

文章编号:1672-6561(2012)02-0072-09

地下储层表征的不确定性及其科学思维方法

吴胜和, 杨延强

(中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 由于地质的复杂性和资料的不完备性, 地下储层表现为“灰箱”系统, 表征结果存在着不确定性。基于系统论和科学哲学的方法, 探讨了地下储层表征中不确定性的成因类型、内涵及解决方案, 并论述了地下储层表征过程中所应重视的科学思维方法。地下储层表征中存在两类基本的不确定性类型: ① 随机不确定性, 主要由局部预测整体(如应用多井资料进行井间储层预测)以及第二性资料的非完全映射(如应用地震资料预测储层)所致; ② 模糊不确定性, 主要由储层概念模式认知不足所致。为了使表征结果逼近地质实际, 除了正确应用和创新相关理论和方法外, 需要具备科学的表征理念和思维, 包括总体把握、分级约束, 多科一体、地质为核, 发散求索、聚焦论证, 辩证思维、综合分析; 同时, 应正确理解和处理宏观与微观、绝对与相对、静态与动态、映射与多解、局部与整体、模糊与置信、确定与随机、个别与一般、复杂与简约、手工与自动等矛盾统一体的关系。

关键词: 地下地质; 储层表征; 开发地质学; 不确定性; 随机; 模糊; 科学思维方法; 矛盾统一体

中图分类号: P618.130.2; N941.5 **文献标志码:** A

Uncertainty and Scientific Methodology in Subsurface Reservoir Characterization

WU Sheng-he, YANG Yan-qiang

(School of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Due to the complexity of geology and the incompleteness of the data, subsurface reservoirs are shown as grey box systems. Thus, great uncertainty exists in the reservoir characterization. The genetic types, the essence of the uncertainty and the possible solutions for uncertainty reduction were discussed based on the system theory and philosophy of science. The scientific methodology that should be implemented in the reservoir characterization procedure was also addressed. Uncertainties were grouped into two types according to their fundamental difference. One was random uncertainty that was caused by predicting the entirety from the fraction, such as predicting the inter-well reservoir from well data. Another reason of random uncertainty was non-complete mapping from secondary data such as predicting the reservoir from seismic data. The second type of uncertainty was named as fuzzy uncertainty that was caused by insufficient cognition of the reservoir conceptual model. In order to make the reservoir model more close to the geological reality, the correctly implementation of the new related theories and methods should be guided by a more scientific characterization philosophy. Some of the philosophical characterization principles were proposed. The characterization procedure should be perceived in an overall view, and the geological analysis should be hierarchically constrained. The characterization would integrate multiple disciplines while it was geologically focused. The

收稿日期: 2012-01-04

基金项目: 国家科技重大专项研究项目(2011ZX05030-005); 国家高技术研究发展计划项目(2008AA06Z206)

作者简介: 吴胜和(1963-), 男, 江西抚州人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: reser@cup.edu.cn.

geologists should follow a divergent seeking and reasoning as well as a point-focused demonstration. The investigation will comply with dialectical thinking and comprehensive analysis. Meanwhile, some relationships in contradictory entities, such as macroform and microform, certainty and ambiguity, static and dynamic, mapping and divergence, fraction and entirety, fuzzy and concrete, certainty and randomness, specialty and generalization, complexity and simplicity, hand-operation and automation, should be correctly understood and handled competently and successfully.

Key words: subsurface geology; reservoir characterization; development geology; uncertainty; random; fuzzy; scientific methodology; contradictory entity

0 引言

储层表征是指应用多学科信息定量预测和描述地下非均质储层的一个过程,属于油气藏开发地质研究的范畴。开发地质工作的核心任务是描述油气藏开发地质特征,即油气藏所具有的那些控制和影响油气开发过程,从而也影响所采取的开发措施的所有地质特征^[1],其中最为重要的是储层地质特征,如储层的空间连续性和连通性、储层内部夹层分布、储层质量差异分布等。

储层表征属于地下地质研究的范畴。与野外露头不同,后者“看得见,摸得着”,直观可辨,而地下地质研究的资料主要为极少量的岩芯、各井的连续测井资料、分辨率有限的地震资料、少量的单层井间动态监测资料^[2-5]。显然,针对复杂的非均质储层,应用这些不完备的资料进行地下储层空间预测具有很大难度,预测结果也具有很强的多解性,即不确定性。

长期以来,学者们对储层表征(包括不确定性评价的理论和方法)进行了大量研究,并取得了丰富的研究成果。然而,不确定性的类型及生成机理不同,采取的表征对策及方法亦不同,对表征精度的影响亦有较大差别,而这一点又往往容易被忽视。笔者拟从储层预测的不确定性入手,探讨不确定性的生成机理,并进一步论述储层表征研究所应重视的科学思维方法。

