

文章编号: 0253-9985(2009)03-0379-05

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

焦翠华¹, 夏冬冬², 王 军³, 刘 磊³, 盛文波³, 程培涛³

(1 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249 2 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083 3 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257051)

摘要: 准噶尔盆地永进油田西山窑组储集层孔隙度的分布范围在 4% ~ 6% 之间, 渗透率分布范围在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 属典型的特低孔、特低渗储层。结合静态、动态资料及岩石物理实验, 综合利用经验统计法、含油产状法、物性试油法、核磁共振法、最小流动孔喉半径法、驱替压力法等 6 种方法, 确定了该储层有效物性下限孔隙度为 6%、渗透率为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为有效厚度划分及储量计算提供了依据。

关键词: 有效厚度; 物性下限; 特低孔、特低渗储层; 永进油田; 准噶尔盆地

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A

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

Jiao Cuihua¹, Xia Dongdong², Wang Jun³, Liu Lei³, Sheng Wenbo³, Cheng Peitao³

(1 Faculty of Natural Resource & Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2 Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3 Research Institute of Geosciences, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257051, China)

Abstract With the porosity range of 4% to 6% and the permeability range of $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 - 0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, the Xishanyao Formation reservoirs in the Yongjin oilfield of the Junggar Basin are typical extra-low porosity and extra-low permeability reservoirs. According to the static and dynamic data and petrophysical experiments, we have determined the effective porosity and permeability cutoffs of these reservoirs through methods of empirical statistics, oil-bearing occurrence test, physical property test, nuclear magnetic resonance, minimal pore throat radius and displacement pressure. The results show that the lower limit of porosity is 6% and the lower limit of permeability is $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, providing basis for determining effective thickness and estimate reserves.

Key words effective thickness; petrophysical property cutoff; extra-low porosity and extra-low permeability reservoir; Yongjin oilfield; Junggar Basin

1 地质概况

永进油田位于准噶尔盆地腹部的负向构造区, 属于中央拗陷昌吉凹陷西段, 构造为呈西南倾

的单斜, 圈闭类型主要有地层、地层-岩性和岩性圈闭。

侏罗系西山窑组储层主要为辫状河-三角洲沉积, 岩性以细粒岩屑长石砂岩为主, 分选中等, 成分成熟度低, 结构成熟度低到中等, 重矿物含量

收稿日期: 2009-02-05。

第一作者简介: 焦翠华 (1960—), 女, 教授、硕士生导师, 测井储层精细评价、油藏描述、测井资料解释及综合应用。

低。研究区目的层储层埋藏深 (5 800~6 000 m), 在漫长的地质历史过程中经历的成岩作用主要有压实压溶作用、胶结作用和溶解作用等。孔隙类型以残余粒间孔、粒内溶孔为主, 其次为胶结物内溶孔、泥质晶间微孔。自生石英、沸石、自生绿泥石充填于孔隙中, 对储层的孔渗特性影响最大。岩心分析孔隙度集中分布在 4%~6% 之间, 平均值为 5.69%, 渗透率主要分布在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 平均值为 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于特低孔、特低渗储集层。

2 物性下限确定方法

储层有效厚度指储层中具有产油能力的那部分厚度, 而储层是否具有产油能力取决于储层的储油能力, 它是油藏的天然条件, 是物质基础。当储层的孔隙度和渗透率达到一定的数值后, 储层才具备储油能力, 这个下限值就是储层的有效厚度物性下限。

研究储层有效厚度标准的基础资料有岩心、试油和测井资料, 这 3 种资料应综合使用。一般以单层试油资料为依据, 对岩心样品实验测量资料进行充分的研究, 制定出有效厚度的物性下限标准, 并以测井资料为手段、广泛利用测井定量解释方法具体确定油层有效厚度^[1,2]。

考虑研究区的储层特点和资料情况, 采用以下 6 种方法确定研究区储层有效厚度的物性下限标准。

2.1 经验统计法

当没有取得相当数量的针对有效厚度物性下限的单层测试资料时, 很难确切地定出定量的界限。在美国和我国海上油田通常使用经验统计法。该方法的核心是以岩心分析孔隙度、渗透率资料为基础, 统计找出一个下限值^[1,3], 在这个值以下储层丢失的储油能力和产油能力都很小, 可以忽略。

用研究区西山窑组全部孔隙度样品 157 块, 渗透率样品 153 块, 分别绘出孔隙度和渗透率频率分布直方图、累积频率及累积能力丢失曲线 (图 1, 图 2), 其中孔隙度储油能力、渗透率产油能力计算公式为:

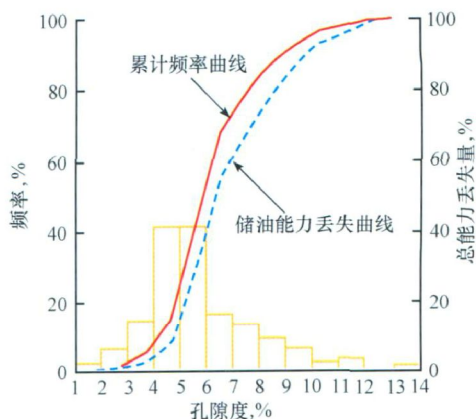


图 1 西山窑储层孔隙度丢失能力直方图

Fig. 1 Histogram of permeability losing capability of reservoirs in the Xishanyao Formation

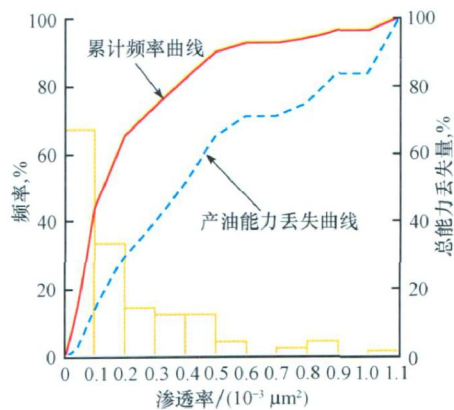


图 2 西山窑储层渗透率丢失能力直方图

Fig. 2 Histogram of porosity losing capability of reservoirs in the Xishanyao Formation

$$Q_{\Phi_i} = \Phi H_i / \sum \Phi H_i \quad (1)$$

$$Q_{K_i} = K H_i / \sum K H_i \quad (2)$$

式中, Q_{Φ_i} 为储油能力, %; Q_{K_i} 为产油能力, %; Φ_i 为样品孔隙度值, %; K_i 为样品渗透率值, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; H_i 为样品长度, m。

下限一般控制累计频率在 10% 左右。从图 1 中看出, 在累计频率曲线上孔隙度为 4.8% 处, 曲线有一明显的拐点, 说明将有效厚度的孔隙度下限值定在 4.8% 较合适。取此值时在样品累计曲线上为 12%, 样品块数丢失为 12%; 在能力丢失曲线上, 当孔隙度为 4.8% 时, 累计能力丢失为 5%。图 2 中, 渗透率取 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时, 此时样品块数丢失为 10%, 产油能力丢失 4%。因此以孔隙度 4.8%、渗透率 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为下限值, 其储油能力和产油能力丢失都很小, 可以认为

该下限值是合适的。

2.2 含油产状法

岩心是认识地下油层最直接的静态资料, 在我国的很多砂岩油藏都发现储层的物性与含油性(产状)有着一致的变化规律, 因此可以用岩心的含油产状确定有效厚度物性下限^[3 4]。

根据研究区西山窑组储层的岩心样品物性分析资料, 建立含油产状与孔隙度、渗透率关系图(图 3)。从图中看出含油(油斑、油迹和油浸)的岩心样品的孔隙度绝大部分大于 6%, 渗透率大于 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 因此将孔隙度为 6%、渗透率 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为储层有效厚度的物性下限。

2.3 物性试油法

物性试油法是在取心井的试油层段, 统计单层孔隙度、渗透率平均值, 结合试油结论, 绘制孔隙度、渗透率交会图^[5]。由于永进地区西山窑组试油层段较少且只有油层和干层的结论, 故用试油资料点的岩心分析孔隙度与渗透率作交会图版(图 4), 将试油油层和干层结论标在图版上, 从图版上确定孔隙度下限值为 6.5%, 渗透率下限值为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 这个下限可以很好的将油层和干层区分开。

2.4 核磁共振法

由核磁共振测量的样品 T_2 信号的幅度值, 可以得到样品的可动流体饱和度, 国内外研究表明, 在低孔低渗油藏中, 可动流体饱和度是评价油层物性优劣、确定产油能力下限的重要指标之一^[3]。

