

用测井资料确定储层粘土矿物成分的方法^①

张 玉 金 张 守 谦 付 有 升 王 德 福

(大庆石油学院)

(大庆测井公司)

提 要

介绍一种用测井资料确定储层粘土矿物成分的方法。阐述了从测井资料中提取粘土测井响应值并利用误差分析、优化理论及地质约束建立粘土矿物分析综合评价函数的过程。利用该方法分析了大庆油田东部 26 口探井的 CSU 测井资料,经岩心分析资料验证了该方法的效果。

主题词: 测井资料 粘土矿物成分 储层 综合评价函数

1 前言

用测井资料确定粘土矿物成分快速、经济。特别是在缺少取岩心资料的勘探新区,用测井资料确定地层粘土矿物和油层敏感性特征,以便及时采取相应的技术措施,保护油气层产能^[1]。对此,近年来国内外有关专家高度重视,并提出了一些方法。目前比较成熟且具有代表性的是德莱赛公司的 CLAYS 程序处理方法,它采用阳离子交换能力(CEC)和含氢指数(HI)交会图方法确定粘土矿物成分^[2]。但在使用中发现它存在以下缺点:

1. 它只能确定蒙脱石、伊利石和高岭石-绿泥石混层三种成分,不能区分高岭石和绿泥石。而大庆油田储层中的粘土矿物成分有蒙脱石、高岭石、伊利石、绿泥石、蒙脱石-伊利石混层和蒙脱石-绿泥石混层。因此,在大庆油田不能用 CLAYS 程序确定粘土矿物成分。

2. CLAYS 程序只利用了 CEC 和 HI 两个参数进行分析,有一个测定不准,对分析的结果就产生较大的影响。

基于此,从测井资料中提取 ρ_{CL} 、 Φ_{NCL} 、 U_{CL} 、CEC、HI、 K_{CL} 和 Th_{CL} 等粘土测井响应值,用误差分析和最优化方法确定储层粘土矿物成分。经 26 口井 82 个层验证,效果较好。

① 参加本项工作的还有于智堂、曹阳、丛健生。

2 粘土测井响应值的确定

测井仪器测得的响应都是地层各种组分的综合反映,粘土只是地层的一小部分组分。若要用测井资料确定粘土矿物成分,必须突出粘土对测井响应的贡献。

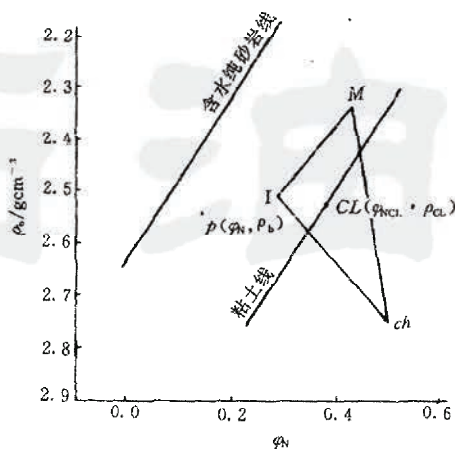


图1 中子-密度交会图

Fig 1 The neutron-density cross plot
 利石、绿泥石点连线 \overline{Ich} 交点的坐标。钾指数相对值为

$$\lambda = \frac{PI - PI_{\min}}{PI_{\max} - PI_{\min}} \quad (3)$$

式中 $PI = K_{40}/V_{CL}$ ——钾指数; PI_{\max} ——钾指数极大值; PI_{\min} ——钾指数极小值; K_{40} ——自然伽玛能谱测井的钾含量; V_{CL} ——粘土含量。

2.2 U_{CL} 的确定

根据双水模型的体积光电吸收截面测井响应方程,可以确定纯粘土的体积光电吸收截面 U_{CL} 。

$$U_{CL} = [U - \Phi S_{xo} U_{mf} - \Phi(1 - S_{xo}) U_{hr} - (1 - \Phi - V_{CL}) U_{ma}] / V_{CL} \quad (4)$$

式中 U ——地层的体积光电吸收截面, B/cc; U_{mf} ——泥浆滤液的体积光电吸收截面, B/cc; U_{hr} ——油气的体积光电吸收截面, B/cc; U_{ma} ——岩石骨架的体积光电吸收截面, B/cc; S_{xo} ——冲洗带含水饱和度; Φ ——地层的有效孔隙度。

