

石油地质勘探技术培训教材

测井地层分析 与油气评价

(下 册)

何 欧 曾
登 阳 文
春 健 冲
编著

石油工业出版社



石油地质勘探技术培训教材

测井地层分析与油气评价

下 册

曾文冲 欧阳健 何登春 编著 王曰才 谭廷栋 审校

石油工业出版社

目 录

第七章 两种用于油气评价的解释方法	1
第一节 可动水分析法	1
一、基本原理.....	1
二、测井解释方程.....	3
三、成果显示与解释原则.....	9
四、应用及其特点.....	10
五、地质应用的发展.....	14
第二节 测井多参数评价油气层	18
一、泥质砂岩油气层规律.....	18
二、两种判别分析方法.....	21
三、基于贝叶斯 (Bayes) 准则的判别分析.....	21
四、费歇 (Fisher) 意义下的判别分析.....	29
五、确定判别准则与检验及实现自动解释.....	33
六、应用.....	36
第八章 复杂地质条件的油气评价	45
第一节 低电阻率油气层的解释	45
一、低电阻率油气层的特点.....	45
二、低电阻率油气层的评价.....	51
第二节 碳酸盐岩地层的油气评价	52
一、碳酸盐岩地层的特点.....	53
二、裂缝性储集层的分类.....	55
三、重要的问题在于揭示裂缝的分布规律.....	58
四、评价储集层的分析内容.....	59
五、油气层分析.....	66
第三节 盐水泥浆条件下的油气评价	72
第四节 水淹层的解释	73
一、水淹层特点.....	73
二、综合评价水淹层.....	74
三、水淹层的定量分析.....	84
第九章 地层倾角测井及其应用	89
第一节 地层倾角测井原理	89
一、德莱赛公司倾角测井仪 (DIPLOG)	89
二、斯伦贝谢公司倾角测井仪 (HDT)	92
三、斯伦贝谢公司新型倾角测井仪 (SHDT)	92

第二节 地层倾角测井数字处理原理	92
一、地层倾角和视倾角	93
二、根据地层法向计算地层倾向和倾角	94
三、用相关对比方法确定地层法向在仪器坐标系中的坐标	95
四、井斜位移校正	97
五、用坐标变换公式确定地层法向在大地坐标系中的坐标	98
六、相关对比中步长、窗长和探索长度的选取	100
七、相关对比的质量检查及相关对比结果的筛选	102
八、相关对比方法的改进	103
九、倾角处理成果图显示	105
十、消去构造倾斜	109
第三节 地层倾角数字处理新方法	112
一、群 (CLUSTER) 程序	112
二、地质倾角 (GEODIP) 程序	118
三、用频率分析法精确计算地层倾角 (STRATADIP) 程序	124
四、SHDT资料处理方法	132
第四节 地层倾角测井在研究地质构造中的应用	133
一、地层倾角矢量图象的分类	133
二、地层倾角确定构造倾斜	135
三、地层倾角确定断层	138
四、在两口井之间确定断层	147
五、地层倾角确定角度不整合	147
六、地层倾角确定褶皱	150
七、地层倾角确定盐丘、泥丘	155
八、应用地层倾角进行地层对比	156
九、计算储集层真厚度	158
第五节 地层倾角测井在研究沉积相中的应用	159
一、用地层倾角划分层理构造	161
二、确定古水流方向	163
三、识别各种沉积砂体	167
四、判断岩性和泥质分布形式	182
第六节 地层倾角测井在识别裂缝及孤北潜山中的应用	184
一、裂缝识别基本原理	185
二、裂缝识别在王庄油田的应用	187
三、地层倾角和裂缝识别在孤北潜山中的应用	187
第十章 地层测试器及其应用	192
第一节 地层测试器工作原理	192
第二节 地层测试器解释基础	194
一、原理	194

二、估算渗透率的原理.....	197
第三节 地层测试器的应用.....	202
一、分析回收的流体.....	202
二、估算地层渗透率.....	205
三、预计油气日产量.....	211
四、探测气、油、水界面.....	213
第十一章 测井在油田勘探过程中的地质应用.....	217
第一节 两种新测井方法的应用.....	217
一、岩性-密度测井 (LDT) 的解释与应用.....	217
二、自然伽马能谱测井 (NGS) 的解释与应用.....	221
第二节 研究构造地质方面的应用.....	224
第三节 研究沉积相.....	224
一、分析沉积旋回.....	225
二、确定粘土成分.....	226
三、岩相的研究.....	227
第四节 探测裂缝及裂缝带.....	229
一、裂缝的定义及其特点.....	229
二、裂缝性地层的勘探特点.....	231
三、探测裂缝的测井技术.....	233
四、确定裂缝的主要方法.....	234
五、综合评价与实例.....	257
第五节 油田研究的应用.....	262
一、数据标准化.....	262
二、确定综合数据和绘制等值图.....	264
第六节 确定异常高压带.....	265
一、产生异常地层压力的原因.....	265
二、根据测井资料确定异常压力井段.....	266
三、估算地层流体压力.....	266
附录.....	268
附录一 常用符号说明.....	268
附录二 常用单位换算.....	270
附录三 书中使用的许用单位与非许用单位.....	271
参考文献.....	273

第七章 两种用于油气评价的解释方法

近年来,随着我国测井系列的发展和数字处理技术的采用,以及应用现代的化验手段,结合大量的岩心和试采数据,开展对不同类型的产层特性及其测井特征的综合研究,不仅进一步发挥了测井技术在油田勘探和开发过程中的作用,而且从深度和广度提高了测井解决地质问题的能力。尤其在评价油气层方面,由于引用油层物理的概念,剖析油(气)、水层的动态规律;采用扫描电子显微镜、X射线衍射、压汞资料研究产层的孔隙结构、粘土性质及其分布形态、润湿性,分析它们与测井显示的关系;同时结合油基泥浆取心数据进行多方面的观测和分析。因而,无论是理论或解释方法都有了新的进展。“可动水分析法”和“多参数自动判别分析油水层”就是其中的两种解释新技术,在现场应用中已经见到较好的效果。为此,我们将在本章系统地阐述它们的原理、解释方程和实际应用。

第一节 可动水分析法

“可动水分析法”是针对油气层评价提出的一种新型的测井分析方法。这一方法从油层物理的基本概念出发,以油、气、水在微观孔隙的渗流理论为理论依据。通过采集储集层两个主要的地质信息——含水饱和度(S_w)和束缚水饱和度(S_{wr}),判明产层的含油性和可动水率,以达到正确划分油(气)、水层的目的。因此,“可动水分析法”的设计和应用,不仅改变了过去单纯以含油饱和度为尺度评价油气层的传统概念,而且也为油(气)、水层解释发展了比较完整的理论和解释模型。并在这一基础上,提供一种评价油气层的比较有效的途径,从而在颇大程度上提高了测井评价油气层的能力。

