

等值反磁通瞬变电磁法探测超顺磁红土覆盖区铝土矿的应用

李星^{1,2)}, 韩润生¹⁾, 席振铎^{* 3)}, 龙霞⁴⁾

1) 昆明理工大学, 云南昆明, 650500;

2) 中铝(云南)勘查股份有限公司, 云南昆明, 650000;

3) 中南大学, 湖南长沙, 410083;

4) 湖南五维地质科技有限公司, 湖南长沙, 410205

内容提要:等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)凭借其浅层高分辨率的优势,在铝土矿层探测中具有潜力。然而,在红土覆盖区,覆盖层的超顺磁效应会叠加于感应涡流产生的二次瞬变电磁场,导致总体响应信号增强、弛豫时间延长,从而显著降低探测分辨率。针对云南富民铝土矿白龙水井村矿段深部地质勘查需求,本文基于研究区物性统计与地层特征,结合铝土矿层、赋矿层位及上下围岩的电阻率特性,建立了沉积型铝土矿层状地电模型,并开展 OCTEM 正演模拟,系统分析浅层超顺磁红土覆盖条件下的响应特征。根据响应规律,对红土区实测感应电压进行处理与校正,以抑制超顺磁覆盖层的影响,并通过反演获取地下电阻率空间分布。结合找矿模型,对两条 OCTEM 试验剖面电阻率的二维展布特征进行综合解释,揭示了白龙水井村矿段的深部延伸与空间分布,钻探结果验证了该解释的准确性。研究表明,经有效校正后,OCTEM 可用于超顺磁红土覆盖区的铝土矿层探测。

关键词:等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM);铝土矿探测;红土覆盖层;超顺磁;数据校正

铝是世界上应用最广泛的金属之一,铝土矿是生产金属铝的主要原料,是战略性关键矿产。近年来,随着国民经济快速发展和城市化推进进程,中国铝需求量逐年增长。由于国内优质铝土矿资源短缺,中国铝土矿资源供应依然面临较大压力(高兰等,2015;陈喜峰,2024)。中国铝土资源主要集中于华北陆块和扬子陆块,山西、广西、贵州、河南四省铝土资源位居全国前列。云南省分布有一定的铝土矿资源,矿区数量和资源储量相对有限,但是在云南省具有重要的经济价值。云南铝土矿自 20 世纪 80 年代初开展地质普查后,一直再未作过系统勘查。2009 年开始,云南省有色地质局启动了全省铝土矿找矿行动计划,经过多年研究和实践,地质找矿取得了重大突破,提出了以堆积型铝土矿寻找沉积型铝土矿的新认识,在滇东南地区发现了文山天生桥沉积型铝土矿,填补了云南缺少大型沉积型铝土矿的

空白,对云南矿业经济发展起到举足轻重的作用(崔银亮等,2018)。

地球物理勘探技术在铝土矿勘探中发挥重要作用。传统的地球物理探测方法在寻找铝土矿的应用中取得了一定的效果。Wei Laonao et al. (2025) 采用基于阵列观测策略的大规模三维瞬变电磁法,在广西西部某矿区实现了快速、高分辨率的地下电性结构反演,准确探测了沉积型铝土矿埋深与空间分布。江明秀等(2025)在川主庙铝土矿勘查中,运用电法和地震勘探手段,利用含矿岩系低电阻率,中低值波阻抗特性,有效划分含矿地层,圈定古岩溶洼地范围,勾绘含矿岩系空间分布。李富等(2025)综合应用音频大地电磁测深、高密度电阻率法、高密度极化率法和微动测量组合定位赋矿地层的顶、底界面。Xue Guoqiang et al. (2022)采用重力与瞬变电磁法在陕西蒲城已知矿区有效识别出与成矿相关的奥陶

注:本文为国家重点研发计划课题(编号 2022YFC2903404)资助的成果。

收稿日期:2025-11-14;改回日期:2026-01-09;网络发表日期:2026-01-30;责任编辑:潘静。

作者简介:李星,男,1984 年生。正高级工程师,主要从事地球物理勘查应用研究。E-mail: 261801976@qq.com。

* 通讯作者:席振铎,男,1966 年生。博士,教授,主要从事电磁法勘探理论与技术研究。E-mail: xizhenzhu@163.com。

引用本文:李星,韩润生,席振铎,龙霞. 2026. 等值反磁通瞬变电磁法探测超顺磁红土覆盖区铝土矿的应用. 地质学报,100(2): 670~678,doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025459.

Li Xing, Han Runsheng, Xi Zhenzhu, Long Xia. 2026. Application of opposing-coil transient electromagnetic method in exploring bauxite deposits underlying superparamagnetic laterite overburden. Acta Geologica Sinica, 100(2): 670~678.

系灰岩界面,并预测了矿体位置,经钻探验证成功发现铝土矿。李星等(2020)通过 AMT 测深剖面,并结合地质对文山某沉积型深部铝土矿的富集部位进行了推测与空间定位。杨瑞西等(2019)采用重力测量、CSAMT、TEM、地震测量和地面高精度磁法测量在研究区进行了铝土矿深部找矿试验。黄国民等(2018)采用高密度电阻率法探测煤层、泥岩层、碳质页岩层等与沉积型铝土矿相关的地质信息,圈定含矿层空间分布特征,从而实现间接找矿目的。牛杰等(2017)通过激发极化法与音频大地电磁法相结合的物探方法,成功地寻找到沉积型铝土矿体。然而对于云南地区的中小型铝土矿,目标矿床通常比较薄,矿体电阻率与矿层围岩差异较小,因此传统的物探方法难以有效分辨。等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)是近些年新提出的一种具有较高分辨率的物探方法,赖耀发等(2021)基于等值反磁通瞬变电磁法对电阻率差异的高分辨能力,根据地层层序电阻率谱系变化规律,成功探测出古风化壳型沉积铝土矿,为浅部铝土矿勘探提供了一种新思路。针对云南富明县赤鹫铝土矿矿层薄,红土覆盖层电阻率低、超顺磁响应强、难以分辨的特点,选用 OCTEM 进行探测试验。

