

储层物性下限确定方法的研究现状与展望

路智勇^{1,2}, 韩学辉¹, 张欣³, 孙婷⁴, 王建伟⁵, 李宇志², 赵海燕⁵

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化胜利油田公司东辛采油厂, 山东东营 257100;
3. 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部, 河北廊坊 065021; 4. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,
广东湛江 524057; 5. 中石化胜利油田分公司胜利油田现河采油厂, 山东东营 257000)

摘要:储层物性下限是储量评价中识别储层、确定有效厚度的重要参数。系统考察储层物性下限确定方法,并对技术发展方向进行展望。研究认为:可依据方法、使用资料特点将物性下限方法分为岩心分析、测试分析两大类;岩心分析方法通过统计分析实验室测量的孔隙度、渗透率等参数确定各种阈值作为物性下限,确定的物性下限比较乐观,适用于测试资料较少的勘探阶段;测试分析方法通过统计分析产液能力与含油产状、孔隙度、渗透率等参数的关系来给出物性下限,确定的物性下限比较保守,适合在开发阶段使用,与岩心分析方法组合使用可在开发阶段动态确定物性下限;物性下限研究应该注意非均质性、试油工艺等问题带来的冲击。

关键词:储层; 物性下限; 有效厚度; 岩心分析; 试油

中图分类号: P 618.13 **文献标志码:** A

引用格式: 路智勇, 韩学辉, 张欣, 等. 储层物性下限确定方法的研究现状与展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 32-42.

LU Zhiyong, HAN Xuehui, ZHANG Xin, et al. Research status and outlook for methods of determining petrophysical property cutoffs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(5): 32-42.

Research status and outlook for methods of determining petrophysical property cutoffs

LU Zhiyong^{1,2}, HAN Xuehui¹, ZHANG Xin³, SUN Ting⁴,
WANG Jianwei⁵, LI Yuzhi², ZHAO Haiyan⁵

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Dongxin Production Plant, Shengli Oilfield, Dongying 257100, China;
3. Welltech-China Oilfield Services Limited, Langfang 065021, China;
4. Zhanjiang Branch of CNOOC, Zhanjiang 524057, China;
5. Xianhe Production Plant, Shengli Oilfield Company Limited, Dongying 257000, China)

Abstract: Petrophysical property cutoffs are important parameters to identify reservoirs and their effective thickness in calculating reserves. Based on literature review and case studies, the methods for petrophysical property cutoffs and development trends are explored. Some conclusions can be drawn: 1) all methods can be divided into core analysis method and oil test method based on the characteristics of the methods and the data used; 2) core analysis method can take some thresholds as petrophysical property cutoffs through statistical analysis of parameters such as porosity, permeability and so on. Its results are aggressive and the method is suitable to exploration stages where no enough test data is present; 3) oil test method can get petrophysical property cutoffs through statistical analysis on the relation of production capacity with some parameters such as oil-bearing occurrence, porosity, permeability and so on. Its results are conservative and the method applies to develop-

收稿日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1562108)

作者简介: 路智勇(1976-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为油田开发。E-mail: 18954678577@163.com。

通讯作者: 韩学辉(1974-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为储层岩石物理。E-mail: hanxuehui@upc.edu.cn。

ment stage. In addition, it is good to make dynamic adjustment of the cutoffs in development stages with the combination of core analysis method and oil test method; 4) it is necessary to pay more attention to the impacts of some issues such as reservoir heterogeneity, production test and so on.

Keywords: reservoir; petrophysical property cutoffs; effective thickness; core analysis; oil test

储层是指具有连通孔隙和一定渗透率,既能储集流体,又能让流体在一定压差下流动的岩层^[1]。储层的物性下限包括有效储层开发物性下限和成藏物性下限,前者是在目前经济和技术条件下达到储量起算标准的孔隙度、渗透率等物性参数的下限值^[2-4],是确定储层和核定储层有效厚度计算储量的重要技术参数^[5],也是生产测试过程中试油层位选择的重要依据^[6]。鉴于其基础性和必要性,有关有效储层开发物性下限(以下简称物性下限)的确定方法一直是油藏工程师的研究热点。随着对低渗透油藏、致密油气藏、页岩油气藏等非常规油气藏的勘探和开发的持续深入,有关物性下限确定方法的研究更为重要^[7-11]。目前,已经发展了较多的储层物性下限确定方法^[12-13],研究者也对物性下限的影响因素做了大量研究。综合研究表明,物性下限值受地质条件、原油性质、储层孔隙结构、埋藏深度、地层压力和温度、开采技术和石油工艺等众多因素影响^[13-15],难以建立相应的物理或者数学模型给出物性下限的确定方法,由岩心分析和试油结果通过统计得到储层的物性下限是比较现实的途径。根据使用的方法,可以将物性下限确定方法分为岩心分析方法和测试分析方法两大类。这两类方法主要利用实验室岩心分析或者试油结果确定的孔隙度、渗透率数值作为物性下限。由于确定结果都是对样本做出的评估,样本的代表性决定最终的结果,具有一定的不确定性。并且,由于区块的勘探和开发阶段的岩心分析资料、测试资料的准确程度和丰富程度不同,决定了物性下限的研究将贯穿于整个区块的勘探和开发过程。在勘探、开发的不同阶段,如何立足资料的占有程度开发适用的物性下限方法,是一个比较重要的工程命题。笔者在文献调研国内外物性下限确定方法的基础上,将有效储层开发物性下限确定方法分为岩心分析方法和测试分析方法两大类,结合部分储层物性下限确定实例分析两类方法的优越点,探讨不同勘探和开发阶段的综合使用方法以及将来的技术发展趋势。

