

doi: 10.11720/wtyht.2016.2.20

李怀渊, 张景训, 江民忠, 等. 航空瞬变电磁法系统 VTEM^{plus} 的应用效果 [J]. 物探与化探, 2016, 40(2): 360-364. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.2.20>

Li H Y, Zhang J X, Jiang M Z, et al. The application effect analysis of the VTEM^{plus} system [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(2): 360-364. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.2.20>

航空瞬变电磁法系统 VTEM^{plus} 的应用效果

李怀渊, 张景训, 江民忠, 骆燕, 孙栋华

(核工业航测遥感中心 铀资源地球物理勘查技术中心重点实验室, 河北 石家庄 050002)

摘要: 航空瞬变电磁法测量系统 VTEM^{plus} 具有信噪比高、分辨能力强、探测深度大等技术优点, 介绍了该系统的构成、主要技术参数、采集的数据类型和数据处理方法及所形成的图件资料, 对资料解释方法也作了简要阐述。在新疆哈密黄土坡块状硫化物型矿区及内蒙古翁牛特旗小营子铅锌矿区, 对该系统进行的测量试验, 结果说明该方法应用在多金属勘查中效果良好。

关键词: 航空瞬变电磁法; VTEM^{plus} 测量系统; 时间常数; 视电阻率深度剖面图; 多金属矿勘查

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2016)02-0360-05

航空电磁法(AEM)测量技术就是利用安装在飞行器上先进的航空电磁法测量系统、高精度 GPS 卫星定位系统等大范围获取地面电磁场等地球物理信息, 应用计算机和专业的软件对数据进行处理成图, 分析区域电磁场的变化规律, 判断地质体的分布范围、区域地质环境情况, 发现局部异常, 圈定找矿有利区等的一种先进快捷的地球物理勘查方法。航空电磁法测量技术以其快速、高效、成本低、覆盖面广、信息量大、找矿效果明显等优势在国内外区域地质调查、多金属和非金属矿勘查、石油天然气勘查等领域得到广泛的应用, 并拓展到地下水勘查、环境监测、城市环境基础调查、国家重要设施建设的选址调查、农业生态地质调查和环境保护等方面^[1-3]。航空电磁法测量分为频率域电磁法测量(FEM)和时间域电磁法测量(TEM)两种类型^[4], 笔者重点介绍时间域航空电磁法测量系统 VTEM 的技术优势及其应用效果。

1 VTEM 简介

安装于直升机上的时间域航空瞬变电磁测量系统 VTEM 由加拿大 Geotech 公司于 2001 年初开始研制, 2002 年底投入商业服务^[5]。从 2002 年到 2012 年的十年间, 该公司先后研制出 VTEM^{lite}、

VTEM^{plus}、VTEM^{max} 和 VTEM^{earlytime} 四个型号的 VTEM 系统, 最常用的是 2010 年问世的 VTEM^{plus} 系统^[6]。

1.1 VTEM^{plus} 系统的构成

VTEM^{plus} 是加强型多用途时间域电磁法 (Versatile time-domain electro-magnetic system) 系统的简称, 其系统结构如图 1 所示。它是由电磁发射线圈、接收线圈、补偿线圈和 GPS 定位系统、雷达高度计、数据采集与收录系统组成, 3 个电磁线圈位于同一平面内, 外层为直径 26m 的发射线圈, 内层接收线