1 地质背景与物性特征

1.1 地质特征

研究区内出露地层较为简单,分别为寒武系、奥陶系、泥盆系、二叠系及第四系,地层走向大致北东-南西向,倾向南东,倾角较平缓。研究区内构造较简单,主要构造为普渡河逆断层及小磨丹向斜,断层走向近北东-南西向,倾向南东;向斜位于研究区南东部,地层为二叠系中统峨眉山玄武岩组。研究区岩浆岩主要为玄武岩,位于研究区南东部。研究区铝土矿床为沉积型,受层位、沉积相、成矿物质来源及古构造环境控制,铝土矿赋矿层位位于二叠系中统梁山组(P_2l)下段。

1.1.1 地层

研究区地层信息由老至新叙述如下:

(1)寒武系(ϵ)。① 下统沧浪铺组(ϵ_{1c}):主要出露在研究区西侧,岩性主要为灰色磷块岩、页岩、含磷砂岩、粉-细砂岩。厚度 123~226 m。与下伏地层呈整合接触。② 中统双龙潭组(ϵ_{2s}):主要出露在研究区西侧,岩性主要为紫红色、灰绿色长石粉砂岩,白云质长石粉砂岩、白云岩夹砂页岩。厚度 108~429 m。与下伏地层呈整合接触。

(2)奥陶系(O)。下统汤池组+红石岩组并层(O_{1t+h}):主要出露在研究区西侧,岩性主要为紫、绿色页岩砂岩互层,底部夹铁锰质层。厚度 100~282 m。与下伏地层呈角度不整合接触。

(3)泥盆系(D)。中统海口组(D_2h):主要出露在研究区西侧,岩性主要为灰色泥质灰岩、粉砂质页岩、石英细砂岩夹页岩、灰质白云岩,部分地段见有豆状赤铁矿层产出。厚度 10~170 m。与下伏地层呈不整合接触。

(4)二叠系(P)。① 中统梁山组(P_2l):主要出露在研究区中部,是区内沉积型铝土研究区赋矿层位,区内延伸长达 12 km,厚度较稳定,南东缓倾,保存较完好,是寻找中-大型铝土矿床的有利条件。岩性主要上部为紫红色、黄褐色豆状-致密状铁质铝土矿、赤铁矿,部分地段缺失;中部为黄绿色、灰绿色或黄灰色致密状、鲕-豆状、蜂窝状铝土矿、铝土质黏土岩;底为灰白色含铝黏土岩或紫红色含铝粉砂岩、粉砂质页岩。厚度 0~67 m。与下伏地层呈不整合接触。② 中统阳新组(P_2y):主要出露在研究区东侧,岩性主要灰岩、白云质灰岩夹白云岩。厚度 73~467 m。与下伏地层呈整合接触。③ 中统峨眉山玄武岩组下段($P_2\beta^a$):主要出露在研究区东侧,岩性主要为玄武岩、火山角砾岩夹凝灰岩。厚度 187~1246 m。与下伏地层呈不整合接触。

(5)第四系(Q)。主要分布研究区的溶蚀洼地、沟谷,以坡积、残积物为主,岩性主要为褐红色、褐黄色黏土、粉砂质黏土夹灰岩、泥岩碎块,局部地段含紫红色棱角状-次棱角状铝土矿碎块。厚度 0~60 m。

1.1.2 构造

研究区地处普渡河逆断层南东侧,小磨丹向斜北西翼。就研究区来说,构造较为简单,除了普渡河逆断层外,无大的断层和褶皱,仅在含矿带上发现三条小断层,断距较小,对含矿层影响不大。

普渡河断层:出露于区域中部,为区域性断裂,属区内的一级主干断裂。区内出露长约 23 km,走向 NE。断裂面倾向 SE,断裂 SE 侧为寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、NW 侧为震旦系、奥陶系、寒武系、泥盆系、三叠系,SE 盘上升。

1.1.3 矿体特征

研究区主矿段分布于研究区北东部白龙水井村一带,处于普渡河逆断层的南东盘,矿体呈北东走向展布,矿体走向长 2800 m,倾向南东,倾角 $22^\circ \sim 35^\circ$,厚度 3~8 m,平均厚度 5 m,平均 A/S3.67,矿

体沿倾斜方向无深部工程揭露和控制。

矿石矿物主要有:一水硬铝石为主,次为一水软铝石、高岭石,偶见三水铝石。伴生矿物有水云母、黄铁矿、叶腊石、方解石、绿泥石、针铁矿、赤铁矿、菱铁矿、面绿泥石、叶绿泥石、有机质、锆石、金红石、电气石、磷灰石、板钛矿及石英等。

矿石结构:致密状、鲕状、豆状;矿石构造:土状、块状。

沉积型铝土矿其顶板多为阳新组灰岩,底板多为灰白色含铝黏土岩或紫红色含铝粉砂岩、粉砂质页岩,夹石则为含矿层中 Al_2O_3 品位或 A/S 达不到工业指标要求需要剔除的部分,其主要为铝土岩,其次为铝土质黏土岩。

