

分层抽样方法在岩心柱取样中的应用

吕洲¹, 王玉普^{2,3}, 李莉¹, 吉伟平⁴, 侯秀林¹, 刘达望¹, 葛政廷⁴, 李扬⁴

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国工程院, 北京 100088;
3. 中国石油化工集团公司, 北京 100728; 4. 中国石油长庆油田公司, 西安 710018)

摘要: 通过储层岩心实验得到的数据是地质研究、测井解释和油气藏工程计算的基础。岩心柱样品的选择是储层岩心实验的第一步, 其取样精度对实验结果具有重要的影响。当岩心柱样品取样数量受限的情况下, 传统的简单随机抽样方法难以满足测量精度的要求。针对传统抽样方法的局限性, 阐述了分层抽样方法的原理, 并探讨了分层抽样参数的选取标准。在实测数据的基础上, 使用 Visual Basic 语言编程实现蒙特卡洛算法, 对随机抽样和分层抽样的测量精度进行了比较。结果表明: 在相同抽样数量的前提下, 分层抽样的数据精度明显优于简单随机抽样。因此, 根据不同岩心实验的要求, 提出了基于分层抽样的岩心柱样品的选择方法。该方法可以预估取样精度, 并据此设计合理的样品数量, 当实验样品数量受限时, 可以有效地提升取样精度。

关键词: 分层抽样; 岩心取样; 储层实验

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Application of stratified sampling method in core plug sampling

LÜ Zhou¹, WANG Yupu^{2,3}, LI Li¹, JI Weiping⁴, HOU Xiulin¹, LIU Dawang¹, GE Zhengting⁴, LI Yang⁴

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China*;
2. *Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China*; 3. *China Petrochemical Corporation, Beijing 100728, China*;
4. *Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China*)

Abstract: The data obtained from reservoir core experiments are the basis of geological research, logging interpretation and oil and gas reservoir engineering calculations. The selection of a sample plug is the first step in a reservoir core experiment, and its sampling accuracy has an important effect on experiment results. When the sample number is limited, the conventional random sampling cannot meet the requirements of measurement accuracy. In view of the limitations of the traditional sampling methods, this paper described the principle of a stratified sampling method, and discussed its selection criteria. Based on measured data, the Monte Carlo algorithm was implemented using Visual Basic programming, and the measurement accuracy of random sampling and stratified sampling was compared. The results showed that, the data accuracy of stratified sampling was better than that of simple random sampling under the same sampling quantity. Therefore, according to the requirements of different experiments, a selection method of core plug samples based on stratified sampling was proposed. The method can estimate sampling accuracy and design a reasonable number of samples accordingly. When the number of experiment samples is limited, the sampling accuracy can be improved effectively.

Key words: stratified sampling; core sampling; reservoir experiment

储层取心的主要目的是通过对岩心样品进行实验分析, 尽可能全面精确地获取油气储层的各种特征参数。这些储层特征参数是认识油气藏的关键数据, 可以运用于油气藏勘探开发中的多个学科和全部过程。目前的岩心样品分析项目一般包括: 常规物性测试、粒度分析、全岩矿物组分分析、常规压汞、恒速压汞、核磁共振、CT 扫描、相对渗透率测试和岩电实验等室内实验项目。这些实验所获得

的结果, 直接影响了地质研究、测井解释和油气藏工程计算等油气藏勘探开发的关键工作内容。以储量计算为例, 有效孔隙度这一关键参数直接受控于岩心实测孔隙度, 即岩心实测孔隙度的精确性会直接影响储量计算的精确性。因此, 实验数据的精确性和代表性既关系到岩心样品分析的可靠性, 又影响着其他油气藏勘探开发工作的数据基础^[1]。

