系分析强调了大型沉积体的空间关系、沉积体内部和外部几何形态的研究。该方法在油气勘探开发中受到了特别的重视。

3.3 层次界面分析法

层次界面分析法即首先将储层单元分层次描述,并对描述的结果进行成因上的解释,以找出规律性的结论,建立适合不同层次的模型;最后再借助地质和数学方法将不同层次的特征统一到一个体系中进行层次归一,以达到预测的目的^[1,9]。整个分析过程可简单概括为以下 5 个阶段:

(1) 层次划分 即在地层学基本单位的基础上划分出次级层次。Miall (1988) 扩展 Jackson (1975)、Allen (1983)、Bridge 和 Gorden (1983) 等人的研究成果,将河流沉积砂体划分出 6 级谱系^[10]。

(2) 层次描述 即对层次界面及层次实体进行描述,目的是弄清界面的形成机制、形态、起伏、连续性、分布范围和厚度变化及级别,层次实体的几何形态、空间分布范围、相互关系及其内部结构。

(3) 层次解释 其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。事件地层学是其主要的工具。

(4)层次建模 随着地质模型的广泛应用,单一的地质模型已远远不能满足实际生产的需要,只有多层次的系列地质模型的建立,才能在不同尺度上更加准确地描述储层。

(5)层次归一 包括地质模型的套合及运用数学地质方法进行层次归一,目的在于得到系统的认识。

3.4 结构单元和流动单元研究方法

目前国内外对油田储层沉积的非均质性研究主要是从流动单元的角度进行研究,砂体内部的构成研究在含油气盆地沉积学中日益重要^[11, 12]。

目前,储层流动单元研究已经成为储层表征和建模的新技术,流动单元是精细油藏描述的关键和最基本单位。流动单元的研究为认识油藏的非均质性提供了有效手段,也是精细油藏描述的重要发展方向和攻关目标。Miall^[13]最早提出河流砂体构成单元概念,指出沉积体是由各种规模的岩相和结构集合体构成的,其规模范围从单个小型波浪到整个沉积体系形成的集合体^[13]。各国学者在一致认为以微相单元作为最基本的沉积构成单位,以此为基础再逐级进行划分和研究。目前对所有的沉积环境都有一个比较统一的构成单元划分标准(表1)。

表1 河流沉积体系和浊流沉积体系规模分级系统对比

Table1 The comparison of the size classification between the fluvial and turbidite depositional systems

浊流沉积体系 ^[14]		河流沉积体系 ^[15]		地层级别	时间范围/a	底形级别 ^[16]
级别	举例	级别	举例			
1	盆地充填扇复合体	未定	盆地充填、冲刷(或河流)复合体	群、超群	10 ⁶ ~10 ⁷	
2	浊流沉积体系、扇	6	河流沉积体系、扇	组段	10 ⁵ ~10 ⁶	
3	扇朵、河道—天然堤复合体	5	主河道	舌状体	10 ⁴ ~10 ⁶	巨型底形
4	单个河道充填	4	点沙坝、侧沙坝	层	10 ² ~10 ³	巨型底形
5	岩相、层理式样侵蚀与充填	3	巨型底形的增长		10 ⁰ ~10 ¹	中型底形
		2	类似岩相的层系组		10 ⁻² ~10 ⁻¹	中型底形
		1	岩相单元		10 ⁻⁵ ~10 ⁻³	小型底形

3.5 高分辨率层序地层学研究

该内容是随着油田开发后期油藏精细描述而发展起来的。其任务是以岩心、三维露头、测井和高分辨率地震剖面为基础,运用精细层序划分和对比技术对三维地层关系进行预测,并建立起各级层序地层对比格架^[17],其理论核心是:在基准面旋回变化过程中,由于可容空间与沉积物补给通量比值的变化,相同沉积体系域或相域中发生沉积物的体积分配作用,导致沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序、相类型及岩石结构发生变化,这些变化是其在基准面旋回中所处的位置和可容纳空间的函数,因此,由基准面旋回所控制的等时地层单元的地层分布形式是有规律可循的,而且是可以预测的。Cross领导的科罗拉多矿业学院成因地层研究组在这一领域取得了突出成就^[18]。

3.6 地质统计学方法

储层的非均质性表现为储层的物性参数,如孔隙度、渗透率、厚度、夹层数等的不均匀性。其既具有结构性,又具有随机性,是区域变化量。根据地质统计学理论,通过半变异函数(式(1)及图2),利用适当的拟合模型(如球状模型、高斯模型、指数模型等),可对储层非均质性的变化幅度、变化速率以及变化的随机性进行定量描述。这套理论在实际应用中效果显著^[7, 19]。

$$\gamma(h, a) = 1/2E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = 1/2\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad (1)$$

式中: $Z(x)$ 为某一区域变化量;

h 为距离;

a 为方向;