1 基于岩心分析的储层物性下限确定方法

基于岩心分析的储层物性下限确定方法主要是

从储层的储油能力和渗流能力两方面考虑,利用实验室测量的孔隙度、渗透率、平均喉道半径等实验结果作为标尺,通过统计分析考察孔隙度、渗透率、饱和度等参数之间的关系确定各种阈值作为储层的物性下限。其方法的共同特点是:①由于是对岩心做分析得到的统计结果,取样的代表性以及数量会影响到最终的确定结果;②由于使用的参数以孔隙度、渗透率、饱和度等静态参数为主,使用的一些关键参数如甩尾法中的丢失比具有主观性,这类方法确定的物性下限需要进一步由测试分析方法来验证和刻度;③从方法应用的角度看,在测试资料较少的勘探阶段,是一种切实可行的方法,可指导后续的试油讨论等工作。图1为应用部分常用方法确定的A储层物性下限结果。表1为目前常用的基于岩心分析的储层物性分析方法^[13,16-39]。其中,有些特殊岩心分析方法如水膜厚度法^[40]、核磁共振法等主要通过束缚水饱和度确定储层物性下限,将其并入束缚水饱和度法中。

图1(a)与图1(b)为应用经验统计法确定A储层物性下限的结果:当累积储油能力丢失为5%时,孔隙度下限值为7.5%,此时累计丢失厚度(这里假设分析的岩心厚度一致)约为6%,小于限制值15%,并且通过孔隙度和渗透率关系得到渗透率下限值为 $0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,对应的累计渗流能力丢失小于5%。因此确定该区块的孔隙度和渗透率下限值分别为7.8%和 $0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

通过图1(c)与图1(d)确定最小流动孔喉半径,当累计渗透率贡献达到99.9%时,对应的孔喉半径为最小流动孔喉半径,为 $0.049 \mu\text{m}$,根据测量数据得到孔喉半径分别与孔隙度、渗透率的关系(图1(e)与图1(f))求得孔隙度下限为7%,渗透率下限为 $0.97 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

图1(g)为孔隙度-渗透率交会图法确定储层物性下限的结果,当孔隙度小于7.5%时,随孔隙度增加渗透率增加甚微,说明岩石中孔隙主要为无渗透能力的孔隙,当孔隙度大于7.5%时,随孔隙度增大渗透率明显增大,据此方法确定孔隙度和渗透率下限分别为7.5%和 $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

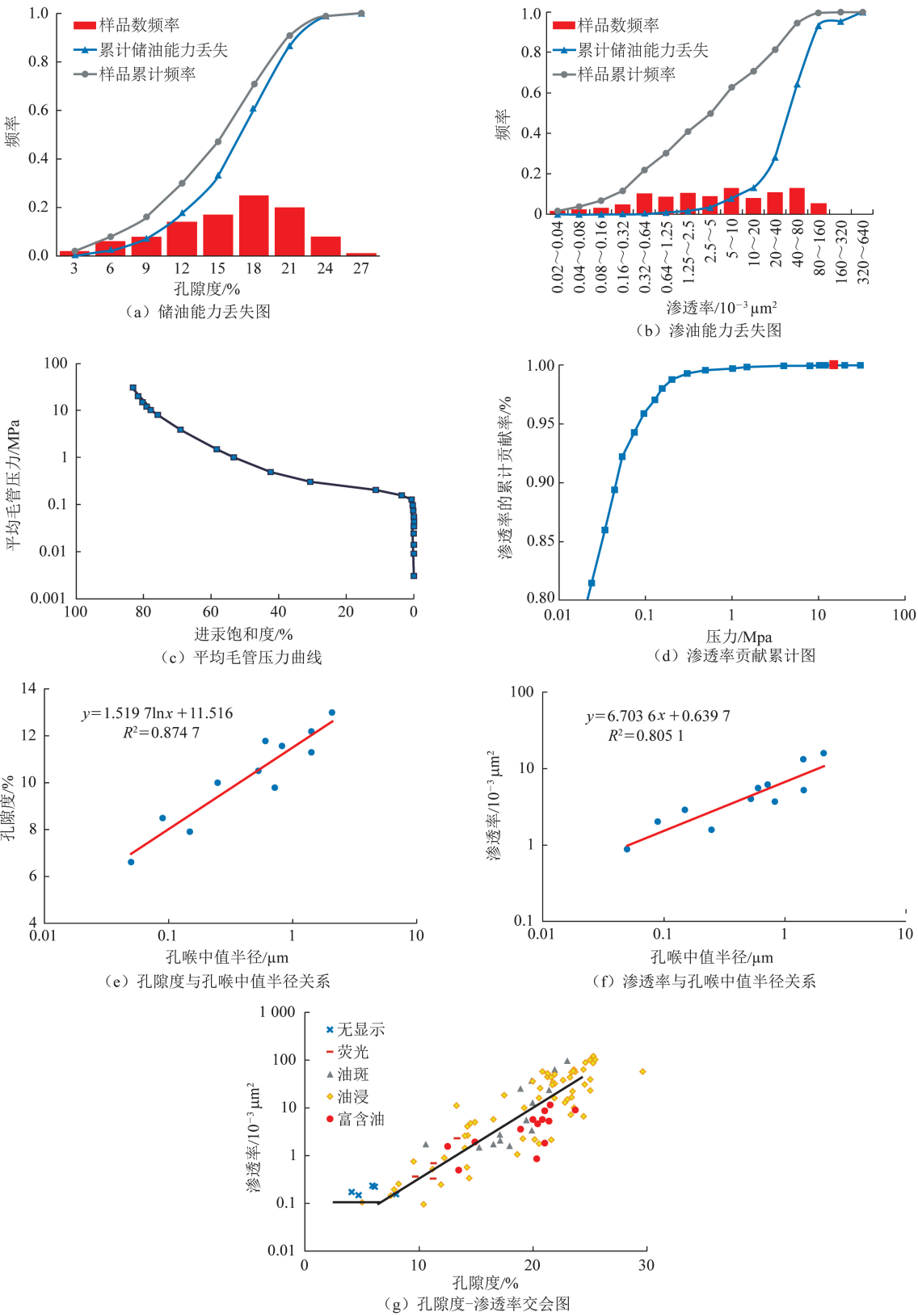


图 1 用岩心分析方法确定 A 储层物性下限

Fig.1 Petrophysical property cutoffs determined by core analysis methods of reservoir A

