

The Research Status and Development Tendency of Carbonate Reservoir Heterogeneity

Yuedong Sun*, Nian Chen, Ya Gao, Yuanqing Lu, Zhonggui Hu#

College of Geoscience, Yangtze University, Wuhan Hubei
Email: syd0503@163.com, #hgz1978@yangtzeu.edu.cn

Received: Mar. 30th, 2016; accepted: Apr. 19th, 2016; published: Apr. 22nd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Reservoir heterogeneity refers to the spatial distribution and various internal attributes of reservoir are uneven, because of the effect of depositional environment, diagenesis and tectonic in the process of reservoir formation. Reservoir heterogeneity plays an important role on exploitation of oil and gas as well as redevelopment of the residual oil in old fields, so it has been the difficulty and emphasis of reservoir research. With most of continental clastic oil-gas fields entering into the middle or last period of development, the exploration and development of marine carbonate oil-gas fields become increasingly important. As the exploration of marine carbonate oil-gas fields in Tarim, Sichuan Basin made a major breakthrough; the research and evaluation of carbonate reservoir heterogeneity become more and more important. Summarizing the research status, characterization, research methods and so on of carbonate reservoir heterogeneity by referring to large amount of data and drawing lessons from clastic reservoir heterogeneity research tools, with the combination of multiple disciplines and the application of technology of reservoir geologic modeling, carbonate reservoir heterogeneity research will reach a new stage.

Keywords

Carbonate Reservoir, Heterogeneity, Lorenz Curve, Geological Modeling for Reservoir

碳酸盐岩储层非均质性研究现状及发展趋势

孙跃东*, 陈念, 高雅, 卢苑青, 胡忠贵#

*第一作者。
#通讯作者。

长江大学地球科学学院, 湖北 武汉
Email: syd0503@163.com, #hgz1978@yangtzeu.edu.cn

收稿日期: 2016年3月30日; 录用日期: 2016年4月19日; 发布日期: 2016年4月22日

摘要

储层非均质性是指储层由于在形成过程中受沉积、成岩作用和构造作用的影响, 在空间分布及内部各种属性上都存在的不均匀的变化。其对油气的开发利用以及中老油田剩余油的再开发具有重要作用, 所以储层非均质性一直是储层研究的重点、难点。随着我国大部分陆相碎屑岩油气田已进入中晚期, 所以海相碳酸盐岩型油气藏在我国的油气田勘探开发中日益重要。随着塔里木、四川盆地的海相碳酸盐岩型油气田的勘探取得重大突破后, 碳酸盐岩储层非均质性的研究与评价愈显重要。通过查阅大量资料以及借鉴碎屑岩储层非均质性研究手段, 归纳总结碳酸盐岩储层非均质性的研究现状、表征、研究方法等内容, 随着多学科相结合以及储层地质建模技术的应用, 碳酸盐岩储层非均质性的研究必定会达到一个新的阶段。

关键词

碳酸盐岩储层, 非均质性, 劳伦兹曲线, 储层地质建模

1. 国内外研究现状

关于储层非均质性的研究始于 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。1985 年中国将“中国陆相储层特征及其评价”列为部级科技攻关重点项目[1], 由此拉开了中国储层研究的序幕, 而储层的非均质性正是储层研究中的核心内容。经过几十年的发展, 国内外关于储层非均质性研究已形成了比较成熟的理论和技术, 其研究内容与领域不断扩宽, 如沉积学和层序地层学的理论在储层非均质性研究中的应用; 关于储层非均质性的表征, 从定性到半定量、定量, 从单参数到多参数综合定量评价; 以及对储层露头的精细研究和储层地质建模技术的广泛应用。近年来, 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, 最为成功的国外实例当属 BP 公司进行的 Gypsy 剖面研究[2]。

