

基于 SPSS 的 γ 能谱法鉴别钻井岩屑沉积岩类别

辜润秋¹ 赖万昌¹ 林宏健¹ 阎荣辉² 王刚² 张丽娇¹ 祝美英¹ 黄子舰³ 黄进初¹

1 (成都理工大学 核技术与自动化工程学院 成都 610059)

2 (中国石油长庆油田分公司勘探部 西安 710018)

3 (盘锦中录油气技术服务有限公司 盘锦 124010)

摘要 γ 能谱法鉴别钻井岩屑沉积岩类别,有助于解决沉积岩小类划分困难以及化学分析时间长等问题。介绍了通过低本底 γ 能谱法测定钻井岩屑中的天然放射性核素 K、U、Th 含量来划分泥岩中的深灰色含灰泥岩、深灰色灰质泥岩以及灰色灰质泥岩的方法。分别选用 1.37–1.56 MeV、1.66–1.86 MeV 以及 2.41–2.81 MeV 能区的计数率来代表 K、U、Th 的放射性强度。利用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions)软件对这三种泥岩的 K、U、Th 计数率以及总计数率对岩石岩性进行费歇尔判别分析,其岩性识别正确率分别为 100%、76.47% 和 60%。由实验可得,根据 K、U、Th 及总的计数率基本可识别深灰色含灰泥岩,而对于深灰色灰质泥岩以及灰色灰质泥岩的识别效果较好,但不能完全区分。

关键词 γ 能谱法,岩芯分析,判别分析

中图分类号 TL182

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080504

γ 能谱测量方法是快速、可靠、非破坏性地检测样品中是否具有放射性的重要手段,是一种较为直观的仪器分析方法。在石油勘查领域中, γ 能谱法应用于岩石分类工作已有不少研究成果。郭余峰等^[1-2]根据三肇地区的探井取心岩样的自然 γ 能谱数据和室内分析,利用钍铀交绘图把砂岩、粉砂岩和泥岩等划分得很清楚。同时,利用钍、铀、钾的含量值确定了岩石的类型、生油环境以及泥质含量等岩性参数,建立了岩石自然 γ 能谱的数据库管理系统。王连升^[3-4]曾对岩样自然伽马能谱测量与岩性的关系进行研究,利用 U-Th 和 Th-K 交绘图以及回归分析区分主要粘土类型。粘土质岩石是重要的生油岩石^[5],灰色及黑色的泥页岩中一般都含有丰富的有机质和微体化石,是良好的生油岩系,而泥质岩是粘土质岩石中的一种,因此对钻井岩屑沉积岩中的泥岩进行细分对寻找油气藏具有一定的作用^[6]。

本文主要通过室内 γ 能谱测量尝试对某地钻井岩屑沉积岩中的泥岩进行细分,以解决钻探过程中沉积岩中泥岩类岩屑较难划分的难题。

1 基本原理及实验条件

1.1 基本原理

γ 能谱测量利用的是地质体中天然放射性核素(主要是铀、钍、钾)衰变释放的不同能量的 γ 射线。地层中放射性元素铀、钍、钾含量的多少,是由含放射性元素的母岩经过长期的地质作用,不断分离和重新分布形成的,它与岩石的种类、沉积环境、搬运过程、变质情况、风化程度等因素有关。由于不同环境条件及不同物质来源所形成的沉积岩其铀、钍、钾的含量不同,因而放射性强度不同,能谱仪所探测到的计数率也不同。因而利用放射性差异可以进一步对沉积岩进行岩性划分,本文以样品中 K、U、Th 的 γ 特征峰计数率来判别岩性的放射性差异。