表 1 基于岩心分析的储层物性下限确定方法

代表性方法	使用资料	确定方法	特点
孔隙度-渗透率交会图法 ^[13,16]	孔隙度、渗透率	绘图确定渗透率和孔隙度分布,确定渗透率随孔隙度开始剧烈变化段的拐点	方法简单,容易操作;渗透率与孔隙度常有幂函数统计关系,曲线拐点不易确定;需要孔隙度、渗透率有较大分布范围
经验统计法(甩尾法) ^[16-17]	孔隙度、渗透率	以低孔渗段累计储油、渗流能力丢失占总累计一定百分比为界限	从储油能力和渗流能力两方面确定储层物性下限;丢失比的确定具有主观性
钻井液侵入法 ^[18-19]	孔隙度、渗透率、饱和度	绘制岩心分析饱和度与渗透率交会图,将含油饱和度随渗透率变小突然增大的拐点作为渗透率下限	需要有渗透率与含油饱和度较好相关性;曲线拐点不易确定
束缚水饱和度法 ^[20-24]	束缚水饱和度、孔隙度、渗透率	制作孔隙度与束缚水饱和度的交会图,取束缚水饱和度为 80% 确定孔隙度下限	方法简单,能快速确定储层的孔隙度下限值;不同实验方法确定的束缚水有一定差异 ^[23]
最小流动孔喉半径法 ^[24-34]	孔隙度、渗透率、压汞资料	以累计渗透率贡献达到 99.9% 时对应的孔喉半径为最小流动孔喉半径确定孔隙度、渗透率下限	从进汞量角度反映了不同孔喉半径对渗透率的贡献;受岩心的数量及代表性影响较大
压汞参数法 ^[35-36]	孔隙度、渗透率、压汞资料	做排驱压力与孔隙度、渗透率的交会图,通过曲线拐点确定有效厚度物性下限	简单直观地反映出排驱压力和储层物性的关系;曲线拐点不易确定
渗透率应力敏感法 ^[37-39]	地面与地层条件下渗透率	利用渗透率对压力的敏感性特点,对比在地面和地层条件下渗透率差异,确定曲线的拐点	通过数据点在图上的分布直观的看出两种条件下渗透率的变化趋势;曲线的拐点不易确定

综合以上 3 种方法可以确定孔隙度下限范围为 7% ~7.8%,渗透率下限范围相对较大。分析原因是取样岩心代表性有差异,不同岩心的孔隙结构变化较大。相对于经验统计法,孔隙度-渗透率交会图简单易用,但主观性较强(二者常为幂函数统计关系,数学上无拐点),而最小孔喉半径法则从压力与进汞量角度反映了不同孔喉半径对渗透率能力的贡献,确定的渗透率下限相对较为客观真实。为了指导今后的生产测试,从不漏掉储层的角度考虑,最

后用该方法得到 A 储层物性下限:孔隙度为 7%,渗透率为 $0.97\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。

2 基于测试分析的储层物性下限确定方法

测试分析方法是 以试油结论为刻度标尺,主要从渗流能力考虑,使用试油的产液能力作为标尺,通过统计分析产液能力与含油产状、孔隙度、渗透率等参数的关系给出物性下限(表 2)。

表 2 基于测试分析的常用储层物性下限确定方法

代表性方法	使用资料	确定方法	特点
含油产状法 ^[41]	试油结论、录井、孔隙度、渗透率	依据试油确定含油产状下限,统计得出有效厚度下限	适用于原油黏度高或密闭保压取心的情况;岩心取到地面含油产状变化,产状确定受人为影响
测试法 ^[42-45]	试油结论、孔隙度、渗透率	绘制产液指数与物性关系曲线,确定产液指数最低界限后确定孔隙度和渗透率下限	产液指数受完井方式和试油工艺影响;适用于单层生产或测试资料较多的区块
分布函数曲线法 ^[46-47]	试油结论、孔隙度、渗透率	绘制有效储层与非有效储层的孔隙度频率分布曲线,两条曲线交点确定有效储层物性下限	能够直观地看出有效储层和非有效储层的物性的分布规律;要求试油试采中有效储层和干层均较多
试油法 ^[48]	试油结论、孔隙度、渗透率	将试油结果因素归结到物性上,根据试油成果将储层划分为有效储层和非有效储层,然后将二者对应的物性绘制在同一坐标系	对资料要求低,简单可操作,适用于地层测试资料较少的区块。精度较低,储层与非储层可能存在交叉或者二者之间范围较大

其方法的共同特点是:①产液能力是主要参数,其数值容易受到完井方式以及试油工艺的影响;②由于试油是以发现油气产层为目的,油气产层一般具有好的物性、含油性和电性显示,决定试油层很难

广泛代表储层,特别是不利于获得低产储层的测试资料,一般少有干层或者在干层与好产层之间常存在“空档”;③对于多层合试的结果,需要做产能劈分,不利于方法的使用。

此外,国内外一些学者给出了几种利用测井资料确定储层物性下限的方法^[12,49-53],多为利用已证实的油水层在两种或者多种测井曲线的交会图的分布确定储层下限的测井标准和物性下限。其本质上与测试法是相同的,只是刻度后不仅可以给出孔隙度、渗透率、饱和度等地质参数下限,还能给出与孔隙度、饱和度对应的声波时差、密度、电阻率等参数,方便应用测井资料直接识别有效储层。

图 2 为应用上述部分方法确定的 A 储层物性

下限结果。图 2(a)与图 2(b)为用分布函数曲线法得到 A 储层的孔隙度和渗透率的分布频率图,利用储层与非储层的交点可以确定出孔隙度与渗透率的下限分别为 10% 和 $0.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。图 2(c)与图 2(d)为每米产液指数与孔隙度和渗透率的交会图,从图中可以得到孔隙度与渗透率下限分别为 11% 和 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。图 2(e)为试油法确定储层物性下限,此方法将试油结果单纯地归结到物性上,干层和储层有一定交叉,难以精确地给出储层物性的下限值。