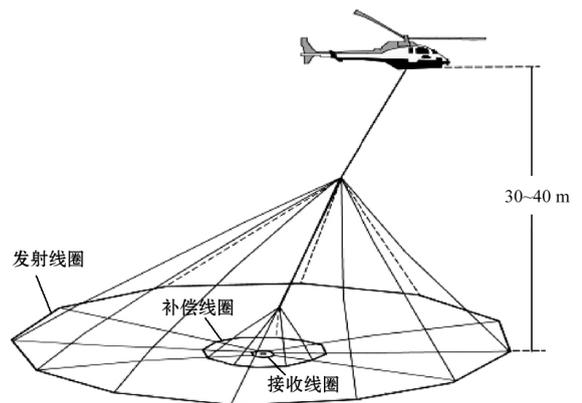


图 1 装载于 AS-305B3 直升机上的 VTEM^{plus} 系统结构示意图

表 1 VTEM^{plus} 系统电磁设备参数统计

发射线圈		接收线圈	
线圈直径	26 m	X 线圈直径	0.32 m
采样率	192 kHz	X 线圈匝数	245
发射线圈面积	531 m ²	X 线圈面积	0.08 m ²
发射基频	25 Hz 或 30 Hz	Z 线圈直径	1.2 m
最大电流	通常 200 A, 最大 310 A	Z 线圈匝数	100
脉冲宽度	>7 ms	Z 线圈有效面积	11.304 m ²
波形形状	双向梯形		
峰值偶极	400000~625 000 NIA		
GPS 定位系统		雷达高度计	
型号	PROPAK-V3-RT20	型号	Terra TRA 3000/TRI 40
模型	WAAS 授权的 OEM4-G2-3151W	位置	驾驶员座舱下方
天线位置	直升机尾翼	采样间隔	0.2 s
采样间隔	0.2 s		

圈包括 X 轴线圈和 Z 轴线圈,中间为直径 6 m 的补偿线圈。全套测量系统装载于 AS-350B3 直升机上,发射和接收线圈吊挂于直升机下方;发射机、数据采集和收录系统安装在机舱内。系统电磁设备基本参数列于表 1^[7]。

1.2 VTEM^{plus} 系统的特点

1) 直升机机载 VTEM^{plus} 系统在测量过程中飞行速度较慢,一般保持在 80 km/h,线圈离地高度 35~40 m,因此探测效率高,采样密度大(采样间距 2~3 m)。

2) 该系统发射波形为正、反双向梯形波。发射脉冲停止后从 0.018 ms 到 9.286 ms 分 44 个时间道测量二次场。早期道、中期道、晚期道的测量数据反映了从浅部到深部的二次场变化。不论是早期还是晚期,VTEM 都拥有更宽范围的时间通道。

3) 该系统雷达高度计和 GPS 接收天线分别位于驾驶员座舱前端外下方和尾翼;数据记录在存储卡上,在测线飞行时,显示屏实时显示电磁监控数据道及飞行航迹、速度、离地高度、时间和线号等。定位精度或圆概率误差(CEP)小于 1.5 m。

4) 该系统的收发线圈同心共轴,位置相对固定,可以避免异常的变形。由直升机供电,系统带宽最大 50 kHz,重量 580 kg^[8]。

5) 采用较低基频频率和超宽供电脉冲减少了“开匝”延迟对低阻体在“关匝”反应时的干扰,大偶极矩及低基频使得穿透深度更大,尤其是在低阻体环境中。本系统的探测深度可达 500~800 m。

6) 中心回线垂直偶极子发射接收装置提供对称的电磁响应,测量资料中任何不对称电磁响应均是由倾斜导体引起的,与系统本身和飞行方向无关。这有助于更好地识别低阻体的位置,并且使观测结果的解释更容易、更直观。

7) 低噪声接收器和大功率发射装置使该系统具有很高的信噪比。VTEM 数据经处理解释后可以直接圈定钻探靶区,可以代替地面电磁法测量,测量速度快,效率高,灵活机动,能够大大节约成本。在国际上,VTEM 技术在寻找多金属矿,特别是火山岩型块状硫化物(VMS)矿中发挥了重要的作用。

8) 根据不同的测量目的可在发射线圈上方 10 m 处加装磁水平梯度装置,在机舱内加装航空伽马能谱测量设备,构成航电、航磁、航放综合测量工作站,获取电、磁、放综合地球物理场信息。

1.3 VTEM^{plus} 系统的数据处理及资料解释

VTEM 系统采集 dB/dt 和 B 场数据,经去除天电噪声修正、事后补偿、基准(背景场)调平、滤波等处理后,获得最终成图数据;可绘制任意时间道的 B 场平面等值线图、任意时间道的 dB/dt 平面等值线图、B 场时间常数 τ 平面等值线图、dB/dt 时间常数 τ 平面等值线图、Fraser 滤波的 X 分量 dB/dt 平面等值线图、电力线监测平面等值线图、不同深度视电阻率切面图和视电阻率剖面图、电阻率三维可视化图等用于资料解释的图件。

