

可靠性研究在油气田勘探中的应用

——地震层速度资料用于含油气层厚度定量解释的可信度分析

庞雄奇 苑学军 陈章明 方祖康

(大庆石油学院)

提 要

本文引入可信度这一基本概念及其有关知识,对用于含油气层厚度定量解释的地震层速度资料的可信度进行了分析研究,对汤原凹陷地震层速度资料用于解释1000米埋深下100米厚的地震层内25米厚的欠压实泥岩层、正常压实的泥岩层、含气砂层和含油砂层的最大可信度,分别为76.1、61.0、43.4和25.4;解释500米埋深下对应厚度的上述各地层可信度分别为75.4、67.9、56.8和29.3。

主题词 可行性研究 定量解释 地震层速度 汤原凹陷 含油、气砂层

1 前 言

可靠性研究是四十年代逐步发展起来的一门新学科。它主要用于飞机、导弹和坦克等军用武器的研制,继而扩展到电器、机械等民用产品的设计。作为一门新技术,它在油气田勘探中同样有着广阔的应用前景。

可靠性研究的对象是“系统”或“产品”,基本内容是系统或产品的“质量”和影响质量的各种因素,目标是提高系统或产品使用时的寿命和可靠度。

油气田勘探的最终目标是寻找油气田,能否成功取决于这一过程中用到的各种资料(地质、地化、地震、测井、钻井……)的精度及基于这些资料分析得出的各种地质结论的可信度。

研究结论体现在对各种资料综合分析研究后提交的成果,这成果可以看成是一种“软”产品。它的质量好坏或其应用运行时的可靠性完全取决于工作环境(即谁用、在何种条件下用)、组成产品的各部件(各种软资料)质量以及组合形式(各种资料综合应用时的解释方法或数学地质模型)的合理性。在其它因素相同的情况下,资料精度高、综合解释方法合理时,通过最后分析得出的地质认识的把握性大或可信度大。

庞雄奇,1961年8月生。1991年10月博士研究生毕业于中国地质大学(北京),现任大庆石油学院副教授、副所长。通讯处:黑龙江省安达市大庆石油学院勘探系,邮政编码:151400。

在可靠性研究中,将系统或产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率称之为可靠度⁽¹⁾。针对油气地质研究的特点,本文将符合解决某一确定地质条件下某一确定地质问题精度要求的资料概率百分数称之为该资料用于该地质问题解释的可信度。

根据上述原理和约定,本文以汤原凹陷实际的地震层速度资料为例,对其用于含油、气地层厚度定量解释时的可信度进行分析研究。

2 分析理论模型

设某一异常地震层(与正常压实条件下纯砂岩背景不同的任何其它地层,本文主要指欠压实泥岩层、正常压实泥岩层、含油砂层和含气砂层)能够造成的层速度变化最大不超过 ΔV (图1中影线部分,面积记为 S_i),则当随机因素造成的层速度偏差 E 大于 ΔV 时,地震资料就不能用于异常地震层定量解释。如果实际的地震层速度资料的随机偏差概率密度函数为 $f(E)$,则该资料用于异常地震层定量解释的可信度 R_c 为⁽²⁾

$$R_c = \frac{S_i}{S} \times 100\% = \frac{\int_{-\Delta V}^{+\Delta V} f(E) \cdot dE}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(E) \cdot dE} = \int_{-\Delta V}^{+\Delta V} f(E) \cdot dE \quad (1)$$

从理论模型(图1和式1)讨论:

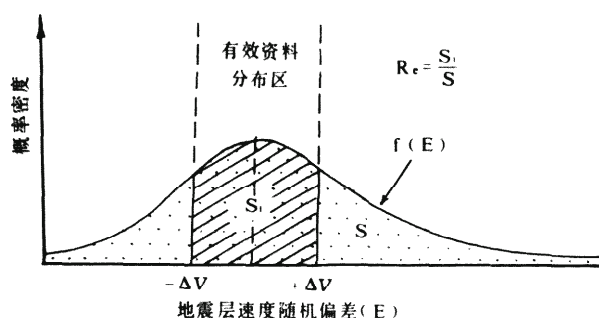


图1 地震层速度用于异常层定量解释可信度分析概念模型

Fig. 1 The conceptual model of reliability analysis in interpreting abnormal seismic strata