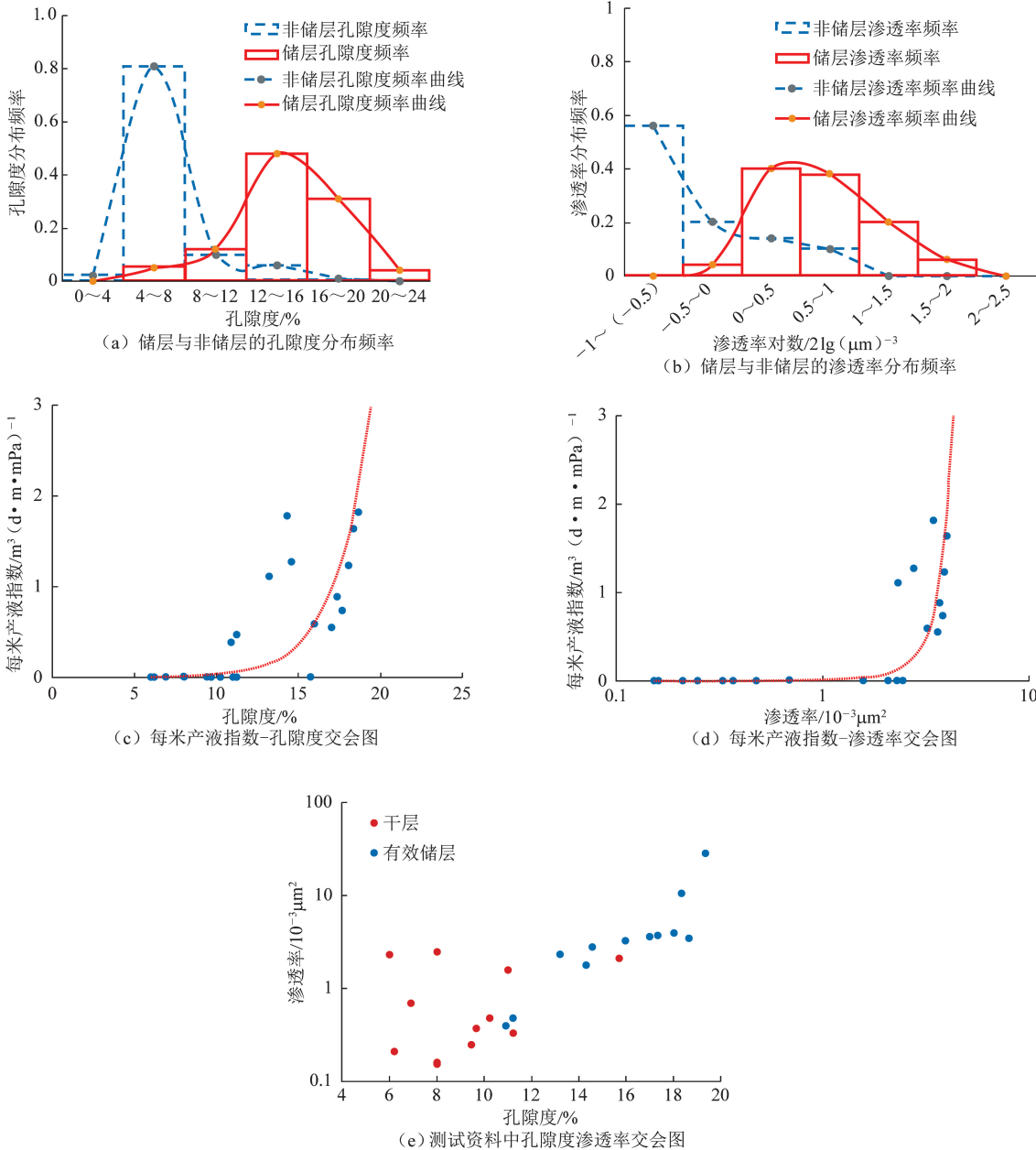


图 2 用生产测试资料确定 A 储层物性下限

Fig. 2 Petrophysical property cutoffs determined by oil test methods of reservoir A

比较几种方法发现,分布函数曲线法和测试法更能准确地给出储层的物性下限,试油法可能存在

储层与干层的交叉或者二者之间出现较大“空档”的情况(如测试资料),导致难以准确地给出储层物

性下限。具体到 A 储层,综合分析后确定 A 储层的孔隙度和渗透率下限分别为 11% 和 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

3 储层物性下限确定方法讨论及展望

3.1 两类方法的优缺点比较

以 A 储层物性下限结果为例,比较两类方法的原理、结果可以发现:测试方法适用于试油资料较多的情况,结果是在当前石油工艺和技术条件下得到的,比较符合生产实际。但是,工程上为了确保试油的成功率,该方法确定的物性下限比较保守。如本文中确定 A 储层的孔隙度下限为 11%,比岩心分析法确定的物性下限大了约 4%,直接使用会导致有效厚度和储量的计算结果偏小,可能漏掉有价值的油气产层。岩心分析方法主要是基于岩心分析结果做出的,不需要有太多的测试资料,适用于试油结论较少的勘探初期,但存在物性下限值比较乐观的可能性,应用该指标会减少漏掉油气层的概率,但会在一定程度上降低试油的成功率。总体上,两种方法各有其特点,宜组合使用。

3.2 物性下限确定的推荐方法

在勘探和开发阶段的岩心分析资料和测试资料的占有程度是有差异的:勘探阶段的岩心分析资料较多,测试资料较少;开发阶段,岩心资料增加有限(部分评价井会增加少量的岩心分析结果),测试资料相对较多,并且会逐渐随着生产井加密和调整越来越多。资料的特点和占有程度决定在勘探阶段和开发阶段的物性下限确定方法是有差别的。

根据两类方法确定储层物性下限的优缺点分析,可行的思路是在勘探、开发的不同阶段综合其优点协同使用:勘探阶段以岩心分析方法为主并指导油层测试,开发阶段将岩心分析方法和测试法组合使用,主要倚重测试资料和少量重点检查井的岩心分析资料进一步确定物性下限,做到既不漏掉油气层和丰富油气测试资料,又能够提高试油的成功率。图 3 提供了一套推荐技术方案的技术路线。