1 “灰箱”系统及不确定性分析

1.1 “灰箱”系统

按照控制论的观点,内部结构一时无法直接观测,只能从外部去认识的现实系统称为“黑箱”,如果内部结构只能部分直接观测,则称为“灰箱”^[6]。

地质体具有复杂的时空结构^[7]。在钻井和地球物理测量之前,地下地质体可看作为一个“黑箱”。

在进行油气勘探发现油气田之后,这一“黑箱”被部分打开了。然而,这个“黑箱”虽然是确定的,具有唯一性的特征,但由于资料获取的局限性及地质情况的复杂性,很难完全、确切地了解“黑箱”的内幕细节。应用测井资料可解释井筒内的油藏特征,但井筒体积仅占地下油藏体积的很小一部分;地震资料虽然平面分辨率高,但其垂向分辨率低且资料具有多解性。显然,就地下储层表征而言,地下复杂储层系统为一个“灰箱”系统(图 1)。

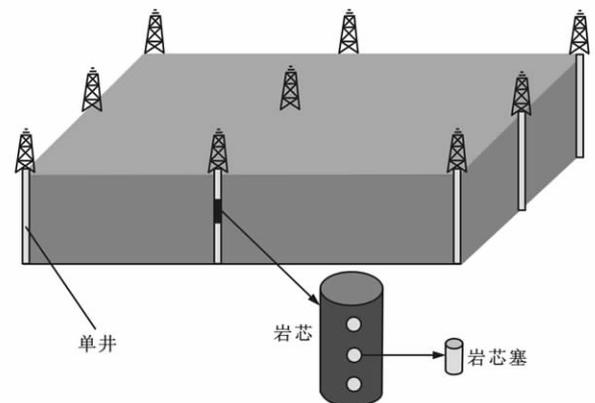


图 1 地下地质研究的规模示意图
Fig. 1 Schematic Diagram of the Scale in Subsurface Geology Study

地下储层表征则是一个如何使“灰箱”变为“白箱”的过程,亦即“白化”过程。然而,在资料不完备的情况下,井间储层预测便必然出现不确定性,或者说“白化”过程难于使“灰箱”变为“白箱”,“白化”模型中总是具有“灰性”,而对这种“灰性”或不确定性的把握对于降低油气开发风险具有至关重要的作用。

储层表征的终极原则就是尽量降低不确定性,使不确定性最小化,并对不确定性进行评价。不同的不确定性有不同的生成环境和变化规律,需要分别应用不同的方法加以研究。因此,正确认识不确定性的生成机理,对于储层表征具有重要意义。

对不确定性的研究,一直是系统科学的重要理论课题之一。从预测论的角度而言,可识别两种基本的不确定性,即随机不确定性和模糊不确定性。

1.2 随机不确定性

随机不确定性为因果律破缺而造成的不确定性。由于条件不充分,某一事件可导致各种可能的结果^[8]。就井间储层预测而论,因果律表现为地质变量的空间函数关系以及井间信息(如地震信息)与地质参数的函数关系。由于获取的资料总是不完备,这两个函数也不是确定的,所以在储层预测结果中必然存在不确定因素。

1.2.1 局部预测整体导致的不确定性

地下储层表征的核心之一是井间储层预测。在地震资料不足以分辨目标地质体的情况下,需要应用多井资料进行井间预测。这一问题即是从局部预测整体的问题。

任何从局部到整体的预测均要求已有数据具有规律性,即局部与整体具有明确的因果关系。井间储层预测属于空间预测范畴,因此,严格意义上的井间预测前提是建立地质变量的空间函数关系。长期以来,学者们一直在试图建立这一关系^[9]。

传统数学插值方法将地质变量视为井间距离的函数,如三角剖分法、距离反比平方法等。这类方法将地质变量视为纯随机变量,将地质变量作为井间距离的函数,据此进行井间预测。这类方法没有考虑多井数据的空间相关性,显然是不合适的。应用这种方法进行建模不是真正意义上的预测,而仅是“绘图”;只有在数据点较多时才能反映目标体的分布趋势。

20世纪60年代初兴起的地质统计学将地质变量视为区域化变量(既有随机性又有结构性的变量),应用变差函数工具,获取变量的空间相关性,据此进行加权插值,如各种克里金方法^[10-12]。与传统数学插值方法相比,这类方法考虑了地质变量的空间相关性,因而插值结果更符合地质实际。然而,在这种方法中,表征空间相关性的变差函数尚存在以下不足:①变差函数仅反映主变程方向(相当于物源方向)及数据相关程度,难于反映成因单元之间的配置关系;②变差函数所表达的空间相关性为空间两点之间(两个数据点之间或一个数据点和一个待估点之间)的相关性,因而难于表达复杂的空间结构;③在井点较少时,难于求取变差函数,特别是当井距大于变程时,应用目标区的井资料难于求准实际的空间相关性^[13]。因此,空间函数的局限性及不确定

