doi: 10.11720/wtyht.2023.1128

杨朝义,朱乾坤,揭绍鹏,等.云南普朗铜矿井孔测井资料综合应用[J].物探与化探,2023,47(1):14-21.http://doi.org/10.11720/wtyht.2023. 1128

Yang C Y, Zhu Q K, Jie S P, et al. Comprehensive application of borehole log data of the Pulang copper deposit, Yunnan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(1):14-21. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023. 1128

## 云南普朗铜矿井孔测井资料综合应用

### 杨朝义<sup>1,2</sup>,朱乾坤<sup>1,2</sup>,揭绍鹏<sup>3</sup>,孔垂爱<sup>1,2</sup>,沙有财<sup>1,2</sup>,钟志勇<sup>1,2</sup>, 沈啟武<sup>1,2</sup>,陈志军<sup>2,4</sup>,马火林<sup>2,3</sup>

(1. 云南迪庆有色金属有限责任公司,云南 香格里拉 674400; 2. 中国地质大学(武汉)普朗铜矿 实践教学与创新人才培养基地,云南 香格里拉 674400; 3. 中国地质大学(武汉) 地球物理与空间 信息学院,湖北 武汉 430074; 4. 中国地质大学(武汉)资源学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**云南普朗铜矿的铜矿化体和矿体主要分布于普朗复式斑岩体内,存在复杂的多期发育。为了精细了解铜矿 储层的地球物理响应特征、裂隙发育特征,为普朗铜矿的勘探和开采提供精细的矿体特征、裂隙发育及层位埋深等 方面的信息,通过对普朗铜矿的钻孔测井数据采集和综合评价,结合钻孔编录、部分岩心样品资料,利用数学统计、 三维交会图、卷积神经网络及裂隙参数计算等开展了普朗铜矿测井响应特征分析、岩性识别和裂隙特征分析的研 究。研究区石英二长斑岩、石英闪长玢岩、角岩等三类主要岩石地层的测井响应特征表明,角岩地层的电阻率相对 较高,石英闪长玢岩地层、石英二长斑岩地层的电阻率依次相对偏低,在裂隙发育层段或较为破碎的层段,电阻率 降低明显。石英二长斑岩地层的充电率(极化率)相对较高,最高达 10%。角岩地层的放射性强度相对较高,石英 闪长玢岩地层、石英二长斑岩地层的放射性强度相对偏低。采用卷积神经网络对三类主要岩石地层进行测井岩性 识别分析,准确率为 97.94%。利用双侧向电阻率测井资料对地层裂隙进行判别,裂隙发育层段的电阻率会明显降 低,且深侧向、浅侧向电阻率差异明显;在铜品位较高的石英二长斑岩地层,其电阻率相对偏低,高角度裂隙比较发 育。相关研究结果对于普朗铜矿的矿体特征识别、矿体开采具有意义。

关键词:普朗铜矿;地球物理测井;测井响应;岩性识别

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2023)01-0014-08

#### 0 引言

普朗铜矿位于云南省西北部的迪庆藏族自治州 香格里拉市北东部,地处青藏高原东南缘、滇西北横 断山脉东北部,临近三江并流世界遗产保护区。矿 区人烟稀少、山高林密,海拔最高4702 m,最低 3450 m。普朗铜矿为大型—超大型复式斑岩体矿 床<sup>[1]</sup>,矿山生产规模为1250×10<sup>4</sup> t/a,于2000 年开 展普查工作,经历了主矿体勘探、整装勘查、探矿及 采选、投产运行等阶段,确定了 I 号斑岩体主矿体的 基本形态,但 I 号斑岩体与石英闪长玢岩、角岩接触 带部分仍未得到完全控制。普朗铜矿床采用自然崩 落法进行开采,需要进一步深化矿化富集规律研究, 推进"探边摸底"深部找矿、岩性的识别和类型判别 等工作。在普朗铜矿勘查阶段,已经开展了航磁、重 力、高精度磁测、瞬变电磁和激电测量等地球物理勘 探工作,测量得到的各类地球物理响应特征和研究 区铜矿(化)体引起的矿致异常密切相关,存在低电 阻率、中一高极化(激电异常)等典型电性特征。前 期在矿区基本没有开展钻孔测井工作,目前,为了进 行"探边摸底"深部找矿和普朗复式斑岩体内部特 征调查需要,根据补充勘探的要求开展了钻孔测井 综合研究。