$\gamma(h, a)$ 为半变异函数。

半变异函数的这些特征值反映了储层非均质性的空间变化特征。

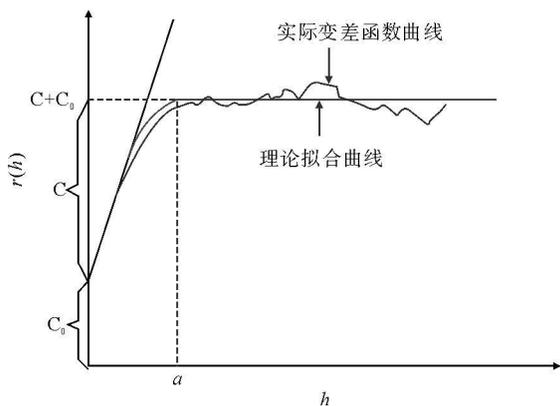


图2 半变异函数示意图

Fig. 2 The sketch map of half-variance function

3.7 劳伦兹曲线法

该方法是将岩心或测井所测得的渗透率数值从大到小排成一列, 分别计算相应的渗透率贡献百分数和其对应的岩样块数百分数或厚度百分数, 在直角坐标系上标绘成劳伦兹曲线^[20,22], 如图3a所示。

对于完全均质的油藏, 劳伦兹曲线是一条对角线AC(即10%样品渗透率贡献10%, 20%样品渗透率贡献20%……), 显然只有在每个样品的渗透率完全相等的情况下才会出现这种情况。图3a中弧线ADC与对角线AC的包络面积愈大表示非均质愈严重。所包含的面积ADCA与三角形面积ABCA之比称之为劳伦兹系数, 也是样品非均质程度的一种表达方式, 它的范围在0到1.0之间。劳伦兹系数为0时表示极端均质, 为1时表示极端非均质。

将图3a中渗透率贡献率及其对应的岩样块数

百分数分别进行倒数变换, 并在直角坐标下作图, 可以将不同形态的渗透率累积分布曲线转换成斜率不同的直线(图3b)。其中, 极端均质储层的斜率为1, 极端非均质储层的斜率为0, 常规非均质储层的斜率则为0~1。将0~1斜率值定义为储层非均质程度系数, 以此定量表征储层宏观非均质程度, 该斜率值与储层非均质程度成反比。

劳伦兹曲线法的优点之一是既适合于任何渗透率分布类型油藏, 又使求得的渗透率变异系数数值在0(均质)到1.0(极端非均质)之间, 是有界的; 优点之二是直观, 包络面积大小与油藏的非均质程度具相关性。从图中可以直接得知油藏的非均质程度, 并可读得不同岩样块数百分数下的渗透率贡献值。因此, 劳伦兹曲线法是比较推崇的一种计算储层宏观非均质性的方法。

4 结语

储层非均质性对油气的聚集、产出、分布和油气藏的形成等起着至关重要的作用。特别是在油田开发中后期, 在对老区块进行工艺调整、剩余油挖潜、提高采收率过程中, 储层非均质性更是核心的研究内容。通过几十年的发展, 储层非均质性的研究内容不断扩展, 研究领域不断拓宽, 研究方法与技术也日趋成熟^[1, 2, 23, 24]。今后, 综合利用测井、地震、计算机和地质建模等多种手段研究储层非均质性将是必然的趋势。同时, 现有的储层非均质性研究基本上都是对现今储层内部结构的研究, 这在老油区开发中起到了决定性的指导作用。

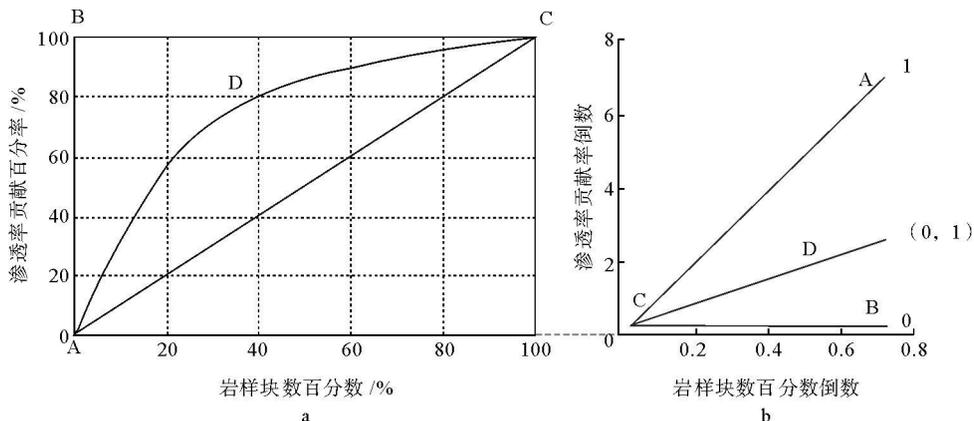


图3 劳伦兹曲线示意图

Fig. 3 The Lorenz curve diagram

随着油气田勘探形势的日益严峻,储层非均质性研究也将向更深层次发展,而研究储层在油气藏形成时期的原始面貌及其受成岩、构造等因素影响所产生的变化则有助于预测新探区油气开发的有利区带,是今后储层非均质性研究的新方向。