一、基本原理

在地层条件下,油(气)、水层的动态规律一般是由混相流体的渗流理论来描述的。根据这一理论,油、气、水在储集层微观孔隙中的流动,主要取决于它们的相渗透率。这就是说,一个储集层到底是产油气,还是产水,或者是油水同出,归根结蒂是取决于产层油(气)、水相对渗透率的大小。例如,如果储集空间只存在两种流体,假设为油和水。那末,当油的相对渗透率(K_{ro})达到最大值(趋于1),而水的相对渗透率(K_{rw})趋于最小(等于0),这时储集层只产油而不产水,属于油层情况。若油的相对渗透率(K_{ro})趋于0,水的相对渗透率(K_{rw})趋于1,情况则相反,储集层只产水而不产油,为水层。如果 K_{ro} 与 K_{rw} 皆大于0,则是油水同出的情况。

实验室测定表明,油(气)、水的相渗透率不仅与岩石本身有关,而且还取决于孔隙内各种流体的相对含量,即取决于各自的饱和度数值。当地层孔隙内的流体为油和水时,而且水为润湿相、油为非润湿相,则根据实验室测定,油水的相对渗透率 K_{ro} 、 K_{rw} 经常可表示具有如下形式的经验关系式:

$$K_{rw} = \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right)^m \quad (7-1)$$

$$K_{ro} = \left[1 - \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right) \right]^n \left[1 - \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right)^j \right] \quad (7-2)$$

式中: S_w ——含水饱和度;

S_{wi} ——束缚水饱和度;

S_{or} ——残余油饱和度;

m 、 n 、 j ——经验系数, 主要取决于储集层的岩石特性。三者一般有如下关系:

$$2m = 2a \quad n = 2a + j \quad (7-3)$$

根据 (7-1) 和 (7-2) 式, 又可进一步推演出下列的结论:

1) 当储集层 $S_w = S_{wi}$ 时, 则 K_{ro} 达到最大值 (趋于 1), 而 $K_{rw} = 0$ 。显然为油层情况。

2) 当储集层 $S_w > S_{wi}$ 时, 则 $0 < K_{ro} < 1$, $0 < K_{rw} < 1$ 。说明储集层为油水同出。

3) 当储集层 $S_w \rightarrow 1$ 时, 则 $K_{rw} \rightarrow 1$, 而 $K_{ro} \rightarrow 0$ 。属于水层。

这就是说, 只要分析储集层的含水饱和度 (S_w) 与束缚水饱和度 (S_{wi}) 之间的关系, 不仅能够指示油(气)、水相对渗透率的变化, 而且能够达到最终评价油(气)、水层的目的。虽然, 以上是一种简化的分析, 实际计算 K_{ro} 、 K_{rw} 更为复杂, 但是, 通过以上的分析, 足以阐明评价油(气)层的基本原理和所应遵循的途径。显然, 这应该成为着眼设计油(气)、水层解释方法的理论基础。

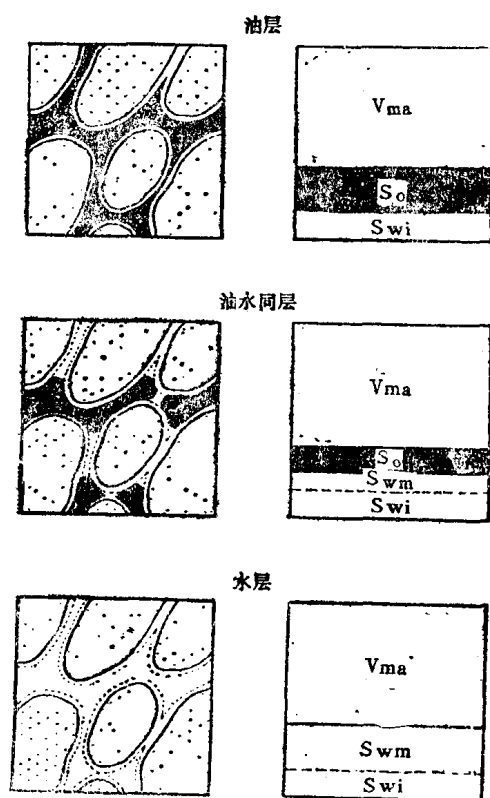


图 7-1 储集层中可动水解释模型

“可动水分析法”就是依据这一原理设计的一种新型解释方法。主要构思来自以下两个方面:

一是分析储集层的含油性, 以含水饱和度 (S_w) 表示之;

二是分析储集层的可动水率。

根据上述原理, 通过分析产层含水饱和度 (S_w) 与束缚水饱和度 (S_{wi}) 之间的关系确定可动水饱和度, 则:

$$S_{wm} = S_w - S_{wi} \quad (7-4)$$

式中: S_{wm} 为可动水饱和度。对于油气层, 显然 $S_{wm} = 0$ 。

据此可建立相应的解释模型和解释方程。解释模型如图 7-1 所示, 不难看出, 它与产层的实际情况十分逼近。所建立的解释方程可用于油(气)、水层的最终评价。

1. 油层

只含束缚水 (不动水), 不含可动水, 产层的孔隙空间为油 (气) 和束缚水所饱和。在

这种情况下, $K_{r,w} \rightarrow 0$, $K_{r,o} \rightarrow 1$, 可用如下方程表示:

$$S_o + S_{wi} = S_o + S_w = 1$$

$$S_w = S_{wi}; \text{ 则 } S_{wm} = 0$$

式中: S_o ——含油饱和度;

S_w ——含水饱和度;

S_{wi} ——束缚水(不动水)饱和度;

S_{wm} ——可动水饱和度。

2. 油水同层

孔隙空间为油(气)、可动水和束缚水三部分所饱和, 相当于 $0 < K_{r,o} < 1$, $0 < K_{r,w} < 1$ 。

1. 解释方程为:

$$\begin{cases} S_o + S_{wm} + S_{wi} = S_o + S_w = 1 \\ S_w > S_{wi}; \text{ 则 } S_{wm} > 0 \end{cases} \quad (7-5)$$

3. 水层

产层孔隙空间不含油或只含残余油(气), 主要被水(包括束缚水和可动水两部分)所饱和。这时 $K_{r,o} \rightarrow 0$, $K_{r,w} \rightarrow 1$, 解释方程为:

$$\begin{cases} S_w = S_{wm} + S_{wi} = 1 \\ S_w > S_{wi}; \text{ 则 } S_{wm} > 0 \end{cases} \quad (7-6)$$