收稿日期: 2022-03-23; 修回日期: 2022-10-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0600201);国家自然科学基金项目(41630317)

第一作者:杨朝义(1987-),男,采矿工程师,主要从事矿产资源开发及生产技术管理工作。Email: 342235766@qq.com

通讯作者: 马火林(1970-), 男, 博士, 副教授。 Email: mhl70@163. com

测井采集的地球物理参数可以较好地应用于金 属矿深部勘探及精细研究<sup>[2-6]</sup>。一般来说,识别岩 性最直接的方法是对岩心样品进行观测,但也存在 岩心破碎或取心不完全的情况,使得岩性与地层埋 深对应等方面会出现差异,利用测井资料开展岩性 识别,有助于对岩性的判别及深度归位。同时,自然 伽马能谱有助于对断层岩性的分析<sup>[7]</sup>,而 CNN 在岩 性识别中具有高效和准确性[8-9]。

此次基于普朗复式斑岩体内部的结构面分布规 律、裂隙系统的调查和研究需要,利用矿区勘探钻孔 进行测井数据采集和评价的先导性工作,为矿区铜 矿储层的地球物理特征分析提供基础数据支撑。

普朗铜矿地质特征 1

云南普朗铜矿位于普朗—红山铜多金属矿亚带 南缘,印支期义敦—中甸岛弧带南段,总体构造近 NNW 向展布。区域自上而下主要出露三叠系曲嘎 寺组 $(T_3q)$ 、图姆沟组 $(T_3t)$ 、喇嘛垭组 $(T_3lm)$ 地层, 是印支期—燕山早期浅成—超浅成中酸性矿化斑岩 的直接围岩(图1)。区内总体为被断裂破坏的红山 复式背斜,由一系列 NNW 向紧密线性褶皱和同向 断裂组成,地质环境表明该处利于出现大型矿 床<sup>[10]</sup>。



Fig. 1 Tectonic and geological map of the study area (modified from reference  $\lceil 10 \rceil$ )

由于岩浆多次侵位及断裂构造长期活动,受到 岩浆岩、岩浆侵位地层、热液蚀变、热液运移以及矿 质沉淀的构造空间控制,矿区内分布 NW 向和 NEE 向2组断裂,它们控制了斑(玢)岩体及矿(化)体的 产出。根据矿化体(矿体)产出的位置,将其划分为 南矿段和北矿段<sup>[11]</sup>。

普朗铜矿为热液蚀变斑岩型铜矿床,成矿作用 发生在复式斑岩体内。成矿元素以铜为主,伴有金、 银、钼、硫等有用组分。已查明有 14 种金属矿物和 16种脉石矿物,其中金属矿物有硫化物、氧化物、碳 酸盐类、自然元素等:含铜矿物主要为黄铜矿,其次 为孔雀石,以及微量的铜蓝、斑铜矿等<sup>[12]</sup>。主要岩 性为石英二长斑岩、石英闪长玢岩、角岩等三类。

#### 普朗铜矿测井响应特征 2

结合普朗铜矿钻孔的特点以及探测目的,本次 测井工作采用 MOUNT 公司 Matrix 便携式测井系 统,包括主机、测井软件、绞车和各种井下探头等:采 集的常规测井数据有 10 种:深侧向电阻率(RD)、浅 侧向电阻率(RS)、自然伽马(GR)、钍( $^{232}$ Th)、钾 (<sup>40</sup>K)、铀(<sup>238</sup>U)、井径(CAL)、井斜(Dev)、方位角 (Azimuth)和充电率( $M_a$ 、极化率)等。