1.2 物性特征

由表 1 可知,铝土矿层下部海口组灰质白云岩、石英细砂岩等等电阻率表现高,算术平均值分别为 2152~2256 $\Omega \cdot m$,明显表现为高阻电性特征;铝土矿层上部阳新组灰岩、白云质灰岩等电阻率也相对较高,算术平均值分别为 1905~2501 $\Omega \cdot m$,相对于铝土矿层表现为高阻电性特征;铝土矿层赋存地层梁山组含铝页岩、含铝粉砂岩、铝土质黏土岩等电阻率相对围岩小,算术平均值为 151~179 $\Omega \cdot m$,表现为低阻电性特征,铝土矿相对中阻,算术平均值 228 $\Omega \cdot m$ 。因此,可以探测电阻率差异来区分不同地层和矿质异常。

表 1 研究区主要岩石电磁物性统计表

Table 1 Statistical of electromagnetic properties of rocks

地层	岩性	块数	电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$	
			范围	平均值
阳新组 P_2y	灰岩	15	910~3030	2501
	白云质灰岩	20	700~2430	1905
梁山组 P_2l (含铝土矿地层)	含铝页岩	12	98~205	151
	含铝粉砂岩	11	112~223	163
	铝土质黏土岩	12	101~214	179
	铝土矿	11	172~253	228
海口组 D_2h	灰质白云岩	15	801~3410	2256
	石英细砂岩	16	710~2950	2152

2 等值反磁通瞬变电磁法

2.1 方法原理

等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)采用上下两个反向磁性源同时激发大地,接收线圈位于两个磁性源中间的一次场零磁通平面上,在磁性源电流关断期间感应接收大地感应涡流产生的二次磁场时间导数,均匀半空间中二次磁场时间导数(见公式 1)与大地电导率的平方成正比,比常规瞬变电磁法具

有更高的灵敏度。

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} = \frac{Ia^2 d}{9\sqrt{\pi}} (\sigma\mu)^2 t^{-3} \quad (1)$$

式中, h_z 为垂向磁场(A/m); t 为扩散时间(s); σ 为电导率(S/m); μ 为大地磁导率(H/m); I 为发射电流幅度(A); a 为发射线圈半径(m); d 为接收线圈与发射线圈的距离(m)。

2.2 理论计算

理论计算部分旨在证明 OCTEM 对超顺磁红土覆盖下沉积型铝土矿的基本探测能力,因此本节计算采用了简化水平层状地电模型,旨在剥离复杂地质干扰,突出超顺磁红土覆盖下 OCTEM 响应的主要特征,从而指导这类型实测数据的后期处理。

针对水平层状地电模型,OCTEM 接收到的是上下两个磁性源激励二次场解的梯度值,根据理论推导(龙霞等,2020),可得频率域响应表达式(见公式 2),通过快速汉克尔数值滤波计算一阶贝塞尔函数积分,再通过余弦变换求取二次垂直磁场的时间导数响应。

$$H_z = \frac{Ia^2}{2} \int_0^{\infty} R_{TE} (e^{-\lambda h} - e^{-3\lambda h}) \lambda J_1(\lambda a) d\lambda, \quad (2)$$

$$R_{TE} = \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1},$$

$$\hat{u}_1 = u_1 \frac{\hat{u}_2 + u_1 \tanh(u_1 d_1)}{u_1 + \hat{u}_2 \tanh(u_1 d_1)},$$

$$\hat{u}_i = u_i \frac{\hat{u}_{i+1} + u_i \tanh(u_i d_i)}{u_i + \hat{u}_{i+1} \tanh(u_i d_i)},$$

$$\hat{u}_n = u_n,$$

$$u_i = \sqrt{\lambda^2 - k_i^2},$$

$$k_i^2 = -i\omega\mu_i/\rho_i$$

式中, I 为发射电流(A); a 为发射线圈半径(m); h 为发射线圈与接收线圈距离(m); J_1 为一阶贝塞尔函数; ρ_i 、 d_i 分别为第 i 层的电阻率($\Omega \cdot m$)和厚度(m); R_{TE} 为反射系数。

根据研究区地质情况和岩矿标本电阻率特征,建立简化的铝土矿找矿地电模型:第一层为红土覆盖层,设 $\rho_1 = 50 \Omega \cdot m$ 、 $d_1 = 20 m$;第二层为二叠系中统阳新组灰岩层,设 $\rho_2 = 1500 \Omega \cdot m$ 、 $d_2 = 100 m$;第三层为二叠系中统梁山组铝土矿层,设 $\rho_3 = 100 \Omega \cdot m$ 、 $d_3 = 0, 10 m, 20 m, 50 m$;第四层为中统海口组白云岩或石英砂岩层,设 $\rho_4 = 2000 \Omega \cdot m$ 。第二层及以下磁导率都设为 μ_0 ,浅表红土超顺磁性

磁导率表示为

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \chi_0 \left(1 - \frac{\ln(i\omega\tau_2)}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \right) \right] \quad (3)$$

式中, τ_1 和 τ_2 是超顺磁性矿物的上下限时间常数, χ_0 是零频率时(静态磁化)磁化率值。通过试验测定,红土标本超顺磁性矿物的上下限时间常数分别为 $\tau_1 = 1 \times 10^{-9}$ s、 $\tau_2 = 100$ s, χ_0 平均值为 85×10^{-6} SI。

基于以上理论计算高磁红土覆盖区铝土矿模型 OCTEM 响应。图 2a 显示了浅表为超顺磁覆盖时 $d_3 = 0, 10$ m、 20 m、 50 m 的 4 条响应曲线,可见不同层厚的铝矿层的响应曲线之间存在差异,但是由于响应曲线衰减很慢,大约随 t 的 -1 次方衰减。按非磁性大地响应公式计算所得视电阻率如图 2b 所示,以 $d_3 = 0$ 的曲线为参考, $d_3 = 10$ m、 20 m、 50 m 时都呈现明显的低阻异常,但是视电阻率随着时间的延长逐渐减小,类似于深部存在大厚度低阻层的

