

基于物性上、下限计算的致密砂岩储层分级评价 ——以苏北盆地高邮凹陷阜宁组一段致密砂岩为例

周磊^{1,2},王永诗³,于雯泉⁴,卢双舫⁵

[1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257000; 2. 中国石化胜利石油管理局博士后科研工作站,山东东营 257000; 3. 中国石化胜利油田分公司,山东东营 257000; 4. 中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院,江苏扬州 225009; 5. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580]

摘要:致密储层分级评价是致密油资源评价的核心内容之一,通过确定致密油储层的不同物性界限能准确有效的建立致密储层分级评价标准,为致密储层分级提供理论依据。以高邮凹陷阜宁组一段致密砂岩储层为例,运用含油产状法、核磁共振法确定了致密储层的含油物性下限,运用核磁共振法、最小流动孔喉半径法、试油法等确定了致密储层的可动物性下限,运用力平衡法确定了致密储层的物性上限;结合致密储层的渗流特征并辅以孔隙结构分类验证,建立了致密砂岩储层的分级评价标准,将高邮凹陷阜宁组一段致密砂岩储层划分为无效致密储层、致密含油储层、可动致密储层及易动致密储层4个级别,渗透率界限分别对应 0.07×10^{-3} , 0.12×10^{-3} , 0.50×10^{-3} 和 $1.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。致密储层的分级结果与储层试油试采结果相一致,印证了利用致密储层物性界限进行致密储层分级评价的准确性和适用性。

关键词:物性下限;物性上限;分级评价;致密砂岩储层;高邮凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Classification assessment of tight sandstone reservoir based on calculation of lower and upper limits of physical properties—A case study of the tight sandstone reservoir in the 1st member of Funing Formation in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

Zhou Lei^{1,2}, Wang Yongshi³, Yu Wenquan⁴, Lu Shuangfang⁵

[1. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oilfield Branch Company Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 2. Postdoctoral Scientific Research Station of Shengli Petroleum Administrative Bureau, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 3. Shengli Oilfield Branch Company Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 4. Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Branch Company Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 5. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: The classification assessment of tight sandstone reservoirs is one of the most important research focus of tight oil resource evaluation. Criteria of classification assessment for tight reservoirs can be effectively and accurately established by calculating the limits of various physical properties of tight oil reservoir, providing a theoretical basis for the classification of tight reservoirs. The tight sandstone reservoir in the 1st member of Funing Formation in the Gaoyou Sag, is taken as an example in the study. Its lower limit of oil-bearing property is calculated by methods of oil-bearing occurrence and nuclear magnetic resonance (NMR); its lower limits of physical properties for oil flowing are worked out by methods of NMR, minimum flowing pore throat radius and formation testing; and its upper limits of physical properties are figured out by balancing the buoyance and capillary resistance of oil in pores. Then following the characterization of tight reservoir permeability and verification of pore structure classification, we established the criteria for classification assessment of

收稿日期:2018-11-29;修订日期:2019-08-02。

第一作者简介:周磊(1985—),男,博士、助理研究员,沉积学、储层地质学。E-mail:zhouleiupc@163.com。

通讯作者简介:卢双舫(1962—),男,教授、博士生导师,非常规油气勘探和地球化学。E-mail:lushuangfang@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05006)。

tight sandstone reservoirs. The tight reservoirs in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag, were accordingly classified into four classes, namely ineffective tight reservoir, oil-bearing tight reservoir, oil-movable tight reservoir and highly oil-movable tight reservoir, with the permeability boundaries of $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $0.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $1.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ respectively. The consistency of the classification results and production tests serves to prove the accuracy and applicability of the method proposed in the study.

Key words: lower limit of physical property, upper limit of physical property, classification assessment, tight sandstone reservoir, Gaoyou Sag

储层作为致密油气藏的两大基本要素之一^[1],是致密油气勘探的核心研究内容,而储层研究中又以储层评价尤为重要,其直接关系到勘探目标的甄选和致密油气资源量评价,同时也是致密油气藏“甜点”预测的前提,开展准确有效的致密储层评价一直是致密油气勘探的难点。为此,石油工作者们就如何建立准确、适用的致密储层评价方法从不同角度开展了研究,也取得了丰富的成果。

比较传统的方法是从致密储层物性的控制因素入手,在明确构造、沉积或成岩等地质因素对储层物性的建设性或破坏性作用基础上,通过判定不同地区各地质因素的作用性质及地质因素的耦合关系来评价致密储层的优劣,并以建设性地质因素叠合发育区作为致密储层“甜点”区^[2-4],该方法从致密储层成因的角度进行定性评价,对于勘探的指导意义重大,但目前尚难以给出储层分级评价的量化标准;随着现代测试技术的进步,有学者在致密储层孔隙结构表征分类的基础上,通过划分不同孔隙结构类型下储层的孔渗能力进行储层评价^[5-6],该方法需要大量扫描电镜、压汞分析等孔隙结构测试作为支撑,对于低勘探程度或缺少相关资料的区块难以推广;有学者则进一步综合考虑致密储层孔隙结构、含油气性、可动性、物质组成等参数或者构建表征储层品质的新参数,通过拟合参数与储层物性的定量关系进行储层评价^[7-10],该类方法实现了储层的量化评价,但表征储层性质的参数众多,选取或者构建何种参数最能反映致密储层品质目前学界仍缺乏共识;因此,有学者通过计算致密储层物性下限划分无效致密储层和有效致密储层进行致密储层分级评价^[11-12],该方法从统计学角度量化了储层分级评价的标准,具有良好的适用性和操作性,但也存在一些不足亟待完善,首先该方法仅能划分致密储层的有效性与否,对于致密储层是否含油以及有效致密储层的流体可动性无法评价;其次,不同方法计算的物性下限含义不同,如试油法计算的是产油储层的物性下限,反映的是致密储层能否产出工业油气的下限,而束缚水膜厚度法计算的是允许烃类进出孔隙的最小孔喉半径,反