费歇尔判别^[7]是按照各类(总体)中的方差尽可能小、不同类中的均值之间差距尽可能大的原则,即类间距离最大而类内离散性最小的原则求判别函数,并利用判别函数进行最小距离分类。两个总体(总体 1 和总体 2)的基本函数表达式为:

$$f(X) = X^T (\Sigma_1 + \Sigma_2)^{-1} (\mu_1 - \mu_2) \quad (1)$$

国家 863 计划项目(No.2012AA06180303)资助

第一作者:辜润秋,女,1991 年出生,2013 年毕业于成都理工大学工程技术学院,现为硕士研究生,研究领域为核仪器与测控技术

通讯作者:赖万昌, E-mail: lwchang@cdut.edu.cn

收稿日期:2015-04-28, 修回日期:2015-05-21

式中, Σ_1 和 Σ_2 分别为总体 1 和总体 2 的协方差矩阵; μ_1 和 μ_2 分别为总体 1 和总体 2 的均值向量。

判别规则:

若 $f(X) \geq b$, $X \in$ 总体 1;

若 $f(X) < b$, $X \in$ 总体 2。

其中, $b = [f(X_1) + f(X_2)] / 2$ 。

对于两个以上的总体, 费歇尔判别法的基本步骤为: 对于 k 个总体 $G_1, G_2, \dots, G_k$; G_k 假定具有相同的协方差矩阵 Σ_1 , $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ 分别为总体 $G_1, G_2, \dots, G_k$ 的均值向量, 每一个总体含有 p 个样本点, 任给出一个样本点 X , 判别 X 属于哪一个总体, 这样得到 X 的线性判别函数:

$$F(X) = b^T X = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p \quad (2)$$

式中, b 为判别系数, $b = (b_1, b_2, \dots, b_p)^T$ 。

费歇尔判别法就是要寻找一个由 p 个变量组成的线性函数 $F(X)$, 使得每一个总体内部样本点的函数值尽量接近, 总体之间的函数值相差尽量大。与两个总体情形相同, 需要求出 b , 使得目标函数

$$\lambda(b) = \frac{b^T B b}{b^T \Sigma b}$$

达到了极大。 B 为总体间的离差矩阵,

反映了总体之间的差异:

$$B = \sum_{i=1}^k (\mu_i - \mu)(\mu_i - \mu)^T \quad (3)$$

其中:

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mu_i$$

由数学证明可知, 满足上述条件的 b 为矩阵 $\Sigma^{-1} B$ 的最大特征值所对应的特征向量。

一般来讲, 在实际应用中, 可以通过样本估计 b , 假设从各总体中抽取 k 组 m 维观测样本如下:

$$\begin{aligned} G_1: & X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_{n_1}^{(1)}; \\ G_2: & X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, \dots, X_{n_2}^{(2)}; \\ & \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ G_k: & X_1^{(k)}, X_2^{(k)}, \dots, X_{n_k}^{(k)}; \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

$$X^{(i)} = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)^T; \quad n = n_1 + n_2 + \dots + n_k$$

$$\text{记 } X^{(i)} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} X_i^{(j)}, j=1, 2, \dots, k;$$

$$X = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k X^{(j)};$$

$$S_j = \sum_{i=1}^{n_j} (X_i^{(j)} - X^{(j)})(X_i^{(j)} - X^{(j)})^T, j=1, 2, \dots, k$$

$$D = \sum_{j=1}^k S_j;$$

$$\hat{B} = \sum_{j=1}^k (X^{(j)} - X)(X^{(j)} - X)^T$$

式中, S_j 为总体的离差矩阵; $\hat{B}$ 为 B 的无偏估计。

矩阵 $D^{-1} B$ 的最大特征值所对应的特征向量即为 b 的估计值。从而, 可以建立判别函数, 并对样品的归属进行判别。

本实验主要是利用三种泥岩的 K、U、Th 计数率 (C_K 、 C_U 、 C_{Th}) 以及总的计数率 C_A 四个变量建立贝叶斯判别函数, 对三种泥岩进行判别分析。