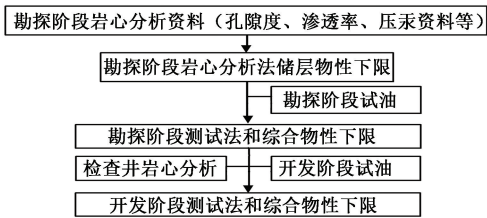


图 3 推荐的物性下限确定方法技术路线

Fig. 3 Work flow of determining petrophysical property cutoffs

3.3 方法研究关键问题及解决方法展望

总体上,两类确定储层物性下限的方法都需要根据表征参数的统计分布特征工作。因此取样的代表性和参数确定方法会影响到最终的结果,需要引起足够的关注。

3.3.1 储层的非均质性和样品的代表性

岩心分析方法确定渗透率下限的一般方法是先确定孔隙度下限,再根据孔隙度与渗透率的关系确定渗透率下限。通常,不同方法确定的孔隙度下限差别不大,但渗透率下限相差较大。如 A 储层的实例,利用岩心分析方法得到的孔隙度下限相差不大(7%~7.8%),但渗透率下限分布在(0.16~0.97) $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,相差几倍甚至接近一个数量级。分析这种情况与储层孔隙结构、孔隙类型的非均质性有关^[54]。如图 1(g)所示 A 储层的实例,相同孔隙度岩样有不同的渗透率,在 1~2 个数量级内变化。某些情况下渗透率级差可能达到 2~3 个数量级(如图 4 所示 B 储层)。在使用不同样品进行不同方法的物性下限研究时,可能会由于使用样品的差异性导致得到不同的渗透率下限,并且有较大差异。因此使用岩心分析方法确定储层物性下限时应当考虑到储层的非均质性,基于储层类型的划分合理获取不同类型储层的实验样品。

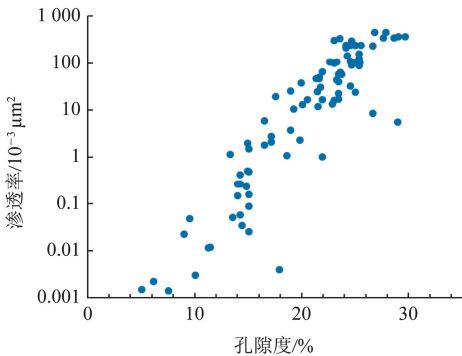


图 4 B 储层孔隙度与渗透率交会图

Fig. 4 Cross-plot of permeability and porosity of reservoir B

3.3.2 岩心分析方法中地面和地层条件的区别

油藏的埋深不同,温度和压力也不同,温度和压力条件对孔隙度、渗透率、孔隙结构、饱和度等性质均有影响。在油藏温度、压力条件下得到的实验测量更贴近储层实际情况,得到的物性下限更可靠。例如:渗透率敏感法就考虑到了两种条件的差异。有关应用压汞法确定孔隙结构也应考虑到油藏压力条件的模拟,罗瑞兰等^[55]强调了覆压条件下压汞测试的必要性。建议使用地层温度、压力条件下的孔

隙度、渗透率、孔隙结构、饱和度测试结果确定物性下限。同时,考虑到原油的黏度对渗透的影响,还应在有关渗流实验分析中使用处理过的地层原油或者黏度接近的模拟油做实验测量,以尽可能接近实际情况。

3.3.3 试油方法及工艺对生产测试类方法确定物性下限的影响

生产测试类方法确定物性下限容易受到试油方法和工艺的影响。一方面,自然求产和压裂求产方法的产能存在差异,多井多层产能结果需要有一个具体的标准化方法。另一方面,单层测试资料较少,多层合试资料较多,劈分方法会对产能确定有很大影响。图5是劈分前的产能指数随孔隙度的分布,与图2(c)对比可见依据层厚、物性劈分后的产能指数随孔隙度的分布更清晰合理,劈分方法及结果对确定物性下限非常重要。

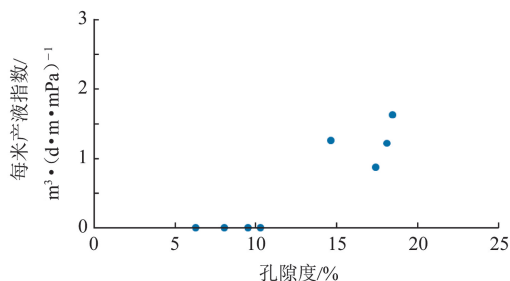


图5 储层A产能劈分前每米产液指数-孔隙度交会图

Fig.5 Plot of liquid production index and porosity of reservoir A

3.3.4 渗透率下限

渗透率下限是最重要的物性下限,应该注重渗透率岩心分析和测井评价方法的研究。

迪基^[56]认为确定油藏流体特征最重要的参数是渗透率,小于一定渗透率的砂岩和碳酸盐岩不能提供最小经济价值的产油量。因此渗透率下限的确定非常重要。对于低渗透、致密油气藏,有关渗透率的岩心分析和测井评价方法的研究非常重要,可以确保得到比较准确的结果以确定渗透率下限,并利用该下限值确定储层有效厚度。

此外,考虑到油价变化引起的油藏开发效益问题,有必要基于成本-效益分析方法动态调整有效储层开发物性下限。

4 结论

(1)基于岩心分析的储层物性下限确定方法主要是从储层的储油能力和渗流能力两方面考虑,通过统计分析实验测量的孔隙度、渗透率、饱和度等参

数之间的关系确定各种阈值作为储层的物性下限。结果受取样的代表性、丢失比、拐点的人为确定等因素影响,适合在勘探阶段确定物性下限以指导测试分析。由于采用了一些乐观的假设(如丢失比5%等),应用岩心分析方法确定的物性下限比较乐观。