或

$$\begin{cases} S_w + S_{or} = S_{wm} + S_{wi} + S_{or} = 1 \\ S_o = S_{or}; S_{wm} > 0 \end{cases} \quad (7-7)$$

式中: S_{or} 为残余油饱和度。

显而易见, 通过测井信息处理, 提供匹配的 S_w 与 S_{wi} 参数是实现这一方法的关键。核心问题在于如何应用测井资料确定束缚水饱和度。为此, 必须进一步了解束缚水饱和度的性质、影响因素及其测井解释方程的确定。

二、测井解释方程

1. 束缚水饱和度

一般说来, 储集层都有两方面的特性。一是岩石本身的骨架特性, 如孔隙度、渗透率、粒度与孔隙分布等。另一是流体与岩石之间的综合特性, 如毛细管力, 润湿性和相对渗透率。这些特性直接规定了油、气、水在产层中分布和流动特点, 是评价油(气)、水层的重要依据。理所当然也是测井分析所需要揭示和探讨的重要问题。

储集层中的束缚水实际是流体与岩石之间综合特性的反映。主要取决于岩石孔隙毛细管力的大小和岩石对流体的润湿性。根据这一概念, 束缚水主要由毛细管滞水和薄膜滞水两部分所组成。毛细管滞水系指油藏形成过程中, 驱动压力无法克服毛细管力而滞留于微小毛管孔道和颗粒接触处的残存水。因为这部分孔隙是如此之小, 孔壁表面分子作用力达到或几乎达到孔隙的中心线, 以至保留在其中的水不能流动。薄膜滞水则指由于表面分子力的作用而滞留在亲水岩石孔壁上的薄膜残留水。因此, 束缚水含量与地层的孔隙结构有十分密切的关系。已经证明, 组成岩石骨架的颗粒粒径小(一般小于100微米), 或以水云母、蒙脱土为主呈分散状分布的粘土矿物含量大, 是高束缚水产层普遍具有的特征。由于

粒度中值变小和粘土矿物充填的结果, 导致储集层的渗透率和孔隙度变小和束缚水饱和度增大。所以, 砂岩的束缚水饱和度 S_{wi} 经常可表示为粒度中值(M_d)和有效孔隙度(ϕ)二者的函数。而建立在这一统计规律基础上的经验方程能够提供与岩心分析相关性较好的计算结果。根据对我国六个主要油田1774块岩心实测数据的统计, 当 M_d 由0.04变化到0.3毫米时, 对于每一特定的粒度中值, $S_{wi} = F(\phi) (M_d = \text{const.})$ 的统计关系式, 相关系数最大为0.97, 最小为0.84, 一般都在0.9以上。同时进一步证明, 表达 $S_{wi}-\phi$ 之间的经验方程, 更趋近于双对数曲线形式, 而且高低孔隙度有着不同的变化规律 (图 7-2和图 7-3)。在以线性

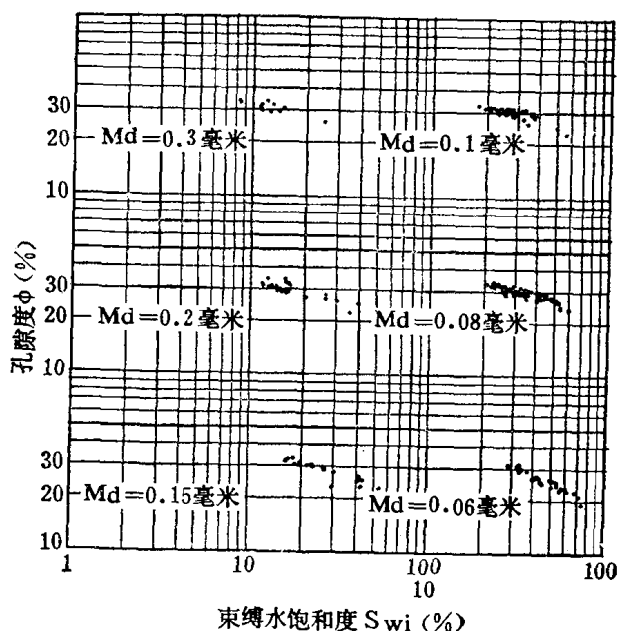


图 7-2 弱—中等胶结高孔隙($\phi \geq 25\%$)砂岩地层 $\phi-S_{wi}$ 关系图
(根据岩心实测数据绘制)

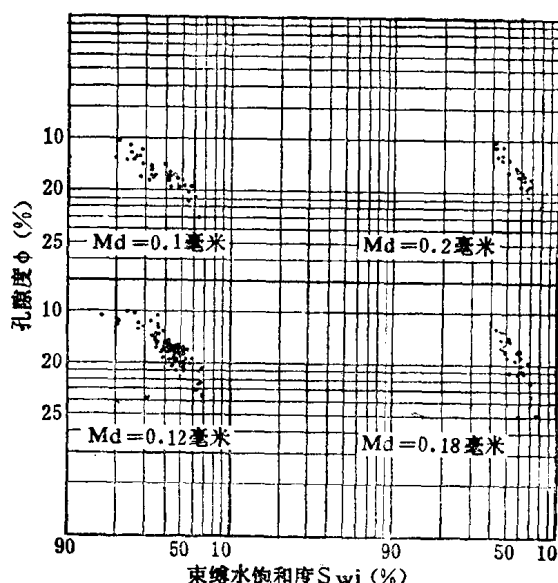


图 7-3 低孔隙度($\phi < 20\%$)砂岩地层 $\phi-S_{wi}$ 关系图
(根据岩心实测数据绘制)

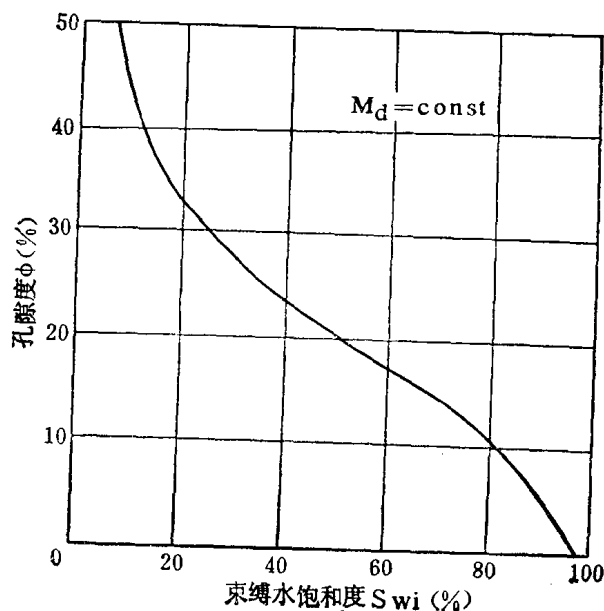


图 7-4 $\phi-S_{wi}$ 关系曲线示意图

刻度的交会图上, 如果粒度中值恒定, S_{wi} 与 ϕ 之间的关系如图 7-4所示。曲线的拐点大约在 $\phi = 20\%$ 附近。这意味着, 对一给定的粒度中值, $\phi \cdot S_{wi}$ 的乘积经常不是一个常数。