映的是致密储层能否充注油气的下限^[13-15],但在文献报道中却常出现把不同方法计算的下限混为一谈的情况^[11,16-17];此外,由于该方法缺乏致密储层物性上限标准^[18],若按照惯用的致密储层划分标准(孔隙度 $\Phi < 10\%$,渗透率 $K < 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)^[19-20],则容易将致密储层的“甜点”储层与常规低渗储层混淆。由此可见,不同储层评价方法存在各自的局限性,开展储层评价时需要根据研究区实际情况采取适用的方法。

“十二五”期间苏北盆地高邮凹陷中深层致密油勘探获得突破^[21],目前处于致密油勘探初期阶段,致密储层相关研究有限^[8,22-23],急需建立行之有效的储层评价方法为进一步勘探提供技术支撑。针对上述存在问题,本文以高邮凹陷阜宁组一段(简称阜一段,下同)致密砂岩储层为例,综合利用已有的分析测试资料,采取不同方法分别明确了致密储层的含油物性下限、可动物性下限、易动物性下限和致密储层物性上限,并结合致密储层孔隙结构特征建立了储层分级评价标准。在此基础上,结合试油试采资料对分级评价的结果进行了验证,结果表明该评价方法具有较好的准确性和适用性。

1 工区地质概况

高邮凹陷位于苏北盆地南部,东台坳陷中部,南为通扬隆起,北接柘垛低凸起与建湖隆起相连,东起白驹凹陷,东南靠吴堡低凸起与溱潼凹陷相连,西接菱塘桥低凸起与金湖凹陷相隔,东西长约100 km,南北宽约25~30 km,面积达2 670 km²,呈北东向长条形分布,新生界地层沉积厚达7 000 m,是苏北盆地沉降最深的一个凹陷,可划分为北部斜坡带,中央深凹带和南部断阶带^[23]。“十二五”期间,江苏油田在北斜坡沙花瓦中内带以及南断阶的低台阶、埋深大于3 000 m地区发现了致密油气藏“甜点”,其中花X33、富深X1等井在阜一段获得重大突破,展示了高邮凹陷深层致密油勘探的巨大潜力^[21]。

高邮凹陷阜一段沉积时期主要发育三角洲沉积,

其上覆阜二段为凹陷深层主力烃源岩层,形成“上生下储”的成藏特点^[21]。阜一段致密储层岩石类型主要为长石质岩屑砂岩和岩屑质长石砂岩,岩石粒度细,粒径范围为0.04~0.2 mm。储层致密特征明显,孔隙度主要分布于4%~16%,其中孔隙度小于10%占63.5%,孔隙度小于12%占81.3%,孔隙度平均为8.31%;渗透率分布于 $(0.02 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 占78.1%,平均为 $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层储集空间主要为溶蚀孔,其次为原生粒间孔、粘土矿物及碳酸盐胶结物晶间孔,少量颗粒可见微裂缝。

2 致密储层物性下限

戴金星^[24]等根据储层物性参数下限描述内容的差异将其分为工业下限和储集下限,工业下限指在现有工业技术及经济条件下获得工业油气流的储层物性下限,也有学者称之为有效储层物性下限^[11],是判断致密储层能否工业产油的物性下限;储集下限指具有储产油气能力的储层物性下限,换言之即油气能够充注储层成藏^[13],是判断致密储层能否含油的物性下限。因此,开展致密储层分级评价不仅需要明确储层的能否产出油气,更要评价储层是否含有油气。

计算储层物性下限的方法很多,常用的主要有经验统计法、分布函数法、试油法、含油产状法、模拟实验法、核磁共振法、束缚水膜厚度法、最小流动孔喉半径法等^[11-17],不同方法的原理不同,适用性及物性下限的含义也有所区别。例如经验统计法是选取储层累积储、渗能力丢失占总累积的5%时的孔、渗值作为物性下限^[16-17],该方法较多用于常规储层物性下限计算,需要大量岩芯物性分析资料,而且致密储层渗透率级差较大,高渗透率储层会严重影响计算结果的准确性,对于致密储层适用性较差;模拟实验法是利用钻井岩心在实验室模拟不同地层温、压下的产液或者渗流达到最低工业产能时储层的临界物性作为物性下限^[17],对于具有强烈非均质性的致密储层而言,仅通过少量样品的实验得到的下限值能否具有代表性值得商榷;束缚水膜厚度法则用于计算致密储层的油气充注物性下限^[13-14]。因此,根据研究区实际资料情况,本文主要运用了束缚水膜厚度法、含油产状法、核磁共振法、最小流动孔喉半径法、试油法等计算了高邮凹陷阜一段致密储层的含油物性下限和产油物性下限。

2.1 束缚水膜厚度法

致密储层孔隙结构复杂,微孔隙发育,具有较高比

例的束缚流体,这些束缚流体有一部分是被亲水矿物吸附在表面形成的水膜,该层水膜充填了喉道,直接影响了油气的渗流^[14]。束缚水膜厚度法就是通过计算水膜受力平衡时的厚度,认为当储层孔喉半径小于吸附水膜厚度时烃类无法充注,此时储层的物性即为物性下限,对于致密砂岩而言,当储层孔喉半径小于水膜厚度时,烃类甚至都无法进入孔隙,所以该下限是致密储层能够充注油气的物性下限,可认为理论含油物性下限。