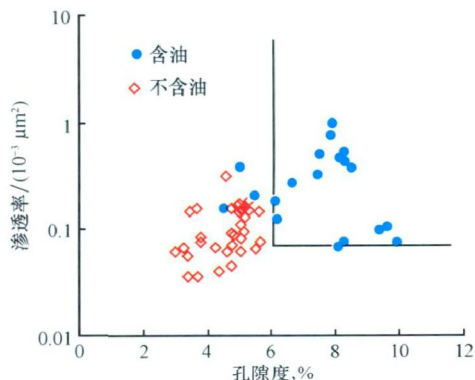


图 3 西山窑组孔隙度-渗透率交会图

Fig. 3 Crossplot of porosity and permeability of reservoirs in the Xishanyao Formation

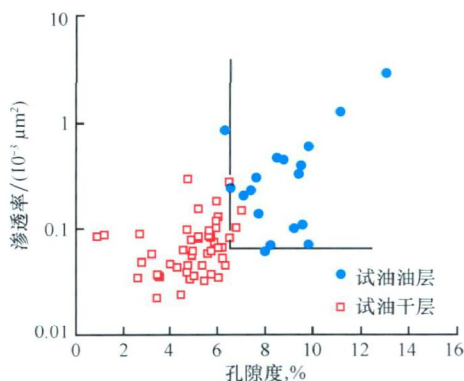


图 4 试油层段孔隙度-渗透率交会图

Fig. 4 Crossplot of porosity and permeability in the tested intervals

对研究区共 10 块岩心样品的气驱法核磁测试结果表明, 当 $\Phi \geq 6\%$ 且 $K \geq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时, 各样品的可动流体的饱和度在 48% 以上。10 个样品中, $\Phi \geq 6\%$ 且 $K \geq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的有 5 个, 占 50%, 5 个样品的平均可动流体饱和度为 55%。根据廊坊国家重点实验室的研究表明, 可动流体饱和度的界限不应低于 10%, 可动流体含量低于该值即无太大的开发潜力。因而 $\Phi \geq 6\%$, $K \geq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 可以作为研究区储层开采下限值。

2.5 最小流动孔喉半径法

岩石的宏观孔渗特征是岩石微观孔隙结构及喉道大小的反映。岩石的孔隙及喉道是油气储集和流动的空间和通道, 油气是否能在一定压差下从岩石中流出取决于喉道的粗细, 即孔喉半径的大小。这种即能储集油气有能使油气渗流的最小孔隙通道称为油气的最小流动孔喉半径^[6 7]。而毛管压力曲线是反映储层微观孔隙结构的重要资料, 可以根据毛管压力测试资料对岩石微观孔喉结构进行分析, 确定油气的最小流动孔喉半径; 用统计分析方法建立孔喉半径与常规物性分析孔隙度和渗透率的关系, 进一步求出对应最小流动孔喉半径的孔隙度和渗透率, 它们即是储层的物性下限。用最小流动孔喉半径确定储层物性下限的具体步骤如下。

2.5.1 “J”函数方法求取平均毛管压力

由于实验室每块样品只能代表油藏某点的特征, 只有把具有相同性质的毛管压力曲线(同一孔隙结构)平均(即还原)为一条代表油藏特征的毛管压力曲线, 才能有利于反映储层的储集性能及

其微观非均质情况。选用研究区 6 口井的 29 块岩心压汞资料,采用 Leverett 等为消除孔隙度 Φ 和渗透率 K 对毛管压力的影响提出的无量纲毛管压力“ J ”函数公式,求得储层的“ J ”函数曲线(图 5):

$$J(S_w) = \frac{P_c}{\sigma \cos \theta} \sqrt{\frac{K}{\Phi}} = 0.086 P_c (K/\Phi)^{0.5} \quad (3)$$

式中: $J(S_w)$ 为“ J ”函数,无量纲; P_c 为毛管压力, MPa; σ 为界面张力, N/m; θ 为润湿接触角, ($^\circ$); K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; Φ 为孔隙度, %。

对于所有的压汞样品统计,由孔隙度平均值 7%, 渗透率平均值 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 得到“ J ”因子为 0.065。利用“ J ”函数曲线,换算得到储层的平均毛管压力曲线:

$$P_c = (1/c)J(S_w) = 5.6167J(S_w) \quad (4)$$

其中, $c = 0.086(K/\Phi)^{0.5}$ 。

2.5.2 利用沃尔公式求最小流动孔喉半径

该方法以等孔隙体积增量为基础,求每一个孔隙体积间隔中渗透率贡献值及累计渗透能力。沃尔公式为:

$$\Delta K_i = \left| (2^i - 1)r_i^2 / \sum (2^i - 1)r_i^2 \right| \times 100 \quad (5)$$

$$\sum K = \sum \Delta K_i \quad (6)$$

式中: ΔK_i 为区间渗透能力贡献值, %; $\sum K$ 为累计渗透能力, %; i 为等量孔隙体积间隔序号; r_i 为相应的孔隙半径, μm 。

取累计渗透能力 99.99% 的孔隙半径为最小流动半径,为 $0.131 \mu\text{m}$ 。

2.5.3 求储层物性下限

利用储层的孔隙度、渗透率与压汞分析的孔喉半径建立统计关系,分别为:

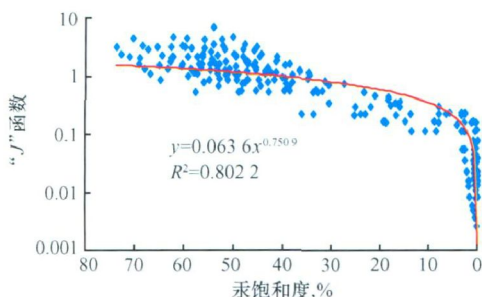


图 5 “ J ”函数曲线

Fig. 5 “ J ” function curve

$$K = 0.6982r^2 + 1.6391r - 0.1472 \quad (7)$$

$$\Phi = -0.3107r^2 + 2.3921r + 6.0417 \quad (8)$$

将最小流动孔喉半径为 $0.131 \mu\text{m}$ 代入上式即可得到物性下限,孔隙度为 6.3%,渗透率为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.6 驱替压力实验法

低渗透问题的流动规律不满足经典的达西定律,只有在作用压力梯度大于某一临界值时,流体才会流动。这个临界值称为启动压力梯度^[8]。

驱替压力实验是通过实验室条件下压力驱替岩样,研究油气渗流的情况。一般而言,储层渗透性越好,相应的启动压力就会越小。根据实验结果(图 6),得到启动压力梯度与样品渗透率的统计关系^[9~13]:

$$P_{启动} = 0.02K^{-2.4535} \quad (9)$$

式中: $P_{启动}$ 为启动压力梯度, MPa; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

可以利用这一关系的物理意义,即最大启动压力梯度对应的渗透率值可以作为储层岩石能形成有效流动的渗透率下限值来求取储层物性下限。西山窑组启动压力梯度最大值为 0.647 MPa/m ,根据上面的拟合关系,得到西山窑组渗透率下限为 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,根据孔渗关系对应出孔隙度下限值为 5.2%。

根据上述 6 种确定油层有效厚度物性下限的方法,确定的孔隙度下限区间为 4.8% ~ 6.5%、渗透率下限区间为 $0.06 \times 10^{-3} \sim 0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,各方法确定下限值详见表 1。综合 6 种方法确定西山窑组储层有效厚度的物性下限:孔隙度为 6%,渗透率为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

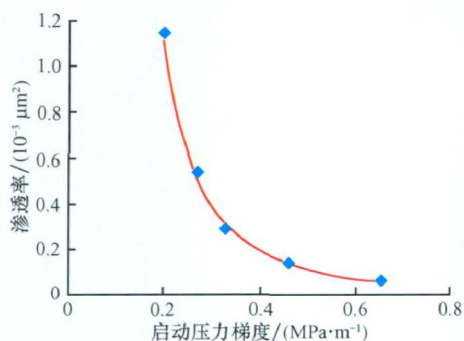


图 6 启动压力梯度与渗透率的关系

Fig. 6 Threshold pressure gradient vs permeability

表 1 永进油田西山窑组物性下限值

Table 1 Porosity and permeability cutoffs of the Xishanyao Formation in the Yongjin oilfield

方法	孔隙度, %	渗透率 $/ (10^{-3} \mu\text{m}^2)$
经验统计法	4.8	0.06
含油产状法	6.0	0.08
物性试油法	6.5	0.07
核磁共振法	6.0	0.10
最小流动孔喉半径法	6.3	0.08
驱替压力实验法	5.2	0.06
综合取值	6.0	0.08