根据测量目的的不同,充分收集工作区的地质、矿产、物化探、钻探、遥感地质、水文地质、环境地质等资料,建立电磁资料解释依据和解释模型。结合已知资料、解释依据和解释模型等,对电磁法测量形成的图件资料进行分析解释,拾取航电异常,结合异常产出的地质环境、异常形态、产状等特征初步分析异常成因,排除盐渍区、破碎充水带、含水层等低阻体,选择矿致可能性大的异常进行麦克斯韦 2.5 维板状体模型反演,确定低阻体的形态、规模、产状、埋深等要素,计算出最大限度揭穿低阻异常体的钻孔位置、倾角及深度。

2 应用效果分析

2.1 新疆黄土坡铜锌矿区

黄土坡矿区位于新疆哈密市西南约 160 km 处,为典型的块状硫化物型铜锌矿床。区内地层为一套下泥盆统卡拉塔格组(D₁k)海相火山岩,自下而上可分为两个岩性段。第一岩性段为凝灰岩、角砾凝灰岩和火山角砾岩,厚度大于 500 m;该层上部出现致密块状硫化物矿化层。第二岩性段为安山岩、英安岩,致密且透水性差,厚度 50~200 m。

矿体矿石矿物中的硫化物成分较为简单,主要为黄铁矿、黄铜矿及闪锌矿和少量磁铁矿。脉石矿物主要为长石、石英、方解石、绢云母、绿泥石,其次为绿帘石、阳起石、榍石、磷灰石、粘土矿物等^[9]。矿体与围岩电阻率差异较大,具体情况见表 2。

在矿区共布设 7 条南北向的主测线,线距 100 m;布设 4 条东西向切割线,线距为 1 km。测量时按设计测线沿地形缓起伏飞行,平均飞行高度 73 m,平均飞行速度 72 km/h。对获得的资料经过处理形成了多种图件。

在使用 dB/dt 数据绘制的平面等值线图中,矿区范围内在早、中、晚期时间道都有离散的低阻异常分布。利用测量数据计算视电阻率,绘制视电阻率

表 2 矿区岩矿石标本电性参数统计

岩矿石名称	样品数	电阻率/(Ω·m)	
		范围	平均值
块状闪锌矿、闪锌矿	12	781~874	835.45
火山角砾岩(未蚀变)	32	5956~9241	7872.28
铜锌矿体	15	85~156	101.9
块状硫化物黄铜矿	21	0.04~0.06	0.06
黄铁矿化凝灰岩	30	968~1534	1324.57
弱蚀变安山岩	32	487~681	575.32
凝灰岩	36	1465~2018	1781.24
安山岩(未蚀变)	27	4786~6587	5821.19

深度切面图,筛选低阻异常;计算时间常数 τ ,圈定异常靶区^[11],圈定的异常靶区与主矿区地下工程的位置吻合较好。

穿过矿区的 5 条测线在已知矿床上方均有明显的电磁异常反映,现以 L1090 线反演的电阻率深度剖面与勘探线叠合图为例进行分析(图 2)。从电阻率深度剖面图^[12]上,可以看到出现两个规模较大的低阻异常体:位于剖面中部的异常体,规模较大,宽度 500 m,地表以深 100~400 m 的低阻异常, $\rho < 28 \Omega \cdot m$,呈团块状分布,异常的规模、范围及强度与钻探揭露的已知矿体的范围及规模十分吻合;位于剖面左侧的异常体,宽度 200 m 左右,是地表以深 80~400 m 的低阻异常, $\rho < 10 \Omega \cdot m$,呈柱状向深

