



林振洲, 刘东明, 高文利, 等. 2017. 测井识别庐枞矿集区科学钻探 ZK01 孔复杂岩性. 地球物理学进展, 32(3): 1174-1180, doi: 10.6038/pg20170330.

LIN Zhen-zhou, LIU Dong-ming, GAO Wen-li, et al. 2017. Well-logging identifying the complex lithology of scientific drilling ZK01 at Luzong ore concentration area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 32(3): 1174-1180, doi: 10.6038/pg20170330.

测井识别庐枞矿集区科学钻探 ZK01 孔复杂岩性 Well-logging identifying the complex lithology of scientific drilling ZK01 at Luzong ore concentration area

林振洲^{1,2}, 刘东明², 高文利², 方思南¹, 王芝尧³

LIN Zhen-zhou^{1,2}, LIU Dong-ming², GAO Wen-li², FANG Si-nan¹, WANG Zhi-yao³

1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000

3. 中国石油大港油田公司, 大港 300280

1. *Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

2. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China*

3. *Dagang Oilfield Company, PetroChina, Dagang 300280, China*

摘要 庐枞矿集区位于长江中下游成矿带内, ZK01 孔为深部探测项目在该地区布设的一口科学钻探孔. 地球物理测井利用各种仪器在钻孔中连续观测, 获取了钻遇地层的视电阻率、极化率、密度、自然伽马、纵波速度和磁化率等物性参数. 该孔钻遇岩性复杂, 测井曲线难以直接识别岩性, 本文基于交会图等技术分析各种岩性测井响应特征, 提取各种岩性的物性特征值, 建立了砖桥组和岩体组相关岩性的 Bayes 自动判别模型, 其回判正确率分别为 85.1% 和 83%, 并在实际判别中取得了较好的应用效果.

关键词 庐枞矿集区; 科学钻探; 测井响应; 复杂岩性识别

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg20170330

Abstract Luzong ore concentration area is locating in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and ZK01 borehole, a scientific drilling hole, is belonging to the deep exploration projects. With continuous observation in the borehole carried by various instruments, Geophysical logging has obtained several physical parameters like resistivity, polarizability, density, natural gamma, P-wave velocity and magnetic susceptibility, etc. Owing to the complex lithology, it is difficult to directly identify lithology with logging curves, and the paper is to analyze lithological logging response characteristics and then obtain various of physical properties value of the lithology through cross-plot technology, at the same time, building two automatic Bayes lithology identification models: Zhuanqiao formation and Bedrock formation, whose accuracy reaches 85.1% and 83% respectively and achieves an effective application.

Keywords Luzong ore concentrated area; scientific drilling; well-logging responding; complex lithology identification

0 引言

长江中下游成矿带是我国东部重要的 Cu、Fe、Au、S 多金属资源基地, 素有东部“工业走廊”之称. 成矿带由 7 个大型矿集区、约 200 多个大中型矿床组成(常印佛等, 1991; 吕庆田等, 2014; 吕庆田等, 2015). 庐枞矿集区位于其中. ZK01 孔位于庐枞盆地中部石门庵西南 900 m 处, 孔深 2012.35 m. 钻孔 2~1469.81 m 为砖桥组火山岩, 主要岩石为粗安岩、高岭石化粗安岩、黄铁矿化粗安岩、硬石膏化粗安岩和辉石粗安岩; 1488.84~1603.35 m 为火成岩地层与下伏岩体的接触

带; 1603.35~2012.35 m 为岩体, 自上而下依次为(石英)正长岩、石英二长斑岩、黑云母石英二长岩, 相互之间为渐变过渡关系(张舒等, 2014).

地球物理测井可在高温、高压环境下获得岩层原位物理特性(牛一雄等, 2004). 通过测井曲线分析, ZK01 孔砖桥组中高岭石化后的粗安岩比粗安岩以及其他矿化后的粗安岩的自然伽马值、纵波速度和极化率要高; 视电阻率值则要低于上述岩性; 岩石密度值相差不大; 受黄铁矿化影响, 部分井段的磁化率值有所增大, 但整体体现出弱磁性的特点. 接触带和岩体的自然伽马值大于上部砖桥组地层, 其中正长岩

收稿日期 2016-09-22; 修回日期 2017-03-21. 投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 “深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)”第 3 项目“深部矿产资源立体探测及试验研究”第 3 课题和“国家高技术研究发展计划(863 计划)”(2014AA06A608)联合资助.