(2)基于测试分析的物性下限确定方法主要从渗流能力考虑,通过统计分析产液能力与含油产状、孔隙度、渗透率等参数的关系给出物性下限。确定的物性下限受试油工艺影响大,但在当前的技术经济条件下比较落实,更适合在开发阶段广泛使用。考虑到试油层数特别是油气显示弱的低孔低渗油层数一般较少(相对于岩心分析方法的实验数据),应用测试分析方法确定的物性下限比较保守。

(3)为了不漏掉油气层以及获得较好的试油成功率,建议在勘探阶段以岩心分析方法为主确定物性下限,测试阶段将测试法和岩心分析方法组合使用得到物性下限,工作时有必要根据岩心分析资料和测试资料的占有情况及时更新物性下限。

(4)随着油气勘探和开发的深入,更多的低渗透储层、致密油气储层、页岩油气储层等非常规储层也成为了研究的目标,这些储层的孔隙度和渗透率更小,试油工艺也更为复杂,而且存在因为结构引起的各向异性等问题,应用岩心分析和测试这两类方法确定储层物性下限特别是渗透率下限的难度也越大,需要引起更广泛的注意。

参考文献:

- [1] 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2008.
- [2] WORTHINGTON P F, COSENTINO L. The role of cut-offs in integrated reservoir studies [J]. SPE Res Eval & Eng, 2005, 8(4): 276-290.
- [3] WORTHINGTON P F. The application of cutoffs in integrated reservoir studies [J]. SPE Res Eval & Eng, 2008, 11(6): 968-975.
- [4] WORTHINGTON P F. Net pay—what is it? What does it do? How do we quantify it? How do we use it [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2010, 13(5): 812-822.
- [5] 杨通佑, 范尚炯, 陈元千, 等. 石油及天然气储量计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [6] 刘达林. 试油层位选择及提高探井试油成功率之我见[J]. 油气井测试, 2002, 11(2): 39-42.
LIU Dalin. The opinion of both choosing layer location and improving success ratio about production testing in deep wells [J]. Well Tsetting, 2002, 11(2): 39-42.

- [7] 白工,黄德明,刘欣,等.川东北超致密砂岩气田储层物性下限确定方法[J].天然气技术与经济,2013,7(5):23-25.
BAI Gong, HUANG Deming, LIU Xin, et al. A method to determine the lower limit of physical property in extra low-porosity and low-permeability sandstone reservoirs, Northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2013,7(5):23-25.
- [8] 李烨,司马立强,闫建平,等.低孔、低渗致密砂岩储层物性下限值的确定[J].天然气工业,2014,34(4):52-56.
LI Ye, SIMA Liqiang, YAN Jianping, et al. Determination of petrophysical property cutoffs of tight sandstone gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4):52-56.
- [9] 潘高峰,刘震,赵舒,等.鄂尔多斯盆地镇泾地区长8段致密砂岩油藏成藏孔隙度下限研究[J].现代地质,2011,25(2):271-278.
PAN Gaofeng, LIU Zhen, ZHAO Shu, et al. The study on lower limit of porosity for oil accumulation in Chang-8 member, Zhenjing area, Ordos Basin [J]. Geoscience, 2011,25(2):271-278.
- [10] 张安达,王成,乔睿.致密砂岩储层物性下限确定新方法 & 系统分类[J].岩性油气藏,2014,26(5):5-8.
ZHANG Anda, WANG Cheng, QIAO Rui. A new method for determining physical property lower limit of tight sandstone reservoir and reservoir system classification [J]. Lithologic Reservoirs, 2014,26(5):5-8.
- [11] 柳锦云.低渗透油藏有效厚度下限标准研究[J].海洋石油,2009,28(3):70-73.
LIU Jinyun. Research on the minimum net pay thickness in low permeability reservoirs [J]. Offshore Oil, 2009, 28(3):70-73.
- [12] SNYDER R H. A review of the concepts and methodology of determining "net pay" [R]. SPE 3609,1971.
- [13] 郭瑞.储集层物性下限值确定方法及其补充[J].石油勘探与开发,2004,31(5):140-144.
GUO Rui. Supplement to determining method of cut-off value of net pay [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004,31(5):140-144.
- [14] 黎菁,罗彬,张旭阳,等.致密砂岩气藏储层物性下限及控制因素分析[J].西南石油大学学报,2013,35(2):54-62.
LI Jing, LUO Bin, ZHANG Xuyang, et al. Methods to determine the lower limits and controlling factors of the effective reservoir of tight sand gas reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013,35(2):54-62.
- [15] 刘震,黄艳辉,潘高峰,等.低孔渗砂岩储层临界物性确定及其石油地质意义[J].地质学报,2013,86(11):1815-1825.
LIU Zhen, HUANG Yanhui, PAN Gaofeng, et al. Determination of critical properties of low porosity and permeability sandstone reservoir and its significance in petroleum geology [J]. Acta Geologica Sinica, 2013,86(11):1815-1825.
- [16] 张春,蒋裕强,郭红光,等.有效储层基质物性下限确定方法[J].油气地球物理,2010,8(2):11-16.
ZHANG Chun, JIANG Yuqiang, GUO Hongguang, et al. Methods to determine the matrix petrophysical property low limits of effective reservoir [J]. Petroleum Geophysics, 2010,8(2):11-16.
- [17] 张晓岗.经验统计法在物性下限确定中的应用.[J].国外测井技术,2012,191(5):17-18.
ZHANG Xiaogang. Application of experience statistics method in petrophysical property cutoffs determination. [J]. Word Well Logging Technology, 2012,191(5):17-18.
- [18] 耿龙祥,曹玉珊,易志伟,等.濮城油田砂岩储集层物性下限标准研究[J].石油勘探与开发,1999,26(1):81-83.
GENG Longxiang, CAO Yushan, YI Zhiwei, et al. A study on petrophysical property cutoffs of sandstone reservoirs in Pucheng Oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999,26(1):81-83.
- [19] 董立全.川西南部地区须二气藏储层物性下限研究[D].成都:成都理工大学,2005.
DONG Liquan. A research on reservoir physical textuer lower-bound of the second zone of Xujiahe formation area of west Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [20] 万念明,操应长,郑丽婧,等.滨南-利津地区沙四段有效储层物性下限研究[J].大庆石油地质与开发,2012,30(6):50-56.
WAN Niangming, CAO Yingchang, ZHENG Liqian, et al. Lower limit studies of the physical properties for the effective reservoirs in Sha no. 4 member of Binnan-Lijin area [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2012,30(6):50-56.
- [21] 王艳忠,操应长.车镇凹陷古近系深层碎屑岩有效储层物性下限及控制因素[J].沉积学报,2010,28(4):752-761.
WANG Yangzhong, CAO Yingchang. Lower property limit and controls on deep effective clastic reservoirs of paleogene in Chezhen depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010,28(4):752-761.