性必然导致井间预测结果的不确定性。

自20世纪80年代以来,国内外学者进行过不少储层地质知识库的研究,企望建立垂向信息与侧向规模的关系,涉及河流相、三角洲相、扇三角洲相、深水浊积相等,取得了丰富的研究成果^[14-29]。然而,大部分成果为研究区储层单元的定量规模,部分地区建立了沉积单元垂向与侧向之间的定量关系,但主要为砂体的宽厚比,其普适性不够。研究程度相对较高的为曲流河沉积,而且只是高弯度曲流河沉积建立了垂向沉积序列与点坝规模及侧积体规模的定量关系^[30-31],据此可进行较好的井间储层构型预测。系统建立不同相型的定量可预测模式是储层表征乃至开发地质学十分重要的前沿研究课题。

1.2.2 非完全映射导致的不确定性

应用测井和地震资料进行储层解释是储层表征的重要研究内容。测井和地震资料为第二性资料,对其进行储层地质解释,实际上是一个映射过程。以地震储层预测为例,如果地震资料与储层特征具有一一对应的线性映射关系,则储层预测的结果是确定的。但是,由于地震资料的分辨率和多解性,地震资料与储层特征并不存在确定的映射关系。

地震资料具有横向采集密度大、分辨率高(达 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$)的优点,因而是储层横向预测的重要信息。地震储层预测的基本前提是建立地震属性与地质变量之间的关系。然而,用于地震资料的垂向分辨率和地质多解性问题导致了储层表征中的不确定性。

(1)分辨率问题。地震资料本身所达到的分辨率(真分辨率)由有效频宽确定,可分辨厚度为 $1/4$ 视波长^[32]。因此,在地震分辨率极限的情况下,若要预测该极限范围内的细节,便难于建立地震参数与地质变量的关系,从而产生不确定性。

在一定的资料情况下,将地质体划分很多网格,则玻耳兹曼熵 S 为

$$S = k \ln N \quad (1)$$

式中: k 为玻耳兹曼常量; N 为网格数,代表宏观层次的 N 个微观状态数量。在玻耳兹曼常量一定的情况下,网格数越大,则玻耳兹曼熵越大,微观状态的复杂程度或不确定性程度越强,亦即垂向网格划分越细(或者说地质研究程度要求越高,如细化到单砂体及内部构型),不确定性越大。

基于模型的波阻抗反演可提高视分辨率,但井间波阻抗具有一定误差,且离井越远,误差越大,多解性越强。因此,在提高视分辨率的情况下,波

阻抗本身具有多解性。这一多解性将“传递”到地震参数与地质变量的关系上,从而导致该函数关系的多解性。

(2)多解性问题。即使在地震分辨率能达到预测目标的需求时,但由于地震资料与地质属性之间不存在确定性的函数关系,所以会导致较强的地质多解性,亦即预测结果的非唯一性和不确定性。以波阻抗为例,该参数是预测岩性和物性的常用地震参数。波阻抗是储层岩性、物性和含流体性质的综合响应,意味着在储层预测中,需要应用一个已知数求解 3 个未知数;波阻抗与上述任一地质参数均无严格的确定性关系。因此,应用波阻抗预测地质参数(岩性、物性、含流体性质)必然存在不确定性。

目前,降低这类不确定性的方法主要有:①加强地震正演模拟,进一步研究不同类型储层定量模式的地震响应,建立地震属性与地质参数的关系;②进一步研究整合地震属性特别是多属性的储层随机建模算法。另外,由于地震资料为时间域信息,所以加强速度场研究以及提高时-深转换精度亦是应用地震资料进行精细地质建模的关键。

1.3 模糊不确定性

模糊不确定性为排中律破缺而造成的不确定性。一种情形是“意会”的不确定性,如不同研究者对河流类型的判别存在分歧,导致对砂体分布预测结果有差异;另一种情形是“语义”不确定性,如河道砂体“较宽”与“较窄”,中间找不到明确的边界。储层概念模式认知不足而导致储层预测的不确定性属于模糊不确定性的范畴。

假如所采集的井间资料(如地震资料)具有预测目标所要求的纵、横向分辨率,再假如井间资料与所预测的地质参数(如岩性、物性、含油性)具有确定的函数关系,储层预测问题就变得很简单了。但事实上上述假设不成立。于是,在储层预测过程中必然要体现地质约束,而地质约束的关键是建立符合地质实际的储层概念模式,如基于目标的储层建模(预测)方法要求预知目标体的几何构型(如砂体物源方向、长度、宽度、厚度、几何形态等)^[33];基于象元的多点地质统计学储层建模(预测)方法要求预知“训练图像”(替代经典地质统计学中的变差函数)^[34]。几何构型及“训练图像”实际上就是数字化的储层地质模式。