在研究区采集了多口井的测井数据,其中 ZK18XX 的测井综合图如图 2 所示。该井 350~450 m 井段 Cu 品位较高且层段发育不连续,其中 395~ 420 m 为一段较厚的高 Cu 品位层段,相对应的放射 性自然伽马数值偏低,深侧向、浅侧向电阻率均偏低  $(n \times 10^2 \,\Omega \cdot m)$ ,且2组电阻率数值差异明显,表明 该层段存在裂隙发育。

参考岩性识别的结果,对研究区石英二长斑岩、 石英闪长玢岩、角岩等三类岩石地层的测井数据进 行了统计分析。图 3 为这三类岩石地层的测井曲线 图,图4为三类岩性地层的3种测井参数及铜品位 的三维交会图:三类岩性的测井响应和铜品位参数 特征见表 1,表中给出的电阻率为深侧向电阻率 (RD)数值。

综合来看,角岩地层的自然伽马数值相对高一 些,即放射性强度相对高一些,石英闪长玢岩地层、 石英二长斑岩地层的放射性强度相对偏低一些;石 英二长斑岩地层的充电率(极化率)相对高一些,角 岩地层、石英闪长玢岩地层的充电率(极化率)相对 偏低一些:角岩地层的深侧向电阻率相对较高,石英 闪长玢岩地层、石英二长斑岩地层依次相对偏低。 深侧向电阻率与充电率(极化率)的关系总体成近









47 卷

Fig. 3 The logging curves of quartz diorite porphyrite, quartz monzonite porphyry and hornstone formation





#### Fig. 4 Three-dimensional cross plot of three logging parameters and copper grade for three lithological formations

#### 表1 三种岩性的测井响应和铜品位参数特征 Table 1 Characteristics of logging response and copper grade parameters for three lithologies

岩性	自然伽马/API	$M_a/\%$	$RD/(\Omega \cdot m)$	w(Cu)/%
	分布范围 (平均值)	分布范围 (平均值)	分布范围 (平均值)	分布范围 (平均值)
石英二	31~203	1.9~10.1	204~2931	0.3~1.2
长斑岩	(135)	(4.1)	(1223)	(0.42)
石英闪	107~219	0.9~3.9	1302~3901	0.33~0.39
长玢岩	(159)	(2.8)	(2015)	(0.36)
角岩	116~238	2.3~4.7	1537~5972	0.32~0.52
	(173)	(3.1)	(3180)	(0.39)

似的反比关系,即充电率(极化率)越高,电阻率相 对偏低;电阻率高,充电率(极化率)会偏低。

#### 3 测井资料岩性识别研究

结合钻孔编录资料,利用测井数据进行岩性识别,有助于对各岩性地层的测井响应特征进行综合统计研究。卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)是一种在深度学习技术中占有重要地位的网络模型,属于前反馈式的神经网络,具有很强的特征提取能力,在图像处理、语音识别、目标跟踪与检测等领域取得了良好的应用效果,也因此被地质工作者应用到岩性识别中,并取得了较好的成效。图 5 为卷积神经网络结构示意<sup>[13]</sup>。

本文选取研究区 5 口井的测井数据及综合岩性 编录资料,建立起测井资料和石英二长斑岩、石英闪 长玢岩、角岩等三类不同岩性的映射关系,开展岩性





识别研究。为了最大化利用测井资料,使用了井径(CAL)、自然伽马(GR)、深侧向电阻率(RD)、浅侧向电阻率(RS)、充电率(M<sub>a</sub>)、钾含量(<sup>40</sup>K)、钍含量(<sup>232</sup>Th)和铀含量(<sup>238</sup>U)等8种测井数据;另外,将角岩、石英二长斑岩、石英闪长玢岩这三类岩性的标签(Label)分别设置为0、1、2,建立的样本数据集部分数据如表2所示。

9.8

171.4

1691.3

1910.7

3.0

5.4

25.6

5.8

2

本次岩性识别网络训练共使用角岩测井数据 1010组,石英二长斑岩测井数据1043组,石英闪 长玢岩测井数据1016组,其中取各岩性数据组中 的70%作为训练样本,剩下的30%作为测试样本。