(1)当地震层速度资料的精度一定(即 $f(E)$ 不变)时,它用于定量解释那些能够造成地震层速度发生较大幅度变化的异常地震层时所得结论的可信度大。例如,气层造成的层速度变化较同样厚度的油层大,因此同一种地震资料用于解释同样地质条件下的气层的可信度较油层的大。

(2)当异常地震层能够造成的层速度变化幅度(图1中的 $-\Delta V \sim +\Delta V$)一定时,地震资料的精度越差(表现为图1中的 $f(E)$ 曲线宽缓),则定量解释异常地震层时的可信度越低。

由上述讨论可以看出,确定地震资料用于异常地震层定量解释的可信度的前提条件是①确定异常地震层速度的最大变化幅度($-\Delta V \sim +\Delta V$)和②确定地震层速度随机偏差概率密度函数 $f(E)$ 的分布形式。

3 异常地震层层速度最大偏差值理论计算

某一埋深为 Z ,厚度为 H 的地震层 $T_a \sim T_b$ 在纯砂岩背景下的层速度为 V_{Ha} (图2),由于层内出现了厚度为 h 的异常层,层速度变为 V_{Hh} 。由于异常层的出现造成的层速度偏差 ΔV 为:

$$\Delta V = V_{Hh} - V_{Ha} \quad (2)$$

根据层速度叠加合成原理⁽³⁾,地震层层速度可依下列各式计算:

$$V_{Hh}^2 = \frac{V_h^2 \cdot t_h + V_l^2 \cdot t_l}{t_h + t_l} \quad (3)$$

$$V_{Ha}^2 = \int_z^{z+H} V_s(Z) \cdot dZ / \int_z^{z+H} [1/V_s(Z)] \cdot dZ \quad (4)$$

$$V_h^2 = \int_z^{z+h} V_N(Z) \cdot dZ / \int_z^{z+h} [1/V_N(Z)] \cdot dZ \quad (5)$$

$$V_l^2 = \int_{z+h}^{z+H} V_s(Z) \cdot dZ / \int_{z+h}^{z+H} [1/V_s(Z)] \cdot dZ \quad (6)$$

$$t_h = \int_z^{z+h} [1/V_N(Z)] \cdot dZ \quad (7)$$

$$t_l = \int_{z+h}^{z+H} [1/V_s(Z)] \cdot dZ \quad (8)$$

式中 V_{Ha} ——纯砂岩背景下地震层 $T_a \sim T_b$ 的层速度;

V_{Hh} ——加入异常层后的地震层 $T_a \sim T_b$ 的层速度;

V_h ——地震层 $T_a \sim T_b$ 内异常层层速度;

V_l ——地震层 $T_a \sim T_b$ 内纯砂部分的层速度, $l = H - h$;

$V_s(Z), V_N(Z)$ ——地震剖面中纯砂岩和纯泥岩速度;

t_h, t_l ——地震波在 $T_a \sim T_b$ 中异常层(h)和纯砂层(l)传播时间;

H, h, l ——地震层 $T_a \sim T_b$ 总厚度、异常层厚度和剩余砂层厚度。

根据上述原理,本文计算了不同厚度 h 的泥岩层、油层、气层、欠压实泥岩层在不同埋深 Z 、不同厚度的地震层 H 内能造成的最大的层速度变化百分数。计算时采用下列数学模型和地质参数。计算结果如图3所示。

①含油、水地层速度变化

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_m} (1 - \Phi_f) + \frac{1}{V_f} \Phi_f \quad (9)$$

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-C \cdot \delta \cdot Z} \quad (10)$$

式中 V ——地层速度;

V_m ——地层骨架速度,取常数 5442m/s;

V_f ——地层孔隙流体速度,水取 1575m/s,油取 1200m/s;

Φ ——地层孔隙度;

Φ_0 ——地层在地表时的孔隙度。砂岩取 0.45,泥岩取 0.65;

C ——地层压实系数。砂岩和泥岩均取 0.0003466;

δ ——地层欠压实因子。正常压实时 $\delta = 1$,欠压实时 $\delta < 1$;