2.3 CEC 的确定

地层的阳离子交换能力

$$CEC = \frac{B_w}{0.084 C_0^{-1/2} + 0.22} \quad (5)$$

式中 B_w ——纯粘土的束缚水体积; C_0 ——束缚水的含盐量, g/L。

2.4 HI 的确定

粘土的含氢指数

$$HI = \Phi_{NCL} - \frac{(\rho_{CL})_{ma} - \rho_{CL}}{(\rho_{CL})_{ma} - \rho_{bw}} \quad (6)$$

式中 $(\rho_{CL})_{ma}$ ——干粘土骨架密度, g/cm³; ρ_{bw} ——束缚水密度, g/cm³。

2.1 ρ_{CL} 和 Φ_{CL} 的确定

根据中子-密度交会图(图1),结合自然伽玛能谱测井资料,用下式确定纯粘土的密度和中子测井响应 ρ_{CL} 和 Φ_{NCL} 。

$$\rho_{CL} = (\rho_{CL})_{\max} \lambda + (\rho_{CL})_{\min} (1 - \lambda) \quad (1)$$

$$\Phi_{NCL} = (\Phi_{NCL})_{\min} \lambda + (\Phi_{NCL})_{\max} (1 - \lambda) \quad (2)$$

式中 $(\Phi_{NCL})_{\max}$, $(\rho_{CL})_{\min}$ 为粘土线(过纯粘土点和含水纯砂岩线平行的线)与蒙脱石绿泥石点连线 \overline{Mch} 交点的坐标; $(\Phi_{NCL})_{\min}$, $(\rho_{CL})_{\max}$ 为粘土线和伊利石、绿泥石点连线 \overline{Ich} 交点的坐标。

2.5 Th_{CL} 和 K_{CL} 的确定

在储层成分分析的基础上,用下列公式可确定纯粘土的钍和钾含量

$$Th_{CL} = (Th - \sum_{i=1}^n Th_i V_i) / V_{CL} \quad (7)$$

$$K_{CL} = (K_{40} - \sum_{i=1}^n K_{40i} V_i) / V_{CL} \quad (8)$$

式中 Th_i 和 K_{40i} 分别为储层中第 i 种成分的钍和钾含量; V_i 为储层中第 i 种成分的相对体积; n 为储层中所含矿物成分数。

3 粘土矿物分析响应方程

根据体积物理模型的研究方法,考虑一种由蒙脱石、高岭石、伊利石、绿泥石、蒙脱石-伊利石混层和蒙脱石-绿泥石混层组成的粘土,可得上述 7 个参数的测井响应方程(图 2)。例如, ρ_{CL} 的响应方程为

$$\rho_{CL} = \rho_m V_m + \rho_l V_l + \rho_k V_k + \rho_{ch} V_{ch} + \rho_{ml} V_{ml} + \rho_{mch} V_{mch} \quad (9)$$

式中 ρ ——密度, g/cm^3 ; V ——某种粘土矿物的体积;下标 m, l, k, ch, ml, mch 分别表示蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石、蒙脱石-伊利石混层和蒙脱石-绿泥石混层。

响应方程的一般形式为

$$f_i(x) = \sum_{j=1}^6 A_{ij} x_j \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 7) \quad (10)$$

式中 $x = \{V_m, V_l, V_k, V_{ch}, V_{ml}, V_{mch}\}$ 为粘土矿物体积矢量; $f_i(x)$ 为第 i 种粘土测井响应函数; A_{ij} 为第 j 种粘土矿物的第 i 种测井响应值。

4 误差分析

粘土矿物分析中的误差主要有两种:在确定粘土测井响应过程中产生的误差(称为测量误差);由于响应方程中选用了某些不适当的参数造成的响应误差。

由大量实际资料统计分析得到粘土矿物分析的测量误差为

$$\sigma_i = B_i \cdot LOG_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (11)$$