地层中水膜受力情况包括:垂直指向管壁的地层压力 p_i 和分离压 p_d ,方向与 p_i 相反的毛管压力 p_c (忽略水膜的重力),通过换算可以建立地层压力 p_i 与油水界面张力 σ 、致密储层水润湿角 θ 、储层孔喉半径 r 及水膜厚度 h 的关系式^[14]:

$$p_i = 2200/h^3 + 150/h^2 + 12/h + 2\sigma \cos \theta / r \quad (1)$$

式中: p_i 为地层压力,MPa; h 为水膜厚度, μm ; σ 为油水界面张力,N/m; θ 为水润湿角, $(^\circ)$; r 为储层孔喉半径, μm 。

当水膜厚度 h 等于孔喉半径 r 时为油气不能充注储层的临界水膜厚度,通过建立地层压力与临界喉道半径的关系即可计算储层岩石的临界水膜厚度,根据计算颗粒表面水膜厚度的理论公式可建立岩石孔隙度 Φ 与水膜厚度 h 、岩石比表面积 A 、岩石密度 ρ 及束缚水饱和度 S_{wi} 之间的关系式^[13-14]:

$$\Phi = hAp / (71.42S_{wi}) \quad (2)$$

式中: Φ 为岩石孔隙度,%; h 为水膜厚度, μm ; A 岩心比表面积, m^2/g ; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; S_{wi} 为束缚水饱和度,%。

由此便可根据不同地层压力下储层的临界水膜厚度计算储层的含油物性下限。分别计算高邮凹陷阜一段致密储层临界水膜厚度(表1),研究区致密储层的含油物性下限平均孔隙度为5.63%,渗透率为 $0.050 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.2 含油产状法

含油产状法是以岩心物性分析为基础,通过致密储层含油产状与孔隙度、渗透率交会图,可以确定不同含油级别储层间的物性界限^[17]。从高邮凹陷阜一段不同含油级别致密储层的孔隙度-渗透率交会图(图1)不难发现,油迹、油斑、油浸储层与荧光、无显示的储层存在较为明显的物性界限。根据高邮凹陷阜一段录井和试油资料统计显示,含油级别为荧光及无显示的储层日产油量为零,含油级别为油迹的储层基本有一定的日产油量,且随含油级别提高日产油量上升,这表明含

表 1 高邮凹陷阜一段致密砂岩储层水膜厚度法物性下限

Table 1 The lower limits of physical properties of the tight sandstone reservoir calculated by means of water film thickness measurement in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

井号	井深/m	岩石密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	束缚水饱和度/ %	BET 比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	临界水 厚度/nm	孔隙度 下限/%	渗透率下限/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
富深 X1	4 042.9	2.42	77.12	2.00	5.10	4.49	0.026
花 X14	3 147.3	2.52	89.46	2.06	6.77	5.48	0.042
花 X33	3 204.4	2.52	93.53	2.24	6.82	5.77	0.047
花 X33	3 294.8	2.62	83.98	2.53	6.66	7.36	0.099
许浅 1-21	2 317.2	2.23	25.50	0.42	9.86	5.03	0.034

油级别为油迹的储层能够储产油气,而含油级别为荧光及无显示的储层基本无法储产油气。由此可将该物性界限作为致密储层的含油物性下限。故而,高邮凹陷阜一段致密储层的含油物性下限孔隙度为 6.0%,渗透率为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。该方法无论是使用的资料或是划分依据更侧重于油田实际生产,所以其计算的含油物性下限要高于束缚水膜厚度法计算的理论含油物性下限。

2.3 核磁共振法

核磁共振是评价致密储层孔隙结构和流体赋存状态的重要手段,通过离心前后的核磁共振分析可以获得 T_2 谱分布及 T_2 截止值参数, T_2 谱分布对应于孔喉的分布, T_2 截止值则是不可动流体与可动流体的界限^[25-26],将 T_2 谱分布转化为孔径分布后可以得到储层中赋存不可动流体与可动流体的孔喉半径界限,通过建立储层孔径与物性的关系即可得出致密储层流体是否可动的物性界限。对于含油致密储层而言,该界限是储层中致密油能够发生渗流的物性下限。

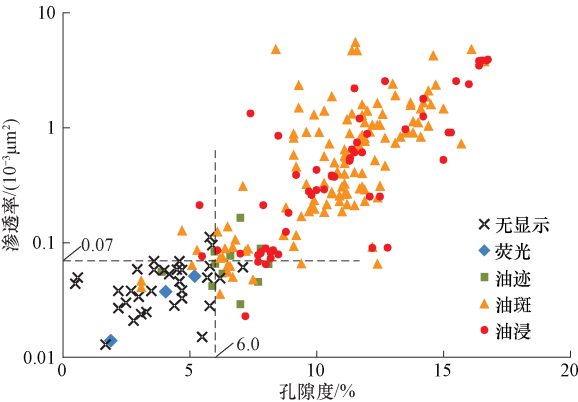


图 1 高邮凹陷阜一段不同含油级别储层孔隙度 - 渗透率交会图

Fig. 1 The porosity vs. permeability of reservoirs with different oil-bearing properties in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

高邮凹陷阜一段致密储层 T_2 截止值平均为 10 ms,对应的孔径半径为 0.12 μm ,即高邮凹陷阜一段致密储层的孔径需大于 0.12 μm 才能保证其中的致密油可动,根据研究区致密储层平均孔喉半径与渗透率关系(图 2a)以及渗透率与孔隙度(图 2b)关系,可以确定高邮凹陷阜一段致密储层可动物性下限渗透率为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 7.83%。