精确储层预测的前提是要求建立符合地质实际的储层概念模式。错误的储层地质模式必然导致储层预测结果的错误;模糊的储层地质模式必然导致

储层预测结果的不确定性。图 2 为通过 9 口井的单井相信息预测平面相分布的 2 种可能性的示意图。在两种情况下,井资料不变,只是概念模式不同。其中,图 2(a)为应用单一河道模式预测的相分布,图 2(b)为应用分叉河道模式预测的相分布。显然,不同的储层概念模式产生不同的储层预测结果。

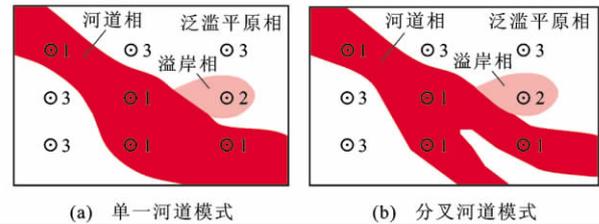


图 2 应用 2 种相模式预测的平面相分布

Fig. 2 Facies Prediction Maps from Applying Two Different Facies Models

值得注意的是,旨在评价储层不确定性的随机建模中,若不能准确确定地下地质模式,则随机建模所产生的一系列模拟实现将不足以反映真实储层的实际不确定性,而只是在忠实测井资料和地震资料的前提下随机种子数(seed number)产生的、人工输入的储层概念模式的随机波动^[35]。显然,这种建模结果包含着由储层概念模式认知不足导致的模糊不确定性,而这一类型的不确定性又往往没有得到足够的重视。

为了降低上述模糊不确定性,需要对地下目标体的相型及定量地质模式进行有效认知。目前的方法主要是地质类比和机理分析,即根据测井资料和地震资料与原型模型进行类比,同时分析各成因单元的成因及其可能的几何分布。但是,由于资料的不完备性以及地质认识水平的影响,研究区地下储层模式的准确认知又绝非易事。因此,加强地下地质模式认知理论和方法研究是今后储层表征乃至开发地质学领域的一个重要研究方向。

2 科学思维方法

由于地质的复杂性和资料的不完备性,地下地质研究特别是井间预测便具有很大的难度和不确定性。为了尽量降低不确定性,使储层表征结果逼近地质实际,除了正确应用和创新相关理论和方法外,还要注重正确的思维方法。

2.1 总体把握,分级约束

首先,在储层表征过程中,需要有全局的观念。包括以下 2 层含义。

(1)把握总体技术路线。针对研究目标,确定研究思路、研究内容及其间的联系。由于储层表征通常有多个环节(如精细地层对比、储层内部构型、储层质量差异等),在对每一个环节进行研究时,需要把握以下几点:①该环节在整个研究目标中的位置;②该环节的研究内容和关键技术;③该环节与其他环节的关系等。

(2)把握储层总体特征。例如,若要确定目标区的沉积微相,首先要确定沉积背景和沉积体系,并明确目标区在沉积盆地的位置。

在总体把握的前提下,分层次进行储层表征。地质体具有多层次性,地层、断层、相、储层均可分为多个级次,如油层单元可分为含油层系、油组、砂组、小层、单层等,沉积相可分为大相、亚相、微相等。高级次的单元比低级次的单元具有更宏观且更易辨析的规律(如亚相分布规律比微相分布规律更明确、更易把握);因此,在研究过程中,先研究高级次单元,然后在其约束下研究较低级次的单元。

2.2 多科一体,地质为核

对于地下储层这样一个“灰箱”系统,难于应用单一学科手段去研究,而应采取“多学科综合一体化”(即多科一体)的研究策略。

储层表征信息包括岩芯、测井、地震、动态信息等,相应的学科为地质、地球物理测井、地球物理勘探、油藏工程等。针对各个学科采集的信息进行处理和解释,并得到相应的研究结果。然而,这只是“多学科分离式”的研究。科学的研究思路应为综合一体化的研究,要求将所有信息放置在统一的平台上,建立各信息之间的联系和约束关系,如岩芯标定测井、井筒约束地震,进行协同研究。

由于储层属于地质体,所以在储层表征的过程中,一定要以地质体为核心。这表现在以下2个方面。

(1)尽量建立各信息对地质体的响应关系。对于测井、地震等信息,要特别注意其储层响应的物理含义,而不仅仅是信息本身的数学变换。

(2)需要对储层地质理论有深刻的理解,并具有深厚的地质“功底”。由于储层表征目标是具有“灰性”的地下储层地质体,为了预测这一地质体,必须掌握其形成机理、分布规律或模式。