根据本次实验数据的混淆矩阵统计(表3),利用 CNN 进行岩性识别的准确率为97.94%。

				8					
岩性	CAL/cm	<i>GR∕</i> API	$RD/(\Omega \cdot m)$	$RS\!/(\Omega \boldsymbol{\cdot} \mathbf{m})$	$M_a/\%$	$w({}^{40}{ m K})/\%$	$w(^{232}\text{Th})/10^{-6}$	$w(^{238}U)/10^{-6}$	Label
	8.4	195.3	5343.6	2122.7	4.5	2.9	12.4	5.6	0
	8.4	201.2	5343.6	2182.5	4.7	3.1	18.8	9.1	0
	8.4	170.2	5000.0	2182.5	4.7	2.1	13.0	10.4	0
角岩	8.3	175.3	4638.3	2302.5	4.6	4.5	0.3	8.9	0
	8.5	194.8	4638.3	2405.9	4.3	1.8	31.3	8.5	0
	8.6	198.3	4810.1	2405.9	4.3	1.9	26.8	1.0	0
	8.4	190.6	5972.9	2270.1	4.5	5.2	9.9	11.0	0
	8.5	201.5	5972.9	2256.6	4.3	3.0	1.3	25.9	0
	8.4	187.6	4710.3	2256.6	4.3	0.7	15.2	11.2	0
	8.4	175.9	4227.2	1883.8	4.1	8.5	9.9	1.1	0
	7.7	100.5	300.1	116.7	8.2	1.7	7.5	3.4	1
	7.7	98.6	300.1	116.7	9.0	1.4	8.3	2.8	1
	7.7	100.5	269.5	130.7	9.0	1.4	5.7	2.6	1
	7.7	106.2	269.5	130.7	9.0	1.4	5.1	3.3	1
デサード専山	7.7	106.2	256.6	112.6	7.3	1.8	4.9	6.7	1
<b>白央</b> 大斑宕	7.7	104.3	346.4	229.7	7.0	2.2	6.1	5.5	1
	7.7	104.3	287.6	241.9	6.2	2.5	6.8	4.7	1
	7.7	108.1	287.6	241.9	6.2	2.8	10.6	4.1	1
	7.7	100.5	244.7	222.7	4.6	3.3	11.9	7.0	1
	7.7	98.6	244.7	222.7	4.6	2.2	6.1	6.4	1
	9.7	147.2	2301.8	1237.4	3.2	3.5	1.6	14.1	2
	9.9	161.8	2167.1	1348.2	3.5	3.4	4.8	3.5	2
	9.8	178.8	2117.9	1385.7	3.6	3.2	2.8	12.7	2
	9.7	140.8	1988.1	1495.9	3.4	3.9	2.6	4.8	2
	9.9	148.5	1899.8	1514.2	3.3	3.8	14.4	0.5	2
<b>石央内</b> 大坊石	9.8	157.6	1783.3	1548.3	3.2	1.5	14.7	6.4	2
	9.9	161.9	1745.4	1622.9	3.2	4.7	11.8	2.1	2
	9.8	210.4	1717.8	1686.4	3.1	1.9	3.2	15.0	2
	9.8	134.5	1699.8	1828.1	3.1	3.9	13.1	5.7	2

表 2 CNN 训练样本集部分数据 Table 2 CNN training sample set partial data

表 3 CNN 网络岩性预测混淆矩阵

 Table 3
 CNN confusion matrix for lithology prediction

百分米则	预测类别					
具关关刑	角岩	石英二长斑岩	石英闪长玢岩	总计		
角岩	296	2	2	300		
石英二长斑岩	0	306	3	309		
石英闪长玢岩	7	5	300	312		
总计	303	313	305	921		

#### 4 普朗铜矿裂隙特征分析

金属矿地层的裂缝或裂隙展布信息对于矿体分 布、矿体开发具有意义,而双侧向测井的深、浅电阻 率数据差异程度可以较好地反映地层裂隙的发育情 况。Sibbit 裂缝开度模型<sup>[14]</sup>针对的是水平裂缝和垂 直裂缝,利用双侧向测井资料计算裂隙开度,本文采 用 Sibbit 模型计算普朗铜矿地层的裂隙参数、分析 裂隙类型。