参考文献:

- [1] 穆龙新. 储层精细研究方法[M]. 北京:石油工业出版社, 2000: 69-95.
- [2] 裘怿楠. 油气储层评价技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1993: 75-86.
- [3] Weber K J. How heterogeneity affects oil recovery [M]// Lake L W, Carroll H B. Reservoir Characterization; Orlando, Florida; Academic Press 1986: 665-672.
- [4] 熊琦华. 油气储层地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 1998: 129-135.
- [5] 贾爱林. 储层地质模型建立步骤[J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4): 32-36.
- [6] 王家华. 油气储层随机建模[M]. 北京:石油工业出版社, 2001: 27-36.
- [7] 何 琰, 殷 军, 吴念胜. 储层非均质性描述的地质统计学方法[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(3): 13-15.
- [8] 罗明高. 定量储层地质学[M]. 北京:地质出版社, 1998: 58-73.
- [9] 张昌民. 储层研究中的层次分析方法[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 344-350.
- [10] Miall A D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones; lessons from outcrop studies[J]. AAPG Bull., 1988, 72(6): 682-697.
- [11] 窦之林. 储层流动单元研究[M]. 北京:石油工业出版社, 2000: 135-147.
- [12] 赵翰卿. 储层非均质体系、砂体内部建筑结构和流动单元研究思路探讨[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(6): 16-19.
- [13] Miall A D. Architectural-element analysis; a new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22(4): 261-308.
- [14] Mutti E, Normark W R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems; problems and concepts [M]// Leggett J K, Zuffa G G. Marine clastic sedimentology: concepts and case studies. London: Graham and Troutman, 1987: 1-38.
- [15] Miall A D. 河流沉积体系分析[M]. 北京:石油工业出版社, 1987: 25-29.
- [16] Jackson R G II. Hierarchical attributes and unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1975, 86: 1 523-1 533.
- [17] Cross T A, Lessenger M A. Sediment volume partitioning; rational for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation[C]// Predictive High-Resolution Sequence Stratigraphy, 1996: 547-559.
- [18] 罗立民. 河湖沉积体系三维高分辨率层序地层学[M]. 北京:地质出版社, 1999: 55-58.
- [19] 肖 蔚. 苏北溱潼凹陷台兴油田储层非均质性研究[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 523-526.
- [20] 陈元千, 李 墨. 现代油藏工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2001: 252-254.
- [21] 李春花, 喻高明, 胡福建. 储层宏观非均质性的研究方法[J]. 内蒙古石油化工, 2008(9): 163-164.
- [22] 严 科, 杨少春, 任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 870-879.
- [23] Weber K J, Kantorowicz J D, Williams H. Geological modeling of hydrocarbon reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 1991, 8(2): 245-246.
- [24] 薛叔浩. 湖盆沉积地质与油气勘探[M]. 北京:石油工业出版社, 2002: 159-164.

A REVIEW OF RESERVOIR HETEROGENEITY RESEARCH

ZHANG Yunpeng^{1,2}, TANG Yan³

(1 Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences Wuhan 430074, China;

2 Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3 Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The research of reservoir heterogeneity has remained as the core of fine reservoir description since its appearance, and has achieved remarkable progress so far. This paper briefed the history of the reservoir heterogeneity research, summarized its classification and description scheme, and concluded with the state of the art methods for the research of reservoir properties and heterogeneity, including the description of outcrop, sedimentary system analysis, level interface analysis, structural unit and flow unit analysis, high-resolution sequence study, statistics method and Lorentz curve method which is now commonly used. Key parameters and their applications in reservoir heterogeneity description are emphasized in order to provide a scientific basis for the residual oil exploitation in old blocks, and the forecast of favorable zone in new oil and gas exploration areas.

Key words: reservoir heterogeneity; reservoir description; residual oil exploitation; Lorentz Curve Method; permeability variation coefficient

(上接第5页)

STUDY OF SEDIMENTARY MICROFACIES IN XIJIANG 24-3 OIL FIELD, PEARL RIVER MOUTH BASIN

ZHOU Chaoyu¹, CHEN Gongyang¹, LIANG Wei², ZHANG Wei²

(1 College of Computer Science Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China;

2 Research Institute of CNOOC Nanhai East Corporation, Guangzhou 510240, China)

Abstract: Through the observation of cores and well logging data using sedimentological methods, the types and characteristics of sedimentary microfacies of the Xijiang 24-3 Oil Field have been carefully studied. It reveals that deltaic plain and deltaic front deposits dominate the sequence. 8 types of microfacies are recognized. We grouped the microfacies in accordance with their temporal and spatial distribution. It suggested that the reservoirs of the region mainly consist of the microfacies of distributary channels in the delta plain, and the subaqueous distributary channels, mouth bars, distributary bars and sand sheets in the delta front. They are the favorable targets for further exploration.

Key words: sedimentary microfacies; delta facies; distributary channel; Xijiang 24-3 Oil Field