不难看出, 由图 7-4所描述的曲线的变化规律显然比较合理, 它不仅与大量的实测数据相吻合, 而且能更好地满足低孔隙度条件下束缚水饱和度小于或等于 1 的边界条件。目前国外普遍有这样一种观点, 认为对于恒定的粒度中值, 储集层的 $\phi \cdot S_{wi}$ 的乘积等于一个常数, 即 $\phi \cdot S_{wi} = C$, 表示这一方程的曲线形式为一双曲线。我

们认为这种观点可能是把复杂的地质问题过于简化了, 至少对于砂岩地层是如此。

当然, 实际影响束缚水饱和度的因素还比较复杂, 不同胶结程度和润湿性的砂岩, 以及原生和次生油藏的产层, 即使它们具有同一粒度中值和孔隙度, 其束缚水饱和度数值也不完全一样。因此, 对于不同地质特点的油田, 同一形式的解释方程, 经常蕴含着不同的经验系数。

2. 解释方程式

根据我国东、西部六个主要油田1774个岩心实测数据(油基泥浆取心), 在数理统计的基础上, 推导出如下的计算束缚水饱和度(S_{wi})解释方程。

高、中孔隙度($\phi \geq 20\%$)砂岩地层的基本形式:

$$\lg S_{wi} = A_0 - (A_1 \lg M_d + A_2) \lg \frac{\phi}{A_3} \quad (7-8a)$$

或

$$S_{wi} \cdot \left(\frac{\phi}{A_3} \right)^{A_1 \lg M_d + A_2} = A_0' \quad (7-8b)$$

显然, $A_0 = \lg A_0'$

式中的 A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 是方程(7-8)的经验系数。其中 A_1 、 A_2 近似为常数, 一般 $A_1 = 1.5$, $A_2 = 3.6$ 。 A_0 和 A_3 与地区地质特点有关, 主要取决于砂岩的胶结程度、孔隙度变化范围以及岩石的润湿性。因为呈现一定的规律性, 比较容易确定。 A_0 的变化范围为0.18~0.36, 随胶结程度变弱和孔隙度增大而减小。 A_3 的变化范围为0.08~0.2左右, 随胶结程度变弱和孔隙度增大以及亲水性增强而增大。 A_3 是方程(7-8)的重要参数, 对 S_w 的计算结果影响相当大。

选值时要求 A_0 与 A_3 匹配, 可参考下列原则确定:

高孔隙度($\phi \geq 0.25$)疏松亲水砂岩地层: $A_0 = 0.18$, $A_3 = 0.18 \sim 0.2$ 左右。例如我国东部地区的上第三系地层。

弱—中等胶结高孔隙度($\phi \geq 0.25$)地层: $A_0 = 0.3$, $A_3 = 0.12 \sim 0.14$ 左右。例如我国东部地区下第三系地层的上段。

中等胶结砂岩地层: 若 $\phi = 0.2 \sim 0.3$ 左右, $A_0 = 0.36$, $A_3 = 0.1$ 左右; 若 $\phi = 0.2$ 左右, $A_0 = 0.36$, $A_3 = 0.08 \sim 0.09$, 亲水砂岩取 A_3 的上限, 亲油砂岩取 A_3 的下限。例如我国东部下第三系地层的下段及其下部地层, 西部地区的有关层系等。

低孔隙度($\phi < 20\%$)砂岩地层的基本形式:

$$\lg (1 - S_{wi}) = B_0 + (B_1 \lg M_d + B_2) \frac{1 - \phi}{B_3} \quad (7-9a)$$

或

$$(1 - S_{wi}) \cdot \left(\frac{1 - \phi}{B_3} \right)^{-(B_1 \lg M_d + B_2)} = B_0' \quad (7-9b)$$

而 $B_0 = \lg B_0'$

式中: B_0 、 B_1 、 B_2 和 B_3 是方程(7-9)的经验系数, 同样与地区地质特点有关。 B_1 可视为常数($B_1 = 9.8$), $B_0 = 0 \sim 0.15$ 左右, $B_2 = 3.3 \sim 1.0$ 左右。若取 $B_0 = 0$, 则取 $B_2 = 3.3$ 或 $B_0 = 0.15$, 取 $B_2 = 1$ 。 B_3 是影响方程(7-9)计算结果的重要参数, 主要与砂岩的压实程度和润湿性有关。一般随地层的压实和亲油性而增大, 变化为0.7~0.8。若根据声波测井的

概念，用 C_p 表示压实程度，相应有以下规律：

$$C_p = 1.3 \sim 1.25,$$

$$C_p = 1.2 \sim 1.1,$$

$$C_p = 1.1 \sim 1,$$

超压实地层，

$$B_s = 0.68 \sim 0.70$$

$$B_s = 0.70 \sim 0.72$$

$$B_s = 0.72 \sim 0.74$$

$$B_s = 0.76 \sim 0.78$$

一般取其下限，对于明显亲油砂岩可取其上限。

为了证明方程(7-8)和(7-9)的可靠性，选择两个不同特点的油田共四口油基泥浆系统取心井进行验证，其结果示于图7-5和7-6。图中每个点代表一个产层，两个油田共有74个产层1493块岩样。根据方程(7-8)、(7-9)计算的束缚水饱和度与岩心实测数据对比，绝对值的平均误差约为 ± 0.05 ，证明能提供符合精度的计算结果。

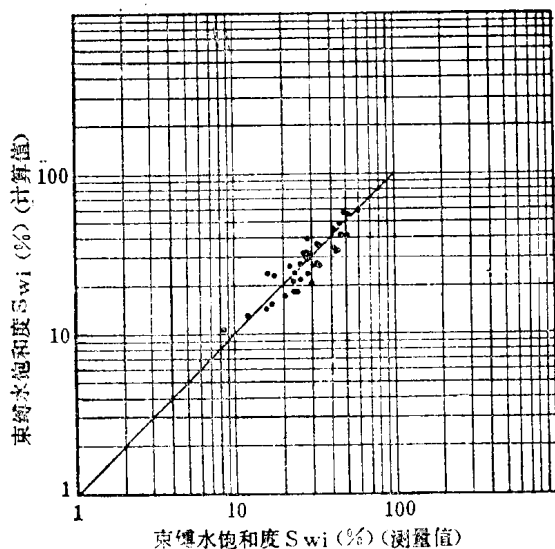


图 7-5 弱—中等胶结高孔隙度($\phi \geq 25\%$)砂岩地层计算束缚水饱和度误差分析
(共38个产层，绝对值的平均计算差为 ± 0.047)