2.4 最小流动孔喉半径法

最小流动孔喉半径法与核磁共振 T_2 截止值法类似,通过毛管压力曲线计算能够允许流体流动的最小

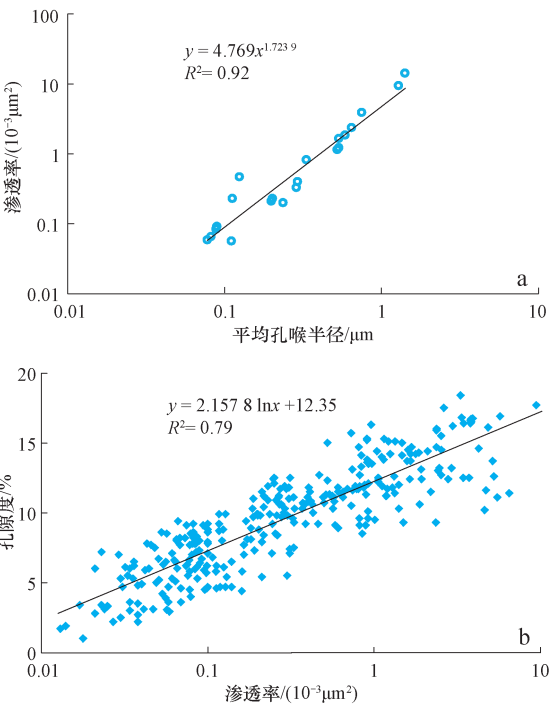


图 2 高邮凹陷阜一段致密砂岩储层孔喉半径、孔隙度与渗透率相关性

Fig. 2 The correlation between pore throat radius, porosity and permeability of the tight reservoir in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag
a. 平均孔喉半径与渗透率关系; b. 渗透率与孔隙度关系

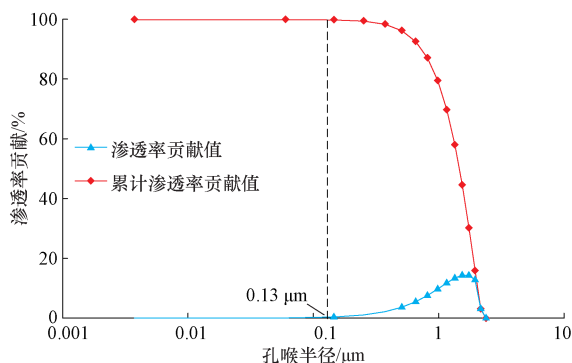


图3 高邮凹陷阜一段致密储层孔喉半径对渗透率贡献分布
Fig. 3 The contribution of pore throat radii to permeability in the tight reservoir in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

孔喉半径,再根据孔喉半径与物性的关系即可获得相应的储层物性界限。常用的方法是利用沃尔公式计算累计渗透率达到99.99%时的孔喉半径,此时的孔喉半径是致密储层中流体能够流动的最小半径^[16-17]。该方法计算的下限也是致密储层中致密油的可动物性下限。

根据研究区5口井18个致密砂岩样品的压汞资料分别求得“J”函数和平均毛细管压力曲线,根据平均毛细管压力曲线计算不同孔径对渗透率的贡献值,当累计渗透率贡献值达到99.99%时对应的孔喉半径为0.13 μm(图3),根据储层孔喉半径与物性的关系(图2),可计算出高邮凹陷阜一段致密储层可动物性下限渗透率为 $0.14 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度下限为8.11%。

2.5 试油法

试油资料能够对致密储层能否产油进行最直观的判断,绘制不同试油结果致密储层的孔隙度与渗透率交会图,以干层和产层间的界限所对应的孔渗值作为储层能够产油的物性界限^[12,16-17]。该方法以储层的日产油量作为判断依据,说明储层中的致密油气能够发生渗流而被采出,因此,该界限也属于致密储层的可动物性界限。高邮凹陷阜一段致密储层产层与干层的物性分布存在明显界限(图4),故而试油法确定研究区致密储层可动物性下限孔隙度为8.0%,渗透率值为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3 致密储层物性上限

致密储层区别于常规储层的一个显著特征是其成藏不受浮力影响,在断陷盆地中致密砂岩储层多发育在靠近洼槽带的斜坡部位,沿斜坡带上倾方向致密化

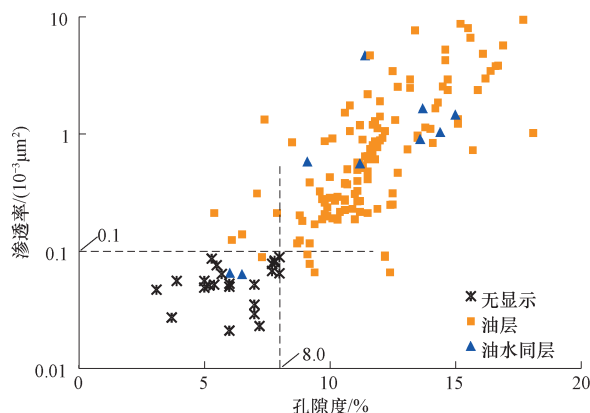


图4 高邮凹陷阜一段试油层段孔隙度-渗透率交会图
Fig. 4 Porosity vs. permeability of the tested intervals in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