响应规律,与设置模型不相符。因此需要校正超顺磁响应。如图 2c 所示,当浅表层为非超顺磁性大地时计算得到的响应,可见响应大概随 t 的 -3 次方衰减,衰减速率大大增加,按非磁性大地响应公式计算所得视电阻率如图 2d 所示,视电阻率总体随着延时增加而增加,以 $d_3 = 0$ 的曲线为参考, $d_3 = 10$ m、 20 m、 50 m 时都呈现明显的相对低阻异常,而随着延时增加,视电阻率逐渐增大,表示深部主要是高阻层,宏观上与设置模型是一致的。

3 数据采集与处理

3.1 数据采集

等值反磁通瞬变电磁法数据采集采用 HPTEM-18 型高精度瞬变电磁仪,测线见图 1 所示,在典型地质剖面上布置两条测线,西边测线 L1,东边测线 L2,测线起点在西北端,终点在东南端,点距 20 m,线距 800 m。现场工作时,收发一体天线

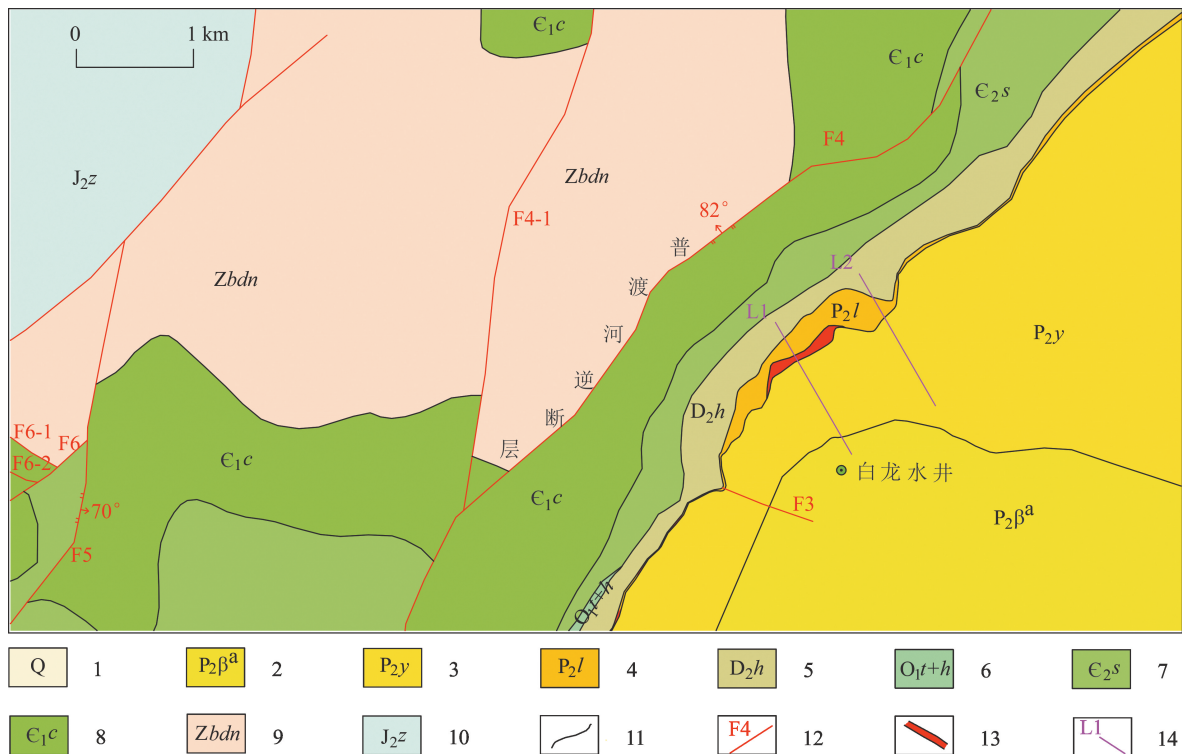


图 1 云南富民铝土矿白龙水井村矿段地质简图

Fig. 1 Geological map of the Bailong Shujingcun ore block in Yunnan Fumin deposit

1—第四系;2—二叠系峨眉山组;3—二叠系阳新组;4—二叠系梁山组;5—泥盆系海口组;6—奥陶系下统汤池组+红石岩组;7—寒武系中统双龙潭组;8—寒武系下统沧浪铺组;9—震旦系上统灯影组;10—侏罗系中统张和组;11—地层界线;12—断层;13—铝土矿体;14—物探测线及编号

1—Quaternary System; 2—Permian Emeishan Formation; 3—Permian Yangxin Formation; 4—Permian Liangshan Formation; 5—Devonian Haikou Formation; 6—Lower Ordovician Tangchi Formation + Hongshiyang Formation; 7—Middle Cambrian Shuanglongtan Formation; 8—Lower Cambrian Canglangpu Formation; 9—Upper Sinian Dengying Formation; 10—Middle Jurassic Zhanghe Formation; 11—stratigraphic boundary; 12—fault; 13—bauxite ore body; 14—geophysical survey line & number