- [22] 于雯泉,叶绍东,陆梅娟.高邮凹陷阜三段有效储层物性下限研究[J].复杂油气藏,2011,4(1):5-9.
YU Wenquan, YE Shaodong, LU Meijuan. Study on lower limit of physical properties of E_1f_3 effective reservoir in Gaoyou Sag [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2011,4(1):5-9.
- [23] 李宁,周克明,张清秀,等.束缚水饱和度实验研究[J].天然气工业,2009,(z1):110-113.
LI Ning, ZHOU Keming, ZHANG Qingxiu, et al. Experimental research on irreducible water saturation [J]. Natural Gas Industry, 2009,(z1):110-113.
- [24] 焦翠华,夏冬冬,王军,等.特低渗砂岩储层物性下限确定方法:以永进油田西山窑组储集层为例[J].石油与天然气地质,2009,30(3):379-383.
JIAO Cuihua, XIA Dongdong, WANG Jun, et al. Methods for determining the petrophysical property cut-offs of extra-low porosity and permeability sandstone reservoirs-an example from the Xishanyao Formation reservoirs in Yongjin oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3):379-383.
- [25] 时宇,杨正明,黄延章.储层流动孔喉下限研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(6):41-44.
SHI Yu, YANG Zhengming, HUANG Yanzhang. The study of cut-off pore-throat in reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009,31(6):41-44.
- [26] 段新国,王洪辉,胡永章,等.储层参数下限确定方法:以河南安棚油田为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),2003,30(2):169-173.
DUAN Xinguo, WANG Honghui, HU Yongzhang, et al. Methods of determining the lower limits of different parameters of reservoir in Anpeng Oilfield [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2003,30(2):169-173.
- [27] 高阳,蒋裕强,杨长城,等.最小流动孔喉半径法确定低渗储层物性下限[J].科技导报,2011,29(4):34-38.
GAO Yang, JIANG Yuqiang, YANG Changcheng, et al. Minimum flow pore throat radius for determination of the lower limits of parameters in low permeability reservoir [J]. Science & Technology Review, 2011,29(4):34-38.
- [28] 李建明,吴锡令.根据压汞曲线建立砂岩储层渗透率估算模型[J].中国石油勘探,2007,12(1):72-75.
LI Jianming, WU Xiling. Establishment of permeability estimation model for sandstone reservoir based on injection-Hg capillary pressure curve [J]. China Petroleum Exploration, 2007,12(1):72-75.
- [29] 赵松林.应用孔喉体积-渗透率贡献分布曲线确定流动孔喉半径下限值[J].西南石油大学学报(自然科学版),1993,15(3):36-42.
ZHAO Songlin. Determination of cut-off value of effective throat radio by permeability-contribution curve [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 1993,15(3):36-42.
- [30] LEVERETT M C. Capillary behavior in porous solids [J]. Trans Am Inst, 1941,142:152-169.
- [31] 吴俊晨.用压汞资料计算储层孔隙度下限和原始含油饱和度[J].科技资讯,2013(6):113,115.
WU Junchen. The calculation of the lower limit of porosity of reservoir and the original oil saturation by mercury intrusion data [J]. Science & Technology Information, 2013(6):113,115.
- [32] 廖敬,彭彩珍,吕文均,等.毛管压力曲线平均化及J函数处理[J].特种油气藏,2009,15(6):73-75.
LIAO Jing, PENG Caizhen, LÜ Wenjun, et al. Averaging capillary pressure curve and processing J function [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009,15(6):73-75.
- [33] 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.
- [34] WALL C C. Permeability:pore size distribution correlations [J]. Inst Petrol, 1965,51:498.
- [35] 黎菁,杨勇,王少飞,等.苏里格气田东区致密砂岩储层物性下限值的确定[J].特种油气藏,2012,18(6):52-56.
LI Jing, YANG Yong, WANG Shaofei, et al. Determination of the lower limits of the consolidated sandstone reservoirs in eastern Sulige Gasfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012,18(6):52-56.
- [36] 靳亚勤,王桂成,张涛.直罗油田马莲沟区油层有效厚度下限标准新研究[J].中国西部科技,2010(4):11-13.
JIN Yaqin, WANG Guicheng, ZHANG Tao. A new study for the lower limits of oil reservoir in Maliangou area of Zhiluo Oilfield [J]. Science and Technology of West China, 2010(4):11-13.
- [37] 崔永斌.有效储层物性下限值的确定方法[J].国外测井技术,2007,22(3):32-35.
CUI Yongbin. Methods of the petrophysical lower limitvalue determination for the effective reservoir [J]. Word Well Logging Technology, 2007,22(3):32-35.
- [38] 李幸运,郭建新,张清秀,等.气藏储集层物性参数下