2.3 发散求索,聚焦论证

任何科学认识的取得都包括3个环节,即论点预设、论据挖掘和论证过程^[36-37]。在储层表征中,科学论证的基本思路见图3。

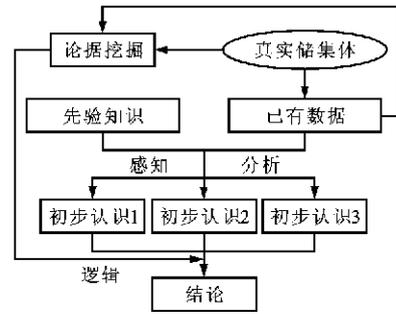


图3 储层表征中的科学论证思路
Fig. 3 Diagram of Scientific Appraisal in Reservoir Characterization

论点可理解为一个地质认识,如一个观点、一张沉积微相图。由于地下地质体“看不见,也摸不着”以及“时过境迁”的特点,难于一步得出最终认识。在研究过程中,或者从已有数据和资料中得出多个可能认识,或者从繁杂数据和资料中初步归纳出一个初步认识,这就是论点预设。预设需要“领悟”和“揣摩”。

当获得这样一个或多个初步地质认识时,要尽量收集有效证据来进行论证。证据来自于数据和资料,承载着各不相同的可信度和有效性,只有真实且有效的证据才能成为论据。地下地质研究最大的难点是“信息不完备”。因此,在研究过程中,应尽量从多学科资料中寻找更多的证据,即“发散求索”,如对相类型的论证,应尽可能“挖掘”(主动寻找)更多的岩芯相标志、测井相标志及地震相标志等。在论据挖掘过程中,没有经验的研究人员容易出现以下问题:①不主动找证据;②对已有的论据“视而不见”。

论证过程就是逻辑分析的过程。逻辑是将预设和证据结合在一起,运用有效的推理而得出结论,即“聚焦论证”。有效应用演绎逻辑和归纳逻辑,是科学论证的关键。演绎逻辑从前提出发,通过证据推理出结论,需特别注意的是,前提必须具有真理性,证据必须具有客观性,并且还应避免逻辑谬误带来的无效论证(如歧义谬误、循环推理等)。归纳逻辑推理是从实际数据得出一个推论,但需注意的是,应尽量挖掘更多的有效论据,以使归纳推理具有“充分性”。

2.4 辩证思维,综合分析

在地质研究中,既要有逻辑推理,又要有辩证思维。辩证思维是反映事物的辩证法及按照客观世界辩证法规律(对立统一律、质量互变律、否定之否定律)进行的思维^[38-39]。辩证思维的根本作用在于反

映事物的矛盾,并从事物发展和变化的角度反映对象,而且将该对象同与其相联系的对象联系起来构成一个整体。因此,辩证思维更能从整体上看问题,即全面综合地分析问题。

在储层表征过程中,要充分运用辩证思维,正确理解矛盾关系。

(1)宏观与微观。地质体总体是宏观的,但由不同层次的微观单元所组成。因此,宏观包含微观,微观反映宏观。宏观与微观构成了复杂的多层次系统。地震资料所反映的地质体主要为宏观规模,岩芯塞主要反映微观规模,并筒测井则反映“中观”规模的一个侧面。如何综合多种信息进行多层次储层解释和预测,正是储层表征的主要目的。

(2)绝对与相对。油气藏(储层)的非均质性是绝对的,而均质性是相对的。虽然在某一层次可将储集单元视为均质的,但其内部则是有多个低序次单元组成的非均质体,如将曲流河点坝视为一个相对均质体,其内部则是由多个侧积体和侧积泥岩组成的非均质体。储层的客观实在是绝对的,但由于资料丰富程度及地质体规模的相对性,导致对地质体的认识程度也具有相对性。对于诸如长江和松花江规模(数百米宽)的河流砂体,可以通过开发井网很好地确定点坝范围,甚至能很好地解剖点坝内部的侧积体与侧积层,而对于小河流如内蒙古呼伦贝尔南部的辉河(10 m宽)规模的砂体,即使井距达到50 m,也难于确定点坝的边界。另外,虽然储层的客观实在是绝对的,但由于在开发过程中作用于油气层措施的相对性,导致一些概念及其定量标准具有相对性。例如,有效层渗透率下限值、层间干扰的渗透率级差都是相对于采油工艺技术的;隔层和夹层的区别是相对于非渗透层在井间分布来说的,而是否在井间连续分布则取决于井距和井网密度。

(3)静态与动态。地下油藏在钻采前是一个相对静态的平衡系统。投入开发后,由于钻井、注水、采油等开发工程作业措施,原始油、气、水的平衡状态被打破,形成一个动态的非平衡系统,地下油、水分布状态发生变化,储层性质也可能发生变化。这一作用过程是流体渗流与复杂地质体的相互作用过程。由于地质体的动态响应依赖于地质体本身,所以可通过静态地质体正演预测动态演化,同时也可通过实际的动态响应特征反演解释和预测地质体。