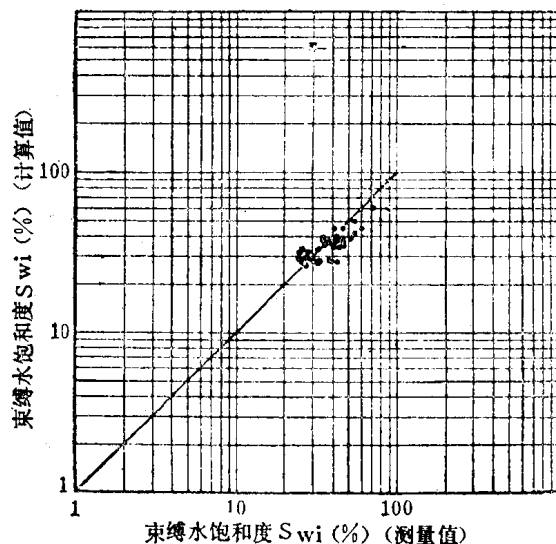


图 7-6 高孔隙度($\phi \geq 25\%$)疏松砂岩地层计算束缚水饱和度误差分析
(共36个产层，绝对值的平均误差为 ± 0.061)

3. 粒度中值解释方程

粒度中值(M_d)可利用自然伽马曲线求出，最理想是采用自然伽马能谱曲线。在有利的条件下，也可采用自然电位或中子伽马曲线进行计算，但以自然伽马法效果最佳。

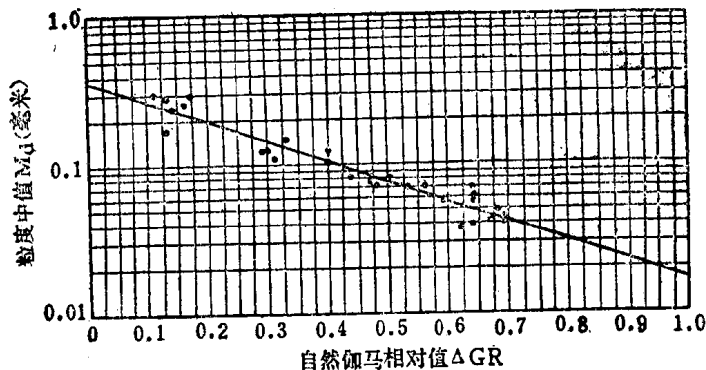


图 7-7 应用自然伽马相对值计算粒度中值图版

实际资料证明，砂岩地层的粒度中值与自然伽马曲线之间有很好的相关性(图7-7)，在有些油田相关系数可达0.96。其实这不难理解，经验表明，组成岩石骨架的泥质、粉砂、粉细砂都具有一定的自然放射性，尤以粒径最小的泥质放射性含量最大。在储集层的范畴内，自然伽马测井显示之所以与砂岩粒度变

化有比较密切的关系,是因为粒径大小反映了吸附放射性元素的能力,反映沉积速度和环境的变化。可以证明,除快速堆积的粗相带外,砂岩粒级的累积曲线基本服从正态分布,粒度中值则为均值。因此粒度中值直接与自然伽马数值建立关系,无论从沉积原理或数理统计角度来看都显得更为匹配。根据实际取心资料的对比,推导出相应的经验方程,其基本形式如下:

$$\lg M_d = C_0 + C_1 \cdot \Delta GR \quad (C_1 < 0) \quad (7-10)$$

式中 ΔGR 为自然伽马相对值,由下式给出:

$$\Delta GR = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (7-11)$$

式(7-10)中 C_0 和 C_1 为经验系数。 C_0 为所选取的 GR_{min} 相应层段的平均粒度中值(M_d)的对数值, M_d 相当于该井段以层为单位统计的粒度中值的最大值、则:

$$C_0 = \lg M_d \quad (\text{当 } GR = GR_{min})$$

C_1 由另一个边界点的粒度中值确定之,由下式给出:

$$C_1 = -1.75 - C_0 \quad (7-12)$$

采用我国东部三个油田的实际资料,对上述方程进行验证,计算粒度中值的平均误差约为 ± 0.12 。

应该指出,关于粒度中值与自然伽马曲线之间有良好的相关性,目前已被国内外更多油田的实际资料所证实。图7-8就是其中的一例,选自阿尔及利亚三叠系地层。从图中

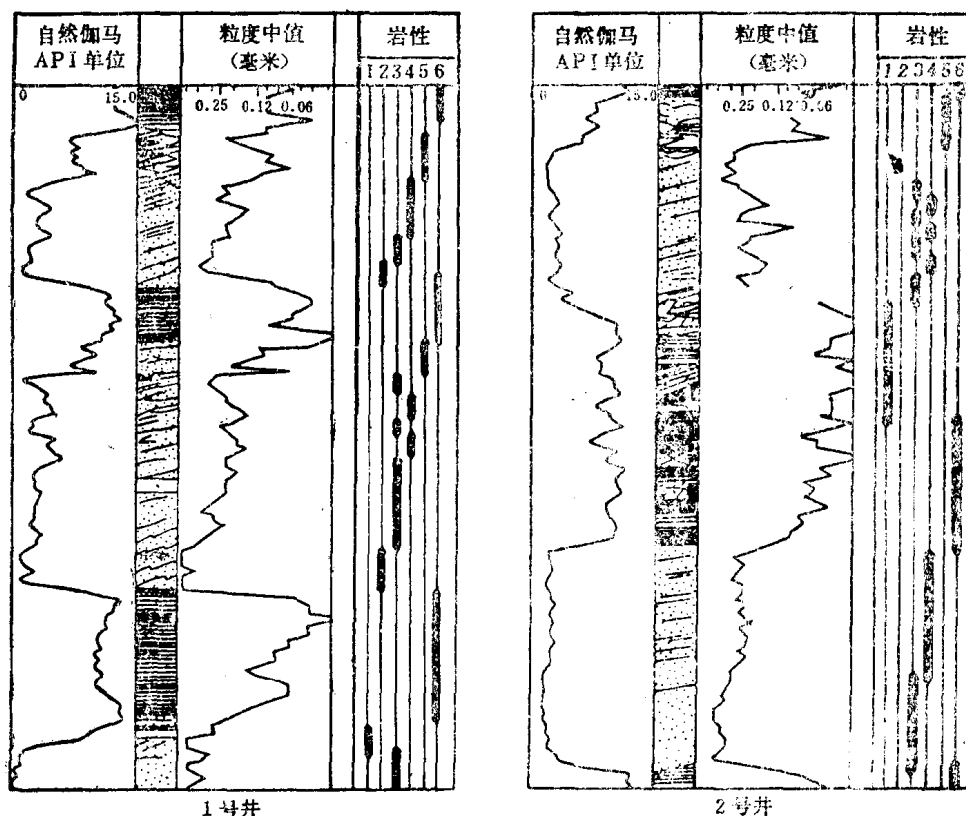


图 7-8 粒度中值与自然伽马曲线的相关性

1—泥质砾岩; 2—砂质砂岩; 3—交错层砂岩; 4—纹层状砂岩;
5—微型交错层砂岩; 6—页岩

可以看出，自然伽马曲线与实测的粒度中值有良好的相关关系。

当然，如果地层富集某些放射性矿物，则不能采用普通自然伽马曲线进行计算。在这种情况下，采用自然伽马能谱测井的钾、钍含量曲线，往往能够提供比较准确的计算结果。

已经证明，应用这一方法计算粒度中值，在陆相沉积地层效果普遍较好，海相地层也可望有较好的收获。对于快速堆积的粗相带或钙质富集层，效果则明显变差，可采用自然电位与中子伽马曲线相结合的方法，以改善其效果。中子伽马法的解释方程与方程(7-10)相仿：

$$\lg M_d = E_0 + E_1 \Delta NG \quad (E_1 > 0) \quad (7-13)$$

式中， ΔNG 为中子伽马相对值，由下式给出：

$$\Delta NG = \frac{NG - NG_{min}}{NG_{max} - NG_{min}} \quad (7-14)$$

式中： NG_{min} 和 NG_{max} ——为中子伽马曲线的最小和最大值，分别用纯泥岩和致密砂岩确定；

E_0 与 E_1 ——经验系数。

自然电位法的解释方程有两种形式，可根据地区的地质特点进行选用。

$$M_d = N_0 + \frac{N_1}{1 + \Delta SP} = N_0 + \frac{N_1}{2 - \alpha} \quad (7-15)$$

或

$$\lg M_d = C_0 + C_1 \cdot \Delta SP \quad (C_1 < 0) \quad (7-16)$$

式中： ΔSP ——自然电位相对值；

α ——自然电位的缩减系数。

$$\Delta SP = \frac{SP - SP_{sh}}{SP_{sd} - SP_{sh}} = (1 - \alpha) \quad (7-17)$$

式中， SP_{sh} 、 SP_{sd} 分别为纯泥岩和纯砂岩的自然电位数，经验系数 C_0 、 C_1 与方程(7-10)中的系数等同，方程(7-15)的经验系数 N_0 、 N_1 ，可由下式解出：

$$\begin{cases} N_0 + N_1 = M_d \\ N_0 + \frac{N_1}{2} = 0.02 \end{cases} \quad (7-18)$$

式中 M_d 是与 SP_{sd} 相对应的以层为单位的粒度中值。

总之，粒度中值是地层的一个重要特性，确定其数值，对于计算束缚水饱和度和渗透率，评价油气层和研究沉积相都有着重要的意义。

整个计算过程，包括计算粒度中值，束缚水饱和度，含水饱和度和渗透率等参数，都已编成完整的计算机解释程序。其中渗透率的解释方程，也是根据我国八个油田4573块岩心的实测数据，在数理统计基础上推导的基本关系式。实际应用表明，它不但能够提供与岩心分析相关性较好的渗透率数据，而且应用范围比较广泛的。

三、成果显示与解释原则

可动水分析法的成果显示具有形象直观的特点,便于解释人员分析。通常有两种形式:重叠法与交合法。交合法适用于人工解释,是由 S_{wi} (纵坐标)与 S_w (横坐标)组成的交会图,如图7-9所示,可直观指示产层的含油性和判明可动水。对于落在图上 45° 线附近的点,由于基本满足 $S_w = S_{wi}$,因而 $S_{wm} = 0$,说明生产过程中不会出水。

随着含水饱和度增加,由油层—低产油层—干层(当 $S_{wi} > 75\%$ 左右,则为干层)最后趋于泥点,如图上箭头所示。对于落在 45° 线右下方的点,始终满足 $S_w > S_{wi}$,因而 $S_{wm} > 0$,产水特征明显,含水率随着 S_{wi}/S_w 比值减小而增大。如箭头方向所示,为油层—油水同层—水层。

图7-10是渤海湾地区下第三系地层四口井实际资料绘制的 S_{wi} — S_w 交会图,能够十分清楚地区分油水层。尤其是判断低含油饱和度油层,效果较好。如图中第8~11、19、33~35等层,虽然含水饱和度十分高,有的原被解释为油水同层,但都经试油证实为油层。

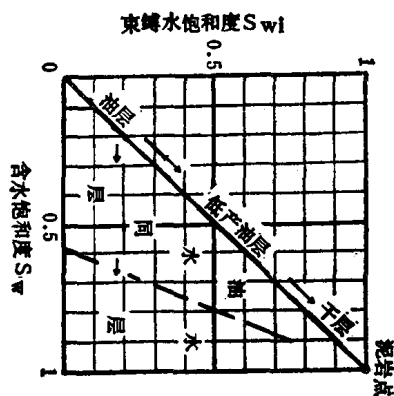


图 7-9 S_w — S_{wi} 交会示意图

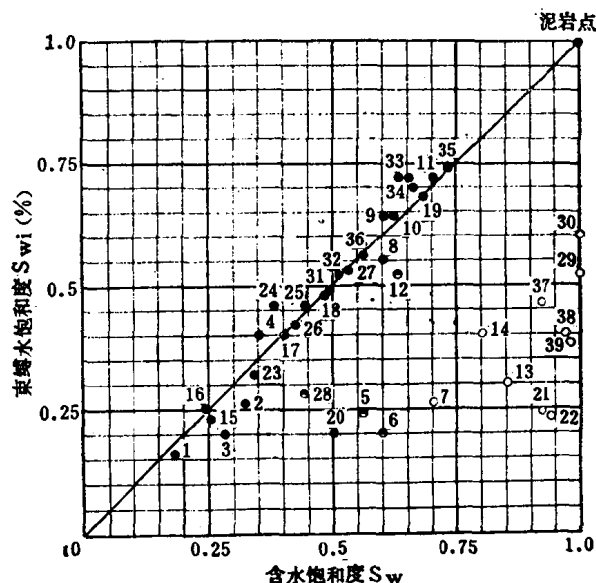


图 7-10 应用 S_w — S_{wi} 交会图评价油水层实例
(根据四个油田实测资料绘制)