Z ——地层埋深

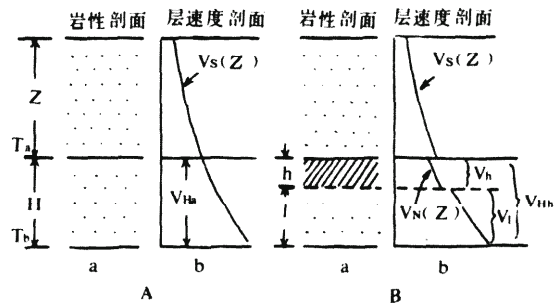


图2 异常层地震层速度偏差及其计算

$$(\Delta V = V_{Hh} - V_{Ha})$$

Fig. 2 Seismic interval velocity deviation of abnormal strata and its calculation

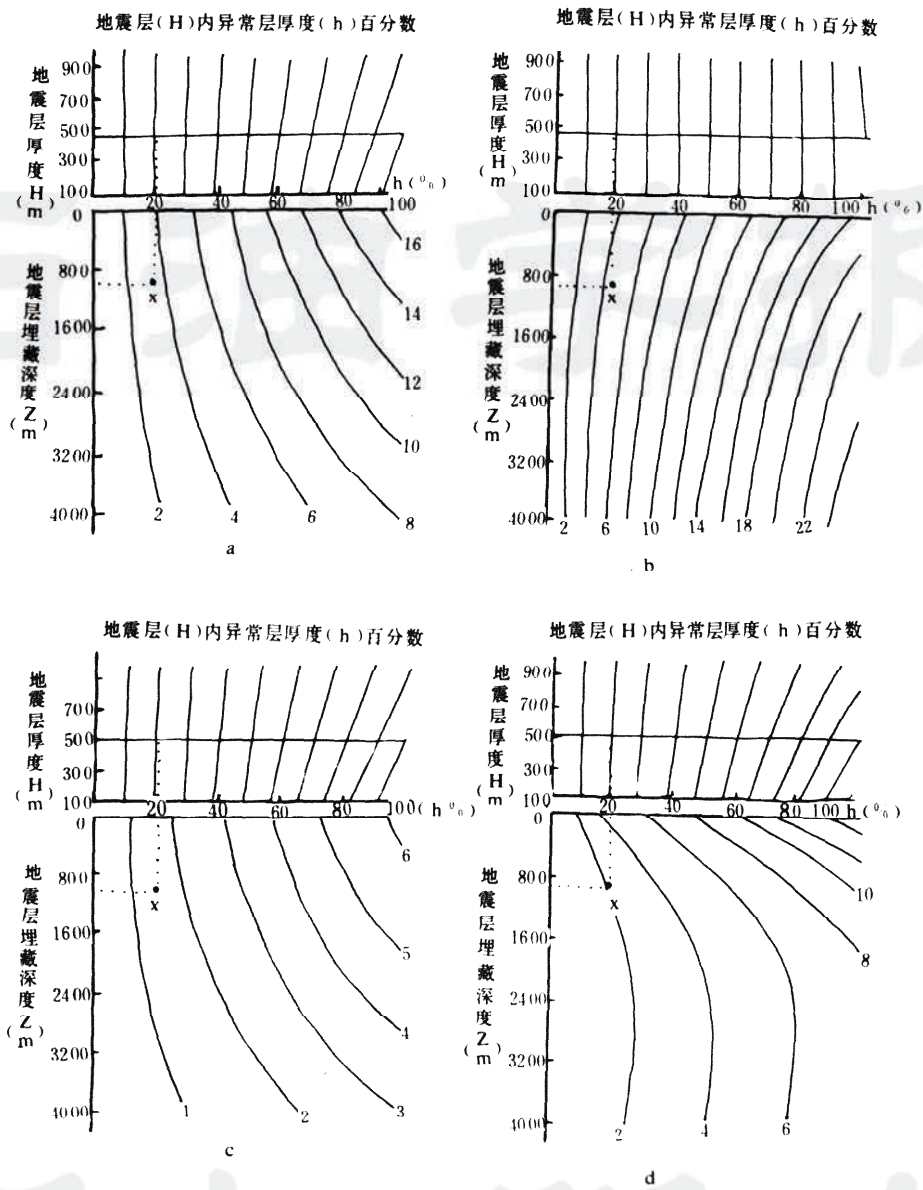


图3 地震层速度资料用于定量解释不同地质条件下异常层厚度的精度要求
(允许的地震层速度相对偏差最大百分数)

a—解释泥岩层； b—解释异常压力层； c—解释油层； d—解释气层

Fig. 3 The requirement of seismic interval velocity precision in interpreting the thickness of abnormal seismic strata at different geological conditions (allowable maximum relative deviation of seismic interval velocity)

a—compacted shale； b—strata with abnormal pressure；
c—oil-bearing strata； d—gas-bearing shale