1.2 实验条件

采用的低本底多道 γ 能谱仪探头为 $\phi 75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的 NaI(Tl) 晶体, 能量分辨率 (半高宽, Full Width at Half Maximum, FWHM) 优于 8.0% (对 ^{137}Cs 的 662 keV γ 射线)。测量时将整个探头以及被测样品均置于铅室中加以屏蔽, 以减少环境本底对测量结果的影响。由于岩芯样品水分含量变化较大, 测量之前, 将其烘干。每个样品混合均匀, 称取 400 g 压实并密封在高 10 cm、直径 8 cm 的圆柱形聚乙烯塑料盒内^[8]。样品封存 30 d 左右, 待射气达到放射性平衡后再进行测量。测量时间均设为 3 000 s。

2 结果分析与讨论

实验样品来自陕西某石油钻井部分井段的钻孔岩屑, 该井段的大部分岩芯属于泥岩。选取该井段中具有代表性的采样点构造样本文件。实验选取 46 个样本作为原始训练样本建立判别函数模型, 其中深灰色含灰泥岩 3 个, 深灰色灰质泥岩 30 个, 灰色灰质泥岩 13 个, 并利用该模型来对余下 29 个样本进行判别验证, 所得结果再与已知情况作比较, 以检验结果的准确性。根据石油分公司勘探部所提供的岩屑描述记录所述本实验中的三种泥岩的成分差别在于深灰色含灰泥岩含少量灰质, 深灰色灰质泥岩以及灰色灰质泥岩灰质含量高。

使用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 软件对三种泥岩的 K、U、Th 计数率 (C_K 、 C_U 、 C_{Th}) 以及总的计数率 C_A 进行费歇尔判别分析的结果如下。

表 1 为典则判别式函数系数，两个函数是有 Fisher 判别法得到的向两个方向的投影。据此建立两个非标准化判别函数。

表 1 典则判别式函数系数
Table 1 Coefficients of canonical discriminant function.

	函数 Function	
	1	2
C_K	18.783	21.257
C_U	21.171	8.017
C_{Th}	86.375	102.055
C_A	0.122	-2.237
常量 Constants	-12.674	2.309

函数 1:

$$\omega_1 = -12.674 + 18.783C_K + 21.171C_U + 86.375C_{Th} + 0.122C_A$$

函数 2:

$$\omega_2 = 2.308 + 21.257C_K + 8.017C_U + 102.055C_{Th} - 2.237C_A$$

根据这两个函数，从任何一个样本（每个样本都有 4 个变量）都可以算出两个判别式得分。把这两个分数当成样本的坐标，这样数据中的 49 个样本就是二维平面上的 49 个点，如图 1 所示。

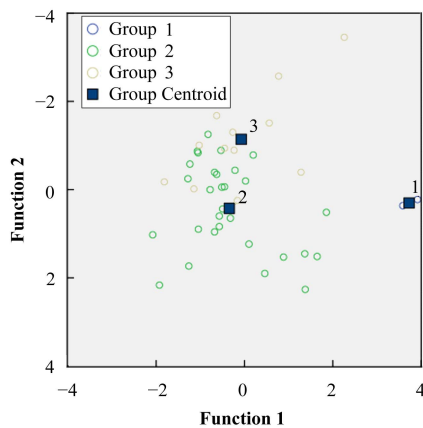


图 1 基于典则判别函数的差异距离分布
Fig.1 Differential distance distribution of three mudstones based on canonical discriminant analysis.

表 2 为分类函数系数，即费歇尔线性判别函数系数，可以据此建立三类泥岩费歇尔线性判别模型。

第一类:

$$F_1 = -192.331 + 512.739C_K - 319.500C_U + 47.232C_{Th} + 20.424C_A$$

第二类:

$$F_2 = -143.176 + 433.674C_K - 406.666C_U - 316.877C_{Th} + 20.200C_A$$

第三类:

$$F_3 = -134.495 + 472.036C_K - 388.384C_U - 133.731C_{Th} + 16.731C_A$$

表 2 分类函数系数
Table 2 Coefficients of classification function.