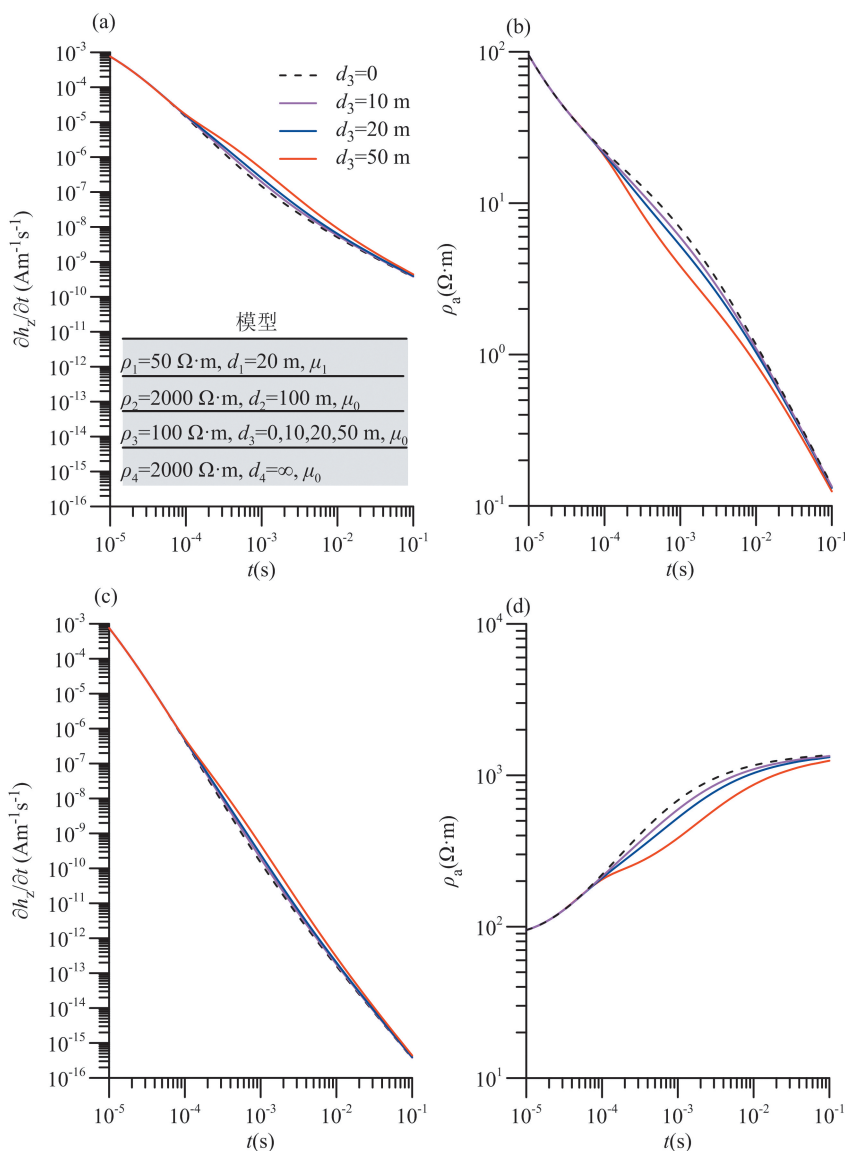


图2 高磁红土覆盖区铝土矿模型 OCTEM 响应

Fig. 2 OCTEM response of bauxite model with high-magnetic laterite cover

(a)—超顺磁覆盖时不同厚度铝土矿层响应；(b)—超顺磁覆盖响应按公式(1)计算的视电阻率；(c)—非磁性覆盖时不同厚度铝土矿层响应；(d)—非磁性覆盖时按公式(1)计算的视电阻率

(a)—response of bauxite layers with different thicknesses under superparamagnetic overburden；(b)—apparent resistivity calculated according to formula (1) for the superparamagnetic overburden response；(c)—response of bauxite layers with different thicknesses under non-magnetic overburden；(d)—apparent resistivity calculated according to formula (1) for the non-magnetic overburden response

置于测点位置,收发一体主机远离天线 5 m 以上,操作员具体天线 5 m 以上。现场测试发现,当测点位于表层红土区时,由于红土富含可能引起超顺磁响应(或称磁张弛效应)的矿物(磁赤铁矿、赤铁矿等)颗粒,因此实测 OCTEM 响应曲线衰减较慢(如图 3 中 U_0 所示),因此选用较低的发射频率 2.5 Hz,叠加次数 200 次,关断波形为斜关断,关断时间 $t_{\text{off}} = 66 \mu\text{s}$ 。

3.2 数据处理

数据处理采用 HPTEM-18 配套数据处理软件

HPTEMDDataProcess 处理,主要包含以下步骤:

(1)响应函数校正:对于不同的收发线圈组合,接收线圈的输入与输出之间的响应关系是不一样的,响应函数包含了关断波形、发射磁矩、有效接收面积、以及放大倍数等的影响,所以需要根据具体收发装置及收发参数进行校正,校正后电压如图 3 中 U_1 所示。

(2)超顺磁响应校正:研究区内大部分地区红土覆盖,而红土层富含能引起超顺磁响应的矿物颗粒,超顺磁响应比感应涡流响应衰减慢得多,引起实测

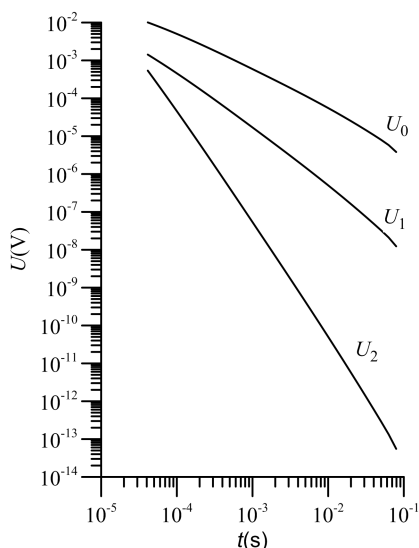


图 3 感应电压校正

Fig. 3 Induced voltage correction

U_0 —实测感应电压; U_1 —响应函数校正后电压; U_2 —超顺磁响应校正后电压

U_0 —measured induced voltage; U_1 —voltage after response function correction; U_2 —voltage after superparamagnetic response correction