钻井取心所获得的岩心样品, 本身是“一孔之

见”,用于代表整个油气藏时,不可避免地具有局限性。而大量的储层岩心实验采用的是岩心柱样品,以标准岩心柱样品为例,其直径为 2.54 cm,长度通常在 5~10 cm 之间。储层岩心实验的研究尺度与油气藏的研究尺度有着明显的差异。此外,受限于实验方法、实验条件及经费周期,岩心样品分析也不可能完全地获取储层的各种信息。因此,合理有效地选取代表性样品,保证样品数据在统计规律上尽量接近真实的储层特征,是保证岩心实验数据的精确性和代表性的先决条件^[2]。

现行的岩心分析国家标准或行业标准中,对于岩心样品的取样要求相对简单,通常只是规定了岩心的取样密度^[3]。而在实际操作中,又因为样品可钻性和实验设计的要求,岩心取样往往是基于人为判断的简单随机抽样,并未充分考虑控制实验误差与实验单元处理的随机化^[4],且取样数量的确定也通常基于现场经验。这就造成了岩心实验数据的人为误差,影响了实验数据的精确性和代表性。

针对岩心取样,前人研究成果主要集中在 3 个方面:一是提高岩心取样技术与岩样制备方法^[5-7],其核心研究目的是保证岩心的收获率,并制备合格的岩心柱样品;二是根据超声波或 CT 扫描等仪器辅助,预估岩心的储层性质^[1,8],保证岩心柱取样位置的代表性;三是根据油藏工程理论推导,保证岩心柱样品数量满足油藏工程计算要求^[2,9]。笔者在前人研究的基础上,探讨了分层抽样方法在岩心柱取样中的适用性,及其与传统取样方法的差异。

统计学研究表明,分层抽样是比简单随机抽样更为高效、更能反映数据整体特征的抽样方式^[10]。该方法适用于数据总体复杂、样品点之间差异较大、非均质性较强的情况,运用于岩心柱样品选择可充分发挥其特点,以获得更高精度、更具代表性的实验数据。故笔者提出了基于分层抽样方法的代表性岩心柱样品选择方法,并对分层抽样参数及其选取标准进行了探讨。在此基础上,使用 Visual Basic 语言编程,实现蒙特卡洛算法,利用实测数据对分层抽样和简单随机抽样的测量精度进行比较,结果显示:在相同抽样数量的前提下,分层抽样的数据精度优于简单随机抽样。

1 分层抽样方法

1.1 原理

分层抽样是一种复合的抽样技术,又称分类抽样或类型抽样。根据预先定义的分层特征参数,将

总体分成互不重叠且穷尽的若干个子总体,即每个个体必属于、且仅属于某一个子总体,称这样的子总体为层。抽样在每一层中独立进行,总的样本由各层样本组成,根据各层样本汇总对总体参数做出评估^[10]。

分层抽样适用于总体基本单位特征差异大、且分布不均的情况。这一特点与岩心的非均质性相适应。

1.2 参数选取标准

分层抽样中的关键参数包括:分层特征参数、层数、分层边界、样本分配方法、层内抽样策略等^[11]。其中,分层特征参数是抽样前对总体进行分层时的依据;层数即为分层的数目;分层边界为分层区间的边界值,决定子层区间的大小;样本分配方法是层内样本与总样本之间的分配关系;层内抽样策略为分层内所采取的抽样策略。下面将详细阐述岩心柱选择中这些参数的配置及理论依据。

1.2.1 分层特征参数

确定合理的分层特征参数是提高分层抽样精度的首要环节。测井曲线是获取连续的储层特征参数的主要手段,同样也是地层划分的重要依据。故选取取心段的测井曲线参数作为抽样过程中的分层参数,既符合储层特征参数的分布规律,又可以利用测井曲线特征推断出各层储层特征参数的大致分布。

1.2.2 分层边界与分层层数

以碎屑岩岩心取样为例,从砂岩到泥岩的岩性变化是最基本的分层边界,在此基础上,通过测井信息反映出的储层物性差异同样可以成为分层边界的划分依据。

前人研究表明,分层抽样中,随着分层层数增加,抽样精度提高。但当分层层数大于 4 时,抽样精度增加的幅度将不断减小^[12]。在抽样设计时,应考虑到样品总数和储层非均质性,设定合理的分层层数。