裂隙发育地层的电阻率变化主要受裂隙产状、 裂隙张开度和泥浆侵入深度的影响。裂隙按其倾角 大小一般分为3类:低角度缝(0°~30°),倾斜裂缝 (30°~60°)和高角度缝(>60°)。通常在高阻背景 下,高角度缝的深、浅双侧向电阻率特征表现为正异 常,即 RD>RS;低角度缝则表现为负异常,即 RD< RS。而对于判断裂隙倾角类型,可将 Y 值的大小作 为判断依据。Y 值的计算公式为

$$Y = \frac{(RD - RS)}{\sqrt{RD \cdot RS}}$$

式中:RD、RS分别为深侧向、浅侧向电阻率。

双侧向测井资料除了可以用来判断裂隙倾角范 围外,还可以用来计算裂隙开度。

低角度缝裂隙开度:

$$\begin{cases} W_1 = \frac{R_m}{b} \left( \frac{1}{RD} - \frac{1}{R_b} \right) \\ b = \frac{1}{b}; \end{cases}$$

高角度缝裂隙开度:

$$\begin{cases} W_{\rm h} = \frac{R_m}{a} \left( \frac{1}{RS} - \frac{1}{RD} \right) &, \\ a = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{d_1 + r} - \frac{1}{d_2 + r} \right) &, \end{cases}$$

式中: $W_1$ 、 $W_h$ 分别表示低角度、高角度裂隙开度; $R_m$ 为泥浆滤液电阻率; $R_b$ 表示无裂缝基岩电阻率;h表示双侧向测井仪器主电流厚度,m; $d_1$ 表示双侧向浅 探测深度, $d_2$ 表示双侧向深探测深度;r表示井眼半径。 利用上述计算公式对研究区几口井的双侧向测 井数据进行计算,并结合钻孔取心编录资料绘制交 会图,进行统计分析。图 6 为双侧向测井数据计算 的 Y 值与通过钻孔取心编录裂缝倾角的交会图,表 4 为利用 Y 值判断裂隙类型统计。



图 6 Y 值与裂缝倾角交会图

Fig. 6 Cross plot of Y value and fracture dip angle

表 4 Y 值判断裂隙类型统计

 Table 4
 Statistical table for judging fracture type by Y value

Y值范围	裂隙类型	倾角范 围/(°)	判断 点数	判断正 确点数	判断正 确率/%
<i>Y</i> ≤0.3	低角度缝	0~30	20	14	70.0
0.3< <i>Y</i> ≤0.5	倾斜裂缝	30~60	15	13	86.7
<i>Y</i> >0. 5	高角度缝	60~90	22	19	86.4

根据图 6,设定:当  $Y \le 0.3$ 时,裂隙为低角度 缝,倾角<30°;当 0.3< $Y \le 0.5$ 时,为倾斜裂缝,倾角 在 30°~60°;当 Y > 0.5时,为高角度缝,倾角>60°。 表 4 说明在研究区利用 Y值对高角度缝、倾斜裂缝 进行判断时较有优势,对低角度缝的判断正确率相 对低一些,这可能与研究区整体存在较多高角度裂 隙发育有关,如表 5 所示,ZK18XX 含矿脉体高倾角 占 60.96%。

表 5 ZK18XX 含矿脉体倾角数据

```
Table 5 Dip Angle data of ZK18XX ore-bearing veins
```

倾角范围/(°)	频数/条	占比/%	
0~15	3	0.76	
15~30	31	7.81	
30~45	56	14.11	
45~60	65	16.37	
60~75	143	36.02	
75~90	99	24.94	
总计	397	100	

同样,将高角度缝裂隙开度、低角度缝裂隙开度 与裂缝倾角制作交会图,如图7、图8所示,可以看 到裂隙开度与倾角度数呈现出一定的相关性。另外,通过对几口井中8个构造破碎带裂隙开度的统计,W<sub>1</sub>、W<sub>h</sub>值出现正负变化时,往往指示该层段存在构造破碎带,且参数的绝对值大小与地层的破碎程度成正相关。