程度逐渐变弱,致密储层甚至与常规储层呈连续分布^[27]。由于致密油气藏与常规油气藏在资源评价、勘探开发技术等方面的巨大差异,实际工作中需要将二者区别开来。

油气在构造斜坡下倾方向的致密砂岩储层中富集与否,取决于致密砂岩储层中油气向上运移所受浮力和毛细管阻力之间的关系。若毛细管力大于浮力,则油气难以向上继续运移,则在致密储层中富集;若浮力增大并超过毛管压力,油气在浮力作用下向上运移并驱替储层孔隙水,在构造高部位聚集形成正常油水关系^[28]。

油气在地层中受到的浮力和毛细管阻力分别为:

$$F = \frac{4}{3} \pi r_p^3 (\rho_w - \rho_o) g \sin \alpha \quad (3)$$

$$p_c = 2 \pi r^2 \sigma \cos \theta / r_p \quad (4)$$

式中: F 为浮力,N; r_p 为孔隙半径,m; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_o 为油的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; α 是地层倾角,(°); p_c 为毛管阻力,N; r 为喉道半径,m; θ 为润湿角,(°); σ 是油/气水界面张力,N/m。

当浮力与毛管阻力相等时为致密油气富集的平衡状态,在流体与储层性质基本相同的情况下,平衡状态仅受孔喉半径的影响,此时的孔喉半径为致密储层成藏的临界孔喉半径,利用孔径与物性关系就可以确定致密油气成藏的物性上限。

高邮凹陷阜一段致密储层孔喉半径比平均为180(可由恒速压汞实验获得),岩石润湿角平均为23°,油水界面张力 σ 为0.015 N/m,油水密度差为0.14 g/cm^3 。建立不同地层倾角下浮力及毛管阻力与喉道半径的关系图版(图5a),高邮凹陷阜一段地层倾角平均为15°,对应的临界喉道半径为2.16 μm,根据连通喉道半

径-渗透率关系(图 5b)及孔隙度-渗透率关系(图 2b),可知致密储层物性上限孔隙度为 12.5%,渗透率为 $1.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

将不同方法计算的物性下限及上限汇总(表 2),束缚水膜厚度法与含油产状法计算的致密储层的含油物性下限,其中前者计算的是含油的理论物性下限,其值比由含油产状法计算的下限要低,为了在储层评价更接近实际应用,本文将致密储层含油物性下限取渗透率为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 6.0%;核磁共振法、最小流动孔喉半径法及试油法计算的都是致密储层的可动物性下限,下限值均高于含油物性下限,取平均值认为工区致密储层可动物性下限渗透率为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 8.0%,致密储层物性上限渗透率为 $1.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 12.5%。

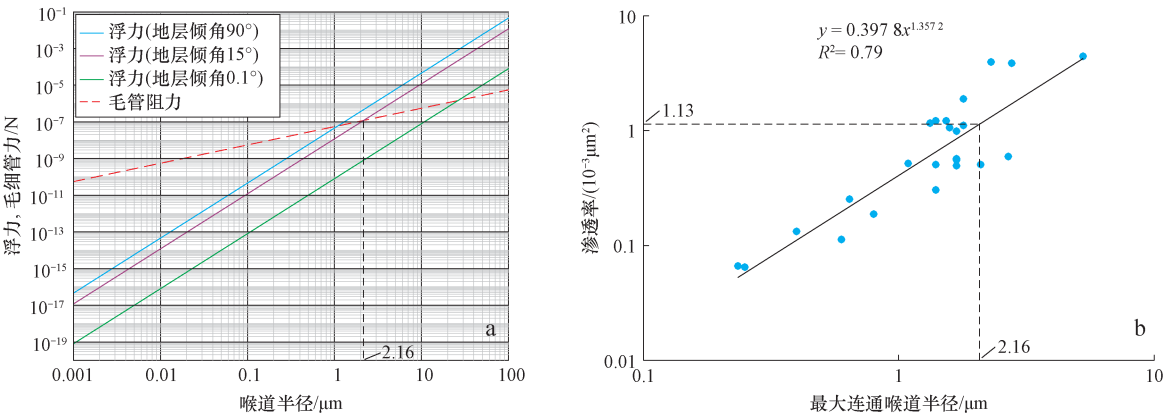


图 5 高邮凹陷阜一段浮力-毛细管阻力与喉道半径关系图版及储层连通喉道半径与渗透率交会图
Fig. 5 The chart showing the relationship between buoyancy-capillary resistance and throat radius, as well as the cross plot of the connected throat radius vs. permeability for the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag
a. 孔隙中烃类所受浮力与毛细管阻力关系; b. 储层连通喉道半径与渗透率关系

表 2 高邮凹陷阜一段致密储层物性上、下限统计
Table 2 The statistics of the lower limits and upper limits of the tight reservoir physical properties in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

测试方法	含油物性下限		可动物性下限		致密物性下限	
	渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	孔隙度/%	渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	孔隙度/%	渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	孔隙度/%
束缚水膜厚度法	0.05	5.63	—	—	—	—
含油产状法	0.07	6.00	—	—	—	—
核磁共振法	—	—	0.12	7.83	—	—
最小流动孔喉半径法	—	—	0.14	8.11	—	—
试油法	—	—	0.10	8.00	—	—
力平衡法	—	—	—	—	1.13	12.50
综合	0.07	6.00	0.12	8.00	1.13	12.50

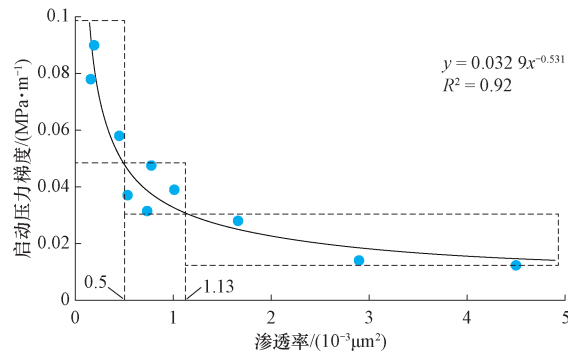


图6 高邮凹陷阜一段致密储层启动压力梯度与渗透率关系
Fig. 6 The correlation between threshold pressure gradient and permeability of the tight reservoir in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