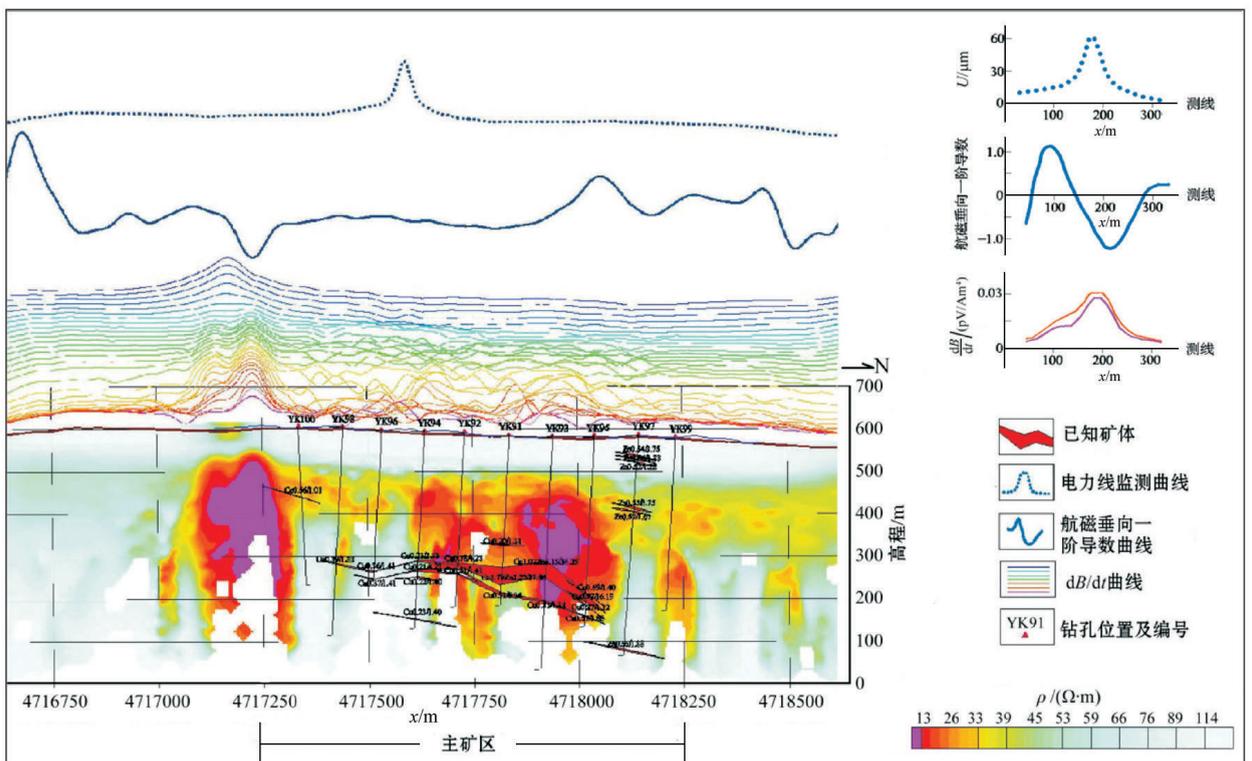


图 2 L1090 线 VTEM^{plus} 系统测量综合剖面

部延伸,为前人未发现的隐伏异常,推测该异常可能为同类矿化引起,值得进一步分析揭露。

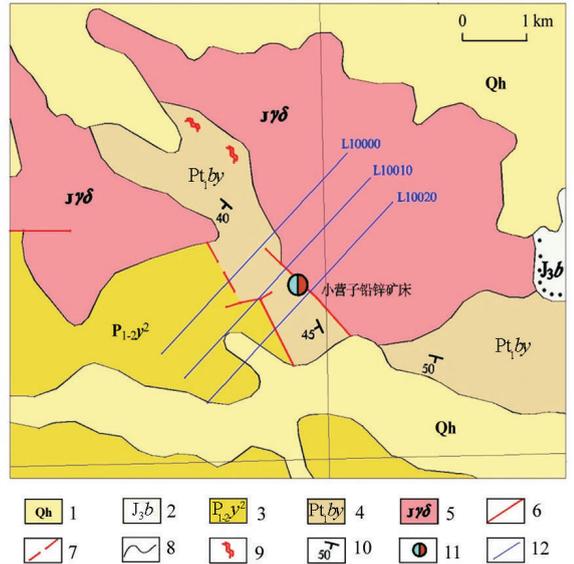
2.2 内蒙古翁牛特旗小营子铅锌矿区

矿区位于铜子—小营子铅锌银多金属成矿带东段,该矿床为渗滤式矽卡岩型矿床,产于元古界宝音图群(Pt₁by)变质岩中。该套地层岩性主要为绿泥石英片岩、斜长角闪片岩夹大理石透镜体和灰白色大理岩夹条带状结晶灰岩、板岩。矿区西南部零星出露二叠系于家北沟组上段(P₁₋₂y²)灰绿色块状蚀变安山岩、角砾凝灰岩、砂板岩等。岩浆岩主要有中侏罗世中酸性侵入岩。中深成侵入体斜长花岗岩和石英闪长岩分布于矿区东西两侧,向深部两岩体倾斜相向变缓,呈不对称状。沿走向收拢或沿倾向变缓翘起部位,均为成矿有利地段,分别赋存富厚矿体或矿脉群^[12]。矿区地质简图见图3。