式中 σ_i ——第 i 种粘土测井响应的测量误差; B_i ——第 i 种粘土测井响应的误差系数; LOG_i ——第 i 种测井响应。

由粘土矿物分析测井响应方程(10),利用误差传播理论可得到响应误差为

$$\tau_i = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2 \quad (12)$$

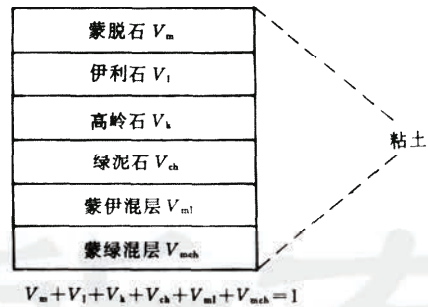


图2 粘土体积模型

Fig 2 The clay volumetric model

式中 τ_i ——第 i 种粘土矿物分析响应方程的响应误差; z_j ——响应方程中第 j 个不确定参数; σ_{z_j} —— z_j 的取值误差, ($j=1, 2, \dots, n$)。

粘土矿物分析中的测量误差(σ_i)和响应误差(τ_i)是相互独立的, 因此, 其总误差为

$$\mu_i = \sqrt{\sigma_i^2 + \tau_i^2} \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (13)$$

5 约束

测井分析结果须满足地质和数学等方面的约束^[3]。例如, 孔隙度、含水饱和度须分别大于零和小于 1。这些约束确保测井分析结果更合理, 并限定了目标函数的解域。本分析的约束主要有:

(1) 计算的各种粘土矿物的相对体积要满足 $0 \leq x_i \leq 1, (i=1, 2, \dots, 6)$;

(2) 各种粘土矿物相对体积之和等于 1, 即 $\sum_{i=1}^6 x_i = 1$ 。

6 综合评价函数

这里分析的问题是给定 7 种粘土测井响应, 确定 6 种粘土成分。如用矢量 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_7\}$ 表示 7 种粘土测井响应; 用矢量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_6\}$ 表示要确定的 6 种粘土成分, 则前述的粘土测井响应方程可用下列矢量式表示

$$Y = R \cdot X \quad (14)$$

式中 R ——系数矩阵。

从理论上讲, (14) 式是严格成立的。但由于响应方程计算的理论值和实际测量值不能完全相等, 因此, 上式可以表示为

$$E = Y - R \cdot X \quad (15)$$

E 是误差矢量, 理想情况下, $E=0$ 。实际上这是不可能的, 但却可以使 E 尽可能地达到最小, 这样, 上述问题就转化为求 E 的极小值问题。(15) 式是一个方程组, 它的解析形式为

$$E_i = y_i - f_i(X), (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (16)$$

根据优化理论, 此方程组的求解问题可转化为求下列函数的最优解问题

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^7 [y_i - f_i(X)]^2 \quad (17)$$

由于不同的粘土测井响应, 其单位和数值都有较大的差别, 所以它们在函数中的权重不同。为消除由此造成的影响, 可以把总误差 μ_i 作为“权系数”对 (17) 式做如下处理

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^7 \left[\frac{y_i - f_i(X)}{\mu_i} \right]^2 \quad (18)$$

这样, 粘土矿物成分的确定就变成了求解下列带约束问题的最优化解

极小化 $\Phi(X), X \in R^7$

满足于 $0 \leq x_i \leq 1, i=1, 2, \dots, 7$

$$\sum_{i=1}^7 x_i = 1$$

7 效果分析

根据本文方法,用计算机处理了大庆油田东部 26 口探井的 CSU 测井资料,图 3 是其中一口井部分井段的处理成果图. 在 26 口井中,82 个层有岩心的 X 射线衍射分析资料,可以进行对比. 表 1 是其中部分井的对比结果. 由 26 口井 82 个层的对比分析可知,75% 以上的层处理效果较好(平均相对误差小于 30%). 此外,我们又选择了几口井的部分层段进行了单块岩心对比,图 4 是其中两口井的对比情况. 对应图 4 中每块岩心深度处,上边的线代表 x 射线衍射分析的结果,下边的线代表测井分析的结果. 两种对比结果表明,在大庆油田应用本文所述的用测井资料确定储层粘土矿物成分的方法效果较好.