急剧增大,表明当渗透率大于 $0.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,致密储层流体渗流明显改善,流体相对更容易发生渗流。由此,可将渗透率为 $0.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为高邮凹陷阜一段致密储层流体易动的下限,根据渗透率-孔隙度关系

(图2b)计算其对应的孔隙度下限为10.8%。

孔隙结构是决定储层储集和渗流能力的最本质因素,也是导致致密储层不同下限差异的直接原因,压汞资料能直观反映储层孔隙结构特征。统计高邮凹陷致密储层孔喉半径分布区间与进汞饱和度关系,根据进汞饱和度峰值关系及其对应的孔径分布区间可将工区内储层大致分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ和Ⅴ五种类型(图7),不同类型储层的渗透率存在明显界限(图8a),且渗透率界限与计算的渗透率含油下限、可动下限、易动下限及致密上限基本吻合,这从致密储层的孔隙结构特征验证了前文计算的不同物性下限的准确性。

由于孔隙度下限是通过渗透率与孔隙度关系换算而来,而高邮凹陷阜一段致密储层渗透率与孔隙度相关性不高,这导致了不同类型储层的孔隙度界限与孔隙度下限未能完全吻合。储层品质指数 RQI 与微观孔喉结构具有密切关系,多用于表征微观孔隙结构^[2],其中:

$$RQI = (K/\Phi)^{0.5} \tag{5}$$

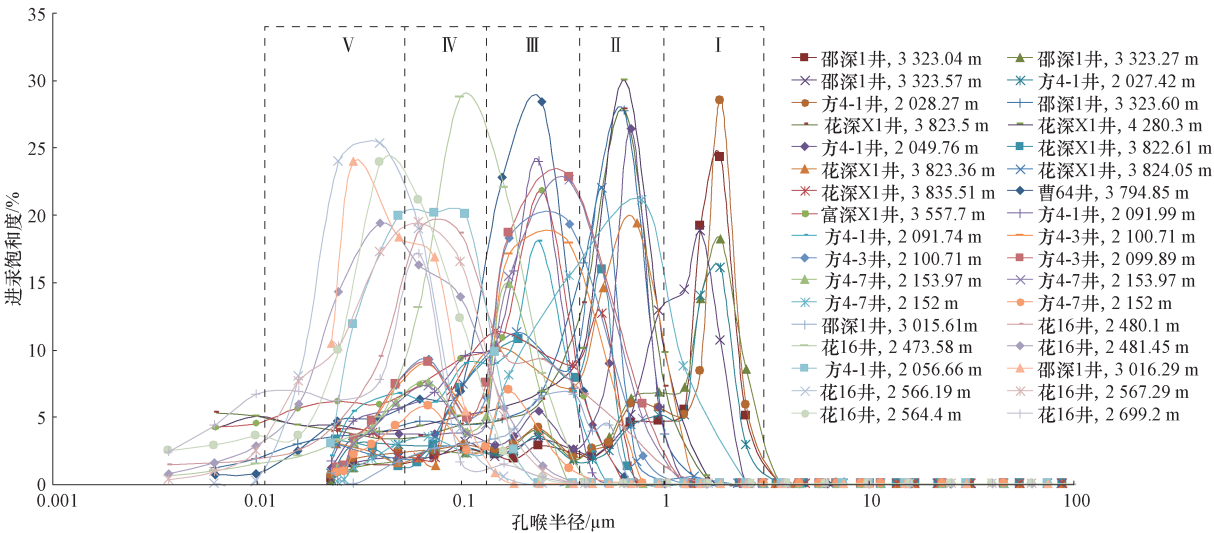


图7 高邮凹陷阜一段致密储层进汞饱和度分布

Fig. 7 The distribution of maximum saturation of mercury in the tight reservoir in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

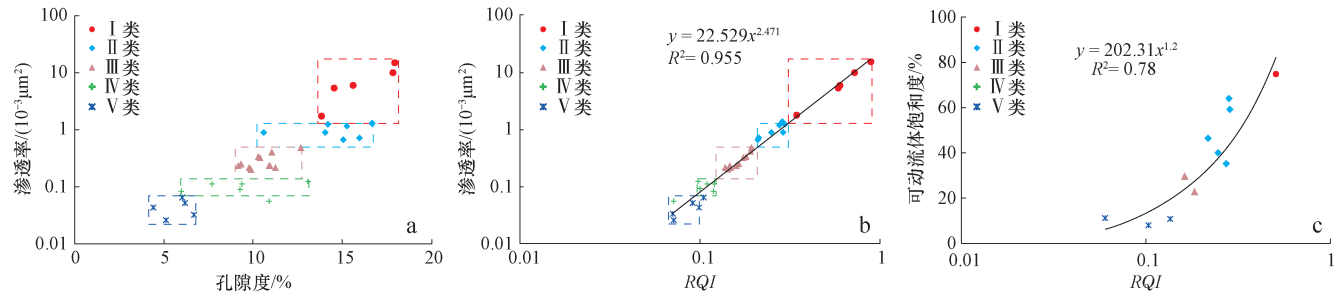


图8 高邮凹陷阜一段致密储层物性分布及其储层品质指数与渗透率、可动流体饱和度关系

Fig. 8 The distribution of physical properties and the correlation of quality index of reservoir (RQI) and permeability, movable fluid saturation in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

a. 不同类型储层孔隙度与渗透率关系;b. 不同类型储层 RQI 与渗透率关系;c. 不同类型储层 RQI 与可动流体饱和度关系

式中: K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; Φ 为孔隙度, %。统计发现高邮凹陷阜一段致密储层渗透率与储层品质指数 RQI 具有良好的相关性, 能够准确的划分不同类型的储层(图 8b), 可以作为划分储层的参数。