(4)映射与多解。在油气藏表征中,测井和地震信息的解释依赖于其对储层的映射关系。然而,很

多信息与地质体之间并没有一一对应的确定性映射关系,因而导致储层解释的不确定性。建立确定的地球物理信息与地质体之间的映射关系,是储层地质工作者追求的目标。

(5)局部与整体。在油田开发中后期储层表征中,最常见的情形是应用多井资料进行井间储层预测,即从局部预测整体的问题。整体包含局部,局部是整体的一个反映。因此,建立局部与整体的关系是井间储层预测的重要前提。最大的难题是局部与整体的关系难于建立,即因果律破缺,储层预测将出现不确定性。建立明确的垂向信息与侧向规模的关系,一直是地质工作者努力的目标。

(6)模糊与置信。在实际储层预测过程中,预测结果总是包含着由储层概念模式认知不足导致的模糊不确定性。然而,模式认知本身具有很大的难度。地下地质模式的确定对于储层预测具有至关重要的作用。

(7)确定与随机。地下地质体是确定的,但由于地质的复杂性以及资料的不完备性,人们又难于掌握任一尺度下储层确定且真实的特征或性质。这些难于确定的储层性质(不确定性),即为储层的随机性质。在储层表征中,需要尽量应用多学科手段和方法使储层预测的不确定性最小化,并通过随机建模的方法评价不确定性^[40-42]。

(8)个别与一般。地下储层类型很多,而同一类型储层往往具有相似的一般规律。长期以来,通过大量储层实例探索储层的一般规律,以指导同类地下储层表征的实践。然而,在一般规律的实际应用中,一定要注意储层的个性;也就是说,在应用某类储层的一般规律对某一具体储层进行表征时,需要注意该储层的具体特征。正如没有一条河流是完全相同的一样,没有一个储层是完全相同的。

(9)复杂与简约。储层具有多层次复杂的非均质性。储层表征的目的正是要客观反映这一非均质性,从而有效指导油气藏评价和开发,特别是在油田开发后期,更需要细化表征低序次的非均质性。然而,由于资料的不完备性,所以难于掌握任一尺度下储层确定且真实的特征或性质,如孔隙大小的空间分布。事实上,油田实际生产也不需要如此细化的储层表征结果。因此,精细的储层表征并不意味着越细越好,“过分”细化可能会导致更多的错误。这样,储层表征就需要合理的简约化:①在满足油田生产要求的前提下,合理选择储层表征的层次;②对表征结果进行适当的平滑。值得注意的是,要合理把

握对复杂储层的简约“度”。

(10)手工与自动。随着计算机技术的发展,储层表征的自动化程度得到了大幅度提高,这是储层表征技术的进步。然而,在享受自动化带来好处的同时,不能忽视手工的作用。在储层表征的各个环节,均需要进行人机交互,特别是对于自动化批量处理结果要进行人工检查或编辑,例如:①批量输入数据的检查,如井位、井轨迹、井解释数据等;②批量测井数据处理结果的检查,校正由于部分测井数据不正常导致的自动解释错误;③自动三维建模结果的人工编辑。由于目前已有算法都是在数学意义上表达部分地质规律与地质思维,算法具有局限性,所以得到的建模结果可能不一定符合地质模式,需要根据地质模式进行人工后处理,以使建模结果具有地质合理性。

在地下储层表征中,研究者的地质功底(知识与能力)至关重要。知识可以通过读书而获得,而能力则需通过实践来锻炼。这些能力包括观察能力、理解能力、宏观把握能力、信息挖掘能力、逻辑推理能力、辩证思维能力、综合分析能力、总结提升能力、为解决问題而配置资源的能力、跳出自我框架不断创新的能力。

3 结 语

(1)由于地质的复杂性和资料的不完备性,地下储层表现为“灰箱”系统,表征结果存在着不确定性,包括随机不确定性和模糊不确定性。

(2)随机不确定性为因果律破缺而造成的不确定性,主要由局部预测整体(如应用多井资料进行井间储层预测)以及第二性资料的非完全映射(如应用地震资料预测储层)所致。降低这类不确定性的途径主要有:改进和优化储层垂向与侧向规模的定量关系;储层参数与地震属性之间的定量关系。这类不确定性可通过现有的随机建模方法来进行评价。

(3)模糊不确定性为排中律破缺而造成的不确定性,主要由储层概念模式认知不足所致。降低这类不确定性的主要途径是对地下目标体的相型及定量地质模式进行有效认知。现有的随机建模方法尚难于对这类不确定性进行有效评价。

(4)为了降低储层表征的不确定性,使表征结果逼近地质实际,除了正确应用和创新相关理论和方法外,需要具备科学的表征理念和思维,包括总体把握、分级约束,多科一体、地质为核,发散求索、聚焦论证,辩证思维、综合分析。同时,应正确理解和处