- 限确定方法研究[J]. 天然气勘探与开发, 2008, 31(3):33-38.
- LI Xingyun, GUO Jianxin, ZHANG Qingxiu, et al. Determining method for the lower limit of physical-property parameters in gas reservoirs [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2008, 31(3):33-38.
- [39] 黎菁, 赵峰, 刘鹏. 苏里格气田东区致密砂岩气藏储层物性下限值的确定[J]. 天然气工业, 2012, 32(6):31-35.
- LI Jing, ZHAO Feng, LIU Peng. Determination of lower limits of porosity and permeability of tight sad gas reservoir in the east block of the Sulige Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6):31-35.
- [40] 王伟明, 卢双舫, 田伟超, 等. 吸附水膜厚度确定致密油储层物性下限新方法: 以辽河油田大民屯凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1):135-140.
- WANG Weiming, LU Shuangfang, TIAN Weichao, et al. A new method to determine porosity and permeability cutoffs of tight oil reservoirs by using thickness of adsorption water film: a case study from the Damintun Sag, Liaohe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1):135-140.
- [41] 魏小微, 谢继容, 唐大海, 等. 低孔渗砂岩储层基质物性下限确定方法研究: 以川中 LA 构造沙一段油藏为例[J]. 天然气工业, 2008(s1), 28-31.
- WEI Xiaowei, XIE Jirong, TANG Dahai, et al. Methods of determining the matrix petrophysical cutoffs of low porosity and low permeability sand stone reservoir; taking the J₂S¹ oil reservoir in LA field in central Sichuan as an example [J]. Natural Gas Industry, 2008(s1), 28-31.
- [42] 韩学辉, 崔玉峰, 李峰弼, 等. DB 气田非均质储层级别划分及常规测井识别方法[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1):186-192.
- HAN Xuehui, CUI Yufeng, LI Fengbi, et al. Classification and conventional logging identification of inhomogeneous reservoir in DB gas field [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1):186-192.
- [43] 王艳忠, 操应长, 宋国奇, 等. 试油资料在渤南洼陷深部碎屑岩有效储层评价中的应用[J]. 石油学报, 2008, 29(5):701-706, 710.
- WANG Yanzhong, CAO Yingchang, SONG Guoqi, et al. Application of production test data to evaluation of the effective reservoir in deep clastic of Bonan Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5):701-706, 710.
- [44] 吴向红, 何伶, 方宏长. 比采油指数曲线的分析和应用[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(6):745-749.
- WU Xianghong, HE Ling, FANG Hongchang. Analysis and application of specific productivity index[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6):745-749.
- [45] 王丽荣, 张秀丽, 黄强强, 等. 常规生产井米采油指数计算研究与应用[J]. 内蒙古石油化工, 2013, 39(16):32-33.
- WANG Lirong, ZHANG Xiuli, HUANG Qiangqiang, et al. Research and application of the calculation of production index for conventional production wells [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2013, 39(16):32-33.
- [46] 邵长新, 王艳忠, 操应长. 确定有效储层物性下限的两种新方法及应用: 以东营凹陷古近系深部碎屑岩储层为例[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2):414-416.
- SHAO Changxin, WANG Yanzhong, CAO Yingchang. Two new methods used to determine the low limits of effective reservoir physical properties and their applications: a case study on deep clastic reservoir of Palaeogene in Dongying depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2):414-416.
- [47] 王艳忠, 操应长, 宋国奇, 等. 东营凹陷古近系深部碎屑岩有效储层物性下限的确定[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(4):16-21.
- WANG Yanzhong, CAO Yingchang, SONG Guoqi, et al. Determination of physical property lower limit of deep clastic effective reservoirs of Paleogene in Dongying depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(4):16-21.
- [48] 李明, 刘继梓, 王雪荔, 等. S 油田 W 南区长 6 特低渗透储层物性下限标准研究[J]. 辽宁化工, 2010, 39(10):1065-1068.
- LI Ming, LIU Jizi, WANG Xueli, et al. Study on petrophysical property cutoff of the southern W Chang 6 extra-low permeability reservoir in the S oilfield [J]. Liaoning Chemical Industry, 2010, 39(10):1065-1068.
- [49] 李建民, 夏庆江. 一种实用的有效厚度电性解释标准转换方法[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(4):41-42.
- LI Jianmin, XIA Qingjiang. One practical conversion method for electric property interpretation standards of effective thickness [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1999, 18(4):41-42.
- [50] 鲁红, 李建民. 一种实用的砂砾岩储层有效厚度解释[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(3):135-137.
- LU Hong, LI Jianmin. A kind of practical effective thickness interpretation and evaluation method for glauconite reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(3):135-137.

- [51] 宋子齐,程国建,杨立雷,等. 利用测井资料精细评价特低渗透储层的方法[J]. 石油实验地质,2006,28(6):595-599.
SONG Ziqi, CHENG Guojian, YANG Lilei, et al. A method for fine evaluation in extra-low permeability reservoirs using logging data [J]. Petroleum Geology And Experiment, 2006,28(6):595-599.
- [52] 薛峰,夏宏泉,吴宝玉,等. 基于 $Rt-\Phi$ 的 Pkt 图确定油水层及有效厚度下限标准[J]. 国外测井技术,2008,23(3):28-30.
XUE Feng, XIA Hongquan, WU Baoyu, et al. Determination of lower limit standard for oil-water layer and effective thickness based on $Rt-\Phi$ Pkt plot [J]. World Well Logging Technology, 2008,23(3):28-30.
- [53] 窦凤华,吕晶,孙国红,等. 萨中开发区萨零组油层测井解释有效厚度标准研究[J]. 国外测井技术,2008,23(1):22-25.
DOU Fenghua, LÜ Jing, SUN Guohong, et al. Study on tile well logging interpretation standards for effective thickness of the oil layer of SA group 0 in the central SA development area [J]. World Well Logging Technology, 2008,23(1):22-25.
- [54] WANG Yanzhong, CAO Yingchang, SONG Guoqi, et al. Analysis of petrophysical cutoffs of reservoir intervals with production capacity and with accumulation capacity in clastic reservoirs [J]. Petroleum Science, 2014,11(2):211-219.
- [55] 罗瑞兰,程林松,李熙喆,等. 低渗透储层岩石覆压实验变形特征分析[J]. 天然气工业,2009,29(9):46-49.
LUO Ruilan, CHENG Linsong, LI Xizhe, et al. The deformation characteristics of low permeability reservoir rocks under confining pressure [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(9):46-49.
- [56] PA 迪基. 石油开发地质学[J]. 北京:石油工业出版社,1982.

(编辑 修荣荣)