1.2.3 样品数量分配方式

分层抽样中样本数在各分层的分配数量,同样是决定抽样精度和代表性的关键步骤,通常包括 4 种分配方式,即常数分配、比例分配、按各层的方差分配和奈曼分配。

常数分配是将样品量平均分配到各分层中,该分配方式既没有考虑到各层样本量的差异,也未考虑各层方差的不同,因此抽样效果较差。

比例分配是使各层的样本量与层内的元素总数呈正比,该分配方式在储层非均质性较强的情况

下不能很好地反映样品数据的总体趋势。

按各层的方差分配样本是使各层的样本量与层方差呈正比。该分配方式考虑到了储层非均质性,并保证每层的统计结果都达到相近的精度。但存在的问题是,当不同层之间非均质性差异较大的情况下,该分配方式给予非均质性较低的层较少的样本量,但这类非均质性较低的层通常对应物性较好的储层段,这就使得抽样结果偏离了储层实际情况。

奈曼分配是对各层的标准差与层边界所包含的区间大小均进行了考虑,如公式(1)所示:

$$n_h = n \frac{N_h S_h}{\sum_{n=1}^L N_h S_h} \quad (1)$$

式中: n_h 为各层样本容量; n 为样品总数; N_h 为某一层内的元素总数; S_h 为某一层内的样本标准差; L 为分层层数。

在本次研究中,选用测井解释孔隙度作为奈曼分配的数据来源,各层的标准差即各层测井孔隙度数据的标准差。而层边界所包含的区间大小即各层岩心的实际长度。

奈曼分配既适用于非均质性较强的岩心,又充分考虑了各层之间样本分配的权重。在利用测井曲线数据预估各层标准差的前提下,奈曼分配明显优于其他样品数量分配方式。

1.2.4 层内抽样策略

在确定了以测井曲线参数为分层特征参数,以岩性及物性界面为分层边界,以奈曼分配为样品数量分配方式的前提下,最后要考虑的是层内抽样策略,为确保层内抽样样本的独立性,拟采用随机抽样策略。

2 实例分析

2.1 实测数据

为评价笔者提出的基于分层抽样方法选择代表性岩心样品的可行性与实际效果,选取了渤海湾盆地某油田一口系统取心井主力储层段的岩心实验数据作为实例。该段岩心总长 13.08 m,总钻取实验用岩心柱 144 块,分别完成了常规物性、恒速压汞、储层敏感性、核磁共振、岩电实验,共 5 类实验项目。

首先进行测井—岩心归位;以取心段测井解释孔隙度为分层特征参数;将取心段分为 3 层;分层界限为岩性和物性的突变界面,分别为 3 798.96 m 处与 3 802.91 m 处;样本分配方法为奈曼分配,各层的标准差通过测井曲线值进行预估,在计算过程中结合岩性特征,将泥岩段扣除;层内抽样策略为随机抽样(图 1)。

2.2 算法编程

根据实验设计,取心段常规物性实验样品的取样密度达到 11 块/m 以上,在本次研究中认为该取样密度所得实验数据分布可以代表取心段岩心真实孔隙度的分布情况。在此基础上分 3 步实现数据抽样:(1)对实测孔隙度数据进行线性插值,间距为 0.01 m,得到连续的孔隙度分布数据;(2)对该数据分别进行简单随机抽样和分层抽样,样本数分别为 100,90,80,70,60,50,40,30,20,10 和 5;(3)将两种方法的抽样结果同样进行线性插值,间距为 0.01 m。