结合致密储层物性上、下限及压汞孔隙结构分类, 建立高邮凹陷阜一段储层划分标准, 一共可分为 5 个级别: I 类属常规储层, 渗透率大于 $1.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层品质指数 RQI 大于 0.30。需要指出的是, 致密储层物性上限仅是一个相对标准, 在整体致密背景下发育的高于物性上限的储层仍可作为致密储层的“甜点”; II—V 类为致密储层, 按照物性下限标准及储层品质指数与可动流体饱和度关系(图 8c) 分别如下。

II 类为致密易动储层, 渗透率介于 $(0.5 \sim 1.13) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层品质指数 RQI 介于 0.21 ~ 0.30, 该类致密储层含油, 启动压力梯度相对较低, 可动流体饱和度 31% ~ 48%。

III 类为致密可动储层, 渗透率介于 $(0.12 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层品质指数 RQI 介于 0.12 ~ 0.21, 该类致密储层含油, 启动压力梯度较高, 且随渗透率降低快速升高, 可动流体饱和度 16% ~ 31%。

IV 类为致密含油储层, 渗透率介于 $(0.07 \sim 0.12) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层品质指数 RQI 介于 0.10 ~ 0.12, 该类致密储层含油, 但启动压力梯度高, 可动流体饱和度 12% ~ 16%。

V 类为无效致密储层, 渗透率小于 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层品质指数 RQI 小于 0.10, 该类储层不含油, 可动流体饱和度小于 12%;

4.2 致密储层分级评价

为了验证本文储层分级标准的适用性, 根据试油试采资料统计了高邮凹陷阜一段致密储层的产油能力, 致密储层产油能力与储层品质指数 RQI 具有明显的相关性(图 9)。当储层品质指数 RQI 小于 0.10 时, 试油显示为干层, 无产能, 该类储层不含油, 属 V 类无效致密储层; 当储层品质指数 RQI 介于 0.10 ~ 0.12 时, 该类储层常规试油显示为干层, 但采取增产措施后能获取产能, 该类储层含油但较难采出, 属 IV 类致密含油储层; 当储层品质指数 RQI 介于 0.12 ~ 0.21 时, 常规试油显示为低产油层或含水油层, 产油量小于 $1.0 \text{ t}/(\text{d} \cdot \text{m})$, 表明致密储层含油且能够采出, 属 III 类可动致密储层; 当储层品质指数 RQI 大于 0.21 时, 常规试油显示为油层或油水同层, 产油量大于 $1.0 \text{ t}/(\text{d} \cdot \text{m})$, 表明储层致密油能够采出且具有一定产量, 属 II 类易动致密储层。由此可见, 按致密储层分级标准划分的储层级

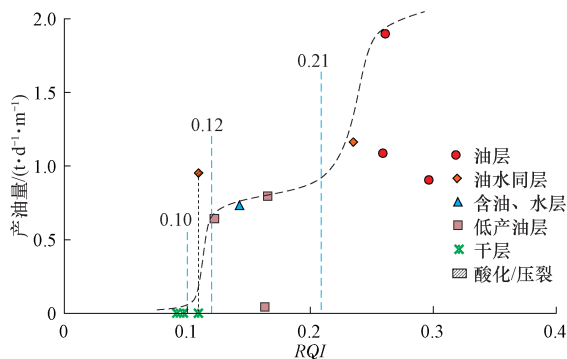


图9 高邮凹陷阜一段致密储层产油量与储层品质指数 RQI 关系

Fig. 9 The correlation between daily oil production and RQI of the tight reservoir in the 1st member of Funing Formation, Gaoyou Sag

别与其各自的含油和产油能力具有明显对应关系, 这也充分印证了利用致密储层物性界限进行致密储层分级评价的准确性和适用性。

5 结论

1) 致密储层物性下限的计算方法很多, 不同方法的原理不同, 适用条件与计算结果含义也有所差别。其中含油产状法、束缚水膜厚度法可用于计算致密油储层含油物性下限, 核磁共振法、最小流动孔喉半径法、试油法可用于计算致密油储层可动物性下限; 高邮凹陷阜一段致密油储层含油物性下限渗透率为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、储层品质指数 RQI 界限为 0.10, 致密油可动物性下限渗透率为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、储层品质指数 RQI 界限为 0.12, 致密油易动物性下限渗透率为 $0.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、储层品质指数 RQI 界限为 0.21, 致密储层物性上限渗透率为 $1.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、储层品质指数 RQI 界限为 0.30。

2) 根据致密储层物性上、下限及流体发生渗流的物性界限建立了高邮凹陷阜一段致密储层的分级标准, 其中 I 类为常规储层, II—IV 类为致密储层, 依次为致密易动储层、致密可动储层、致密难动储层和无效致密储层。运用物性上、下限建立的储层分级与按照储层孔隙结构进行的分类具有良好的对应关系, 而且得到了致密储层的实际含油和产油能力的验证。

参 考 文 献

- [1] 王社教, 蔚远江, 郭秋麟, 等. 致密油资源评价新进展[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1095 - 1105.
Wang Shejiao, Yu Yuanjiang, Guo Qiulin, et al. New advance in resources evaluation of tight oil [J]. Acta Petrolei Sincia., 2014, 35(6): 1095 - 1105.