作者简介 林振洲, 男, 1981 年出生, 高级工程师, 现主要从事测井数据处理方法的研究工作. (E-mail: linzhenzhou@igge.cn)

井段的自然伽马值最高;视电阻率值和岩石密度值变化幅度较小,但岩体整体的视电阻率值明显大于砖桥组地层,而密度值则小于砖桥组地层。

深度达 2000 m 的钻孔在庐枞矿集区并不多,而包含这么多方法的测井数据就更为稀少。庐枞矿集区科学钻探 ZK01 孔岩性复杂,基于测井曲线难以直接识别岩性,对于复杂岩性的识别,元素俘获能谱测井 ECS 能从岩石成分角度解决火山岩岩性识别所存在的困难,但其价格昂贵,实际应用不多,常常只被作为地区识别的标志性资料(陈军等, 2007),而目前国内通常利用常规测井数据进行交会图法、聚类分析、模糊数学等方法来识别岩性(李秀珍等, 2011; 张磊, 2012)。本文基于交会图等技术分析各种岩性测井响应特征,提取各种岩性的物性特征值,建立了砖桥组和岩体组相关岩性的 Bayes 自动判别模型,其回判正确率分别为 85.1% 和 83%,并在实际判别中取得了较好的应用效果。

1 测井响应特征分析

交会图法是一种测井资料处理解释方法,是划分岩性、确定岩石物性的有效手段之一,它是把两种测井数据在平面

图上交会,根据交汇点的坐标定出所求参数的数值和范围(潘伟等, 2010)。ZK01 孔自然伽马值变化范围较大,所有岩性放在一起交会识别效果不好,因此本文以 1490 m 为分界线,上部砖桥组和下部岩体。砖桥组选取的岩性为:粗安岩、高岭石化粗安岩、黄铁矿化粗安岩、硬石膏化粗安岩和辉石粗安岩,岩体选取的岩性为:正长岩、石英正长岩、石英二长斑岩和黑云母石英二长岩(高文利等, 2015)。

本孔地层为火成岩,不同岩石的测井特征相互重叠,故需多参数联合交会方能有效区分不同岩石的测井响应特征,选择参与交会的测井参数为:自然伽马、视电阻率、极化率、密度、纵波速度和磁化率(岩体井段未测极化率,故无此方法的交会图)。

通过砖桥组测井响应特征交会图可得出如下结论:自然伽马能有效的将高岭石化粗安岩与其他岩石区分开(图 1a);视电阻率结合极化率能将大部分硬石膏化粗安岩与其他岩性区分出来(图 1b);密度结合纵波速度能识别部分黄铁矿化粗安岩(图 1c);极化率结合磁化率能将识别部分辉石粗安岩(图 1d)。对各岩石的物性特征值范围进行统计,结果见表 1。

表 1 砖桥组岩石物性特征值统计表

Table 1 The statistics of physical characteristics of Zhuangqiao formation

	粗安岩	高岭化粗安岩	黄铁矿化粗安岩	硬石膏化粗安岩	辉石粗安岩
自然伽马(API)	160 ~ 180	240 ~ 280	160 ~ 200	160 ~ 200	170 ~ 200
视电阻率($\Omega \cdot m$)	200 ~ 600	40 ~ 200	200 ~ 300	100 ~ 200	200 ~ 400
纵波速度(m/s)	5400 ~ 6200	4800 ~ 5200	5700 ~ 5800	5200 ~ 5600	5600 ~ 6000
密度(g/cm^3)	2.8 ~ 2.84	2.7 ~ 2.74	2.76 ~ 2.8	2.8 ~ 2.88	2.8 ~ 3
磁化率(10^{-5} CGS)	150 ~ 200	160 ~ 200	320 ~ 360	140 ~ 160	50 ~ 100
极化率(%)	0.4 ~ 0.8	1.2 ~ 2	0.7 ~ 0.9	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6

岩体测井响应特征交会图可分析出如下结论:自然伽马能将大部分正长岩识别出来(图 2a);视电阻率能将石英二长斑岩与其他岩性区分开(图 2a);纵波速度结合密度能将石英正长岩、石英二长斑岩和黑云母石英二长岩这三种岩石区分开(图 2b);磁化率识别效果较好,能将正长岩和石英正长岩与石英二长斑岩和黑云母石英二长岩区分开(图 2c)。下面对各岩石的物性特征值范围进行了统计,结果见表 2。