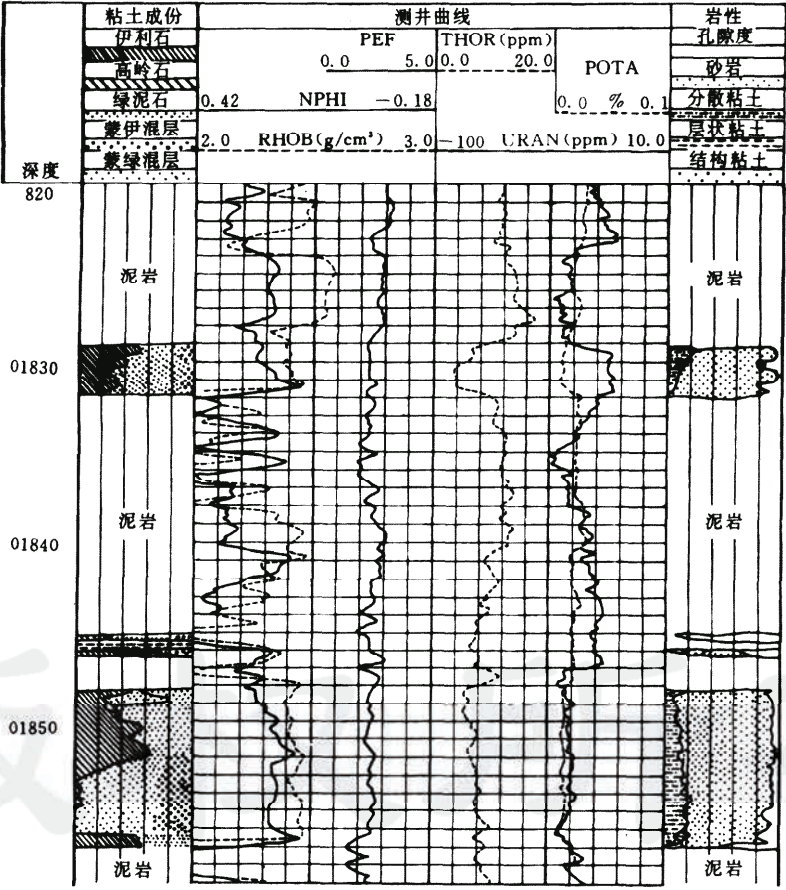


图 3 芳 48 井粘土矿物分析成果图
Fig 3 The clay mineral analysis result from WELL # Fang 48

表 1 粘土矿物分析对比表

Table 1 The contrast table of the clay mineral analysis

井号	层段	伊利石含量			高岭石含量			绿泥石含量			蒙伊混层含量			蒙绿混层含量			分析的 岩心数
		岩心 分析	程序 计算	相对 误差	岩心 分析	程序 计算	相对 误差	岩心 分析	程序 计算	相对 误差	岩心 分析	程序 计算	相对 误差	岩心 分析	程序 计算	相对 误差	
井 37	1851.8—1858.6	58.0	62.0	6.9	6.5		/	28.3	30.0	6.0	7.1	6.0	15.5		2.0		8
	1864.8—1868.4	40.8	39.0	4.4	10.5	1.0	/	42.8	49.0	14.5	4.3	11.0					4
朝 944	1350.0—1358.0	33.8	41.0	21.3	6.5	1.0	/	13.8	17.0	23.1	7.0	0.0	/	39.0	41.0	5.1	6
	1445.0—1449.0	38.3	47.0	22.7	12.8		/	9.5	13.0		3.8	4.0		34.3	35.0	2.0	8
	1490.0—1498.0	49.5	50.0	1.0	8.3		/	33.9	39.0	15.0	8.3	11.0	/				9
	1499.0—1501.2	63.0	47.0	25.4	2.0		/	26.0	41.0		9.5	12.0	26.3				2
	1510.4—1515.8	57.8	53.0	8.3	5.0		/	26.4	38.0	11.6	10.6	9.0	15.0				5
	1516.4—1521.0	51.6	44.0	14.7			/	38.1	46.0	20.7	10.1	9.0	10.9				8
	1523.0—1528.6	50.9	48.0	5.7	8.8		/	29.8	40.0		10.5	12.0	14.3				8
朝 59	1103.6—1107.0	31.5	29.0	7.9	6.0	5.0	16.7		29.0		10.0	2.0		52.0	45.0	21.2	2
	1112.0—1119.0	35.0	31.0	11.4	2.0	1.0			29.0		7.5		/	55.5	39.0	29.7	2
朝 941	1231.0—1238.5	41.6	43.0	3.4	4.9	2.0		46.6	46.0	1.3	6.9	4.0	/		5.0		14
	1312.4—1318.2	49.3	45.0	8.7	3.5	1.0		40.4	45.0	11.4	6.7	7.0	4.4		2.0	10	10