	组 Group		
	1	2	3
C_K	512.739	433.674	472.036
C_U	-319.500	-406.666	-388.384
C_{Th}	47.232	-316.877	-133.731
C_A	20.424	20.200	16.731
常量 Constants	-192.331	-134.176	-134.495

根据泥岩费歇尔线性判别模型，将各类泥质岩的 K 、 U 、 Th 计数率以及总计数率 C_A 作为相应变量值代入三个判别函数模型，比较计算出的三个函数值 F_1 、 F_2 和 F_3 ， F_1 最大，则对应泥质岩归入第 1 类；若 F_2 最大，则对应泥质岩归入第 2 类；若 F_3 最大，则对应泥质岩归入第 3 类。

表 3 为已知分类的样本空间的预测分类结果，表 3 中的预测类结果是根据以上三类泥岩费歇尔线性判别模型得出。

由表 3 可知，1 类的判别正确率为 100%，可以完全与另外两类区分；2 类和 3 类的判别正确率分别为 70% 和 76.92%。由图 1 可知，1 类与 2、3 类泥岩分布距离较远，能够完全加以区分；而 2、3 类分布距离较近，部分样本出现重叠，总区分度可达 72.09%。三种泥岩在组成成分上的差别在于深灰色含灰泥岩灰质含量低，而深灰色灰质泥岩与灰色灰质泥岩两者灰质含量较高，因此 2、3 类样品区分度相对 1 类样品来说较低。

根据建立的判别函数对余下 29 个样品进行验证，其结果列于表 4。根据已有的资料可知 47、48 号样品为深灰色含灰泥岩，49–65 号样品为深灰色灰质泥岩，66–75 号样品为灰色灰质泥岩。由表 4 可知，已建立的判别函数对所有未分组样品的总判别正确率为 72.41%，其中深灰色含灰泥岩、深灰色灰质泥岩以及灰色灰质泥岩各自的判别正确率分别为 100%、76.47% 和 60%； γ 能谱法基本上可以划分泥岩和含灰泥岩，对成分接近的两种含灰泥岩也有一定的划分效果。

表 3 分类预测结果
Table 3 Classification predictions.

样品 序号 Serial number	实际类 Actual class	预测类 Forecast class	马氏距离 Mahalanobis distance	判别式得分 Discriminant score		样品 序号 Serial number	实际类 Actual class	预测类 Forecast class	马氏距离 Mahalanobis distance	判别式得分 Discriminant score	
				函数 1 Function 1	函数 2 Function 2					函数 1 Function 1	函数 2 Function 2
1	1	1	0.024	3.386	-0.201	24	2	2	0.882	-0.551	-0.052
2	1	1	0.003	3.454	-0.216	25	2	2	0.771	-0.513	-0.019
3	1	1	0.043	3.717	-0.020	26	2	3**	0.905	-0.024	0.363
4	2	2	3.558	1.707	-2.175	27	2	3**	0.831	0.178	0.931
5	2	1**	3.978	1.726	-0.350	28	2	2	0.713	-0.783	0.05
6	2	2	2.725	1.193	-1.283	29	2	2	0.591	-0.645	0.339
7	2	2	6.328	0.735	-1.655	30	2	3**	0.748	-1.061	0.782
8	2	2	5.144	1.244	-2.124	31	2	3**	0.871	-0.831	1.186
9	2	2	0.714	1.476	-1.435	32	2	3**	0.244	-0.529	0.766
10	2	2	0.397	-1.091	-0.891	33	2	2	0.434	0.388	-1.623
11	2	2	2.553	-0.687	-0.965	34	3	3	0.657	-1.177	0.745
12	2	2	0.023	-1.275	-1.611	35	3	2**	0.629	-1.084	0.123
13	2	2	0.082	-0.514	-0.518	36	3	3	0.282	-0.97	1.021
14	2	2	0.050	-0.629	-0.535	37	3	2**	0.969	-1.862	0.022
15	2	2	0.853	-0.39	-0.688	38	3	3	0.005	-0.242	1.284
16	2	2	5.531	0.029	-1.454	39	3	3	0.764	2.203	3.349
17	2	2	1.331	-1.912	-2.080	40	3	3	0.251	0.502	1.647
18	2	2	1.064	-1.241	0.287	41	3	3	0.911	0.755	2.484
19	2	3**	3.369	-0.946	1.100	42	3	3	0.971	-0.461	0.851
20	2	2	0.780	-2.005	-1.039	43	3	2**	0.304	-0.221	-0.193
21	2	3**	0.221	-0.650	0.511	44	3	3	0.957	1.314	0.815
22	2	2	0.513	-0.566	-0.841	45	3	3	0.741	-0.285	0.786
23	2	3**	0.260	-0.223	0.743	46	3	3	0.963	-0.64	1.786