衰减曲线比非红土区实测曲线衰减更慢,如果按照常规的数据处理方法,视电阻率将会随着延时增加而减小,从而引起深部的假性低阻异常,所以需要剔除超顺磁响应的影响。超顺磁响应大地近似随 t 的 -1 次方衰减,而不含超顺磁大地响应近似随 t 的 -3 次方衰减,根据这两个规律校正超顺磁响应,校正后电压如图 3 中 U_2 所示。

(3)反演成像:基于一维瞬变电磁“烟圈”扩散理论,根据校正后电压幅值及其随时间衰减速率特征,快速反演出不同深度的电阻率,再通过二维空间域滤波,得到拟二维电阻率剖面。

4 地质解释

通过研究区典型岩矿石标本物性参数测试结果可知:铝土矿层(主要指梁山组,包括铝土岩、页岩、砂岩及煤层)为相对低电阻率特征;矿层上下盘围岩(主要指上盘阳新组的灰岩、白云质灰岩等以及下盘海口组灰岩、砂岩等)为相对高电阻率特征(上部地层局部含水,电阻率变低)。再结合地表出露岩体及产状,结合研究区矿床、矿体特征及地质、水文地质资料进行物探成果解译及电阻率变化特征异常推测铝土矿层异常。

图 4a 所示为 L1 线 OCTEM 测深剖面,测线起止 80~1300 号点,总长 1220 m。在 250~1300 号点,标高 2000~2250 m 之间,有一条相对低阻渐变

异常带,且这条异常带在起始段位于二叠系梁山组,与地表出露和工程控制的已知矿脉一致,因此,推测这条异常带为铝土矿层位异常,其上部为阳新组的灰岩、白云质灰岩等,下部为海口组灰岩、砂岩等。在 940 号点位附近布置验证钻孔 ZK1-1 验证铝土矿层深部延伸情况,在 125.52 m 深处见 2.15 m 厚的铝土矿,所穿过的岩性主要是灰岩、白云质灰岩、砂岩、页岩、铝土岩、砂岩。钻孔结果与物探异常段大致吻合。

图 4b 所示为 L2 线 OCTEM 测深剖面,测线起止 0~1300 号点,总长 1300 m。在 380~1300 号点,标高 1900~2150 m 之间,有一条相对低阻渐变异常带,且这条异常带在起始段位于二叠系梁山组,与地表出露和工程控制的已知矿脉一致,因此,推测这条异常带为铝土矿层位异常,其上部为阳新组的灰岩、白云质灰岩等,下部为海口组灰岩、砂岩等。在 940 号点位附近布置验证钻孔 ZK2-1 验证铝土矿层深部延伸情况,在 139.19 m 深处见 3.16 m 厚的铝土矿,所穿过的岩性主要是灰岩、白云质灰岩、砂岩、页岩、铝土岩、砂岩。钻孔结果与物探异常段大致吻合。

上述结果表明,高阻围岩中的低阻异常带具有明确的找矿指示意义:在类似地层结构区域, OCTEM 剖面中出现的连续、渐变型低阻异常可作为识别隐伏铝土矿层的重要地球物理标志,为矿区深部及外围勘查提供有效的探测靶区。

5 结论

本研究针对云南富民铝土矿白龙水井矿段,开展了等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)勘探,系统探究了红土覆盖区沉积型铝土矿的空间分布与深部延伸特征,取得的主要认识与成果如下:

(1)明确了 OCTEM 方法在薄层铝土矿探测中的适用性与有效性。研究证实, OCTEM 对地下电阻率变化响应灵敏,能够有效识别铝土矿层与上、下围岩之间的电性差异,为该类矿床的地球物理勘查提供了可靠方法支撑。

(2)揭示了红土覆盖层对 OCTEM 响应的干扰机制并提出针对性校正流程。矿区广泛分布的红土层兼具低电阻率与超顺磁特性,导致瞬变电磁信号衰减缓慢、浅层分辨率降低。本研究通过选用低频发射参数抑制激励效应,并在数据处理中引入超顺磁校正,显著提升了深部有用信号的识别能力。