图 7 W<sub>1</sub> 与裂缝倾角交会图







#### 5 结论和认识

通过对普朗铜矿钻孔的测井数据采集和综合解 释评价,结合钻孔编录、部分岩心样品测试资料开展 了综合应用研究,取得如下认识:

1) 开展测井资料综合评价对于普朗铜矿的矿 体特征识别、矿体开发具有意义;采用卷积神经网络 进行地层岩性识别具有效果,准确率为97.94%。

2)石英二长斑岩地层的充电率(极化率)相对 偏高,角岩地层、石英闪长玢岩地层的充电率(极化 率)相对偏低。角岩地层的深侧向电阻率相对较高,石英闪长玢岩地层、石英二长斑岩地层依次相对偏低。充电率(极化率)越高,电阻率相对偏低;电阻率高,充电率(极化率)会偏低。Cu品位高相应的地层电阻率会降低。角岩地层的自然伽马数值相对高一些,即放射性强度相对高,石英闪长玢岩地层、石英二长斑岩地层的放射性强度相对偏低。

3)利用双侧向测井数据计算地层的裂隙参数、 分析裂隙类型。普朗铜矿存在较多高角度裂隙发 育,特别在裂隙发育层段或者较为破碎的层段,电阻 率降低明显。相对来说,石英二长斑岩地层裂隙特 别是高角度缝较为发育,石英闪长玢岩地层会存在 几米厚的裂隙不太发育的层段。

#### 参考文献(References):

- [1] 范玉华,李文昌. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征[J]. 中国地质, 2006,33(2): 352-362.
  Fan Y H, Li W C. Geological characteristics of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan[J]. Geology in China, 2006,33 (2): 352-362.
- [2] 潘和平,马火林,蔡柏林,等. 地球物理测井与井中物探[M]. 北京:科学出版社,2009.

Pan H P, Ma H L, Cai B L, et al. Principles of Geophysical Logging and Well Geophysical Exploration [M]. Beijing: Science Press, 2009.

[3] 袁桂琴,熊盛青,孟庆敏,等.地球物理勘查技术与应用研究 [J].地质学报,2011,85(11):1744-1805.

Yuan G Q, Xiong S Q, Meng Q M, et al. Application research of geophysical prospecting techniques [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1744–1805.

[4] 樊彦超.地球物理测井技术在金属矿勘查中的应用[J].世界 有色金属,2018(15):129-130.

Fan Y C. Application of geophysical logging technology in metal ore exploration [J]. World Nonferrous Metals, 2018(15): 129–130.

[5] 周新鹏, 项彪, 邹长春,等. 南岭地区多金属矿 NLSD-2 孔综合地球物理测井研究[J]. 地质学报, 2014, 88(4): 686-694.

Zhou X P, Xiang B, Zou C C, et al. Integrated geophysical logging study on the borehole NLSD-2 of the polymetallic ore in the Nanling District[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(4): 686– 694.

 [6] 郭建宏,杜婷,张占松,等.基于支持向量机与地球物理测井 资料的煤体结构识别方法[J].物探与化探,2021,45(3): 768-777.

Guo J H, Du T, Zhang Z S, et al. The coal structure identification method based on support vector machine and geophysical logging data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3):768-777.

[7] Konate A A, Pan H P, Ma H L, et al. Use of spectral gamma ray as a lithology guide for fault rocks: A case study from the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling project Borehole 4 (WFSD-4) [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2017,128:75-85. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.06.038.