注：带**表示出现错判现象，1 类为深灰色含灰泥岩，2 类为深灰色灰质泥岩，3 类为灰色灰质泥岩

Notes: ** represent misjudgment phenomenon, Class 1 for dark gray mudstone containing, Class 2 for dark grey calcareous mudstone, Class 3 for grey calcareous mudstone.

表 4 检验样品的分类结果
Table 4 Classification results of the test sample.

样品 序号 Serial number	实际类 Actual class	预测类 Forecast class	马氏距离 Mahalanobis distance	判别式得分 Discriminant score		样品 序号 Serial number	实际类 Actual class	预测类 Forecast class	马氏距离 Mahalanobis distance	判别式得分 Discriminant score	
				函数 1 Function 1	函数 2 Function 2					函数 1 Function 1	函数 2 Function 2
47	1	1	0.108	3.208	-0.249	62	2	2	0.281	-0.771	-0.276
48	1	1	2.777	2.606	-1.540	63	2	2	0.547	0.326	0.581
49	2	2	1.299	-1.384	-0.195	64	2	2	0.37	-0.756	-0.099
50	2	2	0.124	-0.611	-0.354	65	2	2	0.464	-0.953	-0.579
51	2	2	0.596	-1.038	-0.330	66	3	3	1.191	0.380	2.076
52	2	2	0.249	0.185	-0.293	67	3	2	2.317	-1.715	-0.981
53	2	2	0.356	0.111	-0.025	68	3	3	0.081	-0.222	0.854
54	2	2	6.863	-2.76	0.761	69	3	2	0.56	-0.436	0.256
55	2	3	5.363	-2.452	0.758	70	3	3	0.18	-0.445	0.812
56	2	2	1.144	-1.246	-0.017	71	3	3	0.947	0.745	1.473
57	2	3	0.311	-0.723	1.177	72	3	3	0.807	-1.176	-0.427
58	2	3	0.497	-0.775	0.776	73	3	2	1.11	-0.923	0.358
59	2	3	0.66	-0.937	0.874	74	3	3	0.208	-0.552	0.887
60	2	2	0.556	-0.759	0.095	75	3	2	7.998	-2.996	-1.264
61	2	2	1.583	-1.491	-0.135						

3 结语

(1) 由实验可得，根据 K、U、Th 计数率及总计数率 A 基本上可以识别深灰色含灰泥岩，而对于

深灰色灰质泥岩以及灰色灰质泥岩的识别效果较好，但不能完全区分。由此可得， γ 能谱法对于成分差异较大的岩性识别效果很好，但对一些组成成分差异较小的岩性识别效果欠佳。(2) 低本底 γ 能谱法

具有成本低，易推广的优点，可望在类似工作中推广应用。(3) 本实验是利用常规的低本底 γ 能谱仪系统。仪器的分辨率较低，样品用量太少，造成放射性测量的灵敏度较低，测量时间较长。实际应用中，可针对岩屑测量设计合适的铅室和探测装置，提高工作效率和测量精度。