表 2 岩体岩石物性特征值统计表

Table 2 The statistics of physical characteristics of bedrock

	正长岩	石英正长岩	石英二长斑岩	黑云母石英二长岩
自然伽马(API)	600 ~ 1000	300 ~ 500	300 ~ 400	300 ~ 500
视电阻率($\Omega \cdot m$)	2000 ~ 4000	5000 ~ 7000	11000 ~ 11600	5000 ~ 6000
纵波速度(m/s)	5700 ~ 5900	5760 ~ 5800	5800 ~ 5920	5840 ~ 5960
密度(g/cm^3)	2.6 ~ 2.8	2.66 ~ 2.7	2.76 ~ 2.78	2.68 ~ 2.76
磁化率(10^{-5} CGS)	120 ~ 200	140 ~ 160	360 ~ 400	350 ~ 450

综上所述,本孔各岩石存在一定的物性差异,这为下一步采用 Bayes 判别方法进行数值建模,从而实现岩性的自动识别奠定了理论基础。

2 岩性识别

2.1 岩性识别模型建立

庐枞矿集区科学钻探 ZK01 孔复杂岩性,通过交会图等技术对测井响应特征分析,提取了不同岩性不同测井曲线测井的特征,在此基础上分砖桥组和岩体两个模块来建立判别模型。选用建模参数为纵波速度(V_p)、自然伽马(GR)、视电阻率(R_t) 和密度(DEN);磁化率对磁性矿物反映灵敏,而对非磁性岩石的岩性变化识别应用效果较差,同时本孔极化率值小,对岩性变化反映不理想,故未选取磁化率和极化率参与建模。

建模数据是依据地质编录资料,从测井资料中选取相对应的深度段测井数值做为样品,样品数量及分布如表 3 所示。

利用样本数据,采用 Bayes 判别方法,通过计算各类的均值和协方差矩阵(Vapnik, 2009),建立了两个模块的判别函数,如表 4 和表 5 所示。

表 3 原始样本数目

Table 3 The original number of samples

砖桥组		岩体	
岩性	数目(个)	岩性	数目(个)
粗安岩	30	正长岩	45
高岭石化粗安岩	32	石英正长岩	39
黄铁矿化粗安岩	30	石英二长斑岩	30
硬石膏化粗安岩	28	黑云母石英二长岩	51
辉石粗安岩	21		

表 4 砖桥组各主要岩性判别模型

Table 4 The lithology discriminant model of Zhuanqiao formation

岩性	判别函数
粗安岩	$G1 = -3173.594 + 0.015Vp + 1.965GR + 0.093Rt + 2096.762DEN$
高岭石化粗安岩	$G2 = -3198.598 + 0.006Vp + 2.416GR + 0.097Rt + 2089.463DEN$
黄铁矿化粗安岩	$G3 = -3142.218 + 0.018Vp + 2.035GR + 0.093Rt + 2075.457DEN$
硬石膏化粗安岩	$G4 = -3158.531 + 0.012Vp + 2.104GR + 0.093Rt + 2088.623DEN$
辉石粗安岩	$G5 = -3457.022 + 0.013Vp + 2.239GR + 0.107Rt + 2179.409DEN$

表 5 岩体各主要岩性判别模型

Table 5 The lithology discriminant model of bedrock

岩性	判别函数
正长岩	$G1 = -4217.326 + 0.788Vp + 0.241GR - 0.012Rt + 1366.115DEN$
石英正长岩	$G2 = -4084.223 + 0.788Vp + 0.224GR - 0.009Rt + 1316.117DEN$
石英二长斑岩	$G3 = -4230.634 + 0.798Vp + 0.227GR - 0.007Rt + 1341.865DEN$
黑云母石英二长岩	$G4 = -4214.992 + 0.801Vp + 0.228GR - 0.01Rt + 1337.878DEN$

判别方法为: 将样本分别带入相应模型的函数中, 计算出 G_i 的数值, 哪个数值最大, 该样本即属于其对应的那一类. 对原始样本进行回判性分析, 结果如表 6 和表 7 所示.

砖桥组岩性的判别函数对原始样本的回判正确率为 85.1%, 对原始样本交叉确认回判的正确率为 83.7%, 两个回判的正确率数值接近, 说明模型稳定. 从表 6 中可以看出, 粗安岩、高岭石化粗安岩、黄铁矿化粗安岩、硬石膏化粗安岩和辉石粗安岩的交叉确认回判正确率分别为 93.3%、100%、50%、82.1% 和 95.2%. 其中黄铁矿化粗安岩判别正确率较低, 分析原因为本孔粗安岩的黄铁矿化程度较低, 加之黄铁矿化层位较少, 参与计算数据量少, 故很难将其与粗安岩区分开来.