2. 储层非均质性的表征

2.1. 储层非均质性的分类

储层的结构复杂, 不同的学者依据其研究目的, 对储层非均质性的规模、层次及内容的研究各自有所侧重。对储层非均质性进行分类、描述和分析, 其本身就是储层模型化的过程。1) Pettijohn 和 Siever (1973)在研究河流相储层时, 按非均质性规模的大小, 提出五种规模储层非均质性, 分别是油藏规模、层规模、砂体规模、层理规模及孔隙规模。2) Weber (1986)根据 Pettijohn 的思路, 不仅考虑非均质性规模, 同时考虑构造、隔夹层、原油性质对非均质性的影响, 将储层的非均质性分为八类, ①封闭、半封闭、未封闭断层; ②成因单元边界; ③成因单元内渗透层; ④成因单元内隔夹层; ⑤纹层和交错层理; ⑥微观非均质性; ⑦封闭、开启裂缝; ⑧原油的粘度变化和沥青垫。3) Haldorsen (1983)根据储层地质建模的需要, 按照与孔隙均值有关的体积分布, 将储层非均质性划分为四个级别, ①微观非均质性即孔隙和颗粒规模; ②宏观非均质性即岩心规模; ③大型非均质性即模拟模型中的大型网块; ④巨型非

均质性即地层或区域规模。4)裘亦楠(1987, 1989, 1992)根据我国陆相储层特征(规模)及生产实际, 提出了一套较完整且实用的分类方案, 即①层间非均质性, ②平面非均质性, ③层内非均质性, ④孔隙非均质性。我国各油田根据陆相储层特征及生产实践, 以裘亦楠的分类方案为基础, 综合各种分类方案, 提出了一套较完整且实用的分类方案(表 1), 目前国内已普遍采用[3]。对于碳酸盐岩储层非均质性的评价也大多参考此类。

2.2. 储层非均质性的描述

储层非均质性的准确、科学描述, 有利于我们对储层非均质性的感性认识以及储层物性的整体把握。由于储层非均质性的复杂性, 一般要求分层次描述储层非均质性, 根据储层非均质性的划分方案, 可按规模从大到小对其进行描述, 包括定性和定量描述。

1、定性描述

主要是对影响储层物性的地质特征的描述, 如断层、溶洞、裂缝、夹层、后生变化、空隙类型及分布等。可以借助的资料有岩心资料、测井资料、岩石薄片、野外露头剖面实测资料以及岩样测试资料等, 在此基础上再进行储层非均质性的定性分析。对于较大规模(10~100 m)的储层非均质性, 则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; 米级及更小规模的储层非均质性则可借助岩心资料, 正确识别沉积环境和成岩历史, 建立沉积模型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等测试手段的观察, 进行孔、洞、缝的统计, 如孔、洞的分布、类型、面孔率等; 裂缝的分布、性质、开启状态、密度等, 从而可以定性判断储层物性情况以及非均质性。

2、定量描述

因沉积、构造运动以及后期强烈的风化、剥蚀和淋滤作用, 使得碳酸盐岩储层的非均质性极为严重。因此, 对碳酸盐岩储层非均质性的定量表征一直是困扰人们的技术难题, 到目前为止还没有一套统一的定量表征碳酸盐岩储层非均质性的技术方法。

1) 非均质性综合指数

传统定量描述非均质性的参数有孔隙度、渗透率以及渗透率变异系数、突进系数与级差等参数等。但是以上均是利用单一参数或指标从储层的某一角度对储层的物性进行评价, 若使用各个参数表征的非均质性不一致时就难以处理, 所以很多学者提出多参数定量评价方法、非均质性综合指数等来定量刻画储层的非均质性。

Table 1. The commonly used classification of reservoir heterogeneity (Yu Xinghe, 2009) [3]

表 1. 常用储层非均质性分类(据于兴河, 2009, 有改动) [3]