参考文献

- 郭余峰, 高升. 岩样自然伽玛能谱的数据库管理系统[J]. 测井技术, 1995, **19**(1): 58–62
GUO Yufeng, GAO Sheng. The data base management system for natural gamma ray spectrometry of rock samples[J]. Well Logging Technology, 1995, **19**(1): 58–62
- 郭余峰, 傅石友, 杜鸿烈, 等. 松辽盆地三肇地区自然伽马能谱与岩性参数的关系[J]. 石油学报, 1996, **17**(2): 24–28. DOI: 10.7623/syxb199602004
GUO Yufeng, FU Shiyu, DU Honglie, *et al.* Relations between natural gamma ray spectrometry and lithologic parameters in Sanzhao region of Songliao basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, **17**(2): 24–28. DOI: 10.7623/syxb199602004
- 王连升. 大庆油田岩石自然 γ 放射性与其岩性的关系[J]. 大庆石油地质与开发, 1986, **5**(3): 75–82
WANG Liansheng. Relationship between radioactivity of natural gamma ray from rocks and lithology in Da Qing oil field[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Da Qing, 1986, **5**(3): 75–82
- 王连升. 岩样自然伽玛能谱测量与岩性关系研究[J]. 测井技术, 1987, **11**(1): 29–41
WANG Liansheng. Relationship between radioactivity of natural gamma ray from rocks and lithology[J]. Well Logging Technology, 1987, **11**(1): 29–41
- 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001
ZHAO Chenglin, ZHU Xiaomin. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001
- 曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1986
ZENG Yunfu, XIA Wenjie. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986
- 邵淑彩, 孙韞玉, 何娟娟. 应用数理统计[M]. 第二版. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
TAI Shucui, SUN Yunyu, HE Juanjuan. The application of mathematical statistics[M]. 2nd Ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2005
- Turhan S, Gunduz L. Determination of specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K for assessment of radiation hazards from Turkish pumice samples[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, **99**(2): 332–334. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.08.022

γ -ray spectrometry to identify the classification of well drilling debris of sedimentary rocks based on SPSS

GU Runqiu¹ LAI Wanchang¹ LIN Hongjian¹ YAN Ronghui² WANG Gang²
ZHANG Lijiao¹ ZHU Meiyang¹ HUANG Zijian³ HUANG Jinchu¹

¹(The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

²(Exploration Department of Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

³(Panjin Recorded in Oil and Gas Technology Services Ltd, Panjin 124010, China)

Abstract Background: The application of gamma ray spectroscopy on the classification for the sedimentary rocks is helpful to solve the problem of small classification and the long cycle for chemical analysis of the sedimentary rocks. **Purpose:** This study aims to introduce a method of determining the content of natural radionuclides K, U, Th in the well drilling debris with the low background gamma ray spectroscopy for dipartition among dark gray ash mudstone, dark grey calcareous mudstone and grey calcareous mudstone. **Methods:** Count rates of K, U, Th in the energy ranges of 1.37–1.56 MeV, 1.66–1.86 MeV and 2.41–2.81 MeV were selected to represent the intensity of radioactivity of K, U, Th. The fisher discriminant criterion was applied to measured count rates of various samples for classification of sedimentary rocks using the Statistical Product and Service Solutions (SPSS) software. **Results:** According to the count rate of K, U, Th and total count rate of the three mudstones carry out the discriminant analysis of rock lithology by using SPSS software, the accuracy rate reached 100%, 76.47% and 60%, respectively. **Conclusion:** Gamma ray spectrometry method is of great significance for the division of sedimentary rocks in small class. It could be used to completely identify the dark gray mudstone and the identification effect for dark grey calcareous mudstone, and grey calcareous mudstone is good, but not distinguish them completely.

Key words Gamma ray spectrometer, Analysis of cores, Discriminant analysis

CLC TL182