3 结语

特低孔、特低渗砂岩储层有效厚度物性下限确定非常复杂, 又非常关键。使用多种方法, 从多个方面反映各因素的影响, 经过对各种方法的确定结果进行对比分析后最后综合确定, 避免因研究方法单一而在对下限标准取值时可能产生的较大偏差。在资料允许的情况下, 这几种资料最好能综合运用、相互验证, 才能保证物性下限的合理与正确。本文应用经验统计法、含油产状法、物性试油法、核磁共振法、最小流动孔喉半径法、驱替压力法等 6 种方法, 明确了永进油田西山窑组油藏有效储层物性下限孔隙度为 6%, 渗透率为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为储量计算提供了依据。该标准的建立对开发生产、试油试采具有指导性作用, 同时对特低孔特低渗储层评价也具有重要意义。

(上接第 378 页)

2 李思田. 陆相盆地高精度层序地层学 [M]. 北京: 地质出版社, 2003

3 胡受权, 陈萍, 闫福旺, 等. 泌阳断陷湖盆陡坡带陆相层序油气藏成藏类型及分布规律探讨 [J]. 河南石油, 2001, 15(2): 27~32

4 林畅松. 高精度层序地层学和储层预测 [J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 33~38

5 李思田. 沉积盆地的动力学分析 [J]. 地学前缘, 1995, (2): 173~181

6 贾振远. 成岩地层学与层序地层学 [J]. 地球科学, 1997, 22(5): 538~543

7 陈开远. 成油体系中的层序地层学 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 221~226

8 邱荣华, 孙耀华, 张永华, 等. 泌阳凹陷新庄地区浅层三维地震勘探 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 242~245

参 考 文 献

1 欧阳健. 石油测井解释与储层描述 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994

2 周丽娟, 陈恭洋, 王泽中, 等. 储层测井多井评价技术及运用 [J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(4): 368~373

3 魏小薇, 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 [J]. 天然气工业, 2005, 25(增刊 A): 28~31

4 钟淑敏, 刘传平, 杨青山. 一种有效确定特低渗透砂岩储层有效厚度的方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(5): 46~48

5 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

6 曾伟, 强平, 黄继祥. 川东嘉二段孔隙层下限及分类与评价 [J]. 矿物岩石, 1997, 17(2): 42~48

7 原海涵. 毛管理论在测井解释中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995

8 王渝明. 基于启动压力梯度的低渗透砂岩储层分类研究 [J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 617~621

9 王昔彬, 刘传喜, 郑荣臣. 大牛地区致密低渗透气藏启动压力梯度及应用 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 698~702

10 李红, 柳益群, 刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长 8₁ 低渗透储层成岩作用 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 209~217

11 刘树根, 单钰铭, 黄思静, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层声学参数特征及变化规律 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 399~404

12 张峭楠. 致密天然气砂岩储层: 成因和讨论 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 1~10

13 赵俊峰, 纪友亮, 陈汉林, 等. 电成像测井在东濮凹陷裂缝性砂岩储层评价中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 383~390

(编辑 陈喜禄)

9 孙耀华, 张永华, 罗涛. 泌阳凹陷隐蔽油气藏勘探技术实践探索 [J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(3): 43~44

10 孙耀华, 罗涛. 一种量化区带综合评价方法 [J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(3): 25~26

11 张永华, 赵雨晴, 杨道庆, 等. 井约束反演技术在白云岩缝洞型储层预测中的应用 [J]. 新疆石油地质, 2006, 27(2): 219~222

12 盛文波, 操应长, 刘晖, 等. 东营凹陷古近纪孔盆断层演化特征及盆地结构类型 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 290~296

13 王家豪, 王华, 肖敦清, 等. 伸展构造体系中传送带的控砂作用—储层预测新思路 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 19~25

14 姜建伟. 南襄盆地泌阳凹陷高成熟开发区隐蔽油气藏识别技术 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 361~364

(编辑 董立)

4.2 通过沿层地震属性分析确定岩体边界

当地层倾角较大或构造较复杂时,单独利用水平切片技术无法识别扇三角洲砂体,可以利用层拉平技术,将数据体沿目的层段某一反射层位拉平,拉平后数据体以时间为单位(可不同间隔)切成许多平面进行扫描,根据地震属性的变化特征,结合地震剖面反射特点,判断是否是扇三角洲的砂体,再利用切片的平面信息对砂体进行追踪描述。由于储层的非均质性能引起地震信息的不规则变化,在相干体切片上会表现为低相干。