储层非均质性	分类	含义	研究内容
宏观非均质性	层间非均质性	纵向上的差异性	层系的旋回、渗透率、隔层等
	平面非均质性	一个储集体平面上的差异	储集体的连通程度、平面孔隙度变化及方向性
	层内非均质性	层内垂向上的差异	层理、渗透率差异程度、夹层分布等
微观非均质性	孔隙非均质性	孔隙与吼道的相互关系	孔隙与吼道的大小、均匀程度, 以及两者的配置关系和连通程度
	颗粒非均质性	岩石颗粒大小、形状分选、排列和接触关系	岩石颗粒的定向性及矿物学特征
	填隙物非均质性	填隙物的差异	填隙物的含量、矿物组成、产状及其敏感性等

张兴平等[4]首先利用多个参数的数理统计获得多参数综合评价标准差,从多个方面考虑非均质性,避免单一参数描述的局限性以及无界性。在计算综合指数时,参数需要进行标准化处理化为0-1,各参数权重可由参数变异系数除以各参数变异系数的和来求取。碳酸盐岩储层的结构异常复杂,仅使用单一参数不能准确而全面地表征其非均质性,该方法综合考虑了影响碳酸盐非均质性的诸多因素,具有较强的实践意义。此后不同学者不断改进,根据研究的实际问题,在不同的条件下,采用不同的方法求取非均质性综合指数,如波叠加原理[5]、非线性映射法[6]、灰色聚类方法[7]、熵权方法[8]、随机多步建模技术[9]等。其中岳大力[5]等采用波叠加原理方法,来求取的非均质综合指数,对南海流花11-1油田礁灰岩储层的层内、层间及平面非均质性进行研究取得了良好的效果。

2) 分类表征法

碳酸盐岩具有最大的特征是具有易变性和易溶性[10],所以后期的风化、剥蚀和淋滤等作用对碳酸盐岩的改造,导致碳酸盐岩储层结构复杂化,使得用渗透率变异系数、渗透率突进系数、渗透率级差等参数不能准确描述碳酸盐岩储层的非均质性[11]。根据储集空间类型的不同,可以把碳酸盐岩储层分为孔隙型储层、裂缝型储层和孔洞型储层3类,不同储集空间的储层孔隙度和渗透率差异可以很大。

因此,对于具有孔隙、裂缝和溶洞不同储集空间的碳酸盐岩储层,王立恩等[11]提出了分类表征方法。对于孔隙型碳酸盐岩储层仍采用渗透率变异系数、渗透率突进系数、渗透率级差和夹层密度等常规方法或者采用非均质性综合指数来定量表征储层的非均质程度;对于具有双重孔隙结构的储层和孔洞型储层则可用储层的各种孔隙度与总孔隙度的比值,基质渗透率、裂缝渗透率与总渗透率的比值来定量描述储层的非均质程度。

据此定义下面的参数:

孔隙度贡献率(φ_0)是储层岩石的各种孔隙度与总孔隙度的比值,其表达式为:

$$\varphi_0 = \varphi_i / \varphi_t \quad (1)$$

式中: φ_i 为储层岩石的裂缝孔隙度或者孔洞孔隙度,%; φ_t 为储层岩石的总孔隙度,%。 φ_0 值在0~1之间,越接近1,储层的非均质性程度越高;越接近0,储层越均匀。

渗透率贡献率(K_0)是储层岩石的裂缝渗透率与总渗透率的比值,其表达式为:

$$K_0 = K_i / K_t \quad (2)$$

式中: K_i 为储层岩石的裂缝渗透率,单位为 μm^2 ; K_t 为储层岩石的总渗透率,单位为 μm^2 。 K_0 值也在0~1之间,越接近1,储层的非均质性程度越高;越接近0,储层越均匀。