朝 58	1266.0—1269.0	55.3	59.0	6.7	6.0			32.0	31.0	3.1	7.0	8.0	14.3		2.0		3
	1286.0—1292.0	48.2	50.0	3.7	2.8	1.0		41.3	40.0	3.1	5.1	6.0	17.6	2.7	3.0		12
	1309.6—1322.0	51.6	50.0	3.1	2.0	2.0		38.6	35.0	9.3	7.9	6.0	24.1		7.0		25
芳 48	1796.2—1798.6	31.0	29.0	3.2		10.0			2.0		4.0			65.0	59.0	9.2	7
	1828.0—1831.4	40.0	37.0	7.5				54.2	56.0	3.3	5.8	7.0	27.5				12
	1847.8—1856.5	33.8	30.0	11.2		1.0		45.8	40.0	12.7	8.7	11.0	26.4	11.7	18.0	/	36
芳 381	1869.6—1872.2	49.8	44.0	11.6	6.6			41.2	47.0	14.1	8.8	9.0	2.3				5
	1892.0—1894.0	41.7	33.0	20.8	1.3	2.0		31.0	51.0	/	11.0	14.0	27.2	15.3		/	4
	1917.0—1918.4	41.3	45.0	8.2	2.5			48.8	47.0	3.7	7.5	8.0	6.7				4
	1965.0—1967.0	39.2	35.0	10.7	2.8			45.3	55.0	21.4	3.8	10.0		8.9		/	6
芳 361	1787.4—1790.0	58.3	47.0	19.3	4.3	4.0		21.6	13.0	/	7.0	1.0	/	7.7	35.0	/	7
	1800.4—1803.6	29.0	34.0	8.6	2.0	2.0		53.0	50.0	5.7	16.0	10.0	/		4.0		2
	1846.4—1850.0	38.2	42.0	9.9	0.9	4.0		15.9	32.0	/	6.0	1.0	/	38.8	19.0	/	10
	1883.0—1886.4	30.0	25.0	16.7	4.5	10.0		11.5	23.0	/	6.3	2.0	/	46.0	40.0	13.0	8
	1888.4—1890.0	13.5	24.0	/	2.5	1.0			45.0		1.8			81.8	19.0	/	4

8 结束语

用测井资料分析储层的粘土矿物成分,在油田勘探开发过程中,特别是在油层保护和改造过程中具有十分重要的意义。我们用了几年的时间进行了初步的研究和探索,取得了一定的成果。从在大庆油田的初步应用情况看,效果较好。

本方法虽然是结合大庆油田粘土矿物的分布特点研究的,但方法本身并没有局限性,仅是所用的参数须与所分析地区的地质特征相一致。所以,它可以应用于任何少于 6 种粘土成分的地层。