矿区构造以多次活动的断裂为主,分北西向、北东向、东西向及南北向四组,其中,北西向断裂是主要控矿、贮矿构造。各矿带内矿体均呈斜列状或侧伏状分布、多呈脉状产出。矿石矿物主要为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等,脉石矿物主要为石英、方解石、长石等。矿体埋深 15~145 m,铅、锌、银、镉储量均达中型矿床规模^[12]。围岩电阻率为 500~2 800 Ω·m,矿体电阻率为 0.65~783 Ω·m;围岩与矿体电阻率差异较大。

本次试验在该矿区共布设 3 条电磁法测线,方向北东 45°,线距 500 m,每条测线长 4.1 km。平均飞行高度约 70 m,平均飞行速度约 72 km/h。

在使用 dB/dt 数据绘制的平面等值线图中,



1—全新统;2—上侏罗统白音高老组;3—二叠系于家北沟组上段;4—古元古界宝音图群;5—侏罗系花岗岩闪长岩、二长花岗岩;6—实测断层;7—推测断层;8—地质界线;9—混杂带;10—地层产状;11—铅锌矿床;12—实验测线

图3 小营子铅锌银矿区地质简图

早、中、晚期的时间道都有零散的低阻异常分布,圈定的异常靶区与主矿区位置吻合较好。穿过矿区的 3 条测线在已知矿床上方均有明显的电磁异常反映,图4给出了其中 L10000 线的探测成果。

图4中,dB/dt 叠加曲线在矿体上方出现了典型的“双峰”异常,显示板状低阻体的存在,峰值高的一侧指示了板状体的倾向;在视电阻率断面图上的相应位置出现了两个十分明显、大致呈半圆形、视电阻率值小于11 Ω·m的低阻异常,埋深约40m,

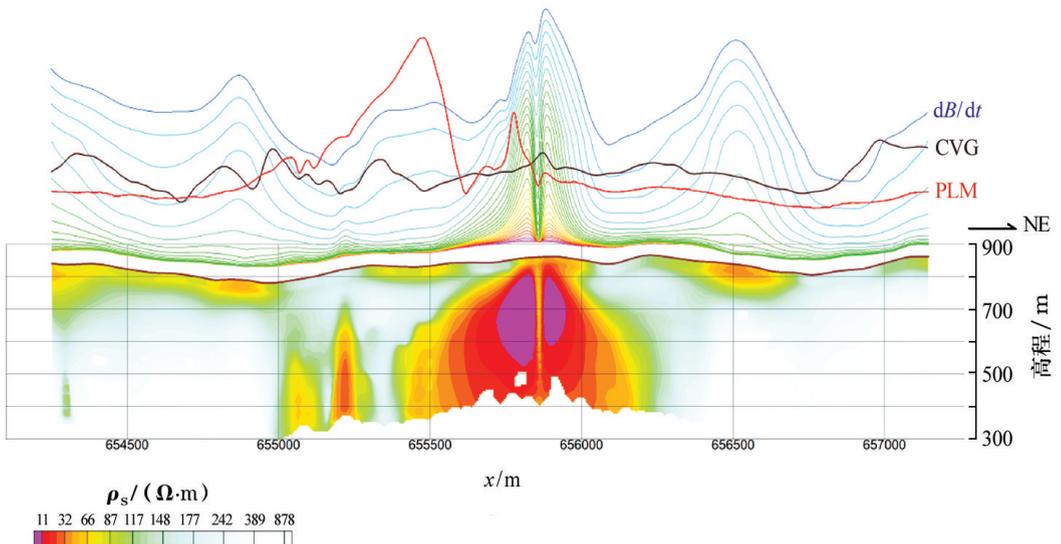


图4 L10000 线视电阻率断面

其中,左侧低阻异常最宽约 120 m,向深部延伸超过 280 m,右侧低阻异常最宽约 60 m,向深部延伸约 200 m;两者共同在平面上的投影范围与已知的矿体范围基本一致。

