

泥质碎屑储集层的测井评价

W.H.Fertl
Dresser Atlas

王文祥 译
孙济元 校

摘 要

泥质碎屑储集岩层中油气资源的可靠评价虽然困难却是一项重要的任务。所以如所简要回顾的那样,过去已演变发展了广泛的各种解释模型。

现在着重讨论泥质砂岩数字评价技术,该技术基于韦克斯曼-斯米茨模型提供以下有关资料:储集层总孔隙度和有效孔隙度以及流体分布;粉砂含量;井下地层所含粘土矿物的类型(蒙脱石、伊利石、绿泥石/高岭石)、体积和分布方式(分散、层状、结构)。

文中取自不同地质环境的实例提供了碎屑储集岩层评价的现场经验,这些储集层的孔隙度和渗透率变化的范围广泛,这些岩层所含粘土矿物的数量、类型和分布方式也各不相同。文中还讨论了由测井资料获得的地层损害指数。

最后,文中重点介绍了改善的关于薄层砂泥岩层段的储集层评价方法,该方法综合应用了电阻率资料、短间距介电测量结果并改善其分析能力以及采用了分析数据的分层程序。

前 言

含油气碎屑储集层很少不含粘土矿物。粘土矿物对地球物理测井响应的显著影响是公认的。测井分析家协会(SPWLA)1982年出版的泥质砂岩专辑⁽¹⁾第一次收集和广泛评述了大量重要的关于泥质碎屑储集岩层评价的技术论文,这种评价是根据地球物理测井的测量结果和有关的解释原理来进行的。作为一个例子,在图1上说明了各种孔隙度测井对泥质效应和油气效应的一般响应。

所以,泥质砂岩地层评价的基本目的是用测井资料按井下地层的岩石物理参数、油气资源的类型和体积数量以及预计的生产特性来可靠地描述储集层的性质。这种评价方法可以是简单的经验规则、标准的分析原理、井场数字“快速直观”技术或单井或多井油田研究的先进数字解释模型。

基 本 原 理

阿尔奇⁽²⁾在其经典的经验公式中将地层电导率、地层水电导率和地层电阻率因数(孔隙

度和胶结指数的函数)与地层水饱和度相关联。阿尔奇公式令人满意地用于纯净砂岩,而地层中所含的粘土矿物(数量、类型、分布方式)给含水饱和度的计算带来不利的影响。而至今提出的用于泥质砂岩储集层评价的含水饱和度模型已超过三十个。其中主要部分大多数可被划分归属于四大类之中(表1)^[3]。该分类和关于储集层评价中泥质砂岩概念演变进展的深刻论述已于最近由Worthington发表(1985)^[3]。

表 1 泥质碎屑储集岩层含水饱和度公式的分类

出 处	公 式*	类 型	附 注
POUPON et al (1954)	$C_t = \frac{(1 - V_{sh})C_w S_w^2}{F} + V_{sh}C_{sh}$	1	层状泥质模型; F—纯净砂岩夹层的地层因数;
HOSSIN(1960)	$C_t = \frac{C_w S_w^2}{F} + V_{sh}^2 C_{sh}$	1	S _w 与纯净砂岩夹层总的 连通的孔隙空间有关
SIMANDOUX (1963)	$C_t = \frac{C_w S_w^2}{F} + \epsilon V_{sh} C_{sh}$	1	$\epsilon=1$, S _w 高值 $\epsilon<1$, S _w 低值
L. de WITTE (1955)	$C_t = \frac{2.15km_w}{F} S_w^2 + \frac{km_{sh}}{F} S_w$	2	m _w =地层水可交换阳离子克分子 浓度 m _{sh} =与泥质相联的可交换阳离子 的克分子浓度 k=m _{sh,w} 转换成电导率的换算 系数 F与总连通孔隙度有关 S _w 与总的连通孔隙空间有关 F=最大地层因数 FA=泥质含量因数 S _w 与总的连通孔隙空间有关 C _{sh} =由泥质引起的电导率 (≠C _{sh}) F与总连通孔隙度有关 S _w 与总的连通孔隙空间有关 F*与总连通孔隙度有关 S _w 与总的连通孔隙空间有关
A.J.de WITTE (1957)	$C_t = \frac{C_w S_w^2}{F} + AS_w$	2	
PATCHETT & RAUSCH(1967)	$C_t = \frac{C_w S_w^2}{F} + C_{sh} S_w$	2	
WAXMAN & SMITS(1968)	$C_t = \frac{C_w}{F^*} S_w^2 + \frac{BQ_v}{F^*} S_w$	2	
BARDON & PIED(1969)	$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + V_{sh} C_{sh} S_w$	2	修正的Simandoux公式
SCHLUM- BERGER(1972)	$C_t = \frac{C_w}{F(1 - V_{sh})} S_w^2 + V_{sh} C_{sh} S_w$	2	F与总的岩石体积(包括地层内的 层状泥质)的自由流体孔隙度有关
CLAVIER et al. (1977, 1984)	$C_t = \frac{C_w}{F_0} S_w^2 + \frac{(C_{bw} - C_w)v_Q Q_v}{F_0} S_w$	2	双水模型 F ₀ 与总连通孔隙度有关 S _w 与总的连通孔隙空间有关

续表

出 处	公 式*	类型**	附 注
JUHASZ (1981)	$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + \left\{ \frac{C_{sh}}{F_{sh}} - C_w \right\} \frac{V_{sh} \phi_{sh} S_w}{\phi}$	2	标准化的韦克斯曼-斯米茨公式 $F = 1/\phi^m$, ϕ 是油气影响校正后的密度测井孔隙度 $F_{sh} = 1/\phi_{sh}^m$, ϕ_{sh} 是密度测井的泥岩孔隙度 S_w 与总的连通孔隙空间有关
DOLL (未发表)	$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + 2V_{sh} \sqrt{\frac{C_w C_{sh}}{F}} + V_{sh}^2 C_{sh}$	3	
ALGER et al. (1963)	$C_t = \frac{C_w(1-q)^2}{F} S_w^2 + \frac{q(1-q)(C_{sh} + C_w)}{F} S_w + \frac{q^2 C_{sh}}{F}$	3	粘土浆模型 F 与总的流体和粘土占据的体积有关 S_w 与充满流体的孔隙空间有关
HUSTEN & ANTON (1981)	$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + 2V_{sh} \sqrt{\frac{C_w C_{sh}}{F}} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{C_w}{C_{wb}}} \right\} S_w + V_{sh}^2 C_{sh} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{C_w}{C_{bw}}} \right\}^2$	3	$F = 1/\phi^2$, ϕ_t 是总连通孔隙度 $C_w = C_{fw}$ S_w 与总的连通孔隙空间有关
PATCHETT & HERRICK (1982)	$C_t = \frac{(1 - V_{sh}) C_w}{F} S_w^2 + \frac{(1 - V_{sh})}{F} BQ_v S_w + V_{sh} C_{sh}$	3	层状砂泥岩模型 V_{sh} = 层状泥质的体积百分比 F 与泥质砂岩夹层中总的连通孔隙度有关 S_w 与泥质砂岩夹层中总的连通孔隙空间有关
POUPON & LEVEAUX (1971)	$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + 2 \sqrt{\frac{C_w V_{sh}^{1-2V_{sh}} C_{sh}}{F}} S_w^2 + V_{sh}^{1-2V_{sh}} C_{sh} S_w^2$	4	“印度尼西亚”公式
POUPON & LEVEAUX (1971)	$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + 2 \sqrt{\frac{C_w V_{sh} C_{sh}}{F}} S_w^2 + V_{sh}^2 C_{sh} S_w^2$	4	简化的印度尼西亚公式, $V_{sh} \leq 0.5$
WOODHOUSE (1976)	$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + 2 \sqrt{\frac{C_w V_{sh}^{1-2V_{sh}} C_{sh}}{F}} S_w^2 + V_{sh}^{1-2V_{sh}} C_{sh} S_w^2$	4	含沥青砂岩修正的 Poupon & Leveaux 公式