3) 其他方法

除以上两种方法外,其他学者也应用了不同的方法以求尽可能准确地表征碳酸盐储层非均质性,如经验公式法,该法主要是通过分析表征储层非均质性的参数如孔隙度、渗透率等与测井的自然伽马、补偿声波以及深度等的相关关系,用回归法求出孔隙度、渗透率与自然伽马、补偿声波及深度之间的经验公式,并用经验公式求出研究区的孔隙度、渗透率等;或者根据不同的经验公式来定量描述储层非均质性。强平[12]等使用该方法研究了川东铁山、雷音铺构造嘉陵江组二段二亚段的碳酸盐岩储层,使用岩心资料所得的孔隙度与自然伽马、补偿声波二元二次回归得出经验公式,再利用经验公式对未取心井及井段进行孔隙度的计算,然后识别储层发育和不发育层段,从而定量研究了该区储层的非均质性。此外还有刘泽容[13]应用变差函数,隋少强[14]应用地质统计方法来定量研究储层非均质性。

3. 研究方法与技术

3.1. 典型露头剖面研究

1、野外典型剖面现场研究

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。由于目前修路、采石等人为工程,使得原来风化严重和植被覆盖严重的剖面暴露出来,为地质工作者开展野外研究提供了直观且准确的素材,同时也为野外工作提供了方便。根据所研究的目的储集层,可在周边寻找包括该目的储集层的典型野外露头剖面,对整套地层进行细致分层、详细描述、密集采样和剖面实测工作,同时也要对每个小层的沉积相和沉积微相有一个初步的判断,得到第一手的资料,并且对重要现象画简单的素描图或拍照。由于碳酸盐岩储集层类型中,礁滩型是最重要也是常见的储层类型之一,所以在野外剖面实测时要特别注意生物化石、颗粒的种类和数量,初步判断能否形成礁滩储层,若能形成礁滩储层则要对岩层进行密集采样、详细记录、重点观察和描述,以便室内的详细分析;同时碳酸盐岩储层的形成受成岩作用影响较大,所以在野外工作时应特别注意有利碳酸盐岩储层形成的关键成岩作用类型分析及采样工作。

2、室内数据整理和分析处理

在室内首先对野外剖面实测所得到的数据进行处理,得到各个小层厚度和地层总厚度,画出剖面图和沉积相柱状剖面图;然后对所采岩石样品和化石样品进行处理,选取合适的各层样品直接用仪器测定其孔隙度、渗透率、孔隙结构等,然后可对数据进行分析,通过计算上述各个参数来定量描述储层物性的非均质性;另外与砂岩相比较,碳酸盐岩的储集空间比较复杂,次生变化非常明显,可以发育有一系列的非原生孔隙,而且裂缝常常很发育,所以在碳酸盐岩储层中定量预测裂缝频率、裂缝发育规模和空间分布是十分必要的。实际分析过程中,充分利用偏光显微镜、扫描电镜、CT扫描等测试手段及物性分析定性到定量判断储层的发育状况。

3.2. 层序地层学方法

在野外工作的基础上,根据各层的颜色、岩性、化石以及沉积构造等分析各层的沉积环境,再结合地震、测井、钻井、岩心等资料综合分析,对地层分布形式作出综合解释。充分利用露头和岩心资料详尽的分析沉积特征、古生物组合以及层序界面特征、测井资料的垂向沉积连续性和高分辨率优势以及地震资料所反映的沉积体几何形态相互接触关系,去完整地系统地划分地层层序,建立年代地层格架,重建盆地沉积发展史和盆地演化历史。

根据碳酸盐岩层序地层学原理[15],碳酸盐岩储层主要发育在:1)碳酸盐岩低位体系域,由前缘斜坡侵蚀滑塌而形成的他生碳酸盐岩碎屑楔状体;2)海平面下降处于低位时期,由于风化淋滤作用,易形成孔洞发育、储层厚度大、分布广的古岩溶碳酸盐岩储层;3)海平面快速上升、海侵体系域发育时期,形成了海侵体系域的并进型沉积,碳酸盐岩沉积速率与海平面上升速率基本一致,可以形成原生孔隙极为发育的礁滩储层;4)高位体系域发育晚期也同样可以形成并进型沉积,可形成良好的储层。