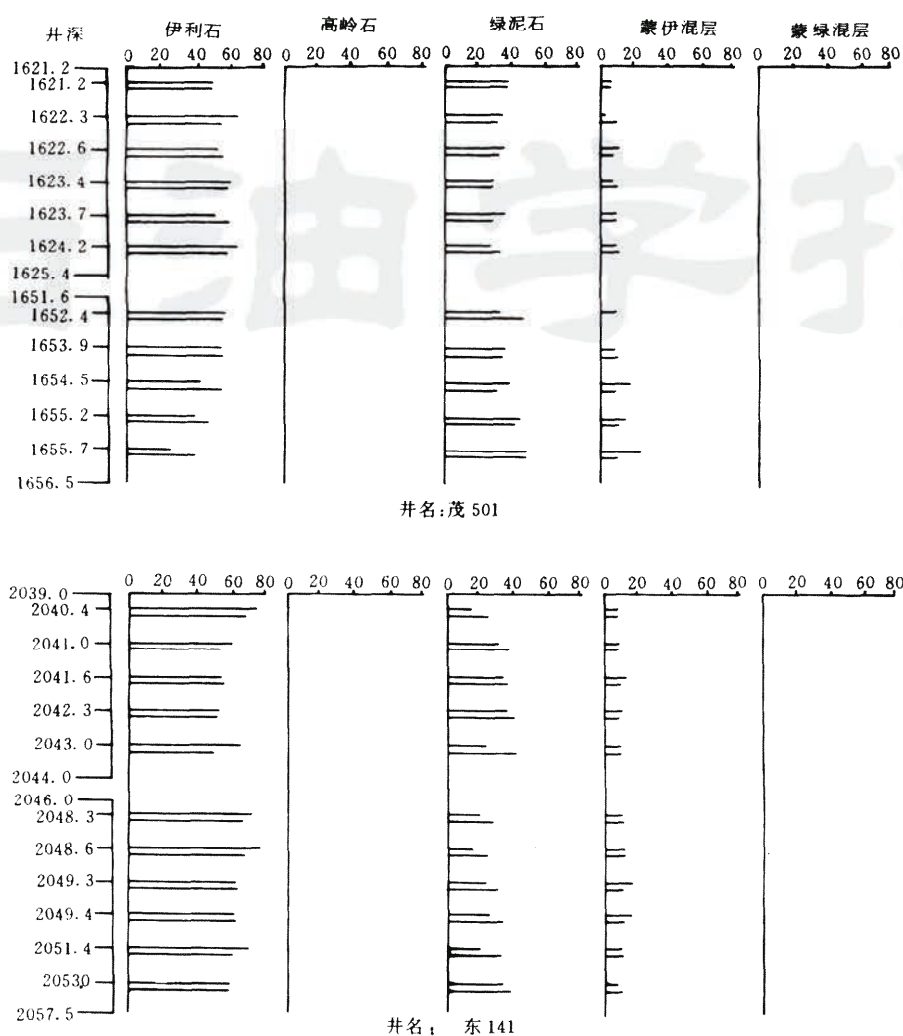


图4 粘土成分分析对比图

Fig 4 The contrast result of the clay composition

参 考 文 献

- [1] 朗斯塔夫 FJ 编, 王行信等译, 粘土矿物和资源地质学, 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1985.
- [2] 雍世和, 新泥质砂岩分析程序, 石油测井科技情报协作组第三次会议文集, 1984.
- [3] 钟兴水编, 测井资料计算机处理解释方法, 北京: 石油工业出版社, 1986.

A METHOD OF DETERMINING THE CLAY MINERALOGICAL COMPOSITION FROM WELL LOGGING IN RESERVOIR

Zhang Yujin Zhang Shouqian Fu Yousheng Wang Defu

(Daqing Petroleum Institute)

(Daqing Well Logging Company)

Abstract

In this paper a method of determining the clay mineralogical composition from well loggings in reservoir has been presented, and a process has been expounded, in which we extract the log response of clay from well logging and set up the comprehensive evaluation function of the clay mineral analysis with error analysis, optimization theory and geological restraint. Using this method, we have analyzed well loggings of 26 exploratory wells' CSU outside Daqing oil field and compared the result from the log analysis with that from the core analysis and a better result has been obtained.

提高裂缝性油藏采收率的方法和理论研究已全部完成

总公司石油勘探开发科学研究院油气田开发研究所与前苏联石油研究院北高加索石油研究院共同合作承担的“提高裂缝性油藏采收率的方法与理论”研究,于 1992 年上半年已全部完成。

该成果分为三个部分、九个章节、20 多个专题报告。

第一部分:裂缝性储集层地质结构研究;

第二部分:物理模拟和数值模拟;

第三部分:后期开采的监测与调整。

双方认为:该项研究成果是在高技术、高水平上的交流与联合攻关的结晶,对油田开发具有较大的潜在价值。目前,研究工作已经全部完成,正在协商鉴定日期。

(文思)