②含气层速度变化

含气层速度变化因采用威利方程(式9),计算偏差较大,本文采用经验公式(曾文冲等,

1982)。计算时,含油气饱和度均采用70%(扣除束缚水)。

$$V_g = 5442e^{-0.02 \cdot \Phi_s \cdot S_g} \quad (11)$$

式中 V_g ——含气地层速度;
 Φ_s ——含气层孔隙度,采用砂岩孔隙度随埋深变化值;
 S_g ——含气饱和度

③欠压实地层的压力变化⁽⁴⁾⁽⁵⁾

$$\delta = \left(1 - \frac{P}{P_r}\right) / \left(1 - \frac{P_w}{P_r}\right) \quad (12)$$

$$P \leq 0.65P \quad (13)$$

式中 δ ——地层欠压实因子;
 P ——地层压力;
 P_w ——地层上覆水静压力;
 P_r ——地层上覆地静压力

图3的计算结果表明,定量解释同样地质条件下同样厚度的欠压实泥岩层、正常压实的泥岩层、含气砂层和含油砂层要求地震资料的精度依次增大(允许的地震层速度最大随机偏差依次减小)。例如定量解释1000米埋深下,500米厚的地震层内100米厚的上述异常层时要求地震层速度最大随机偏差分别小于4.5%、3.5%、2.0%和1.4%(图3中x)。

4 汤原凹陷地震层速度随机偏差概率密度函数分布形式及其参数估计

4.1 地震层速度随机偏差资料(E_i)的获得

在研究区等 t_0 图或构造图上选取尽可能多的CDP点,每组CDP点要求彼此相邻、地下地质情况基本一致。根据速度谱上均方根速度计算各谱点下同一地震层的层速度 V_i^* ,将每组CDP点该层的平均值看作理论值 V_i ,然后依差减法计算随机偏差 E_i 。为讨论问题方便,本文用随机偏差值的百分数,即:

$$E_i = \frac{V_i^* - V_i}{V_i} \times 100\% \quad (14)$$

对于各组CDP点都采用同样的方法可获得每一地震谱点下各地震层的层速度随机偏差百分数资料。本文用此法共获得汤原凹陷80多个谱点下共计402个地震层速度随机偏差百分数资料的样本值。

4.2 地震层速度偏差概率密度分布函数形式

汤原凹陷地震层速度随机偏差频率分布图(图4)。为了确定出它的概率密度分布函数的形式,本文作了三方面的工作。

(1)对地震层速度随机偏差资料进行 Z 、 H 双因素检验⁽²⁾理论上地震层的埋深 Z 和厚度 H 都是影响地震层速度随机偏差 E_i 的重要因素,例如,精度为0.005秒的检波器,对于接收来自500米浅层反射波可以造成 $-10 \sim +10\text{m/s}$ 的层速度偏差,而接收来自4000m以深的地震反射波时可能造成 $-25 \sim +25\text{m/s}$ 的层速度偏差。对汤原凹陷地震层速度随机偏差资料的 Z 、 H 双因素检验结果表明,在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时, E_i 与 Z 相关,与 H 无关。

(2)对地震层速度随机偏差资料与 Z 的关系进行逐步回归分析,本文将 E_i 与 Z_i 和 H_i 组合而成的20多个变量进行逐步回归分析,结果发现与 H 有关的所有变量都不能入选,进一步

证明了双因素检验结果的正确性。这与理论分析有突出,原因可能是实测资料因随机干扰过大而完全掩盖了 H 因素的影响。逐步回归分析最终确定出地震层速度随机偏差幅度 ($|E_i|$) 与 Z 的关系式为:

$$|E| = 1.61 + 2.0787 \cdot \left(\frac{Z}{1000} \right)^{0.273} \quad (15)$$

上式右端第一项代表了与 Z 等因素无关的地震层速度随机偏差幅度;第二项代表了因地震层埋深 Z 作用造成的地震层速度随机偏差幅度增量。

(3)对地震层速度随机偏差正态分布形式进行 χ^2 检验^[2]对汤原凹陷不同埋深下的地震层速度随机偏差全体资料(图4)和依式15扣除 Z 因素影响(相当于令 $Z=0$)后的随机偏差资料进行了正态分布的 χ^2 检验。结果表明,它们均服从均值为零的正态分布。从而推论,同一埋深(Z 为常数)下的地震层速度随机偏差同样服从均值为零的正态分布。其概率密度函数可写成式(16)的统一形式:

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{E^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < E < +\infty \quad (16)$$

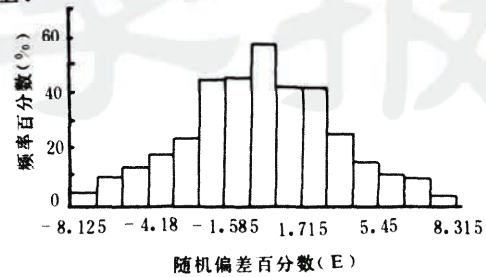


图4 汤原凹陷地震层速度资料
随机偏差(E)频率分布图

Fig. 4 Frequency distribution of seismic interval velocity random deviation in the Tanggvan depression

4.3 汤原凹陷地震层速度随机偏差正态分布函数参数估算

地震层速度随机偏差 E_i 可分解成与埋深 Z 无关和有关的两部分,即 B 和 $E(Z)$ 。它服从均值为零的正态分布,不同埋深下随机偏差资料概率密度函数 $f(E)$ 中的标准差 σ 可依下式估算:

$$\sigma^2(Z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[B_i + \frac{E_i}{|E_i|} \cdot E(Z) \right]^2 \quad (17)$$

式中 $\sigma(Z)$ ——埋深 Z 下的地震层速度随机偏差资料均方差;

B_i ——排除 Z 因素影响后的地震层速度随机偏差;

$E(Z)$ ——受埋深因素 Z 影响下的随机偏差幅度平均增量;

E_i ——实测埋深 Z 下的地震层速度随机偏差;

i, N ——实测资料样点号及样本总数

应用式(17)对汤原凹陷地震层速度随机偏差资料概率密度函数在不同埋深下的均方差参数 $\sigma(Z)$ 进行了估算。例如求出埋深 Z 为 0、1000、2000 和 3000 米埋深下的标准差分别为 3.12、4.8、5.19 和 5.45。均方差随地震层埋藏深度的增大而增大反映了地震反射波信息的精度是随着反射界面埋深的增大而降低。

5 汤原凹陷地震层速度资料用于异常层定量解释的可信度计算及其结果讨论

确定出一定地质条件下异常层能够造成的最大的地震层速度偏差 $-\Delta V \sim +\Delta V$ 和该地质条件下地震层速度随机偏差概率密度函数 $f(E)$ 后,该地震层速度资料用于解释异常层的可信

度依前述理论模型(式1)定量计算。表1为汤原凹陷的地震层速度资料用于定量解释不同埋深Z下、不同厚度的地震层H内不同厚度(h)的欠压实泥岩层、泥岩层、含油砂层、含气砂层的可信度计算结果。

表1 不同Z、H条件下f(E)函数参数估算与地层定量解释可信度计算结果
Table 1 Parameter estimation for function f(E) and reliability calculation in interpreting strata

埋深 Z	厚度 H	可信度 标准差 σ	异常地层百分含量							
			泥岩层(%)				异常高压层(%)			
			25	50	75	100	25	50	75	100
500	10	4.49	68.0	94.8	99.6	100	75.3	97.6	99.9	100
	100	4.49	67.9	94.7	99.5	100	75.4	97.6	99.9	100
	1000	4.49	67.3	93.9	99.3	99.9	76.5	98.1	99.9	100
1000	10	4.80	61.1	90.8	98.7	99.9	76.0	97.7	99.9	100
	100	4.80	61.0	90.7	98.6	99.9	76.1	97.8	99.9	100
	1000	4.8	60.3	89.5	98.0	99.7	77.0	98.2	99.9	100
2000	10	5.19	49.8	81.2	94.7	98.9	78.4	98.3	99.9	100
	100	5.19	49.7	81.0	94.6	98.3	78.5	98.3	99.9	100
	1000	5.19	48.8	79.1	92.9	98.0	79.2	98.5	100	100