表 6 砖桥组样本回判结果

Table 6 The samples discriminant result of Zhuanqiao formation

预测样本数							
		类型	粗安岩	高岭石化粗安岩	黄铁矿化粗安岩	硬石膏化粗安岩	辉石粗安岩
原始样本回判结果	个数	粗安岩	28	0	2	0	0
		高岭石化粗安岩	0	32	0	0	0
		黄铁矿化粗安岩	14	0	15	1	0
		硬石膏化粗安岩	0	0	3	25	0
		辉石粗安岩	0	0	0	1	20
	百分比	粗安岩	93.3	0.0	6.7	0.0	0.0
		高岭石化粗安岩	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
		黄铁矿化粗安岩	46.7	0.0	50.0	3.3	0.0
		硬石膏化粗安岩	0.0	0.0	10.7	89.3	0.0
		辉石粗安岩	0.0	0.0	0.0	4.8	95.2
交叉确认回判结果	个数	粗安岩	28	0	2	0	0
		高岭石化粗安岩	0	32	0	0	0
		黄铁矿化粗安岩	14	0	15	1	0
		硬石膏化粗安岩	0	1	4	23	0
		辉石粗安岩	0	0	0	1	20
	百分比	粗安岩	93.3	0.0	6.7	0.0	0.0
		高岭石化粗安岩	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
		黄铁矿化粗安岩	46.7	0.0	50.0	3.3	0.0
		硬石膏化粗安岩	0.0	3.6	14.3	82.1	0.0
		辉石粗安岩	0.0	0.0	0.0	4.8	95.2

表 7 岩体样本回判结果
Table 7 The samples discriminant result of Bedrock

		预测样本数				
		类型	正长岩	石英正长岩	石英二长斑岩	黑云母石英二长岩
原始样本回判结果	个数	正长岩	39	4	0	2
		石英正长岩	2	30	4	3
		石英二长斑岩	0	5	25	0
		黑云母石英二长岩	0	8	0	43
	百分比	正长岩	86.7	8.9	0.0	4.4
		石英正长岩	5.1	76.9	10.3	7.7
		石英二长斑岩	0.0	16.7	83.3	0.0
		黑云母石英二长岩	0.0	15.7	0.0	84.3
交叉确认回判结果	个数	正长岩	38	4	0	3
		石英正长岩	2	30	4	3
		石英二长斑岩	0	5	25	0
		黑云母石英二长岩	0	8	0	43
	百分比	正长岩	84.4	8.9	0.0	6.7
		石英正长岩	5.1	76.9	10.3	7.7
		石英二长斑岩	0.0	16.7	83.3	0.0
		黑云母石英二长岩	0.0	15.7	0.0	84.3