续表

出 处	公 式*	类型**	附 注
RAIGA- CLEMENCEAU et al. (1974)	$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + 2 \sqrt{\frac{C_w \phi_{bw}^{1.72} C_{bw}}{F}} S_w^{1.5} + \phi_{bw}^{1.72} C_{bw} S_w$	4	“双孔隙”模型 $\phi_{bw} = \phi_t - \phi_c$

* 除非另有说明, F 与自由流体孔隙度有关;除非另有说明, S_w 与自由流体孔隙空间有关;以上所列公式中 n 取为 2。

** S_w 关系式的类型公式

类型 1 $C_t = a S_w^n + \gamma$ 无交互作用项, S_w 不同时出现在两项中。

类型 2 $C_t = a S_w^n + \gamma S_w^r$ 无交互作用项, S_w 同时出现在两项中。

类型 3 $C_t = a S_w^n + \beta S_w^r + \gamma$ 有交互作用项, S_w 不同时出现在所有项中。

类型 4 $C_t = a S_w^n + \beta S_w^r + \gamma S_w^s$ 有交互作用项, S_w 同时出现在所有项中。

式中 a —表示主要的砂岩项;

β —表示主要的交互作用项;

γ —表示主要的泥质项;

r —交互作用项的饱和度指数;

s —泥质项的饱和度指数。

基于粘土体积含量 V_{cl} 的概念受到两方面限制: 一是不准确, 另一是需要可靠的 V_{cl} 测井估算值。⁽³⁾ 后者本身就不是一项轻易的任务 (表 2)。⁽⁴⁾

在表 3 概括列出的是最常见粘土矿物的化学成分、骨架密度、氢指数、阳离子交换量和根据自然伽马能谱资料得出的钾、钍和铀的分布。因为一个典型的泥质碎屑储集岩层或泥质

表 2 测井粘土体积指示式

测 井 曲 线	数 学 关 系 式	有 利 条 件	不 利 条 件
自然电位	$V_{cl} = 1.0 - (PSP/SSP) + 1.0 - a$ $V_{cl} = (PSP - SP_{min}) / (SSP - SP_{min})$ $V_{cl} = 1.0 - C \cdot a$ $1.0 - a = \log A / \log \{ (A - V_{cl} \cdot B) / (1 - V_{cl} \cdot B) \}$ $A = R_t / R_{xo}$ $B = R_t / R_{cl}$ $1.0 - a = (K V_{cl} W) / (K V_{cl} W + \phi S_{xo})$	含水层, 层状泥质砂岩, 低电阻率。 $C < 1.0$, 是粘土类型的函数 要知道所需的几个参数, 包括 a 、 R_t 、 R_{xo} 、 R_{cl} , 限制条件类似于直接的 SP 公式 K —测井系数; W —根据体积和骨架的 ρ_{cl} 值得出的粘土孔隙度; S_{xo} —冲洗带含水饱和度; 以及很多其它所需的实验室的分析资料	R_{mt}/R_w 接近 1.0, 薄层, 高电阻率, 含油气, 大电动电位, 和/或侵入影响。

续表

测井曲线	数 学 关 系 式	有 利 条 件	不 利 条 件
自然伽马	$V_{cl} = (GR - GR_{min}) / (GR_{max} - GR_{min})$ $V_{cl} = C(GR - GR_{min}) / (GR_{max} - GR_{min})$ $V_{cl} = (GR - W) / Z$ $W, Z = \text{地区系数}$ $V_{cl} = 0.33(2^{2V_{CL}} - 1.0)$ $V_{cl} = 0.083(2^{3.7V_{CL}} - 1.0)$ $V_{CL} = (GR - GR_{min}) / (GR_{max} - GR_{min})$	只有粘土矿物具有放射性 $C < 1.0$, 当 $V_{cl} < 40\%$ 通常近似为 0.5 固结和中生界岩石 第三系碎屑岩	存在非粘土的放射性矿物(云母、长石、粉砂) 只存在缺钾的高岭石, 在渗透的裂缝带中铀富集 在套管上有放射性重晶石结垢, 严重冲蚀(自然伽马很低) 年轻、未固结岩石较老, 固结的岩石
自然伽马能谱测井, 该测井提供钾、钍含量的单独测量值	$V_{cl} = (A - A_{min}) / (A_{max} - A_{min})$ $V_{cl} = C(A - A_{min}) / (A_{max} - A_{min})$ $V_{cl} = 0.33(2^{2V_{CL}} - 1.0)$ $V_{cl} = 0.083(2^{3.7V_{CL}} - 1.0)$ $V_{CL} = (A - A_{min}) / (A_{max} - A_{min})$	类似于所讨论的自然伽马的条件。A = 自然伽马能谱测井读数 (K-%, Th-ppm) A_{min} = 纯净层的最小值 (K或Th) A_{max} = 纯泥岩的最大值 (K、Th) 低孔隙度层 (碳酸盐岩、泥灰岩) 产层的 ($S_w - S_{wir}$) 值低 $R_{cl}/R_t = 0.5 - 1.0$ R_{cl} 接近 R_t 在纯净的含油气层, V_{cl} 计算值 = 0	类似于所讨论的自然伽马测井的情况, 然而, 渗透性的裂缝带的铀富集和放射性重晶石结垢不受限制。如应用Th曲线, 将忽略局部的班脱岩夹层。 高孔隙度含水砂岩, 高 R_{cl} 值
电 阻 率 假如有几种电阻率测井资料, 选用在井中显示电阻率最高的一种	$V_{cl} = (R_{cl}/R_t)^{1/b}$ $b = 1.0$ $b = 2.0$ $V_{cl} = \{R_{cl}(R_{max} - R_t) / (R_t(R_{max} - R_{cl}))\}^{1/b}$ $(1/b) = 1.0$ 当 $R_{cl}/R_t \geq 0.5$ $(1/b) = 0.5 / (1 - R_{cl}/R_t)$ 当 $R_{cl}/R_t < 0.5$	高含气饱和度或很低储集层孔隙度 ϕ_{MIN} 能够变化	
中 子	$V_{cl} = \phi_N / \phi_{Ncl}$ $V_{cl} = (\phi_N - \phi_{MIN}) / (\phi_{Ncl} - \phi_{MIN})$		ϕ_{Ncl} 低值
脉冲中子	$V_{cl} = (\Sigma - \Sigma_{min}) / (\Sigma_{max} - \Sigma_{min})$ $V_{cl} = (\Sigma_{cl} / \Sigma(\Sigma - \Sigma_{min})) / (\Sigma_{max} - \Sigma_{min})$	淡水环境、低孔隙度和含气层	