理宏观与微观、绝对与相对、静态与动态、映射与多解、局部与整体、模糊与置信、确定与随机、个别与一般、复杂与简约、人工与自动等矛盾统一体的关系。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 裘怿楠. 石油开发地质方法论(一)[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 43-47.
QIU Yi-nan. The Methodology of Petroleum Development Geology (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(2): 43-47.
- [2] 闵 豫, 石宝珩. 油田开发地质学与油藏研究[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 37-50.
MIN Yu, SHI Bao-heng. Oil Field Development Geology and Reservoir Study[J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(2): 37-50.
- [3] 裘怿楠. 油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
QIU Yi-nan. Oil Reservoir Description[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [4] 李 阳, 刘建民. 油藏开发地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
LI Yang, LIU Jian-min. Reservoir Development Geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [5] 吴胜和. 储层表征与建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
WU Sheng-he. Reservoir Characterization and Modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [6] 欧阳莹之. 复杂系统理论基础[M]. 田宝国, 周 亚, 樊 瑛, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2002.
OUYANG Ying-zhi. Foundations of Complex System Theories[M]. Translated by TIAN Bao-guo, ZHOU Ya, FAN Ying. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2002.
- [7] 於崇文. 揭示地质现象的本质与核心——地质作用与时-空结构[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 2-12.
YU Chong-wen. Revealing the Essence and Crux of Geological Phenomena—Geological Processes and Spatio-temporal Structures [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1): 2-12.
- [8] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学: 原理及应用[M]. 3 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
YANG Lun-biao, GAO Ying-yi. Fuzzy Mathematics: Principle and Application[M]. 3rd ed. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002.
- [9] 赵鹏大. 定量地学: 方法及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
ZHAO Peng-da. Quantitative Geoscience: Methods and Its Applications[M]. Beijing: Higher Education

- Press,2004.
- [10] JOURNAL A G, HUIJBREGTS C J. Mining Geostatistics[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [11] DEUTSCH C V, JOURNAL A G. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide[M]. 2nd ed. London: Oxford University Press, 1996.
- [12] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
WANG Ren-duo, HU Guang-dao. Linear Geostatistics [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1989.
- [13] 吴胜和, 金振奎, 黄沧钊, 等. 储层建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
WU Sheng-he, JIN Zhen-kui, HUANG Cang-dian, et al. Reservoir Modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [14] LEEDER M R. Fluvial Fining-upwards Cycles and the Magnitude of Palaeochannels[J]. Geological Magazine, 1973, 110(3): 265-276.
- [15] LORENZ J C, HEINZE D M, CLARK J A, et al. Determination of Width of Meander-belt Sandstone Reservoirs from Vertical Downhole Data, Mesaverde Group, Piceance Creek Basin, Colorado[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(5): 710-721.
- [16] FIELDING C R, CRANE R C. An Application of Statistical Modeling to the Prediction of Hydrocarbon Recovery Factors in Fluvial Reservoir Sequences[C]// ETHRIDGE F G, FLORES R M, HARVEY M D. Recent Development in Fluvial Sedimentology. Tulsa: SEPM Special Publications, 1987.
- [17] MIALL A D. The Geology of Fluvial Deposits[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [18] GIBLING M R. Width and Thickness of Fluvial Channel Bodies and Valley Fills in the Geological Record; a Literature Compilation and Classification[J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(5): 731-770.
- [19] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
QIAN Ning, ZHANG Ren, ZHOU Zhi-de. Fluvial Process[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [20] 李思田, 焦养泉, 付清平. 鄂尔多斯盆地延安组三角洲砂体内部构成及非均质性研究[C]// 裘亦楠. 中国油气储层研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 1993: 30-35.
LI Si-tian, JIAO Yang-quan, FU Qing-ping. Study on Delta Sand Body's Internal Architecture and Heterogeneity of Yan'an Formation in Ordos Basin[C]// QIU Yi-nan. Symposium for Studies on Chinese Petroleum Reservoir. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 30-35.
- [21] 刘站立, 焦养泉. 曲流河成因相构成及其空间配置关系——鄂尔多斯盆地中生代露头沉积学地质考察[J]. 大庆石油地质与开发, 1996, 15(3): 6-9.
LIU Zhan-li, JIAO Yang-quan. Composition of Facies of Meandering River Origin and Relationship of Its Spatial Configuration—an On-the-spot Geologic Investigation on Sedimentology of Mesozoic Outcrop in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 1996, 15(3): 6-9.
- [22] 裘亦楠, 薛叔浩, 应凤祥. 中国陆相油气储集层[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
QIU Yi-nan, XUE Shu-hao, YING Feng-xiang. Petroleum Reservoirs in Continental Basins, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [23] 马世忠, 杨清彦. 曲流点坝沉积模式、三维构形及其非均质模型[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 241-247.
MA Shi-zhong, YANG Qing-yan. The Depositional Model, 3D Architecture and Heterogeneous Model of Point Bar in Meandering Channels[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(2): 241-247.
- [24] 穆龙新, 贾爱林, 陈亮, 等. 储层精细研究方法: 国内外露头储层和现代沉积及精细地质建模研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
MU Long-xin, JIA Ai-lin, CHEN Liang, et al. Methods of Detailed Study on Reservoirs; Study on Reservoir Outcrop, Modern Sedimentation and Fine Geological Modeling over the World [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [25] 张昌民, 徐龙, 林克湘, 等. 青海油砂山油田第68层分流河道砂体解剖学[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 70-76.
ZHANG Chang-min, XU Long, LIN Ke-xiang, et al. Anatomy of Distributary Channel Sand, the No. 68 Sandbody of Youshashan, Western Qinghai[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(4): 70-76.
- [26] 付国民, 李永军, 石京平. 樊家川油田河流相储层砂体非均质模型及剩余油分布[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(1): 15-19.
FU Guo-min, LI Yong-jun, SHI Jing-ping. The Model of the Anisotropy of the Fluvial Facies Reservoir Sand Body and the Distribution of the Residual Oil[J]. Journal of Chang'an University: Earth Science Edition, 2003, 25(1): 15-19.
- [27] 于兴河, 马兴祥, 穆龙新, 等. 辫状河储层地质模式及层次界面分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
YU Xing-he, MA Xing-xiang, MU Long-xin, et al. Braided River Reservoirs Geological Model and Hierarchy