(3)查明了白龙水井矿段矿体的空间展布规律。

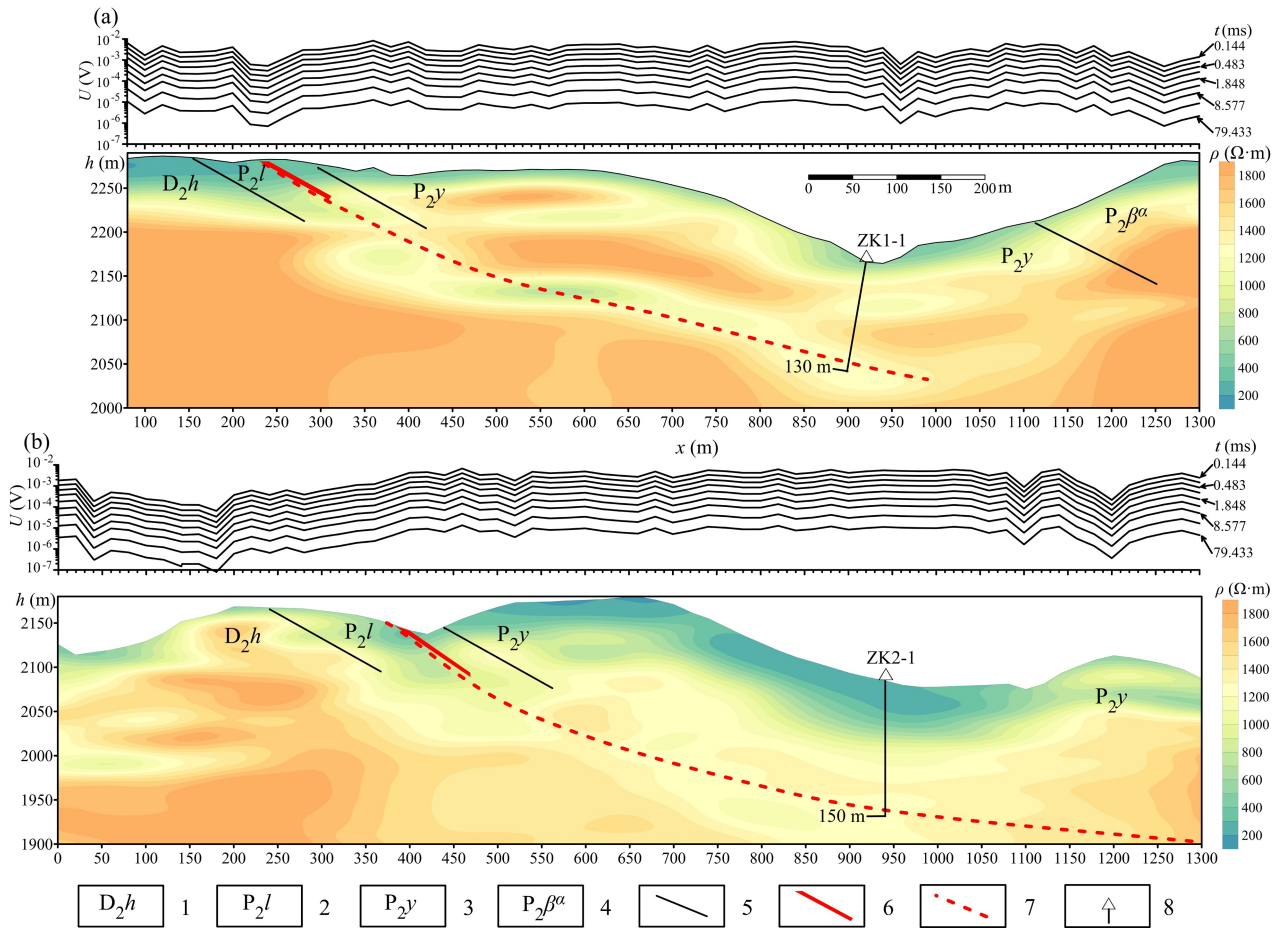


图4 OCTEM反演电阻率剖面与地质解释综合图

Fig. 4 OCTEM inversion resistivity profile and composite geological interpretation section

(a)—L1线OCTEM剖面；(b)—L2线OCTEM剖面；1—泥盆系海口组；2—二叠系梁山组；3—二叠系阳新组；4—二叠系峨眉山组；5—地质
 界面；6—已知矿脉；7—推测矿脉；8—验证钻孔

(a)—OCTEM profile of line L1；(b)—OCTEM profile of line L2；1—Devonian Haikou Formation；2—Permian Liangshan Formation；3—
 Permian Yangxin Formation；4—Permian Emeishan Formation；5—geological boundary；6—known vein；7—inferred vein；8—verification
 drill hole

经校正后的OCTEM剖面与钻孔验证结果表明，矿体呈北东走向、东南倾伏，倾角约 30° ，整体表现为埋深向东北方向逐渐加深的层状薄矿体，连续性较好，为该区下一步勘探部署提供了直接依据。

需要说明的是，本研究在理论模拟中采用简化水平层状模型，旨在突出红土覆盖条件下铝土矿的核心电性响应特征。未来工作中，将逐步开展包含复杂结构的三维地质-地球物理综合建模与反演，以进一步提高对实际矿体形态与边界的三维刻画精度，推动OCTEM在复杂覆盖区的精细化探测应用。

References

Chen Xifeng. 2024. Distribution characteristics and exploration & development pattern of global bauxite resources and its prospect. *China Mining Magazine*, 33(7): 59~68 (in Chinese with English abstract).

Cui Yinliang, Dou Song, Yan Jianguo, Guo Yuansheng, Yan Jian, Chen Shufu, Liang Qiuyuan, Cheng Yunmao. 2018. *Geology and Exploration of Bauxite in Yunnan, China*. Beijing: China Science Press (in Chinese with English abstract).

Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, Yi Chengwei. 2014. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2284~2295 (in Chinese with English abstract).

Huang Guomin, Huang Jinjie, Li Shiping, Wei Mingxun, Tao Yi. 2018. The characteristics of mineral deposits and high density resistivity applied to detect sedimentary bauxite of western Guangxi. *Mineral Resources and Geology* 32(2): 321~326+333 (in Chinese with English abstract).

Jiang Mingxiu, Wang Zhongwei, Chen Qiang, Tian Yuan, Chen Qiang. 2025. Discussion on the application effect of multiple geophysical exploration methods in the exploration of Chuazhumiao bauxite deposit. *Jilin Geology*, 44(1): 71~77 (in Chinese with English abstract).

Lai Yaofa, Xi Zhenzhu, Zhang Feng, Shi Yanliang, Li Hongxing, Xiang Yinhe. 2021. Application of opposing coils transient electromagnetic resistivity spectrum method to detect bauxite deposits. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 52(9): 3264~3272 (in Chinese with English abstract).

abstract).