总之,随着海平面的升降变化,碳酸盐岩层序海侵和高位体系域并进型碳酸盐岩礁滩沉积是原生孔隙最为发育的一类储层,低位体系域他生碎屑楔状体也是比较好的一类碳酸盐岩储层。另外,碳酸盐岩储层储集性能的好坏受后期成岩作用和构造运动的影响较大。因此在研究碳酸盐岩储层时,除了要对碳酸盐岩沉积进行层序地层学研究,确定原生孔隙发育的利带外,还应加强碳酸盐岩成岩作用和构造运动期次、活动方式的研究,在有利的沉积相带中寻找储集性能良好的储层。

3.3. 劳伦兹曲线法

该方法是将用仪器或者测井所测得的渗透率数值从大到小排列,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,在直角坐标系上标绘成劳伦兹曲线[2][16],如图1所示。

对于完全均质的储层,劳伦兹曲线是一条斜率为1的直线(如图1直线AC),很明显只有在理想的条件下,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1(a)中弧线ADC与直线AC所包含的

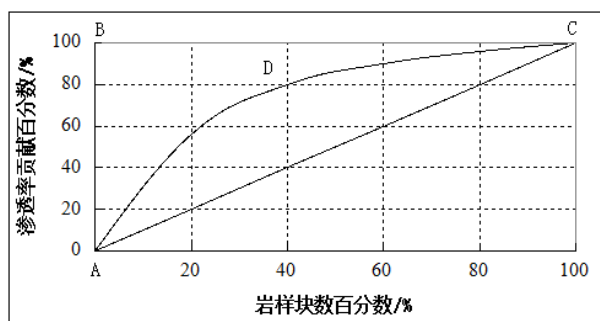


Figure 1. The Lorenz Curve Diagram

图 1. 劳伦兹曲线示意图

面积越大表示非均质越严重。所包含的面积 $ADCA$ 与三角形面积 $ABCA$ 之比称为劳伦兹系数，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。

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，又使求得的劳伦兹系数值在 0(均质)到 1.0(极端非均质)之间，是有界的；优点之二是直观，所包络的面积大小与油藏的非均质程度具相关性，面积 $ADCA$ 越大储层的非均质性越强。从图中可以直接得知储层的非均质程度，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。但是该方法也存在着缺点，该法是首先将所采样品的渗透率按照从大到小的顺序排列，然后再计算作图，但是由于采样时的数量不够以及偶然性等会造成较大的误差，求得的结果并不能代表该层的渗透率，所以在采样时应科学、密集的采样，可同时求得多个渗透率再取其平均值来代表该层的渗透率。

此外，由该法得到启示，既然用渗透率可以得到上述关于渗透率的劳伦兹曲线，从而可以衡量储层的非均质性，则也同样可以用其他参数(如孔隙度)得出关于孔隙度的劳伦兹曲线，用类似的方式去衡量储层的非均质性。

3.4. 用生产井、试井、声波测井信息确定储层非均质性

除了以上较为常见的方法外，也有利用其它资料进行储层非均质性的研究，如金强等[17]根据美国一些开发多年的油气田产量等生产数据(如累积产量、年度产量和月度产量等)，利用数理统计方法结合地质分析提出了月度产量变异系数、年度产量变异系数和累积产量变异系数等特征参数。通过这些参数的分析，不仅能有效地反映储集层非均质特征，对于高含水期的老油气田油藏地质模型研究很有帮助。廖新维等[18]利用试井分析资料，通过数学模型和模型参数回归分析的计算机辅助试井分析技术，可得到该区域储层渗透率的均值分布图，由图即可直接得到储层渗透率的相对大小，确定储集层的非均质性。吴何珍等[19]通过多口井的声波测井数据纵(P 谱)横(H 谱)波谱分析定量描述了储层的纵横向非均质性，可利用 P 谱来研究储层物性在纵向上的变化；同时利用 H 谱分析方法描述储层物性横向非均质性的程度。并且根据此法得到的评价结果与实际砂岩储层的含油性分布具有良好的相关性，所以此法的在砂岩剖面中可较为准确的判断储层的横、纵向的非均质性。而在碳酸盐岩剖面中，由于声波测井是测量声波在地层中传播速度，与岩石的性质、孔隙度、渗透率等有关[20]，所以在碳酸盐地层的中所得到的声波测井数据，也同样可以利用波谱分析的方法定量描述碳酸盐岩储层的纵横非均质性。另外，上述方法只利用的声波测井数据中声波速度，因此在以后的研究中也利用其他的参数如声波幅度等来进行储层非均质性分析。