续表

测井曲线	数 学 关 系 式	有 利 条 件	不 利 条 件
密度—中子	$V_{cl} = \frac{\rho_B(\phi_{Nma}-1.0) - \phi_N(\rho_{ma}-\rho_f) - \rho_f\phi_{Nma} + \rho_{ma}}{(\rho_{sh}-\rho_f)(\rho_{Nma}-1.0) - \phi_{Nsh}-1.0)(\rho_{ma}-\rho_f)}$		产气层的 V_{cl} 值太低, 井眼条件恶劣时不予应用。受岩性影响。
密度—声波	$V_{cl} = \frac{\rho_B(\Delta t_{ma}-\Delta t_f) - \Delta t(\rho_{ma}-\rho_f) - \rho_f\Delta t_{ma} + \rho_{ma}\cdot\Delta t_f}{(\Delta t_{ma}-\Delta t_f)(\rho_{sh}-\rho_f) - (\rho_{ma}-\rho_f)\cdot(\Delta t_{sh}-\Delta t_f)}$	与密度—中子交会图技术相比, 较少依赖于岩性和流体条件 在规则井眼中应用	严重冲蚀(井眼)、地层非常欠压实(浅层、超压)
中子—声波	$V_{cl} = \frac{\phi_N(\Delta t_{ma}-\Delta t_f) - \Delta t(\phi_{Nma}-1.0) - \Delta t_{ma} + \phi_{Nma}\cdot\Delta t_f}{(\Delta t_{ma}-\Delta t_f)(\phi_{Nsh}-1.0) - (\phi_{Nma}-1.0)\cdot(\Delta t_{sh}-\Delta t_f)}$	只在含气层低 S_w 条件下应用	泥质含量对两种测井的影响相似

储集层可能含有数量不定的不同粘土矿物, 所以没有一个单一的粘土参数能普遍用于表征某一具体的泥质沉积或泥质储集岩层。

随着韦克斯曼-斯米茨模型^[5]的出现, 对粘土含量很不相同和地层水矿化度变化范围很广的储集层就有了可靠的计算含水饱和度的方法。关键是根据某一单个的或组合的几个测井参数求得单位总孔隙体积的阳离子交换量(Q_v)。

这种从测井资料得到的 Q_v 估计值可以根据以下资料来计算: 自然电位曲线、自然伽马曲线、自然伽马能谱数据(钾、钍、铀)、介电测量结果、储集层孔隙度、自然伽马值/储集层孔隙度、粘土成分含量/储集层孔隙度等。这些提出的相关技术和其可能特有的约束条件已在有关文献中提及^[4]并予广泛论述。

这里只要说明, 这种相关技术便于对一个地质剖面或一定地区中的给定地层连续计算CEC和 Q_v 值。然而, 这些技术全都要求提供目的层段的测井和岩心资料, 因此不能预期得到简单的唯一数学变换式。

为克服这些限制条件带来的困难, 最近已研究成功先进的泥质砂岩数字分析技术, 例如CLASS^[6]和CLAYS^[7]。根据韦克斯曼-斯米茨模型和各种粘土矿物基本特性参数的变化, CLASS和CLAYS分析技术提供以下各种资料: 总孔隙度和有效孔隙度、总的和有效孔隙的流体分布, 粉砂体积、地层中所含粘土矿物的数量、类型和分布方式以及储集层的产能。这些方法的详细内容可见于有关文献^{[6]、[7]}。

根据密度、中子和自然伽马能谱的资料可确定所计算目的层段每一深度处的两个关键的储集层参数: 粘土密度(ρ_{cl})和100%粘土的中子读数(N_{cl})。不需输入邻近泥岩层的平均粘土参数值。因此, 不用附加其它技术特有的约束条件, 即不用假设碎屑储集层中粘土的特性和邻近泥岩层中粘土的特性是相同的。况且, 这种假设往往是不切实际的^[8]。

在确定上述两个关键性的粘土参数 ρ_{cl} 和 N_{cl} 的同时, 根据钾和钍的含量计算出粘土体积含量(V_{cl})。此 V_{cl} 值基本上与粘土类型无关。