- [2] 周翔,何生,刘萍,等.鄂尔多斯盆地家坪地区长6致密油储层孔隙结构特征及分类评价[J].地学前缘,2016,23(3):253-265.
Zhou Xiang, He Sheng, Liu Ping, et al. Characteristics and classification of tight oil pore structure in reservoir Chang 6 of Daijiaping area, Ordos Basin[J]. Earth Science frontiers. 2016,23(3):253-265.
- [3] A. Sakhaee-Pour, Steven L Bryant. Effect of pore structure on the producibility of tight-gas sandstones [J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(4): 663-694.
- [4] 杨升宇,张金川,黄卫东,等.吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J].石油学报,2013,34(2):272-282.
Yang Shengyu, Zhang Jinchuan, Huang Weidong, et al. “Sweet spot” types of reservoirs and genesis of tight sandstone gas in Kekeya area, Turpan-Hami Basin[J]. Acta Petrolei Sincia, 2013, 34(2): 272-282.
- [5] 张惠良,张荣虎,杨海军,等.超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储集层表征与评价-以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例[J].石油勘探与开发,2014,41(2):158-167.
Zhang Huiquan, Zhang Ronghu, Yang Haijun, et al. Characterization and evaluation of ultra-deep fracture-pore tight sandstone reservoirs: A case study of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kelasu tectonic zone in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 42(2): 158-167.
- [6] Junhui Wang, Zaixing Jiang, Yuanfu Zhang, et al. Quantitative evaluation of the reservoir potential and controlling factors of semi-deep lacustrine tempestites in the Eocene Lijin Sag of the Bohai Bay Basin, East China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77, 262-279.
- [7] Zhao Liangxiao, Chen Mingjiang. A discussion on the interrelationships between five properties in reservoir evaluation[J]. Natural Gas Industry B, 2015, 2, 136-143.
- [8] 刘桂玲,孙军昌,熊生春,等.高邮凹陷南断阶特低渗透油藏储层微观孔隙结构特征及分类评价[J].油气地质与采收率,2013, 20(4):37-41.
Liu Guiling, Sun Junchang, Xiong Shengchun et al. Study of the petrophysical properties and reservoir evaluation of south fault ultra-low-permeability reservoir of Gaoyou depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(4): 37-41.
- [9] 王伟明,卢双舫,陈璇,等.致密砂岩气资源分级评价新方法-以吐哈盆地休罗统水西沟群为例[J].石油勘探与开发,2015, 42(1):1-8.
Wang Weiming, Lu Shuangfang, Chen Xuan, et al. A new method for grading and assessing the potential of tight sand gas resources: A case study of the Lower Jurassic Shuixigou Group in the Turpan-Hami Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 1-8.
- [10] 赵建斌,王金彬,罗安银,等.储层品质评价中的核磁共振研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2018,40(2):89-96.
Zhao Jianbin, Wan Jinbin, Luo Anyin, et al. A study on nuclear magnetic resonance to reservoir quality evaluation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition), 2018, 40(2): 89-96.
- [11] 张以明,付小东,郭永军,等.二连盆地阿南凹陷白垩系腾一下段致密油有效储层物性下限研究[J].石油实验地质,2016,38(4): 551-558.
Zhang Yiming, Fu Xiaodong, Guo Yongjun, et al. Petrophysical property limits of effective tight oil reservoirs in the lower part of the first member of Cretaceous Tengger Formation, Anan Sag, Erlian Basin, North China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(4): 551-558.
- [12] 蔡长娥,刘震,邓守伟,等.伊通盆地西北缘深层储层动态评价[J].中国矿业大学学报,2015,44(1):116-124.
Cai Chang, Liu Zheng, Deng Shouwei, et al. Dynamic evolution for the deep reservoir in the northwest of Yitong Basin [J]. Journal of Chain University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 116-124.
- [13] 曹青,赵靖舟,刘新社,等.鄂尔多斯盆地东部致密砂岩气藏物性界限的确定[J].石油学报,2013,34(6):1040-1048.
Cao Qing, Zhao Jingzhou, Liu Xinshe, et al. Determination of petrophysical property limits for the gas accumulation in tight sandstone reservoirs in the eastern Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sincia, 2013, 34(6): 1040-1048.
- [14] 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, Liaohuo oilfield [J]. Oil and Gas Geology, 2016, 37(1): 135-140.
- [15] 邹才能,朱如凯,白斌,等.中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J].岩石学报,2011,1857-1864.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. 2011. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [16] 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 cutoffs of extra-low porosity and permeability sandstone reservoirs—an example from the Xishanyao Formation reservoirs in Yongjin oilfield [J]. Oil and Gas Geology, 2009, 30(3): 380-383.
- [17] 刘之的,石玉江,周金昱,等.有效储层物性下限确定方法综述及适用性分析[J].地球物理学进展,2018,33(3):1102-1109
Liu Zhidi, Shi Yujiang, Zhou Jinyu, et al. Review and applicability analysis of determining methods for the lower limit of physical properties of effective reservoirs [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3): 1102-1109.
- [18] 王朋岩,刘凤轩,马锋,等.致密砂岩气藏储层物性上限界定与分布特征[J].石油与天然气地质,2014,35(2):238-243.
Wang Pengyan, Liu Fengxuan, Ma Feng, et al. Upper limit and distribution of physical property of tight gas sandstones [J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(2): 238-243.
- [19] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil China [J]. Acta Petrolei Sincia, 2012, 33(3): 343-350.