3.5. 储层地质建模法

储层地质建模可以快速、直观的反映储层内部结构，实现对油气储层的定量表征和各级储层非均质

性的刻画。运用各个阶段所得的相应层次的资料,建立不同勘探开发阶段的储层地质模型,精确地定量描述储层各项参数在三维空间的分布,从而可以准确地反映储层的非均质性。在目前实际的油藏数值模拟工作中,通过建模软件,总是要把储层网格化,先建立“井模型”,并能通过单井资料的层位(小层)进行等时性对比划分建立“层模型”,最后将各个网格赋予各自的参数值从而可以反映储层参数在三维空间的分布,即可得到储层的“参数模型”。

目前国内外对储层地质建模的分类方案较多,依据不同标准可划分为不同类型,由碳酸盐储层的特点,本文重点介绍依据储层属性和模型表述的内容而进行的类型划分,即可将其分为两大类:储层骨架模型、储层参数模型。储层骨架模型主要是反映储层各相异性特征,即储集体性质和几何形态的空间展布,包括沉积相模型、储集体模型、裂缝模型等,其核心均属于离散模型的范畴;对于建立沉积相和储集体模型关键是进行单井、连井及平面沉积相图的编制,然后即可通过切片法来展现、验证、预测沉积相和储集体在平面以及剖面上的分布;由于碳酸盐储层中裂缝尤为发育,并且裂缝对油气田的开发具有重要影响,所以建立裂缝模型非常重要,一般可分为两类:裂缝密度模型和裂缝网络模型,前者主要表征裂缝的发育程度,后者主要表征裂缝的类型、大小、形状、产状、切割关系等。储层参数模型主要反映储层的孔隙度、渗透率、含油饱和度等在三维空间的展布,因此可反映储层的非均质性特征。总之,可应用多种方法、技术,如岩心分析、测井解释、试井分析、地震多波分量研究及地质统计学随机模拟技术等对储层进行进行研究和建模,从而可以较为准确的反映储层的非均质性。

4. 研究趋势

随着对碳酸盐岩型油气藏重视程度的不断增强,碳酸盐岩地层的勘探开发的力度也不断加大,所以关于碳酸盐岩储层非均质性的研究也显得日益重要。但是我国碳酸盐岩储集层地质时代老、演化历史长,经后期构造、风化等作用影响,储集层类型多、非均质性非常强[21],所以关于碳酸盐岩储层非均质性的研究难度大,研究成果也较少。在当今关于碳酸盐岩储层非均质性的研究趋势主要表现为:1) 研究内容综合化,由最初的对储层的分类、储集空间刻画逐步向储层非均质综合表征发展;2) 研究对象不断扩展,研究重点从常见的河流、三角洲、扇三角洲等碎屑岩储集体转向礁滩、古岩溶风化壳等碳酸盐岩储集体以及浊积砂体和煤系地层等更加复杂与隐蔽的储集体;3) 研究方法与技术逐渐多样化,由以前的单学科向多学科发展,紧密围绕油气勘探开发需要,结合地质、测井、地震、岩心、生产信息等各种资料,综合地质、测井、地震、数学地质、计算机、地质建模等各种技术手段多学科、多专业专业协同合作,以期对储集体的刻画越来越准确;4) 表征方法定量化、统一化,由对影响储层物性的地质特征的定性描述转向储层非均质性的定量表征,由多个单一参数的定量表征转向基于不同算法理论得出的反映综合非均质特征的非均质性综合指数。由于碳酸岩储集层类型多,储层结构复杂性等,对于碳酸盐岩储层非均质性的研究还处于探索阶段,我们可以借鉴碎屑岩储层非均质的研究,针对碳酸盐岩储层的自身特点,同时也要结合工作中的实际,对原有方法技术进行改进,得到适合碳酸盐岩储层非均质性的研究方法。