重叠法是把 S_w 与 S_{wi} 参数以曲线形式表示,以统一的刻度和基线显示在成果图上的一种方法,如图7-11所示。如果 S_{wi} 与 S_w 基本重叠(即 $S_{wi} \approx S_w$),表明产层不含可动水,是油气层的显示,若 S_{wi} 很大,则趋于干层。如果出现 $S_w > S_{wi}$ 的幅度差,表明产层含有可动水,其含量随着幅度差增加而增大,是油水同层或水层的显示标志,出现 $S_w < S_{wi}$ 的幅度差,是由于计算的 S_w 与 S_{wi} 参数不够匹配引起的,不过常常可作为指示典型油层的标志。成果图显示内容同样由左向右分为四道。

第Ⅰ道和第Ⅱ道:分别为地层体积分析和流体体积分析,其内容与常规的成果图相同。

第Ⅲ道:可动水分析

显示地层的含水饱和度(S_w)和束缚水饱和度(S_{wi})重叠曲线。直观指示地层的含油性和可动水含量。

第IV道：产层特性

显示地层的粒度中值(M_d)，渗透率(k)和泥质含量(V_{sh})曲线。

解释原则初步确定如下：

油层

① $S_{wi} \doteq S_w$ ，则 $S_{wm} \doteq 0$ ，表现为 S_{wi} 与 S_w 曲线基本重叠。但是厚度大，含油饱和度高的典型油气层往往容易出现负差异。其原因主要是由于按亲水性地层来选择参数之故。

② $S_{wi} \leq 75\%$ ， $S_o \geq 25\%$ ，满足 $\phi \cdot S_o > 0.05$ 者则认为有射孔价值。若 $S_{wi} > 75\%$ 或 $\phi \cdot S_o \leq 0.05$ 者按干层处理（深部油气层除外）。

③ 具有一定的可动油量。

油水同层

① $S_w > S_{wi}$ ， $S_{wm} > 0$ ，表现为比较明显的正差异。正差异越大表示 S_{wm} 和产水率越高。

② 具有一定的含油饱和度和可动油量。

水层

① S_w 明显大于 S_{wi} ，正差异 ($S_w > S_{wi}$) 较大。

② 含油饱和度趋于 0 或接近残余油饱和度，没有可动油量。

可动水分析法可用简明的方法评价成果的合理性。因此，在解释之前，应对成果的质量进行评价。其办法是在整个解释井段内选择易于识别的典型油气层，分析它们的计算结果是否满足 $S_w \doteq S_{wi}$ （若按亲水性地层选择参数， S_{wi} 则应稍大于 S_w ）。否则就要分析原因，判断是 S_w 还是 S_{wi} 的计算结果不够合理。以便重新选择参数，对整个井段进行再次的运算，直到认为合理为止。

现列举一例。图7-12属于我国东部油田的一口井，目的层段为下第三系地层。岩性以粉砂岩为主，中等胶结，孔隙度约为18~25%，渗透率由10~1000毫达西，地层水矿化度高，油层的含油饱和度相对较低。利用可动水分析法显示油水层清楚，如图7-12所示。2346~2397米 S_w 与 S_{wi} 基本重叠，为主要的油层段，测试结果与解释结论吻合，日产油354吨（畅喷）。2433~2438米有明显的可动水显示，为典型水层。

四、应用及其特点

“可动水分析法”是对现有的评价油气层方法的改进和发展。由于它既有比较可靠的理论依据，又有比较完整的解释逻辑，因此投产以来，在两年的时间里，取得了良好的地质效果。到目前为止，已经应用这种方法解释了我国东西部20个油田（地区）300多口井，其中主要为新区（块）的第一批探井和油气层不易判断的疑难井，以及由于油田注水开发造成地下条件复杂化的开发调整井和检查井等，并获得比较高的成功率。例如，对已经有试油结果的15个油田74口井348个解释层分析表明，可动水分析法的解释结果与试油结果相符合者达320层，符合率在90%左右。分析其应用情况，主要特点是表现在对三种解释疑难课题的突破。

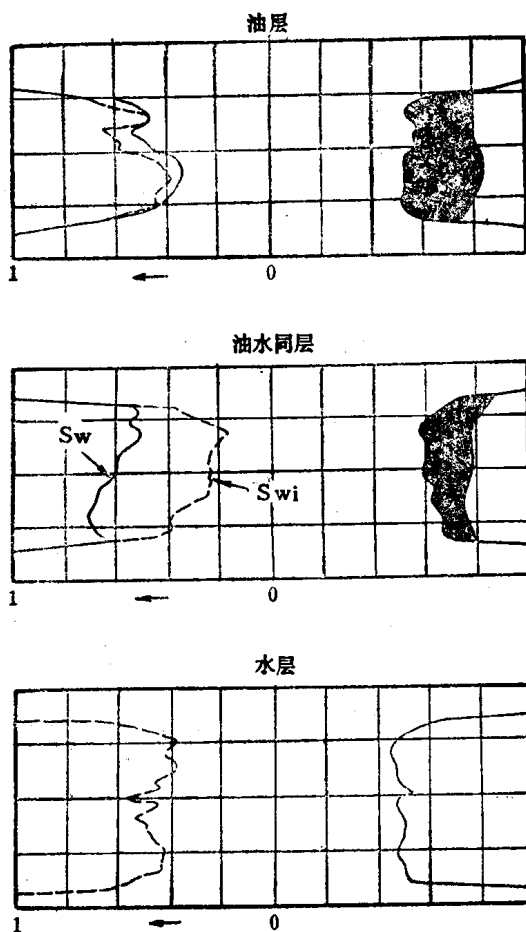
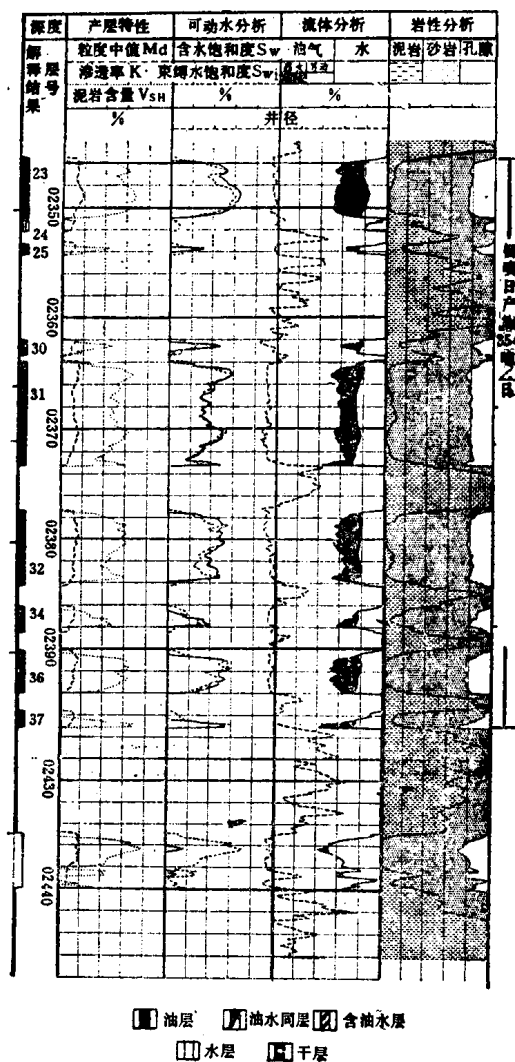
图 7-11 $S_w - S_{wi}$ 重叠示意图