埋深 Z	厚度 H	可信度 标准差 σ	异常地层百分含量							
			油层(%)				气层(%)			
			25	50	75	100	25	50	75	100
500	10	4.49	29.4	54.5	73.3	85.8	57.1	87.9	97.8	99.7
	100	4.49	29.3	54.3	73.1	85.5	56.8	87.5	97.5	99.7
	1000	4.49	28.9	52.7	70.4	82.5	54.3	83.1	94.5	98.4
1000	10	4.30	25.4	48.0	66.1	79.4	43.6	74.4	90.7	97.3
	100	4.30	25.4	47.8	65.9	79.1	43.4	74.0	90.2	98.0
	1000	4.80	24.9	46.2	63.0	75.4	41.7	69.6	85.6	93.7
2000	10	5.19	19.6	37.8	53.0	67.0	29.8	55.1	73.9	86.2
	100	5.19	19.6	37.7	53.5	66.6	29.7	54.9	73.6	85.9
	1000	5.19	19.2	36.1	50.4	62.1	29.2	53.4	71.5	83.9

从表1的计算结果中可看出如下几点:

- (1)地震层速度随机偏差的标准差随埋深增大而增加,资料精度随埋深增大而降低。
- (2)地震层速度资料用于定量解释同样地质条件下同样厚度的欠压实泥岩层、泥岩层、含气砂层、含油砂层的可信度依次降低。例如解释埋深为1000m、地震层厚度为100m内含25m厚的上述异常层的可信度分别为76.1、61.0、43.4和25.4。
- (3)地震层速度资料用于定量解释埋深大、厚度薄的异常层的可信度低。例如解释埋深为1000m和2000m的50m厚的油层的可信度分别为47.8和37.7;解释1000m埋深下25m和100m厚的油层的可信度分别为25.4和79.1。

(4)在异常层厚度占地震层厚度百分数一定的情况下,地震层厚度 H 划分的大小对定量解释异常层的可信度无明显影响。

上述计算结果的规律性与油气勘探实践经验是一致的,从而说明可靠性研究在油气勘探中的应用是可行和有效的。

6 结 语

利用各种资料定量研究地质问题已成为油气地质研究中的热门课题和发展方向。例如不少地质学家应用地震资料定量解释砂泥含量、油气层厚度,甚至用其定量解释储层物性和估算圈闭中的油气储量⁽⁶⁾。油气地质研究成果的可信度永远摆脱不了资料来源、精度及综合应用这些资料的方法和数学地质模型的影响。可靠性研究不仅能够帮助决策考查油气勘探的实用资料的精度,而且还能计算确定它们用于定量解释某一确定地质问题的可信度,它对于确保油气勘探决策的正确性和成功率具有重要的理论意义和实用价值。

(本文收到日期 1992 年 2 月 12 日)

(修改稿收到日期 1992 年 5 月 25 日)

(编辑 康 剑 廖世芳)

参 考 文 献

- (1) 汪应洛. 系统工程导论. 北京:机械工业出版社. 1982.
- (2) 浙江大学数学系编. 概率论与数理统计. 北京:人民教育出版社. 1979.
- (3) 陆基孟. 地震勘探原理. 北京:石油工业出版社. 1987.
- (4) Nakayama and Van Sicien DC. Simulated Model for Petroleum Exploration. AAPG Bulletin. 1981. 65: 1230 ~ 1255.
- (5) 陈发景等. 压实与油气运移. 北京:中国地质大学出版社. 1989.
- (6) 佩顿编,牛毓荃等译. 地震地层学. 在油气勘探中的应用. 北京:石油工业出版社. 1977.

An APPLICATION OF RELIABILITY ANALYSIS IN OIL AND GAS EXPLORATION — Reliability of Seismic Interval Velocity Data in the Interpretation of Pay Zone Thickness

Pang Xiongqi Yuan Xuejun Chen Zhangming Fang Zukang

(Daqing Petroleum Institute)

Abstract

This paper introduced the basic concept of reliability and the related knowledge to study the reliability of seismic interval velocity data used to interpret pay zone thickness.

Application results of seismic interval velocity data in the Tangyuan depression indicate that the reliability of an interpretation of 25m uncompacted shale, compacted shale, gas-bearing layer and oil-bearing layer are respectively 76.1, 61.0, 43.4 and 25.5 when the seismic interval thickness is 100m and its depth of burial is 1,000m, and their reliability change to 75.4, 67.9, 56.8 and 29.3 when their depth of burial is 500m.