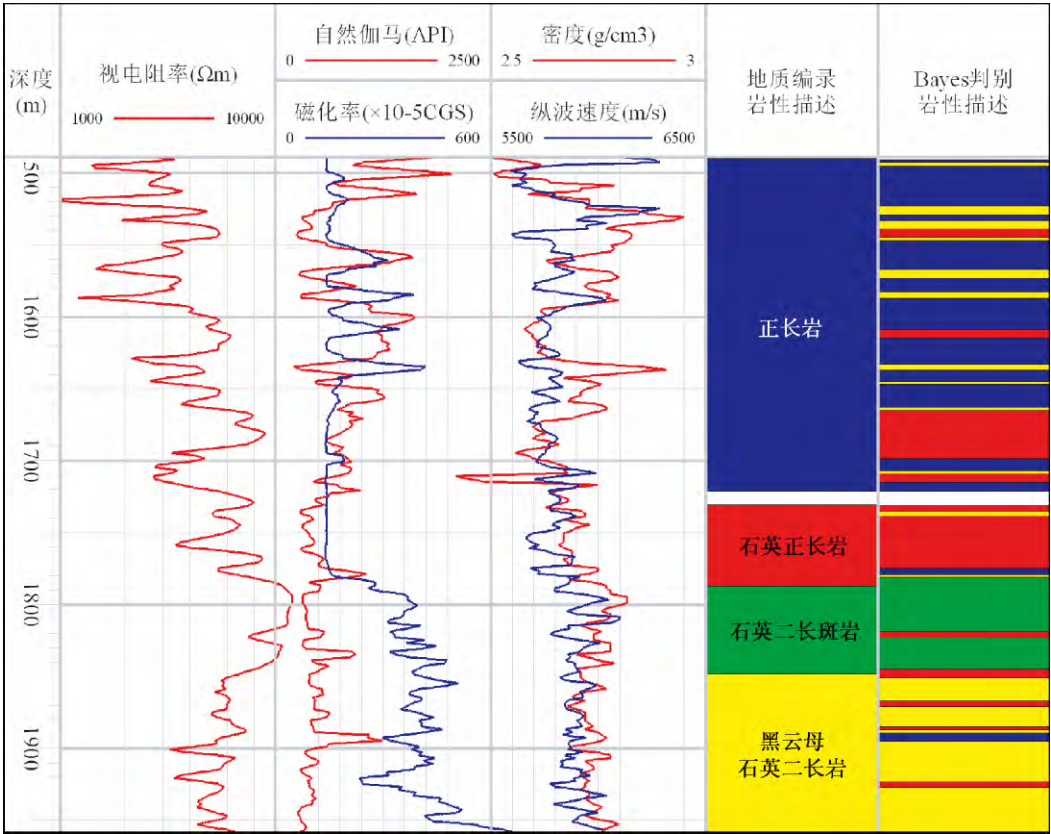


图 4 岩体 Bayes 判别结果图
Fig. 4 The Bayes discriminant result of bedrock

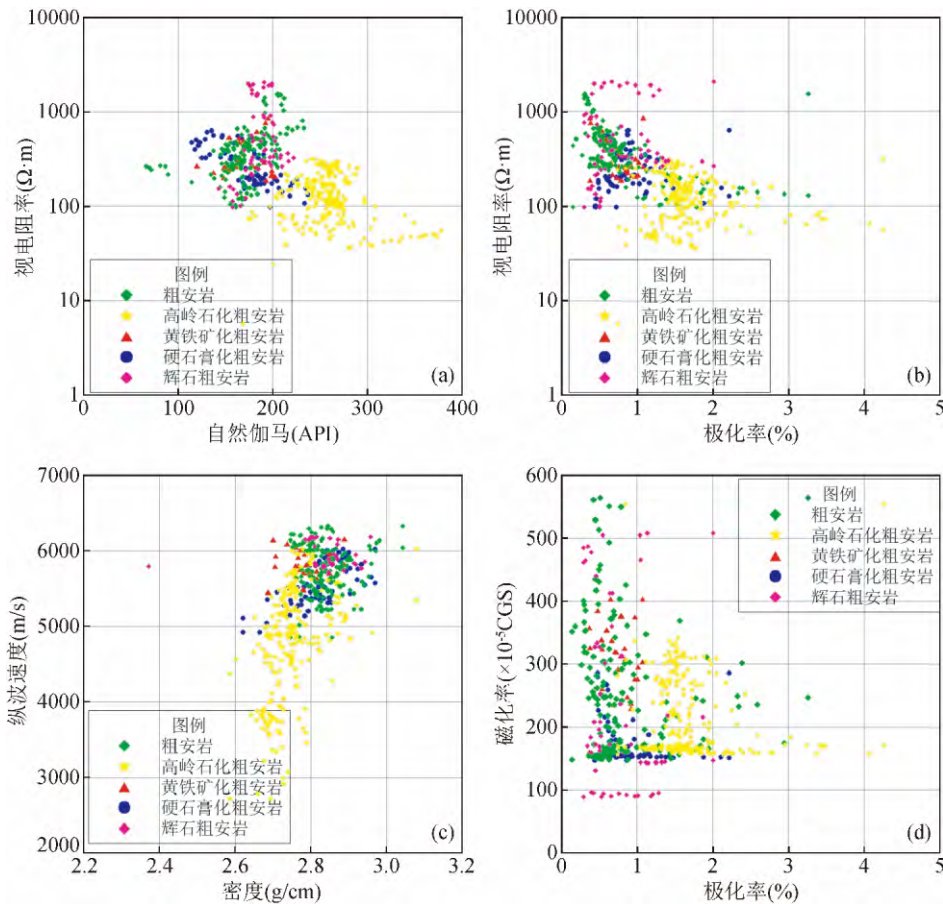


图1 砖桥组测井响应特征交会图

(a) 自然伽马-视电阻率交会图; (b) 极化率-视电阻率交会图; (c) 密度-纵波速度交会图; (d) 极化率-磁化率交会图.