2.3 综合分析

从以上分析可以看出,无论是时间常数圈定的低阻异常还是电阻率深度剖面显示的低阻异常,都与已知矿体吻合度较高,说明该方法在勘查与隐伏低阻体相关的多金属矿方面具有良好的效果。

本次测量试验区选择了正在开采的已知矿区,测量中受到矿区基础设施、地下采矿工程设施及电力线等的干扰,测量数据虽然受到一定影响,但获得的数据处理后同样可以清晰地显示出低阻异常的分布范围和分布特点,同样可以用于成果解释。这进一步证实了 VTEM 系统的高信噪比、高分辨率、大探测深度的突出优点,也充分显示了航空 VTEM 技术在多金属矿勘查中的显著效果。

3 结语

航空瞬变电磁测量系统 VTEM^{plus} 具有信噪比高、分辨能力强、探测深度大等突出优点,对低阻体十分敏感,对于勘查与低阻体有关的多金属、盐矿等矿产有着十分显著的效果。装载于直升机上的航空瞬变电磁测量系统 VTEM^{plus} 优势更加明显,机动灵活,受地形影响小,测量效率高,探测效果明显,生产周期短,相对成本低,对环境不良影响小。该系统的不足之处是重量大,吊挂于直升机下方,对于飞行安

全影响较大;另外该系统在高压电网区不宜进行测量。建议在我国西部条件艰苦的复杂山区、东北及南方植被覆盖较厚的有利成矿区带优先开展航空电磁法测量或航空电磁、航磁、航放综合工作站测量工作。相信随着这种高科技技术方法的推广应用,在我国一定会取得多金属找矿的重大突破。

参考文献:

- [1] 张昌达.航空时间域电磁法测量系统:回顾与前瞻[J].工程地球物理学报,2006,3(4):265-273.
- [2] 线纪安.冶金地质系统航空物探工作三十年[J].地质与勘探,2001,37(3):36-40.
- [3] 孟庆敏,高卫东,满延龙,等.航空电磁法区域农业生态地质调查与评价[J].物探与化探,2004,28(4):333-340.
- [4] 雷栋,胡祥云,张素芳.航空电磁法的发展现状[J].地质找矿论丛,2006,21(1):40-44.
- [5] 张洪瑞,范正国.2000年来西方国家航空物探技术的若干进展[J].物探与化探,2007,31(1):1-8.
- [6] 骆燕,曾阳,石岩.航空电磁法在火山岩型块状硫化物矿区的试验[J].物探与化探,2014,38(4):840-845.
- [7] Airborne geophysical Surveys, inner data[R].Geotech Ltd,2014.
- [8] 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地球物理探矿队.新疆哈密黄土坡铜锌矿简介[R].2010.
- [9] 骆燕,杨波.航空瞬变电磁测量试验成果报告[R].核工业航测遥感中心,2013.
- [10] Geonics L. Applications of transient electromagnetic techniques [R]. 1980.
- [11] Geotech L. Tem resistivity depth imaging(RDI)[R].2011.
- [12] 骆燕,孙栋华,朱琳.内蒙古自治区翁牛特旗乌丹镇地区铅锌多金属矿集中勘查区航空瞬变电磁法勘查试验报告[R].核工业航测遥感中心,2015.

The application effect analysis of the VTEM^{plus} system

LI Huai-Yuan, ZHANG Jing-Xun, JIANG Min-Zong, LUO Yan, SUN Dong-Hua

(Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: This paper briefly introduces the composition and the main technical parameters of the VTEM^{plus} system, summarizes the technical advantages, describes the collecting data type and the method of data processing and the maps formed, with a brief description of data interpretation methods. The measurement of massive sulfide mining areas in Hami of Xinjiang and Xiaoyingzias of Inner Mongolia shows the significant application effect of this method in polymetallic ore exploration, and hence this method deserves recommendation for future work. The results obtained by the authors have certain guiding significance for exploration of polymetallic and other mineral resources.

Key words: time-domain airborne electromagnetic survey; VTEM^{plus} system; time constant; contours of apparent resistivity depth inversion; polymetallic ore exploration

作者简介: 李怀渊(1965-),男,博士,教授级高级工程师。1986年毕业于华东地质学院,主要从事核技术勘查与资源环境方面的生产与研究工作。