基于 Visual Basic 语言完成上述步骤的编程,运用蒙特卡洛原理^[13],将步骤(2)、(3)重复输出

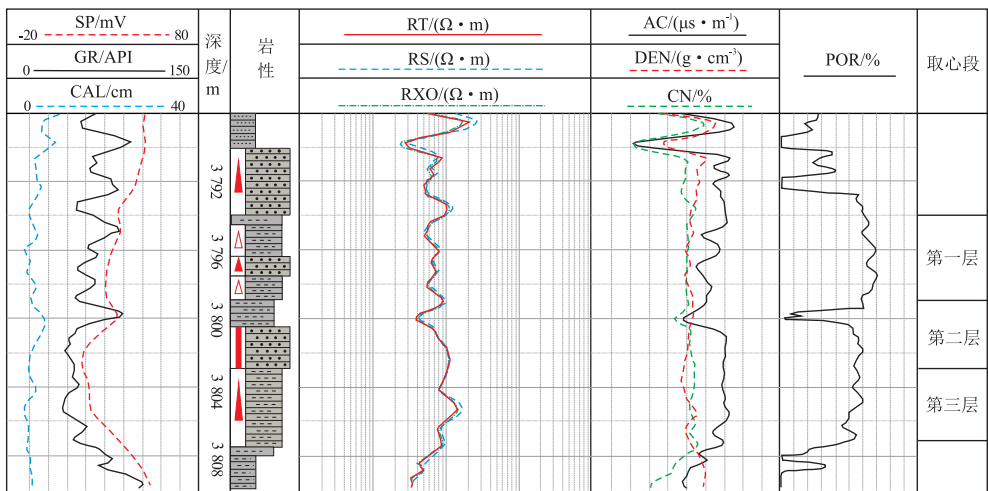


图 1 渤海湾盆地某油田取心井测井曲线

Fig.1 Logging curves of a cored well in the Bohai Bay Basin

结果 1 000 次,比较不同样品数量下,简单随机抽样和分层抽样所得结果与原始数据的相似性,并以概率的形式得出合理的样品数量。

2.3 抽样结果比较

为了比较简单随机抽样和分层抽样所得结果的数据精度,引入相关系数这一参数。相关系数是指对抽样结果插值后所得的数据与实测数据插值后所得的数据首先做 Z 分数处理,然后两组数据的乘积和除以样本数,其中 Z 分数处理是指抽样数据偏离原始数据的距离,即等于抽样数据减掉原始数据再除以标准差。相关系数用于反映数据之间相关关系的密切程度,该数值越接近 1,数据间的相关性就越强。在本次研究中,以相关系数大于 0.8 为界限,满足以上条件可认为抽样结果精度在允许范围内。

对实测数据进行简单随机抽样和分层抽样,并比较抽样结果与实测数据的相关系数(表 1)。结果表明:(1)两种抽样方式下,随着样品数量的增加,抽样结果的测量精度均不断提高,但是测量精度增加的幅度越来越小;(2)相同样品数的条件下,分层抽样的相关系数均大于简单随机抽样,即数据精度较高;(3)随着样品数量的减少,分层抽样与简单随机抽样的精度差异增大,当样品数量仅有 5 个或 10 个时,分层抽样的数据精度明显高于简单随机抽样。

在表 1 的基础上,以相关系数大于 0.8 为满足精度要求的界限,计算不同样本数量下两种抽样方式满足条件的概率(表 2)。结果表明:(1)两种抽样方式下,随着样本数量的增加,抽样结果的测量精度满足相关系数大于 0.8 的精度要求的概率均

表 2 分层抽样与简单随机抽样满足精度要求的概率
Table 2 Probability of stratified sampling and random sampling satisfying precision requirement

样品数	分层抽样 满足精度要求的概率/%	简单随机抽样 满足精度要求的概率/%
5	0	0
10	0.5	0.2
20	17.6	5.6
30	40.3	26.5
40	58.3	49.9
50	68.4	60.2
60	78.7	66.8
70	81.4	75.6
80	88.5	79.2
90	90.0	82.6
100	92.5	87.0

不断提高,但是概率增大的幅度不断减小;(2)相同样本数的条件下,分层抽样的满足精度要求的概率均大于简单随机抽样。

综合以上结果,可以作为制定合理取样数量的依据:(1)使用分层抽样时,当样品数量大于 70 个时,抽样结果具有 80% 以上的概率满足精度要求,再增加样品数,对数据精度的提高贡献不大,因此可将 70 个样品作为研究实例的合理样本数量上限;(2)使用分层抽样时,当样品个数小于 35 时,抽样结果满足精度要求的概率不足 50%,再减少样品数,数据精度显著下降,因此可将 35 个样品作为研究实例的合理样本数量下限;(3)同理,使用简单随机抽样时,合理样品数量上限为 80 个,下限为 40 个。