Fig. 1 Logging dataCrossplots of Zhuangqiao formation

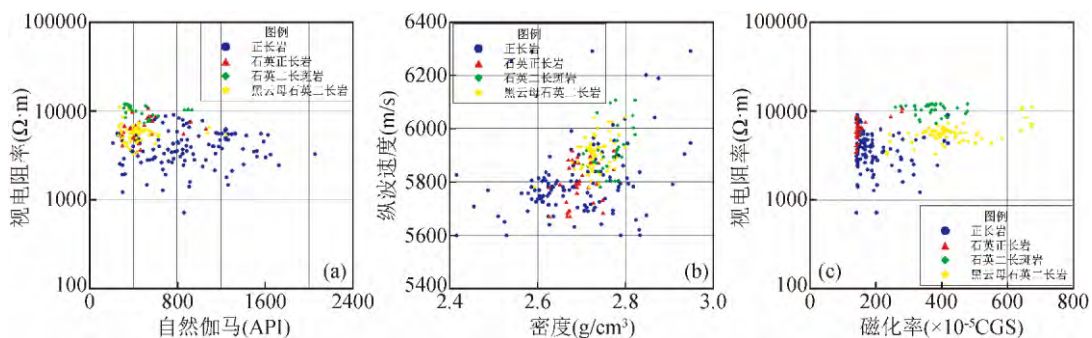
(a) GR-RTCrossplots; (b) η -RT Crossplots; (c) DEN-Vp Crossplots; (d) η -M Crossplots.

图2 岩体测井响应特征交会图

(a) 自然伽马-视电阻率交会图; (b) 密度-纵波速度交会图; (c) 磁化率-视电阻率交会图.

Fig. 2 Logging dataCrossplots of Bedrock

(a) GR-RTCrossplots; (b) DEN-Vp Crossplots; (c) M-RT Crossplots.

岩体岩性的判别函数对原始样本的回判正确率为 83% ,对原始样本交叉确认回判的正确率为 82.4% ,两个回判的正确率数值接近,说明模型稳定.从表 7 中可以看出,正长岩、石英正长岩、石英二长斑岩和黑云母石英二长岩的交叉确认回判正确率分别为 84.4%、76.9%、83.3% 和 84.3% .石英正长岩的判别正确率相对较低,说明本孔石英正长岩中所含石英矿物较少,物性特征差异不明显.

2.2 应用实例

利用 Bayes 判别方法建立的两模型,对 ZK01 孔测井数据进行了判别分析,判别结果如图 3、图 4 所示.图中第 5 道为地质编录结果,第 6 道为 Bayes 判别结果.