- Li Fu, Xia Shibin, Liang Shengxian, Wang Zizheng, Guo Yang, Liao Guozhong, Zhou Bangguo, Chen Zicong. 2025. Application research of comprehensive geophysical exploration methods in the exploration of Dagan bauxite. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 45(4): 701~711 (in Chinese with English abstract).
- Li Xing, Niu Jie, Gao Mingshan, Xie Kang, Feng Yi, Yan Tuojiang, Wei Haimin, Yang Suo. 2020. The discussion of geological and geophysical model establishment in the exploration of a sedimentary bauxite deposit in Wenshan by AMT method. *Mineral Resources and Geology*, 34(1): 120~127 (in Chinese with English abstract).
- Niu Jie, Feng Yi, Pan Xiaosong, Zhang Zhipeng. 2017. The application and research of using comprehensive geophysical methods to prospecting sedimentary bauxite in Wenshan District, Yunnan. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 39(S2): 11~123 (in Chinese with English abstract).
- Xue Guoqiang, Zhou Nannan, Guo Wenbo, Fan Jingsheng, Lei Kangxin, Zhang Sanmin. 2022. Delineation of sedimentary bauxite deposits in Shaanxi Province using the gravity and transient electromagnetic methods. *Ore Geology Reviews*, (144): 104865.
- Yang Ruixi, Xu Guoli, Chu Lukai, Cai Zhongming, Liu Baishun. 2019. Gravity-CSAMT integrated metallogenic prediction of the bauxite deposit in Yushan-Lizhuangzhai area, Henan Province. *Metal Mine*, (9): 113~122 (in Chinese with English abstract).
- Wei Laonao, Liu Yunhe, Yin Changchun, Zhang Bo, Ren Xiuyan, Su Yang, Rong Zhihao. 2025. High-resolution imaging of sedimentary bauxite deposits and structural controls on mineralization in western Guangxi Province based on efficient

3D TEM observation and inversion. *Geophysics*, 90(3): B131~B142.

参 考 文 献

- 陈喜峰. 2024. 全球铝土矿资源分布特征、勘查开发格局及展望. *中国矿业*, 33(7): 59~68.
- 崔银亮, 豆松, 晏建国, 郭远生, 严健, 陈书富, 梁秋原, 程云茂. 2018. 云南铝土矿地质与勘查. 北京: 科学出版社.
- 高兰, 王登红, 熊晓云, 易承伟. 2014. 中国铝土矿成矿规律概要. *地质学报*, 88(12): 2284~2295.
- 黄国民, 黄锦捷, 李世平, 韦明汛, 陶毅. 2018. 桂西沉积型铝土矿含矿岩系特征及高密度电阻率法应用. *矿产与地质*, 32(2): 321~326+333.
- 江明秀, 王中伟, 陈强, 田原, 陈强. 2025. 多物探方法在川主庙铝土矿勘探中的应用效果探讨. *吉林地质*, 44(1): 71~77.
- 赖耀发, 席振铎, 张峰, 石彦良, 李红星, 向胤合. 2021. 等值反磁通瞬变电磁电阻率谱系法探测铝土矿. *中南大学学报(自然科学版)*, 52(9): 3264~3272.
- 李富, 夏时斌, 梁生贤, 王子正, 郭阳, 廖国忠, 周邦国, 陈子聪. 2025. 综合物探方法在大关铝土矿勘查中的应用研究. *沉积与特提斯地质*, 45(4): 701~711.
- 李星, 牛杰, 高明山, 解康, 冯毅, 颜拓疆, 魏海民, 杨锁. 2020. AMT在文山某沉积型铝土矿勘查中地质地球物理模型建立与探讨. *矿产与地质*, 34(1): 120~127.
- 牛杰, 冯毅, 潘小松, 张志鹏. 2017. 文山某矿区综合物探方法寻找沉积型铝土矿的应用与研究. *云南大学学报(自然科学版)*, 39(S2): 116~123.
- 杨瑞西, 许国丽, 楚卢凯, 蔡仲明, 刘百顺. 2019. 河南郁山—礼庄寨地区铝土矿重力-CSAMT综合成矿预测. *金属矿山*, (9): 113~122.

Application of opposing-coil transient electromagnetic method in exploring bauxite deposits underlying superparamagnetic laterite overburden

LI Xing^{1,2)}, HAN Runsheng¹⁾, XI Zhenzhu^{* 3)}, LONG Xia⁴⁾

1) *Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;*

2) *Aluminum Corporation of China (Yunnan) Exploration Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China;*

3) *Central South University, School of Geosciences and Info-Physics, Changsha, Hunan 410083, China;*

4) *Hunan 5D Geosciences Co. Ltd., Changsha, Hunan 410205, China*

** Corresponding author: xizhenzhu@163.com*

Abstract

Opposing coils transient electromagnetic method (OCTEM) offers high resolution for shallow subsurface investigations, making it a potential tool for detecting bauxite layers. However, in laterite-covered terrains, the superparamagnetic response of the overburden masks the target response by superimposing a strong, long-decay signal onto the secondary transient field induced by eddy currents, significantly degrading detection resolution. To address the challenge of deep bauxite exploration in the Bailong Shujingcun ore block (Yunnan Fumin deposit, China), this study established a layered geological model based on local stratigraphy and statistical physical properties. This model integrates the resistivity characteristics of the bauxite layer, its host stratum, and the surrounding rocks. We conducted forward modeling to analyze the OCTEM response patterns with shallow superparamagnetic cover. Based on these patterns, a calibration and correction methodology was developed to suppress the superparamagnetic influence from the measured induced voltage. The corrected data were then inverted to recover the subsurface resistivity distribution. Comprehensive interpretation of 2D resistivity sections from two OCTEM profiles, integrated with an ore-prospecting model, successfully delineated the deep extension and distribution of the bauxite ore block. Drilling results subsequently confirmed these findings, verifying the accuracy of the approach. This study demonstrates that, with appropriate signal processing, OCTEM can be effectively applied for detecting bauxite layers in areas covered by superparamagnetic laterite.

Key words: opposing coils transient electromagnetic method (OCTEM); bauxite detection; laterite cover; superparamagnetic; data correction