表 3 各种粘土矿物的重要测井参数

粘土矿物	化 学 成 分	附 注	密 度 ρ_{cl} (克/厘米 ³)	氢指数 HI	阳离子交换 量CEC (毫克当量/ 100克)	自然伽马射线分布(平均)		
						钾 K(%)	铀 U(ppm)	钍 Th(ppm)
绿 泥 石	$(Mg, Al, Fe)_{12}(Si, Al)_8O_{20}(OH)_{16}$	低吸附水特性, 在储集层孔隙空间中以包裹或孔桥形式存在在表面积中等, 对电阻率测量结果影响不大	2.60—2.96	0.34	10			
伊 利 石	$K_{1-1.5}Al_4Si_{17-6.5}Al_{1-1.5}O_{20}(OH)_4$ $\left\{ \begin{array}{l} K_2(Mg, Fe^{+2})_{6-4}(Fe^{+3}, Al)_2 \\ Ti_{0-2} \\ [Si_{16-8}Al_{12-3}O_{20}O_{0-2}(OH)_4] \\ (F)_{4-2} \end{array} \right\}$ $K_2Al_4Si_{16}Al_2O_{20}(OH, F)_4$	不吸附水, 在储集层孔隙空间中以包裹/孔线和/或孔桥的形式存在, 使电阻率测量值降低, 中等表面积 黑云母 在储集岩层中以孔桥形式存在和/或薄云母层以纹理形式存在 白云母 对垂直渗透率有严重影响	2.64—2.69 2.7—3.2 2.76—3.0	0.12 0.12 0.13	10—40	4.5 6.7—8.3 7.9—9.8	1.5	<2.0 <0.01 <0.01
高 岭 石	$Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2$	“斑状”高岭石在储集层孔隙空间中以离散颗粒形式存在当移动成线就造成地层内部损害, 对电阻率理论密度值测量值影响小, 表面积小 广泛文献引用值 常用值	2.61 2.60—2.68 2.63	0.36	3—15	0.42	1.5—3.0	6—19
蒙 脱 石	$(\frac{1}{2}Ca, Na)_{0.7}(Al, Mg, Fe)_4(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4$	蒙脱石在储集层孔隙空间中以包裹和/或孔桥形式存在, 对物理和化学的地层损害是决定性的, 对电阻率测量值有严重影响, 使其大为降低, 表面积大 低铁蒙脱石 3.6%铁含量 斑脱岩	2.20—2.70 2.53 2.74	0.13	80—150	0.16	2.0—5.0	14—24

* 此表中汇编的数据取自广泛的文献资料

上述的这三个参数 (ρ_{cl} 、 N_{cl} 、 V_{cl}) 然后用于计算每一深度处的两个重要的储集层参数, 即阳离子交换量 (CEC) 和氢指数 (HI)。所得出的 CEC 和 HI 值用于确定地层所含粘土矿物的类型 (见表 3)。在 CEC 和 HI 的交会图上, 蒙脱石、伊利石和高岭石/绿泥石会集于三个分隔开的明确的位置 (图 2) ^[7]。然而高岭石和绿泥石单独根据测井资料不能予以区分, 这是由于它们具有相似的响应特性。

测井得到的 CEC 值和岩心得出的 CEC 值受下列因素的影响: 储集层的不均匀性、井眼条件和采样过程的差别。所观测到的 CEC 测井和 CEC 岩心的相关系数范围从 0.92 起始 (理想的值为 1.0), 采样数目直到 100。

图 3 所示是一个第三系含煤层段的粘土类型的测井图, 该层段夹于厚层含油气储集层之间。其它粘土类型的例子在本文其余部分列举。

此外, 储集岩层中粘土矿物的分布方式显著影响储集层的有效孔隙度、有效含水饱和度、渗透率因而以及层段的产能。不同的粘土矿物分布方式如分散粘土、层状粘土或结构粘土对储集层有效孔隙度 (ϕ_e) 和渗透率的影响程度很不相同, 例如

$$\text{层状粘土: } \phi_e = \phi_{max} (1 - V_{cl})$$

$$\text{分散粘土: } \phi_e = \phi_{max} - V_{cl}$$

$$\text{结构粘土: } \phi_e = \phi_{max}$$

式中 ϕ_{max} 是最大孔隙度值。

与孔隙度有关的储集层渗透率的截止值在很大程度上取决于所含粘土矿物的类型和分布方式。图 4 所示是细粒、分选良好、纯净砂岩和泥质砂岩的上述影响的情况。

地 层 损 害

有几种机理可能会导致泥质碎屑储集岩层的地层损害。^{[10]、[11]} 为了防止或至少是减小在钻井、完井、生产、修井和增产作业等的期间造成的地层损害, 必须考虑许多有关的储集层参数和条件。这些包括副矿物的成分、数量和分布方式以及它们对下列因素的敏感性: 移位、移动和随后的桥接作用、与井内液体的化学反应和其它热力学条件。

在表 4 ^[12] 中给出钻井作业中遇到的有问题泥岩的分类, 而在表 5 ^[13] 中则概括列出有关适当设计完井技术的几条准则。

最近已提出一种测井评价技术 ^[14], 根据所存在可膨胀粘土的百分含量来估计泥质储集层的地层损害敏感性。这种技术根据粘土体积 (V_{cl}) 的确定值来进行评价, 该体积含量最好根据钾-钍指数来得到。因为上述指数减少了具有高铀含量放射性粉砂的影响, 并且实际上与粘土类型无关。与氧化钾的值 (POTV; 根据自然伽马能谱测量值来计算) 相结合的 V_{cl} 值与可膨胀粘土层的百分含量 (PCEC) 相关联一起, 如下式:

$$PCEC = aPOTV^2 - bPOTV + c$$

而且, 可膨胀粘土层的百分含量与阳离子交换量 (CEC) 成正比:

$$CEC = (dPCEC + e)V_{cl}$$

故可以估计 CEC 值 (对一个给定的地区, 式中的 a、b、c、d 和 e 是经验常数)。

所以只要能够直接应用以上的关系式, 自然伽马能谱测量值能便于单独用测井资料估计地层损害敏感性, 这种损害是由于在储集层中存在膨胀性的粘土。图 5 所示是取自美国墨西哥湾沿岸地区的一个现场实例。

表 4 钻井作业中有问题泥岩的分类

类	特 性	成 分	KCl抑制分散的 能 力	KCl抑制膨 胀的能力	是否推荐使用 KCl
1	软, 高度分散	蒙脱石含量高, 含一些伊利石	好	较 好	两可, 取决于泥 岩情况
2	软, 较高可分散性	蒙脱石含量较高 伊利石含量高	极 好	很 好	是
3	中等硬度, 中等分散, 有坍塌倾向	间层粘土含量高, 伊利石和绿泥石 含量高	极 好	很 好	是
4	硬, 低分散有坍塌倾 向	伊利石和绿泥石 含量中等	极 好	(1)大多数很好 (2)很硬	是 两 可
5	很硬, 脆, 分散不明 显, 有坍塌倾向	伊利石含量高 绿泥石含量中等	极 好	(1)大多数很好 (2)对裂缝高度 发育的层, 较好	是, 在大多数情 况下如此 两 可