2.4 实例应用效果

根据前文分析结果,针对实测数据,在相同数据精度的前提下,分层抽样所需的样品数量比简单随机抽样少 10%~15%,即可以节约 10%~15% 的实验经费与周期。

3 储层岩心实验应用

在常规物性实验中,分层抽样的测量精度明显优于简单随机抽样。但相比于常规物性实验,压汞、核磁共振、储层敏感性、岩电实验等在实验费用和周期上均较高,制约了这些实验的样品数量。因此,笔者基于实验原理及实验数据的处理方法^[14-20],探讨了压汞、核磁共振、储层敏感性、岩电实验这 4 类实验取样的要求。运用分层抽样方法,选择合理的分层特征参数,以期在样品数量较少的情况下获得尽可能高的测量精度。

表 1 分层抽样与简单随机抽样测量精度对比

Table 1 Comparison of measurement accuracy between stratified sampling and random sampling

样品数	分层抽样 结果的相关系数	简单随机抽样 结果的相关系数
5	0.732(0.541~0.786)	0.706(0.452~0.783)
10	0.746(0.638~0.816)	0.738(0.604~0.815)
20	0.774(0.654~0.824)	0.765(0.637~0.817)
30	0.787(0.692~0.828)	0.781(0.646~0.833)
40	0.798(0.717~0.834)	0.793(0.675~0.833)
50	0.806(0.724~0.836)	0.801(0.723~0.840)
60	0.813(0.733~0.838)	0.807(0.726~0.842)
70	0.815(0.741~0.839)	0.813(0.726~0.844)
80	0.821(0.747~0.840)	0.818(0.750~0.845)
90	0.822(0.752~0.844)	0.821(0.753~0.846)
100	0.826(0.746~0.847)	0.825(0.761~0.847)

注:表中数据为:平均值(最小值~最大值)。

3.1 利用孔隙度与渗透率参数提高压汞实验取样精度

压汞实验所得的喉道半径与储层的储集性与流动性密切相关^[14]。在毛细管模型的假设前提下,根据泊稷叶方程和达西定律^[15]可知:

$$K = \frac{\varphi r^2}{8\tau^2} \quad (2)$$

式中: K 为渗透率, μm^2 ; φ 为孔隙度,%; r 为喉道半径, μm ; τ 为迂曲度,无因次;当 K 的单位为 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时,将公式(2)变形得:

$$RQI = 0.0316 \sqrt{\frac{K}{\varphi}} = \frac{r}{2.83\tau} \quad (3)$$

式中: RQI 为储层质量指数^[15], μm ; K 为(克式)渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

在沉积环境与成岩作用相近的情况下,迂曲度 τ 可以认为是定值,故储层质量指数与喉道半径呈线性关系。因此可以将实测孔隙度与渗透率数据作为抽样的分层特征参数,提高压汞实验取样的精确性。

3.2 利用孔隙度与渗透率参数提高核磁共振实验取样精度

根据核磁共振实验原理,氢原子核在多孔介质中主要发生横向弛豫,弛豫时间既与岩石的弛豫率 ρ 成反比,还与孔隙体积 V 与表面积 S 的比值有关,而 V/S 与孔隙半径 r 成正比^[17]。因此,横向弛豫时间 T_2 可表达为:

$$T_2 = \frac{1}{\rho} \times \frac{V}{S} = \frac{1}{\rho} \times \frac{r}{c} \quad (4)$$

式中: T_2 为横向弛豫时间,ms; ρ 为弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; V 为孔隙体积, μm^3 ; S 为孔隙表面积, μm^2 ; r 为喉半径, μm ; c 为孔喉形状因子,无因次。