砖桥组岩性的判别结果中,高岭石化粗安岩的识别效果最好,其他岩性的识别受曲线异常变化影响与编录资料偶有差别,但大体上基本一致.粗安岩识别错误的地层的视电阻

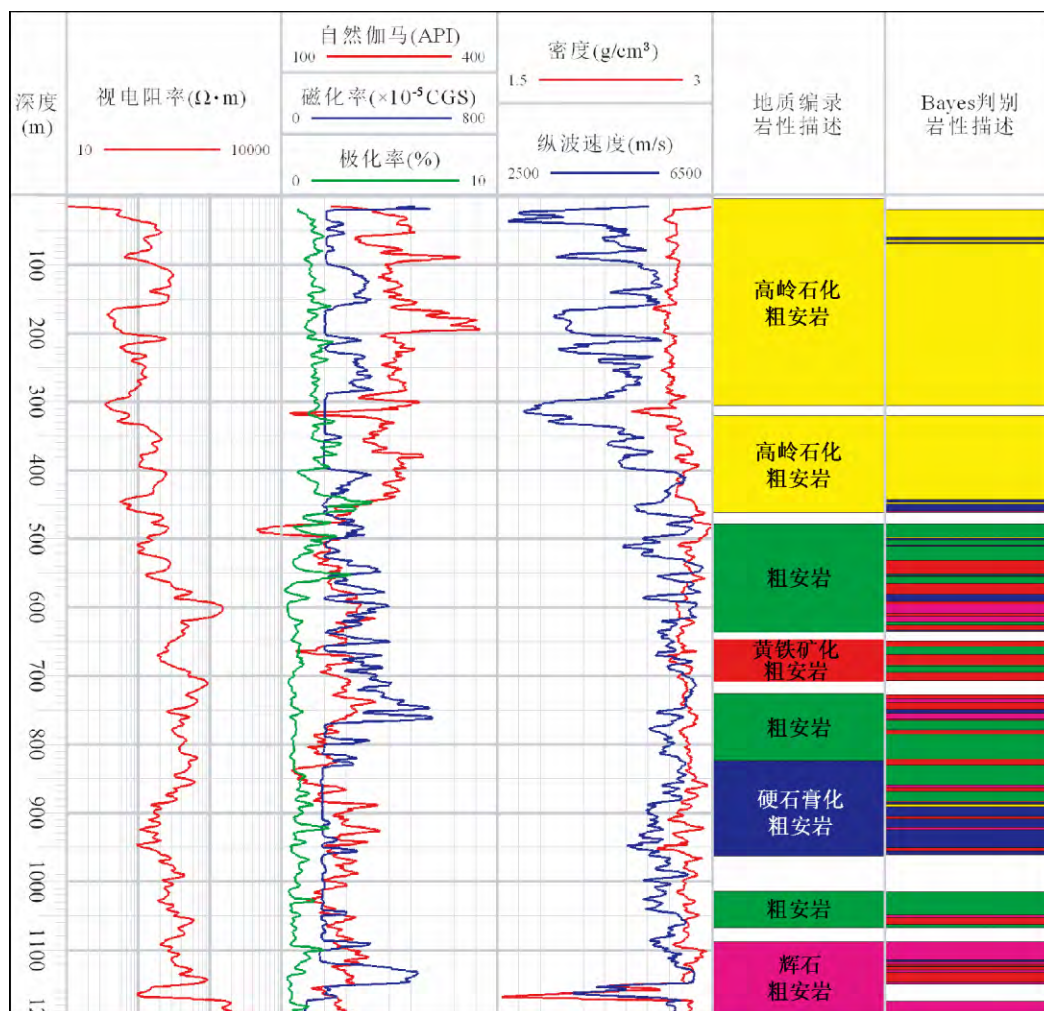


图3 砖桥组 Bayes 判别结果图

Fig. 3 The Bayes discriminant result of Zhuangqiao formation

率值、自然伽马值和纵波速度值比识别正确的地层偏大,分析原因这些地层岩石为非纯的粗安岩,故测井值受所含有的其他矿物或岩石矿化影响,数值与纯粗安岩石有所差别,其他识别错误的地层也存在类似情况。1089 ~ 1170 m 井段地质编录为辉石粗安岩,1150 ~ 1170 m 段受井眼扩大影响,视电阻率、密度和纵波速度数值明显偏离正常值,故未做 Bayes 判别;1120 ~ 1150 m 段大部分被识别为黄铁矿化粗安岩,分析该段井壁有含磁性体,从磁化率数值明显变大可以验证。

岩体岩性的判别结果与地质编录资料大体上也基本一致。其中 1665 ~ 1699 m 地质编录显示该段岩石主要由正长石为主(60% ~ 70%)、斜长石(15% ~ 20%)和石英(10% ~ 15%)组成,而 Bayes 识别结果为石英正长岩,与实际情况相符;黑云母石英二长岩部分被识别为正长岩类,推断本层碱性长石含量比斜长石含量略微偏低。

3 结论与建议

3.1 虽然该孔钻遇岩性类型多、岩性复杂,但基于交会图等技术分析各种岩性测井响应特征,提取各种岩性的物性特征值,为岩性识别打下了良好的基础。

3.2 建立了砖桥组和岩体组相关岩性的 Bayes 自动判别模型,其回判正确率分别为 85.1% 和 83%。

3.3 基于建立的判别模型,实际应用,全井段岩性判别符合率可以达到 70%,取得了较好的应用效果。

3.4 由于训练样本的限制,本文只提供了 2 组地层 9 种岩性的判别模型,但随着今后该地区勘探力度的加大,将收集到更多的实测资料,增大训练样本的数量,能提高判别函数的准确性和代表性,从而逐步完善庐枞矿集区岩性识别模型。

致谢 本文得到了中国地质大学(武汉)潘和平教授和马火林副教授的细心指导,安徽省地质调查院杜建国教授和吴明安教授提供了钻孔地质资料,在此表示衷心的感谢。同时,感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Chang Y F, Liu P X, Wu Y C. 1991. The Copper-Iron Belt of the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River (in Chinese) [M]. Beijing: Geological Publishing House.