表 5 完井技术中关于地层损害的分析

矿 物	地层损害/敏感的问题	附 注	补救办法与建议
自生高岭石或地开石 	粘土粒径的细粒的移动堵塞孔隙喉道, 这种青况当假六方晶体叠加于孔隙壁上时发生。特正是晶体都面向堆积, 又长条弯曲聚合体, 每一片都随机取向。	化学性能稳定, 酸的影响小到不存在。 弯曲的堆积造成大量的微小孔隙, 流体不能移动, 因而形成高孔隙度低渗透率特征。 粘土片性脆, 流体流速高时就断开因而堵塞孔隙喉道。	补救办法是采用油管传送射孔技术, 正压达250—500磅/英寸 ² , 采用小油嘴, 慢速、中等产量, 稳定生产不波动。 粘土稳定剂有助于中等产量。
蒙脱石和混合层蒙脱石/伊利石族粘土 	对水敏感, 在淡水中膨胀, 减少孔隙体积。细粒移动; 蒙脱石晶体的高比面积, 高束缚水饱和度。	孔线和孔桥结构发育, 富含钠的蒙脱石能膨胀到原有体积的600—1000倍。 某种膨胀使晶体移动并堵塞孔隙喉道。 可以与未处于平衡状态的孔隙水交换阳离子。聚合物、表面活性剂、苛性药剂由于交换作用或吸附或附着于粘土矿物表面而消耗, 因而使表面活性剂沉淀。这由于消耗掉的化学品不能恢复因而	采用油基泥浆、氯化钾或氯化铵井液会有助于防止损害。 水敏损害通过用稀的氢氟酸和盐酸的混合物酸化而能反转。 为防止表面活性剂的沉淀, 在实验室中加压测试岩心, 以确定当流体注入井中时是否会产生不可逆转的情况。 采用油管传送深穿透

续表

矿 物	地层损害/敏感的问题	附 注	补救办法与建议
		是不可逆的。	枪, 井中加氮, 负压达200—500磅/英寸 ² 油井以低流速投产以防止细颗粒移动。
自生伊利石 	结构形成大量的微孔隙, 高束缚水饱和度。孔隙桥和纤维状伊利石严重降低渗透率。轻微水敏, 在存在淡水情况下, 伊利石纤维聚集因而降低渗透率。细颗粒移动。	柴油不可改变地损害衬在孔隙里的伊利石, 由于柴油浸透了伊利石, 并通过界面张力在原处使它们粘结一起。不能反转。 2—5%的纤维状伊利石伴随着细粒移动能堵塞孔道使渗透率降到无工业价值的状态。	采用油管传送射孔技术, 在井眼中加氮, 负压达200—500磅/英寸 ² , 油井以低流速平稳投产不波动。 大部分井眼表面的问题可通过使用氢氟酸和盐酸的混合物来解决。表面活性剂、聚合物和苛性药剂与伊利石微孔隙的相互作用如同和混合层粘土及蒙脱石相互作用一样会产生相同的问题。 建议做岩心和注入流体的试验以防止活性剂趋于浸透和粘结伊利石。
自生绿泥石 	酸敏-微孔隙	富含铁的粘土。酸溶解绿泥石, 析出铁然后以大晶体氢氧化铁形式沉淀, 因而堵塞孔隙喉道。	使用铁螯合剂, 即醋酸和氧清除剂以防止损害。当酸化以消除粘土, 氧清除剂就得到时间使铁螯合剂有效地起作用。
碳酸铁(菱铁矿和铁白云石) 	酸化增产措施导致氢氧化铁沉淀, 因而堵塞孔隙喉道。		通过使用铁螯合剂和氧清除剂以及盐酸可以避免产生问题。 使用过的酸必须回收使之有效。

续表

矿 物	地层损害/敏感的问题	附 注	补救办法与建议
脆弱、疏松固结的细粒砂岩 	在生产的条件下,出砂在油管中桥梗。岩屑切割油嘴或阀门并造成其他机械上的生产问题		取脆的砂岩颗粒样品以了解颗粒尺寸和分选情况来确定玻璃珠,铝质珠或砾石的最佳尺寸,这些用于修理作业。所以,充填材料的孔隙喉道会防止砂粒随生产的流体而移动。 高孔密射孔和大孔径降低通过孔眼两端的流速以防止砂粒移动。 冲洗射孔孔眼,清除地层砂粒并对地层充填砾石以防止砂粒移动。 采用砂粒固结化学剂以减少砂粒移动。

油 田 实 例

美国俄亥俄州的粉砂岩/泥岩层序

图6所示是美国俄亥俄州Clinto地层的CLASS分析结果和自然伽马能谱测井响应。^[15]该层段主要由泥岩和薄层粉砂岩组成,该层粉砂岩可渗透和可含油气(主要含气)。CLASS分析结果显示有几个有希望的层段,其有效孔隙度达10—15%并且含水饱和度低。由测井得到的有效渗透率低,虽然油气渗透率高于水的渗透率,因而可以预计得到边缘的天然气产量。由测井资料得出的低CEC值但高氢指数表示存在这些粘土例如伊利石、绿泥石和高岭石。根据岩心分析结果在层段中所含粘土的主要类型为伊利石和绿泥石。同时,注意在所有含油气粉砂岩层段中铀含量急剧增长,这一点由自然伽马能谱测井响应清楚地表明。换言之,总放射性响应未表明与储集层泥质含量有直接的关系。

美国东得克萨斯的低渗透率含气Cotton Valley 砂岩

可靠地评价这些厚层的但通常是致密、低孔隙度的侏罗系 Cotton Valley 砂岩是一项困难的任务(表6),这些评价包括储集层岩性、孔隙度、流体饱和度分布、渗透率和预期的生产潜力。此外适当选择测井系列和有关的分析方法就提供了可靠评价的基础。图7所示是一口东得克萨斯气井的CLASS分析结果,并补充以完井、增产作业、测试和天然气生产的资料。

储集层孔隙度和渗透率之间的复杂关系作为粒径和方解石含量的函数表示于图8。注意

表 6 得克萨斯、路易斯安那和阿肯色州Cotton Valley砂岩的一般特性

Cotton Valley 砂岩	
地 点	阿肯色-路易斯安那-得克萨斯
"A"岩性	冲积覆盖砂岩 一般海退砂泥岩层序中的松散砂岩体 (≤ 100 英尺); 通常可对比
"A"储集层	产气(常常"自喷")
特 性	地层可能损害 孔隙发育好($\phi \leq 18\%$), 渗透率发育; 过渡带和气/水接触面短而明确; 含水饱和度常 $< 40\%$ 泥质含量是控制储集层孔隙度的主要因素。
"B"岩性	低渗透率砂岩(包括Bossier砂岩); 厚层细粒未分异的砂岩; 区域对比性差; 地层因素比构造因素更重要
"B"储集层	产气(需采取大规模的强化增产措施)
特 性	地层损害严重 低孔隙度($\phi \leq 10\%$)和差渗透性(0.003—0.03毫达西); 长而不明确的气/水接触面; 含水饱和度常 $< 60\%$, 钙质胶结和泥质含量控制储集层孔隙度; 可能有天然裂缝系统。 厚层中的选择性射孔是先决条件