图 7-12 文10-2井解释成果图

1. 低电阻率油气层的解释

低电阻率油气层往往见于许多油田粉砂或泥质砂岩地层中。由于具有高束缚水含量特点，含油饱和度普遍低于50%，相应降低了测井信息对油气层的分辨率，因而容易解释偏低和遗漏。已经证明，采用“可动水分析法”则能在颇大程度上改善这种情况，在提高低电阻率油气层的解释成功率方面，取得了较好的效果。现列举几例。濮阳地区的主要含油层系为沙二、三段地层，由于岩性细、以粉砂为主，粘土含量普遍较高，因此在有些层段低电阻率油气层发育。例如濮城油田沙二上，文留油田沙二段第七砂层组和沙三段第十砂层组等，其电阻率甚至小于1欧姆米，视含油饱和度也在30%左右，是我国目前比较典型的低电阻率油层，由于油层电阻率与水层接近，有时甚至低于周围泥岩的电阻率，给划分油水层带来不少困难。采用“可动水分析法”之后，这种情况有了较好的改善，先后成功地解释了一些具有低电阻率油气层的探井和生产井，它们分布于濮阳、利津、商河西、苏北、柯克亚等地区，解释成功率相当高。例如图7-13是文留油田下第三系地层一口井的解释成果图，该井的第35层是一个典型的低电阻率油层，视电阻率约为0.9欧姆米，不仅

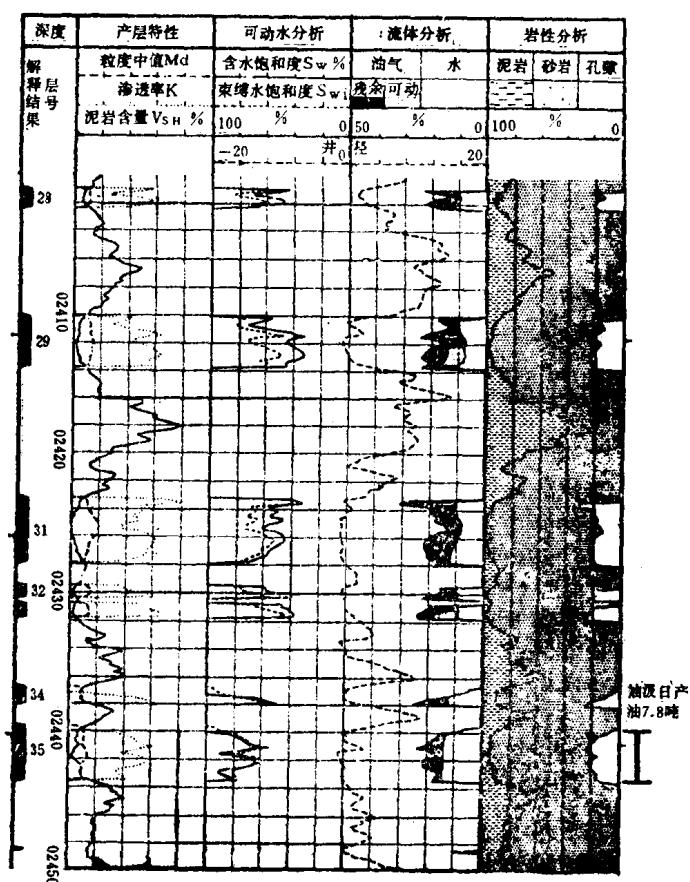


图 7-13 文10-22井解释成果图

小于周围泥岩的电阻率而且与同样条件的水层接近（见图7-14）。视含油饱和度约为30~35%，油层特征不明显。但是，对于这种类型的油气层，采用“可动水分析法”则能提供比较明确的答案。根据图7-13的显示，第35层不含可动水（ S_w 与 S_{wi} 重叠），可以比较肯定地解释为油层。经测试，日产油7.8吨，无水，证实为油层。对第35层进行扫描电镜分析，表明引起油层低电阻率的原因，除了与地层水矿化度高达30万ppm有关外，更主要是由于组成岩石骨架的颗粒粒径小和以水云母、蒙脱土为主的粘土矿物普遍充填于粒间孔隙，形成以微小孔隙为主的孔隙系统和具有高束缚水含量的特点。

利津油田也是一个具有低电阻率油层的油田，应用可动水分

析法也在第一批探井中成功地解释了油层。例如利8井的第18、20层，利10井的第7~10层等。图7-15为利10井的解释成果图。由于束缚水含量高，油层电阻率与水层接近，因此从第7层开始，原人工解释为油水同层（7~9层）、含油水层（10层）和水层（11层）。然而，在 S_w-S_{wi} 重叠图上油层特点明显，都应解释为油层。经射开其中的8~10层测试，日产油34吨，肯定了可动水分析法解释的正确性。

此外，在柳泉、跃进、南疆等油田的应用也都取得较好地效果。分析了我国6个比较典型的低电阻率油气层发育的油田，在有试油结果的29口井191个解释层中，可动水分析法的解释结果与试油结果相符为175层，符合率为91.6%。

2. 解释界限层和划分油水过渡带

众所周知，如何掌握油气层的界限是解释工作的一个难点，因为油气层的含油饱和度界限是随着产层束缚水含量的变化而变化。对于这一问题，可动水分析法也能提供比较明确的答案。实际应用表明，它不仅能够指示处于界限附近的油气层是否会含水，而且能提供含水率高或低的相对概念。现举其中一例：

图7-16的解释井段同样为文留油田下第三系地层。图中的第46~49层属于该地区渗透率和孔隙度都比较高的产层。因此，与其上部的油层相比，电阻率相对较高，视含油饱和度达65%左右，原人工解释为油层。然而，在 S_w-S_{wi} 重叠图上， $S_w > S_{wi}$ ，产水特征明显，应解释为油水同层。扫描电镜分析也证明具有束缚水相对较低的特点，主要是粘土含