- Chapelle O, Vapnik V, Bousquet O, *et al.* 2002. Choosing multiple parameters for support vector machines [J]. *Machine Learning*, 46 (1-3): 131-159.
- Chen J, Fan X M, Mo X W. 2007. The resrarch of volcanioclastic rock lithologic identification based logging [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese)*, 37(S): 99-101, 113.
- Gao W L, Kong G S, Pan H P, *et al.* 2015. Geophysical logging in scientific drilling borehole and find of deep Uranium anomaly in Luzong basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 58(12): 4522-4533, doi: 10.6038/cjg20151215.
- Goldberg D E, Holland J H. 1988. Genetic algorithms and machine learning [J]. *Machine Learning*, 3(2-3): 95-99.
- Huelsenbeck J P, Ronquist F. 2001. MrBayes: Bayesian inference of phylogenetic trees [J]. *Bioinformatics*, 17(8): 754-755.
- Li X Z, Wang C H, Deng H Y. 2011. A comparison of distance and Fisher discrimination methods applied to identifying potential landslides [J]. *Rock and Soil Mechanics (in Chinese)*, 32(1): 186-192.
- Lü Q T, Dong S W, Shi D N, *et al.* 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt: A review from SinoProbe [J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 30(4): 889-906.
- Lü Q T, Dong S W, Tang J T, *et al.* 2015. Multi-scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depth: A synthesis from SinoProbe-03 [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 58(12): 4319-4343, doi: 10.6038/cjg2015120.
- Niu Y X, Pan H P, Wang W X, *et al.* 2004. Geophysical well logging in main hole (0~2000 m) of Chinese Continental Scientific Drilling [J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 20(1): 165-178.
- Pagel M, Meade A, Barker D. 2004. Bayesian estimation of ancestral character states on phylogenies [J]. *Systematic Biology*, 53(5): 673-684.
- Pan W, Gu S F, Wei J. 2010. To identify igneous rock lithology with subsection crossplot technique [J]. *World Well Logging Technology (in Chinese)*, (4): 20-22, 39.
- Ronquist F, Huelsenbeck J P. 2003. MrBayes 3: Bayesian phylogenetic inference under mixed models [J]. *Bioinformatics*, 19(12): 1572-1574.
- Shao X G, Yang H Z, Chen G. 2006. Parameters selection and application of support vector machines based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Control Theory & Applications*, 23(5): 740-743, 748.
- Vladimir N. Vapnik. 2009. *Statistical Learning Theory (in Chinese)* [M]. Xu J H, Zhang X G Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry.
- Zhang L. 2012. To identify the lithology with Bayesian discriminant analysis method [J]. *Computer Applications of Petroleum (in Chinese)*, (1): 41-43.
- Zhang S, Wu M A, Wang J, *et al.* 2014. The Mineralization Related with the Syenite in Luzong Basin, Anhui Province [J]. *Acta Geologica Sinica (in Chinese)*, 88(4): 519-531.

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带 [M]. 北京: 地质出版社.
- 陈军, 范晓敏, 莫修文. 2007. 火山碎屑岩岩性的测井识别方法 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(S): 99-101, 113.
- 高文利, 孔广胜, 潘和平, 等. 2015. 庐枞盆地科学钻探地球物理测井及深部铀异常的发现 [J]. *地球物理学报*, 58(12): 4522-4533, doi: 10.6038/cjg20151215.
- 李秀珍, 王成华, 邓宏艳. 2011. DDA 法和 Fisher 判别法在潜在滑坡判别中的应用比较 [J]. *岩土力学*, 32(1): 186-192.
- 吕庆田, 董树文, 史大年, 等. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型-深部探测(SinoProbe)综述 [J]. *岩石学报*, 30(4): 889-906.
- 吕庆田, 董树文, 汤井田, 等. 2015. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿-长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展 [J]. *地球物理学报*, 58(12): 4319-4343, doi: 10.6038/cjg20151201.
- 牛一雄, 潘和平, 王文先, 等. 2004. 中国大陆科学钻探主孔(0-2000m)地球物理测井 [J]. *岩石学报*, 20(1): 165-178.
- 潘伟, 顾绍富, 卫娟. 2010. 分段应用交会图技术识别火成岩岩性 [J]. *国外测井技术*, (4): 20-22, 39.
- 邵信光, 杨慧中, 陈刚. 2006. 基于粒子群优化算法的支持向量机参数选择及其应用 [J]. *控制理论与应用*, 23(5): 740-743, 748.
- Vapnik V N. 2009. *统计学习理论* [M]. 许建华, 张学工译. 北京: 电子工业出版社.
- 张磊. 2012. 利用贝叶斯判别分析方法识别岩性 [J]. *石油工业计算机应用*, (1): 41-43.
- 张舒, 吴明安, 汪晶, 等. 2014. 安徽庐枞盆地与正长岩有关的成矿作用 [J]. *地质学报*, 88(4): 519-531.