5. 结语

储层非均质性的概念自提出以来就是储层研究的重点,前期我国关于储层非均质性的研究多倾向于碎屑岩储层,而随着国内碳酸盐岩型油气田的勘探开发连续取得重大进展后,关于碳酸盐岩储层非均质性的研究逐渐得到重视。相对于碎屑岩储层,碳酸盐岩储层的非均质性尤为强烈,目前关于碳酸盐岩储层非均质性的描述为定性和定量相综合,以较为准确地表征碳酸盐岩储层非均质性;定性描述主要是对影响储层物性的地质特征的描述,而定量描述则是通过非均质性综合指数、分类表征法等来表征其非均质性。通过借鉴碎屑岩储层非均质性的研究方法与技术并且结合碳酸盐岩储层的自身特点,归纳了

关于碳酸盐岩储层非均质性的研究方法与技术,如典型露头剖面研究、层序地层学方法、劳伦兹曲线法、生产信息法、地质建模法等,在实际的应用中可结合研究区的特点综合利用各种方法;通过地质、测井、地震、数学地质、计算机、地质建模等各种技术手段的综合利用,必能实现对碳酸盐岩储层非均质性的精确刻画。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(2014006)、国家自然科学基金(41402090)资助。

参考文献 (References)

- [1] 熊琦华. 油气储层地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 129-135.
- [2] 张云鹏, 汤艳. 油藏储层非均质性研究综述[J]. 海洋地质前沿, 2001, 27(3): 17-22.
- [3] 于兴河. 油气储层地质学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 325-359.
- [4] 张兴平, 衣英杰, 夏冰, 等. 利用多种参数定量评价储层层间非均质性——以尚店油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(1): 56-57.
- [5] 岳大力, 林承焰, 吴胜和, 等. 储层非均质定量表征方法在礁灰岩油田开发中的应用[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 75-79.
- [6] 朱德燕. 储层非均质性研究[J]. 西部探矿工程, 2004(9): 76-77.
- [7] 王志杰, 温长云, 冉雪梅. 运用灰色聚类方法确定储层非均质分布[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(3): 271-275.
- [8] 杨少春, 杨兆林, 胡红波. 熵权非均质综合指数算法及其应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(1): 18-21.
- [9] 文华, 孙娜. 一种定量描述气藏储层非均质性的新方法[J]. 特种油气藏, 2011, 18(1): 51-53.
- [10] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 202-207.
- [11] 王立恩, 姜复东. 碳酸盐岩储层非均质性定量表征方法[J]. 天然气技术, 2009, 3(1): 27-29.
- [12] 强平, 曾伟, 陈景山, 等. 川东碳酸盐岩储层非均质模型[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 205-210.
- [13] 刘泽容, 杜庆龙, 蔡忠. 应用变差函数定量研究储层非均质[J]. 地质论评, 1993, 39(4): 297-301.
- [14] 隋少强, 宋丽红, 赖生华. 储层非均质性定量探讨[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(4): 5-8.
- [15] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2000: 82-101.
- [16] 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.
- [17] 金强, Browton, J.R. 用生产井信息确定储层非均质性[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(2): 18-21.
- [18] 廖新维, 沈平平, 杨永智. 利用试井信息确定储集层非均质性[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(增刊): 100-102.
- [19] 吴何珍, 符力耘, 葛洪魁. 利用多井声波测井数据谱分析进行储层非均质性描述[J]. 测井技术, 2010, 34(3): 297-301.
- [20] 丁次乾. 矿床地球物理测井[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2002: 85-113.
- [21] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 15-22.