- [8] Xu Z X, Ma W, Peng L, et al. Deep learning of rock images for intelligent lithology identification [J]. Computers & Geosciences, 2021, 154: 104799. https://doi.org/10.1016/j. cageo. 2021. 104799.
- [9] 陈钢花,梁莎莎,王军,等. 卷积神经网络在岩性识别中的应用[J].测井技术,2019,43(2):129-134.
  Chen G H, Liang S S, Wang J, et al. Application of convolutional neural network in lithology identification[J]. Well Logging Technology, 2019,43(2):129-134.
- [10] Yang L Q, He W Y, Gao X, et al. Mesozoic multiple magmatism and porphyry-skarn Cu-polymetallic systems of the Yidun Terrane, Eastern Tethys: Implications for subduction- and transtension-related metallogeny[J]. Gondwana Research, 2018, 62: 144-162. https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.02.009.
- [11] 李文昌, 曾普胜. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型

[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2007,34(4):436-446.

Li W C, Zeng P S. Characteristics and metallogenic model of the Pulang super large porphyry copper deposit in Yunnan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2007, 34(4):436-446.

- [12] 李文昌, 余海军, 尹光候.西南"三江"格咱岛弧斑岩成矿系统[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1129-1144.
  Li W C, Yu H J, Yin G H. Porphyry metallogenic system of Geza arc in the Sanjiang region, southwestern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(4): 1129-1144.
- [13] LeCun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86 (11): 2278 2324. https://doi.org/10.1109/5.726791.
- [14] Sibbit A M, Faivre Q. The dual laterolog response in fractured rocks [C]//Dallas: SPWLA 26<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, 1985: 17-20.

# Comprehensive application of borehole log data of the Pulang copper deposit, Yunnan Province

YANG Chao-Yi<sup>1,2</sup>, ZHU Qian-Kun<sup>1,2</sup>, JIE Shao-Peng<sup>3</sup>, KONG Chui-Ai<sup>1,2</sup>, SHA You-Cai<sup>1,2</sup>, ZHONG Zhi-Yong<sup>1,2</sup>, SHEN Qi-Wu<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-Jun<sup>2,4</sup>, MA Huo-Lin<sup>2,3</sup>

(1. Yunnan Diqing Non-ferrous Metal Co., Ltd., Shangri-La 674400, China; 2. Practical Teaching and Innovative Talents Training Base in the Pulang Copper Deposit, Shangri-La 674400, China; 3. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 4. School of Earth Sciences, China; 4. School of Earth Scienc

Abstract; The copper mineralized bodies and orebodies of the Pulang copper deposit in Yunnan Province are mainly distributed in the Pulang complex porphyry body and were formed through complex multi-stage development. This study aims to detail the geophysical response and fractures of copper reservoirs and provide detailed orebody characteristics, fractures, and horizon burial depth to be referenced in the exploration and exploitation of the Pulang copper deposit. First, the borehole-log data in the Pulang copper deposit were sampled for comprehensive evaluation. Then, in combination with the drilling reports and data on partial core samples, this study analyzed the log response characteristics and fractures and identified the lithology of the Pulang copper deposit using mathematical statistics, three-dimensional cross plots, convolutional neural networks (CNNs), and fracture parameter calculation. The log response characteristics of the three major strata of quartz monzonite porphyries, quartz diorite porphyrites, and hornstones in the study area are as follows. The hornstone strata have relatively high resistivity, followed by the quartz diorite porphyrite strata and the quartz monzonite porphyry strata in sequence. The resistivity decreases significantly at the intervals with fractures occurring or at the relatively fractured intervals. The quartz monzonite porphyry strata have a relatively high charge rate (polarization rate) of up to about 10%. The hornstone strata have relatively high radioactive intensity than the quartz diorite porphyrite strata and the quartz monzonite porphyry strata. CNNs were used to identify and analyze the lithology of the three major types of strata based on log data, with an accuracy rate of 97. 94%. Finally, this study identified fractures in these strata using dual laterolog data. The resistivity significantly decreases at intervals with fractures occurring and differs greatly between deep and shallow lateral resistivity. The quartz monzonite porphyry strata with a high copper grade have relatively low resistivity and relatively well-developed high-angle fractures. The results of this study are of significance for the identification of ore body characteristics and the exploitation of ore bodies in the Pulang copper deposit. Key words: Pulang copper deposit; geophysical well logging; logging response; lithology identification