泌阳凹陷白云岩主要分布于深凹区核二—核三上亚段,构造较为简单,无断层发育,属静水半深湖相沉积。目前已有 35 口井钻遇白云岩,有 19 口井钻遇油气显示,云 2、泌 103、泌 112 三口井在核二段获得工业油流。图 11 是核二段地震振幅平面图,黄色区域为核二段白云岩地层地震振幅,反映在能量较强,集中在 4 000~6 000 m 之间,衰减较慢,频率较低,在 20~30 Hz 之间,均方根振幅值在 80 Hz 左右,在地震反演波阻抗沿层平面图上为高阻抗分布区。在钻遇白云岩井的控制下,利用地震层切片分析圈定有利的白云岩分布区。依据试油及测井资料,在核二¹段,计算含油面积 2.7 km²,有效厚度 15.2 m,预测石油地质储量 278 × 10⁴ t;核二²段,含油面积 3.4 km²,有效厚度 16.6 m,预测石油地质储量 382 × 10⁴ t;核二³段,含油面积 4.7 km²,有效厚度 14.5 m,预测石油地质储量 461 × 10⁴ t。

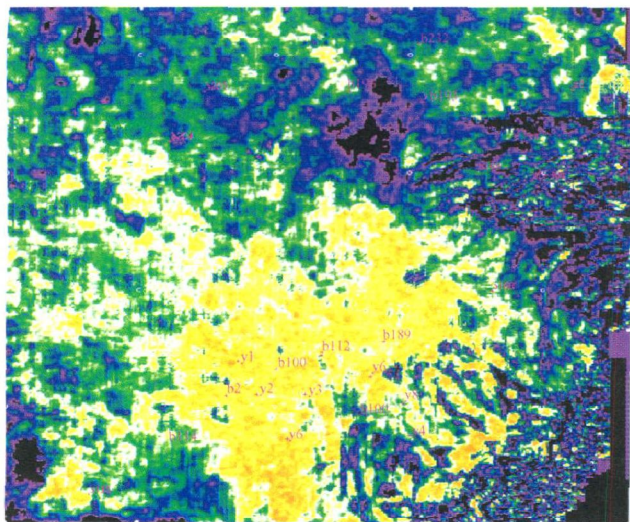


图 11 核二段白云岩区振幅

Fig. 11 Map showing the amplitude of the dolomite interval in the second member of the Hetaoyuan Formation

合计预测石油地质储量 1 121 × 10⁴ t。

4.3 用提高分辨率的地震反演方法预测砂体分布

稀疏脉冲反演方法可以提高地震反演的分辨率,但稀疏脉冲反演得到的绝对波阻抗数据不是全频带的,它缺少低频信息和高频信息。利用 Jason 软件,从已有的钻井资料中建立模型,在此约束下对地震资料进行反演处理,得到较宽频带的地震波阻抗资料。

通过对新三维地震资料的精细解释和综合研究,在南部陡坡带查明了一批不同深度、不同类型的局部圈闭,部署多口深浅井钻探,在该区浅中深层均发现油层。泌 304 井圈闭属于构造背景下的岩性圈闭,在地震相上,在近东西地震剖面上表现为丘状反射,同相轴向两侧减薄合并,从盆地边界断层向盆地内部,反射减薄,连续性也变好,综合分析认为物源来自南部边界发育的小砂砾岩体。钻探的泌 336 井在 H₂ 7—8 小层试油日产油 2.55 m³,累计产油 25.1 m³;泌 304 井在 H₂ 1 小层,试油日产油 4.42 m³,水 0.57 m³,新增含油面积 1.44 km²,新增探明石油地质储量 828.29 × 10⁴ t。

5 结束语

在层序地层框架的指导下,综合地质、地震和测井等资料预测盆地内各类复杂油气藏发育的有利部位,然后通过已发现油藏的标定对比,预测出古近系各主要目的层的隐蔽圈闭发育区。以此为指导,针对不同层位、不同区域发育的不同圈闭类型,选择使用合适的地震勘探新技术,具体落实和评价勘探目标。经过几年的技术应用,先后在泌阳凹陷北部斜坡带浅层复杂断块油藏勘探、安棚深层系低孔低渗油气藏勘探和南部陡坡带浅中深层整体勘探中取得重大突破,5 年北部斜坡累计新增探明储量 5 964 × 10⁴ t 可采储量 1 125.9 × 10⁴ t 南部陡坡带新增控制储量 1 740 × 10⁴ t 为河南油田的增储稳产做出了重要的贡献。

参 考 文 献

- 1 王敏,秦伟军,赵迫,等.南襄盆地泌阳凹陷油气藏形成条件及聚集规律[J].石油与天然气地质,2001,22(2):169~172

(下转第 383 页)