对于一个孔隙度值例如 8%, 储集层的渗透率可以从 10^{-2} 毫达西变化到13毫达西。

美国得克萨斯州的花岗砂岩储集层

宾夕法尼亚系和二叠系的花岗砂岩储集层位于得克萨斯州Panhandle、新墨西哥州、俄克拉何马州南部和科罗拉多州生产大量的油气。花岗岩冲积物是砂岩, 含有超过25%的长石, 这些冲积物来自具有花岗状结构的酸性火成岩的风化过程。

典型的勘探目标是具有良好储集层特性的花岗砂岩地层, 包括由石英、长石、低粘土含量的云母矿物和风化碎屑等的混合物组成的渗透层。泥质越益增多的地层需要广泛而昂贵的增产措施, 否则这些地层显示的储集层品质这样差以致没有什么工业价值。

常规自然伽马测井除了敏感于地层的泥质含量之外, 还受所存在的碎屑放射性云母和富含钾的微斜长石等的显著影响。然而, 这些矿物显示出非常不同的钾、铀和钍的分布。所以, 对这种复杂储集岩层应用自然伽马能谱测井, 在存在其它放射性矿物的情况下, 已成功地区分和评价储集层的泥质含量。

根据Sethi和Fertl于1979年研究成的经验物质平衡公式, 交会钾和钍的测量值能够定量地估算所存在的放射性矿物。对一个花岗砂岩层段所作钾(Y轴)、钍(X轴)含量交会图的线性趋向与泥质体积增长相关。点子落在趋向线上方的西北方向表示存在数量变化的富含钾的长石和云母。

图9所示是花岗砂岩的计算机处理分析结果, 所用测井系列是密度、补偿中子、双感应和自然伽马能谱测井。这口井位于得克萨斯州Wheeler县, 储集岩层比较纯净, 显示孔隙度较高, 自喷日产油250桶⁽¹⁸⁾。还要注意那两层高孔隙度产层的特征为非常高的铀值。

美国俄克拉何马州宾夕法尼亚系Red Fork和Cherokee含气砂岩

宾夕法尼亚系的Red Fork和Cherokee砂岩位于俄克拉何马州, 含有大量油气资源。

这些储集层的颗粒从细到很细而且这些层纯净程度为中等到相当纯净。此外, 有害的粘土矿物例如高岭石、绿泥石、伊利石和蒙脱石在地层中所含数量不大但影响却显著。粒径分选较好到良好, 岩石胶结良好, 孔隙度从低到中等, 但渗透率却相当低(<0.1 毫达西)。因为所有这些储集岩层都需进行强化增产处理以工业性生产天然气, 所以为了有效的气层管理, 先决条件是根据测井资料做出可靠和准确的天然气资源评价(天然气产能、地层中天然气储量)以及了解储集层的岩性特征(以选择适当的强化增产技术)。

图10和11所示是边缘的Red Fork储集层和良好的Cherokee储集层气井完井的CLASS评价结果^[19]。在图12上比较了这两口井通过CLAYS分析根据测井资料得出的粘土矿物识别结果。

Red Fork地层中的气井(图10)以低流量自喷完井, 采用选择性射孔, 射孔总数为36孔, 储集岩层以6000加仑10%甲磺酸(MSA)和压裂技术作了处理。在净化之后, 地层的自喷产量稳定在日产0.45百万英尺³气、1.9桶油和14.8桶水。油管流动压力为1737磅/英寸², 使用8/16英寸油嘴。

在Cherokee地层的自喷气井完井中(图11), 对含泥质较多的层段选择射孔, 总数为25孔并以5,000加仑10%的甲磺酸处理以及进行压裂。在净化之后, 层段的自喷产量稳定在日产1.95百万英尺³气和21.3桶水(原文误为Bcf/D——译者注), 油管流动压力为2,200磅/英寸², 用10/64英寸的油嘴。

注意Red Fork层段比产量更高的Cherokee层段显示更高的电阻率、较低的含水饱和度并更为纯净。两个层段的孔隙度值可作比较。然而, 更仔细的观察图12的CLAYS分析结果不仅显示出两个层段的粉砂含量有明显的不同, 而且根据测井资料得出的粘土类型和分布方式也不相似。这种补充资料因而加深了对与完井设计方案有关的储集层基本特性的变化和油井生产预测的了解。

美国南得克萨斯下Wilcox地层

下Wilcox Lobo构造带最初于新墨西哥州发现, 然后在1972年确定该构造带延伸进入南得克萨斯州。在下Wilcox砂岩的Lobo 6号层中的层状、结构和颗粒包覆的原生粘土趋于是含钾的伊利石和某种蒙脱石, 而造成孔隙喉道堵塞的成岩粘土大部分是缺钾的高岭石和绿泥石。这些地层中所含的成岩粘土基本上控制了储集层的渗透性, 这取决于孔隙喉道的堵塞程度。

直到最近Berilgen等人作了大量研究(1985)^[7]之前, 根据测井资料不能预告或预测储集层的品质, 这使确实含有大量油气资源的Lobo地层成为一个谜。

在上述研究中^[7], 应用钾含量曲线和密度、中子曲线来得到两种独立的粘土体积值。如以前所述, 在Lobo 6号层中所含的成岩粘土是不含钾的。因此, 由钾含量曲线得出的粘土体积将不考虑这些粘土。而根据密度/中子曲线计算的粘土体积将确定总的粘土体积。密度和中子测井读数在用作粘土指示参数之前先校正油气的影响。对于100%的粘土体积含量, 由于不含钾的粘土所占比例不大, 上述两种粘土体积值将接近一致。然而在比较纯净的层, 根据

密度/中子曲线计算的粘土体积将超过根据钾含量或自然伽马曲线得到的粘土体积值。较纯净的砂岩含有更多数量的成岩粘土，储集层的特性处于边缘状态（即差的产层）。好的产层的点子将落在一条对角线上。

另一种方法是绘制阳离子交换量（CEC）和氢指数（HI）的交会图。绿泥石/高岭石族的HI值大约为伊利石族或蒙脱石族的三倍。在交会图上所有差产层的数据点都朝向交会图的右角，这些层都显示绿泥石和高岭石的含量高，在图上标以差产层区。好产层的点子将落到朝向交会图左角的位置，图上标以好产层区。

图13和14所示是某些记录的测井数据、CLASS/CLAYS Epilog图、储集层参数总括分析表、测井阳离子交换量（CEC）和氢指数（HI）交会图以及密度/补偿中子测井粘土含量和泥质含量（根据自然伽马能谱测井钾含量曲线）^[1]的交会图。一张图说明了一口好生产井的测井分析特性，这口井测试结果为日产天然气2.266百万英尺³，用10/64英寸油嘴，油管流动压力为4900磅/英寸²。另一张图所示是一口差生产井的测井分析特性。这口井测试结果为日产气0.518百万英尺³，用10/64英寸油嘴，油管流动压力为3,100磅/英寸²。