- Interfaces Analysis [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [28] 单敬福, 纪友亮, 史榕, 等. 曲流河道单砂体驱油效率主控因素[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(2): 170-173.
SHAN Jing-fu, JI You-liang, SHI Rong, et al. Main Controlling Factors for Oil Displacement Efficiency by Single Sand Body in Meandering River Channel[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(2): 170-173.
- [29] 付国民, 周丽梅, 刘蕊, 等. 塔河三叠系下油组河流相储层夹层成因类型及其分布规律[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 260-264.
FU Guo-min, ZHOU Li-mei, LIU Rui, et al. Fluvial Facies Reservoir Interbed Genesis Category and Distribution Characteristic in Low Oil Group Triassic Tahe Oilfield[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(3): 260-264.
- [30] 吴胜和, 岳大力, 刘建民, 等. 地下古河道储层构型的层次建模研究[J]. 中国科学: D 辑, 2008, 38(增1): 111-121.
WU Sheng-he, YUE Da-li, LIU Jian-min, et al. Study on Subsurface Ancient Channels Reservoir Architecture's Hierarchical Modeling [J]. Science in China; Series D, 2008, 38(S1): 111-121.
- [31] 周银邦, 吴胜和, 岳大力, 等. 点坝内部侧积层倾角控制因素分析及识别方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(2): 7-11.
ZHOU Yin-bang, WU Sheng-he, YUE Da-li, et al. Controlling Factor Analysis and Identification Method of Lateral Accretion Shale Beddings Angle in Point Bar[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2009, 33(2): 7-11.
- [32] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
LI Qing-zhong. The Way to Obtain a Better Resolution in Seismic Prospecting [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [33] HOLDEN L, HAUGE R, SKARE Φ , et al. Modeling of Fluvial Reservoirs with Object Models[J]. Mathematical Geology, 1998, 30(5): 473-496.
- [34] STREBELLE S. Conditional Simulation of Complex Geological Structures Using Multiple-point Statistics [J]. Mathematical Geology, 2002, 34(1): 1-21.
- [35] 吴胜和, 张一伟, 李恕军, 等. 提高储层随机建模精度的地质约束原则[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(1): 55-58.
WU Sheng-he, ZHANG Yi-wei, LI Shu-jun, et al. Geological Constraint Principles in Reservoir Stochastic Modeling[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 2001, 25(1): 55-58.
- [36] 刘大椿. 科学技术哲学导论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2000.
LIU Da-chun. Introduction to Philosophy of Science and Technology [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2000.
- [37] GAUCH H G. 科学方法实践[M]. 王义豹, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005.
GAUCH H G. Scientific Method in Practice [M]. Translated by WANG Yi-bao. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [38] 马佩. 辩证逻辑[M]. 开封: 河南大学出版社, 2006.
MA Pei. Dialectical Logic [M]. Kaifeng: Henan University Press, 2006.
- [39] 杨德才. 自然辩证法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
YANG De-cai. Dialectics of Nature [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006.
- [40] HALDORSEN H H, DAMSLETH E. Stochastic Modeling[J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(4): 404-412.
- [41] SRIVASTAVA R M. An Overview of Stochastic Methods for Reservoir Characterization[C]// YARUS J M, CHAMBERS R L. Stochastic Modeling and Geostatistics; Principles, Methods, and Case Studies, Volume (I). Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994: 107-125.
- [42] 王家华, 张团峰. 油气储层随机建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
WANG Jia-hua, ZHANG Tuan-feng. Stochastic Modeling of Reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.