由该公式可知,核磁共振实验测得的 T_2 频谱与孔喉半径 r 正相关。在样品的岩石矿物组分无明显差异的情况下,可以认为弛豫率 ρ 为定值。孔喉形状因子 c 与前文提及的迂曲度 τ 相类似,在沉积环境与成岩作用相近的情况下,同样可以认为是定值。故认为核磁共振实验测得的 T_2 频谱与喉道半径 r 成线性关系。结合本文3.1节,喉道半径 r 与储层质量指数 RQI 成线性关系,即可得核磁共振实验测得的 T_2 频谱与储层质量指数 RQI 成线性关系。因此同样可以将实测孔隙度与渗透率数据作为抽样的分层特征参数,提高核磁共振实验取样

的精确性。

3.3 利用孔隙度参数提高岩电实验取样精度

根据阿尔奇公式可知:

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\varphi^m} \quad (5)$$

式中: F 为地层因素; R_0 为100%含水的岩心电阻, $\Omega \cdot \text{m}$; R_w 为地层水电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; a 为岩性系数,无因次; m 为胶结指数,无因次。

因为阿尔奇公式本身即属于实验数据所得的回归方程,式中孔隙度 φ 与地层因素 F 成负相关关系^[18]。当岩电实验所取岩心的孔隙度分布与储层孔隙度总体分布越趋近一致时,阿尔奇公式中各项参数也越具有代表性。因此可以通过岩电实验样品孔隙度与岩心实测孔隙度的数据相关性来判别岩电实验测试取样的精确性和代表性。

3.4 利用渗透率参数提高储层敏感性实验取样精度

储层敏感性实验通常涉及到水敏、压敏、酸敏、碱敏、盐敏这5项实验。其基本原理均为在不同敏感性损害情况下,测试岩心渗透率的变化情况^[19]。当储层敏感性实验所取岩心的渗透率分布与储层渗透率总体分布越趋近一致时,储层敏感性参数也越具有代表性。

3.5 实验数据平均值的求取

在实验结果处理上,针对取样数量较少的实验项目,可以采用加权平均,而非简单的算术平均^[20]。借鉴本文1.2.3节所述的奈曼分配的概念,对不同取心位置的岩心样品赋予权重值,通过加权平均的方式计算储层特征参数。由此取得的实验数据平均值既考虑了储层非均质性,又保证计算结果与真实情况尽量接近。

4 结论

(1)当储层非均质性较强,岩心取样数量受限的情况下,分层抽样所得结果的测量精度和所需样本容量方面均优于传统的简单随机抽样。在保证实验精度的前提下,可以有效地控制实验数量,从而节约实验经费与实验周期。

(2)分层抽样参数选择时,建议遵循以下原则:以取心段测井曲线为分层特征参数;依据测井曲线特征进行分层,分层界限为岩性和物性的突变界面;样本分配方法为奈曼分配,各层的标准差通过测井曲线值进行预估;层内抽样策略为随机抽样。

(3)进行岩心柱取样前,应以测井曲线和岩心观察结果为依据,预估取样数量和取样位置。根据

分层抽样原理,确定取样数量的合理范围和相应的取样位置。

(4)压汞、核磁共振、岩电实验等实验经费高,周期长,导致实验数量受限。在进行这些实验之前,应该先测试岩心常规物性,再依据物性实验结果进行样品数量及取样位置设计,并采用分层抽样方式,提高实验数据的精度。

(5)当实验样品数量较少时,实验数据的处理应考虑借鉴奈曼分配的概念,对不同取心位置的岩心样品赋予权重值,通过加权平均的方式计算储层特征参数。这样既考虑了储层非均质性,又保证计算结果与真实情况尽量接近。

参考文献:

- [1] SIDDIQUI S, OKASHA T M, FUNK J J, et al. Improvements in the selection criteria for the representative special core analysis samples [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2006, 9(6): 647-653.
- [2] MOHAMMED K, CORBETT P. How many relative permeability measurements do you need?: A case study from a North African reservoir [J]. Petrophysics, 2003, 44(4): 262-270.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. SY/T 5336—2006, 岩心分析方法[S]. 北京:石油工业出版社, 2006: 28-29.
National Development and Reform Commission. SY/T 5336—2006, Practices for core analysis [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 28-29.
- [4] 奥特 R L, 朗格内克 M. 统计学方法与数据分析引论[M]. 张忠占, 译. 北京: 科学出版社, 2003: 923-942.
OTT R T, LONGNECKER M. An introduction to statistical methods and data analysis [M]. ZHANG Zhongzhen, Trans. Beijing: Science Press, 2003: 923-942.
- [5] SWANSON R G. Sample examination manual [M]. Tulsa, Okla: AAPG, 1981.
- [6] PARK A, DEVIER C A. Improved oil saturation data using sponge core barrel [C]//SPE Production Operations Symposium. Oklahoma City, OK; SPE, 1983.
- [7] WORTHINGTON A E, GIDMAN J, NEWMAN G H. Reservoir petrophysics of poorly consolidated rocks I. Well-site procedures and laboratory methods [C]//Proceedings of the 28th Annual Logging Symposium. London, England; Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1987.
- [8] 刘向君, 王森, 刘洪, 等. 一种岩心选择的方法: 中国, 201110056396.8 [P]. 2012-07-11.
LIU Xiangjun, WANG Sen, LIU Hong, et al. Rock core sampling method; China, 201110056396.8 [P]. 2012-07-11.
- [9] CORBETT P W M, JENSEN J L. Estimating the mean permeability: How many measurements do we need? [J]. First Break, 1992, 10(3): 89-94.
- [10] 梁小筠, 祝大平. 抽样调查的方法和原理 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1994: 1-4, 30-90.
LIANG Xiaojun, ZHU Daping. Methods and principles of sample survey [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1994: 1-4, 30-90.
- [11] 张峰, 雷振明. 基于分层抽样的高速网络吞吐率测量 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2004, 22(6): 557-563.
ZHANG Feng, LEI Zhenming. Throughput measurement technique for high-speed network based on stratified sampling [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2004, 22(6): 557-563.
- [12] ZSEBY T. Stratification strategies for sampling-based non-intrusive measurements of one-way delay [C]//Proceedings of the Passive and Active Measurement Workshop (PAM). San Diego, CA: PAM, 2003.
- [13] 盛骤, 谢式千. 概率论与数理统计及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 229-238.
SHENG Zou, XIE Shiqian. Probability and statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 229-238.
- [14] 何顺利, 焦春艳, 王建国, 等. 恒速压汞与常规压汞的异同 [J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 235-237.
HE Shunli, JIAO Chunyan, WANG Jianguo, et al. Discussion on the differences between constant-speed mercury injection and conventional mercury injection techniques [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 235-237.
- [15] PURCELL W R. Capillary pressures: Their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom [J]. Journal of Petroleum Technology, 1949, 1(2): 39-48.
- [16] AMAEFULE J O, ALTUNBAY M, TIAB D, et al. Enhanced reservoir description: Using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas; Society of Petroleum Engineers, 1993.
- [17] 肖佃师, 卢双舫, 陆正元, 等. 联合核磁共振和恒速压汞方法测定致密砂岩孔喉结构 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 961-970.
XIAO Dianshi, LU Shuangfang, LU Zhengyuan, et al. Combining nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry to probe the pore-throat structure of tight sandstones [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 961-970.
- [18] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54-62.
- [19] 于兴河. 油气储层地质学基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 294-313.
YU Xinghe. Basis of hydrocarbon reservoir geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 294-313.
- [20] 赖锦, 王贵文, 郑新华, 等. 大北地区巴什基奇克组致密砂岩气储层定量评价 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2285-2298.
LAI Jin, WANG Guiwen, ZHENG Xinhua, et al. Quantitative evaluation of tight gas sandstone reservoirs of Bashijiqike Formation in Dabei gas field [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6): 2285-2298.