因此，在测井估计的储集层产能和实际生产数据之间可以观察到极好的相关性。

美国墨西哥湾沿岸路易斯安那州近海第三系高孔隙度、高渗透率、低电阻率产油层

这低电阻率泥质/粉砂质第三系砂岩储集层层序曾用数字CLASS Epilog分析技术成功地进行了评价（图15）。根据常规裸眼井分析结果，上部层段在过去总是被忽视，尽管在某些井壁取心中有油气显示，这是因为典型的墨西哥湾沿岸的产层位于仅几百英尺的深处。然而，CLASS分析结果清楚地指出上部层段含有油气。测试结果，此上部层段自喷日产油400桶以上，不带水。

薄层砂泥岩层序

在世界各地常见到低电阻率有潜力的生产层段。这些储集层可以是：（1）基本上纯净，但粒径很小，因而有很高的视含水饱和度（65—75%），（2）泥质含量高，粘土矿物“包覆”在石英颗粒上，（3）薄层砂泥岩层段。

一组砂泥岩层（通常每个层仅有几厘米厚）的互层的性质对一般测井储集层评价显示出很不利的影响。因为记录的测井曲线所表示的是平均值，该值是各种测井仪器垂直分辨率的函数。所以，常规测井解释技术将导致过于悲观的评价：包括砂岩层计数、储集层孔隙度、和含水饱和度变化，因而以及地层中的油气储量。此外，水平方向渗透率和垂直方向渗透率的比值会非常高。认识这种层状储集层特性是很重要的，关于这种特性对完井、油藏工程和生产动态的蕴涵的意义需作研究。然而，如果进行了适当的分析，这种层状、低电阻率和“非常泥质”的储集层不应被忽视。

典型的现场实例包括在世界各地发现的许多高产的浊积岩储集层；上新统-更新统砂泥岩层序，特别是美国路易斯安那州近海的Green Canyon区域^{[21]、[22]}；意大利近海，亚得里亚海北部的上新统含气砂岩^[23]；印度尼西亚加里曼丹塔拉坎盆地的中新统含油砂岩；等等。

近来，为这种薄层泥质砂岩层序发展了各种解释技术^{[22]、[23]、[24]}，这种技术将常规的测井分析方法与下列资料和技术相结合并增强了分析的能力：地层倾角和其它微电阻率资料、短间距的介电测量结果以及用于所记录测井数据的数学分层程序^[25]。除了计算解释的标准

格式之外, 采用更加详细的深度比例尺 (例如, 30英寸/100英尺, 1/40比例尺) 使得能够更详细地研究分析结果。

最近由Quinn和Sinha(1985) 提出的方法⁽²¹⁾是根据通过其它的微电阻率测井 (例如, 微侧向测井) 的测量值将地层倾角数据 (记录的采样率为每英尺64次) 规格化的技术, 与自然伽马能谱数据相结合并且应用所谓的“活动度”函数 (未分层和分层)⁽⁵⁾, 用来确定薄层的厚度。先决条件是通过钾/钍指数结合张力曲线和/或加速度计数据将各种测井曲线的深度适当取齐。

图16所示是美国墨西哥湾沿岸一口近海的井的自然伽马曲线; 根据自然伽马能谱测量值计算的钾/钍生产指数(TPI); 根据TPI指数得出的粘土体积(V_{cl}); 未分层和分层的倾角活动度曲线以及得出的砂泥岩计数。该井定量薄层砂泥岩分析结果和同一层段(XX480—XX600英尺)的CLASS分析结果的比较情况示于图 17, 而作为比较的储集层参数报告列出于表7。如所预料, 标准的CLASS分析对这种薄层储集层层序会得出过于悲观的储集层评价结果。

表 7 美国墨西哥湾沿岸一口井 (示于图17)
储集层参数比较表 (井段XX480—XX600英尺)
根据薄层砂泥岩分析和CLASS分析结果⁽²⁴⁾

井: R 层: 顶层	薄层砂泥岩分析 顶部=XX480.00英尺 底部=XX600.00英尺					
截 止 值 孔 隙 度 参 数	0.00	1.00	5.00	10.00	15.00	18.00
厚 度	120.00	53.90	53.90	48.50	27.93	19.62
孔隙度-英尺	8.40	8.40	8.40	7.95	5.32	4.90
累计油气体积-英尺	2.63	2.63	2.63	2.52	1.84	1.40
平均孔隙度	7.00	15.59	15.59	16.40	19.05	20.32
平均含水饱和度	68.67	68.67	68.67	68.26	65.27	64.85
平均含油饱和度	31.32	31.32	31.32	31.73	34.72	35.14

井: R 层: 顶层	CLASS 分析 顶部=XX480.00英尺 底部=XX600.00英尺					
截 止 值						
孔 隙 度	0.00	1.00	5.00	10.00	15.00	18.00
参 数						
厚 度	120.00	74.56	34.50	21.87	12.00	8.00
孔隙度-英尺	5.03	5.55	4.46	3.71	2.19	1.21
累计油气体积-英尺	0.93	0.93	0.93	0.92	0.45	0.19
平均孔隙度	4.89	7.44	12.94	15.56	18.28	20.32
平均含水饱和度	83.38	83.13	79.03	75.11	79.41	83.66
平均含油饱和度	16.61	16.86	20.96	24.88	20.58	16.33

人工智能模型

一般来讲,知识工程是一种实用的人工智能的应用,该工程基于建立称为专家系统的分程序。人工智能的特征是通过模拟人的智力功能来进行计算机化、非数字的符号解题。

应用这种原理于地层倾角分析便能够进行详细的曲线间的对比和高质量的地层倾角计算。例如,地层倾角分析采用计算机显象和语言理解技术等的先进技术以提供有价值的解释资料。这种人工智能模型每10英尺井段可确定多达200次的倾角相关对比,然后选择计算的倾角值,这些倾角值落入地质上可解释的数据范围内,例如,细微的地质事件就象详细的地层变化,而不是得出平均结果。

地层倾角程序还包括一种分级系统,这种系统使地层倾角分析在4个不同的技巧等级上来进行,例如:

I—降低噪声,对析取的可对比的数据滤波,甚至在条件差到边缘条件下的某些地区也如此。

II—根据动态规划原理匹配倾角曲线的响应。

III—对以前数值组合和作一致性检查,可直到200次。

IV—应用数学最优化方法以求解和净化解释图形。

一个典型的现场实例示于图18。

多井油田研究方法

在泥质砂岩储集层多井油田研究中,目的是根据测井、岩心和其它与储集层有关资料的综合数据库进行详细的和可用图表示的储集层描述。基本目的之一是估计各种关键参数的空间分布,例如本文所讨论的,以适当描述地下的地层。为成功地完成这一任务,可考虑以下几点⁽²⁷⁾:

1. 应用先进的分析技术,如前所述用于单井评价的那种技术。
2. 通过适当选择关键井将数据规格化。这些关键井广泛地取心,有完整的测井系列并且在储集层内处于关键性的位置;识别和校正环境影响、错误刻度的测井资料、缺失数据的合成的测井资料等。
3. 将层段分层或分段以提供累计的和/或平均的储集层参数,有或无截止值的准则。
4. 根据这个数据库,基于概率的概念,估计关键的储集层参数的空间分布。
5. 以等值图和/或其它二维和三维图的显示格式提供结果。
6. 研究结果还为当地或区域地质研究和储集层模拟工程提供所需输入的资料。

结 论

1. 现已有许多泥质砂岩评价技术可供使用。
2. 基于韦克斯曼-斯米茨模型的数字解释技术对泥质砂岩储集层提供了成功的储集层评价方法。
3. 除了测井得到的粘土含量值、储集层孔隙度和流体饱和度分布之外,现在还能确定地层中所含粘土矿物的类型和分布方式。

4. 在成岩粘土的测井评价结果和泥质砂岩储集层的产能之间明显相关。
5. 薄层砂泥岩层段的可靠评价是可能的。

参 考 文 献

1. SPWLA Reprint Volume-Shaly Sand, July 1982.
2. Archie, G.E.: "The Electrical Resistivity Log As An Aid in Determining Some Reservoir Characteristics," Trans., AIME, 146 (1942) 54-67.
3. Worthington, P.F.: "The Evolution of Shaly-Sand Concepts in Reservoir Evaluation," The Log Analyst (January - February 1985) 23-40.
4. Fertl, W.H. and Frost, E.: "Evaluation of Shaly Clastic Reservoir Rocks," J. Pet. Tech. (September 1980) 1641-1645.
5. Waxman, M.H., and Smits, L.J.H.: "Electrical Conductivities in Oil-bearing Shaly Sands," Soc. Pet. Eng. J. (June 1968) 107-122.
6. Rukhovets, N. and Fertl, W.H.: "Digital Shaly Sand Analysis Based on Waxman-Smits Model and Log-derived Clay Typing," Trans., SAID/SPWLA, 7th European SPWLA Symposium, Paris, France, 1981.
7. Berilgen, B.A., Sinha, A.K., and Fertl, W.H.: "Estimation of Productivity of Lobo 6 Sand (Lower Wilcox, TX) By Identifying Diagenetic Clays Using Well Log Data," paper SPE 14278 presented at the SPE of AIME 60th Annual Technical Conference, Las Vegas, Nevada, Sept. 22-25, 1985.
8. Howard, J.J.: "Mixed-layer Clays in Eocene Interlaminated Shales and Sandstones," Annual AAPG-SEPM Meeting, Houston, Texas, April 1-4, 1979.
9. Wilson, M.D.: "Origins of Clays Controlling Permeability in Tight Gas Sands," SPE/DOE 9843, SPE/DOE Low Permeability Symposium, Denver, Colorado, May 27-29, 1981.
10. Krueger, R.F.: "An Overview of Formation Damage and Well Productivity in Oil Field Operations," paper SPE 10029 presented at the SPE of AIME International Petroleum Exhibition and Technical Symposium, Beijing, China, March 18-26, 1982.
11. Corley, W.T. and Patton, J.T.: "Clear Fluids: They Are Not Always Non-damaging," World Oil (November 1984) 66-69.
12. O'Brien, D.R. and Chenevert, M.E.: "Stabilizing Sensitive Shales With Inhibited, Potassium-based Drilling Fluids," J. Pet. Tech. (September 1973) 1009-1100.
13. "A Guide to Formation Damage Prevention in Fine-Grained Sandstones," Dresser Atlas Technical Publication #9531 (1985).
14. Fertl, W.H. and Rukhovets, N.: "Methods and Apparatus for Determining Characteristics of Clay-bearing Formations," U.S. Patent #4,484,470 (1984).
15. Rukhovets N. and Fertl W.H.: "Volumes, Types and Distribution of Clay Minerals in Reservoir Rocks Based on Well Logs," paper SPE/DOE 10796 presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Recovery Symposium, Pittsburgh, Pennsylvania, May 16-18, 1982.
16. Ganer, B.L.: "Case History of Cotton Valley Sand Log Interpretation for a North Louisiana Field," paper SPE 12182 presented at the SPE of AIME Meeting, San Francisco, California, October 1983.
17. Sethi, D.K. and Fertl, W.H.: "Granite Wash Reservoir Evaluation Is Aided By Spectral Gamma Ray Logging Data," Dresser Atlas Technical Memorandum, (August 1979).
18. Schenewerk, P.A., Sethi, D.K., Fertl, W.H., and Lochmann, M.: "Natural Gamma Ray Spectral Logging Aids Granite Wash Reservoir Evaluation," Trans., SPWLA, 21st Annual Logging Symposium, Lafayette, Louisiana, July 1980.
19. Busch, E.A., Sobkowich, K.N., Neill, B.E., Sinha, A.K., and Fertl, W.H.: "Log-derived Evaluation of Gas-bearing Cherokee, Red Fork, and Morrow Formations, Custer County, Oklahoma," paper SPE 13808 presented at the SPE 1985 Production Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, Mar. 10-12, 1985.
20. Berilgen, B.A., Sinha, A.K., and Fertl, W.H.: "Estimation of Productivity of Lobo 6 Sand (Lower Wilcox, TX) By Identifying Diagenetic Clays Using Well Log Data," paper SPE 14278 presented at the SPE of AIME 60th Annual Technical Conference, Las Vegas, Nevada, Sept. 22-25, 1985.
21. Vajnar, E.A., Kidwell, C.M., and Haley, R.A.: "Low Resistivity Masks High Potential of Gulf Coast Sands," World Oil (Feb. 1978) 49-54.
22. Susu, T., Albertelli, L., Cigni, M., and Gragnani, U.: "Interpretation of Very Thin Gas Sands in Italy," Paper A, Trans., SPWLA, 1984.
23. Salle, J.E. and Wood, B.R.: "Use of Micro-resistivity From the Dipmeter to Improve Formation Evaluation in Thin Sands, Northeast Kalimantan, Indonesia," J. Pet. Tech. (1984) 36(10): 1535-1544.