

doi: 10.11720/wtyht.2020.0189

詹少全,李爱勇,王导丽,等.极寒环境中广域电磁法勘探技术研究[J].物探与化探,2020,44(5):1019-1024.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0189

Zhan S Q, Li A Y, Wang D L, et al. A study of the wide field electromagnetic method under extremely cold conditions[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1019-1024. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0189

# 极寒环境中广域电磁法勘探技术研究

詹少全,李爱勇,王导丽,郝红蕾,王磊

(江苏省有色金属华东地质勘查局 八一四队,江苏 镇江 212005)

**摘 要:** 为了扩展广域电磁法施工领域,突破极寒条件下广域电磁法施工禁区,开展了广域电磁法在极寒条件下的实验技术研究。通过在春季与极寒条件下未揭穿冻土层、极寒条件下揭穿与未揭穿冻土层的对比实验,探索极寒条件下广域电磁法施工的可行性,实验中应用了各类保暖方法及克服冻土层高阻的措施,总结出一套极寒条件下的勘探技术手段。实践证明极寒条件下能开展广域电磁法的施工,资料品质可得到保证。

**关键词:** 广域电磁法;极寒条件;冻土层

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2020)05-1019-06

## 0 引言

电磁法作为对地探测的主要方法之一,在矿产、工程等领域发挥着重要作用,随着浅部资源的日渐枯竭,国家提出“深地探测”战略,电磁法应用范围及领域更加广阔。广域电磁法可在不限于“远区”的广大区域测量,颠覆了频率域电磁法只能在“远区”测量的认识,实现了频率域电磁法由平面波到曲面波的理论跨越,探测深度可达  $8\text{ km}^{[1]}$ ,抗干扰能力强,分辨率高,是一种精细勘探方法,是深地探测的重要手段之一<sup>[2-3]</sup>。

目前,主要是在常温条件下开展广域电磁法的施工,因为电子设备一般应用在  $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度环境下,极寒条件一直是电子仪器设备开展工作的禁区。我国东北地区冬季温度可达零下几十度,极寒环境限制了该方法应用的范围和季节。为了扩展广域电磁仪器的应用范围和应用领域,做到全气候条件下的勘探,开展了极寒环境下广域电磁法的勘探技术研究,通过现场实验开展技术研究,为建立极寒条件的施工工艺进行探索。

## 1 实验区概况

实验区位于大庆市林甸县(图 1),气温在  $-26\sim -16\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,属于极寒气候条件,冻土层厚度达  $2\text{ m}$  左右。该区域在上年度的春夏季开展过广域电磁法测量,具备了资料的对比研究条件,同时,其地质、物探研究程度较高,属于已知地质构造区域,为资料评



图 1 实验区位置示意

Fig.1 Location map of the test area

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0807802); 国家自然科学基金面上项目(41874081)

作者简介: 詹少全(1975-),男,桂林理工大学硕士,汉族,高级工程师,主要从事电磁法数据处理及应用研究工作。Email:1150600969@qq.com

价提供了有利条件。该区地形交通条件较好,提供了良好的交通要素,为实验安全提供了保障。实验区干扰较少,实验段无高压线、城镇等人文干扰,离高速公路 1 km 左右,高速公路对广域电磁的信号接收影响可不予考虑。

实验区位于松辽盆地中央坳陷区,勘探工作程度较高,也是大庆油田实现第二个一百年计划的深部重点勘探区。石炭—二叠系油气勘探是松辽盆地

重要的后备领域<sup>[4]</sup>,二叠系粉砂岩裂缝中干沥青是由石炭系—二叠系本身生成的,在四深 1 井等钻井中在石炭—二叠系中发现油气,证实为烃源岩;实验区已有林深 1 井、林深 2 井、鱼 2 井和乌 1 井,实验段地质情况基本清楚(表 1);实验剖面为已知地质剖面,具备了实验地质条件。实验区地表全部被第四系覆盖,地层主要由基底岩体、前古生界和上古生界以及中生界盖层组成。

表 1 实验区地层简表

Table 1 Main strata table in the test area

地层层序				厚度/m	标志性岩性
系	统	组	代号		
第四系				0~143	黏土与砂层、砂砾层,盆地北部有近代玄武岩喷发
新近系		泰康组	N <sub>2</sub> t	0~165	上部灰黄-灰绿色泥岩和泥质粉砂岩,下部灰黄色砂砾层
		大安组	N <sub>1</sub> d	0~123	上部灰色泥岩、页岩夹砂岩,下部砂砾层
古近系		依安组	E <sub>3</sub> y	0~250	泥岩、砂质泥岩、粉砂岩,时夹薄层褐煤,底部砂砾岩
白垩系	上统	明水组	K <sub>2</sub> m	0~624	上段为泥岩、砂质泥岩与灰绿色砂岩互层;下段灰黑、灰色泥页岩,灰绿、灰色泥质粉砂岩、砂岩、砂砾岩
		四方台组	K <sub>2</sub> s	0~413	棕红、灰绿色泥岩、砂质泥岩夹棕红色砂岩、砂砾岩
		嫩江组	K <sub>2</sub> n	157~1237	共分五段,主要岩性为砂岩、粉砂岩与泥岩等
		姚家组	K <sub>2</sub> y	60~230	共分为三段,主要岩性为泥岩、粉砂岩,盆地中部有灰黑色泥岩、薄层油页岩。盆地边缘为厚层砂砾岩
		青山口组	K <sub>2</sub> qn	78~716	共分为三段,盆地中部、东南部为灰黑色泥岩夹薄层粉砂岩,底部夹油页岩。盆地边缘为厚砂层砂砾岩
	下统	泉头组	K <sub>1</sub> q	0~2154	共分为四段,主要岩性为泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩等,第三段和第四段夹灰色、黑褐色含油粉砂岩
		登娄库组	K <sub>1</sub> d	0~1739	分为四段,主要岩性为泥岩、细砂岩、砂岩,底部见砾岩
二叠系	上统	林西组	P <sub>3</sub> l		灰黑色砂泥质板岩、板岩,黑色板状千枚岩、变余粉砂岩、变质粉砂岩
	中统	哲斯组	P <sub>2</sub> z		黑色泥板岩、变余砂砾岩、泥灰岩、石灰岩夹强碳酸盐化流纹岩互层及夹有安山岩
	下统	大石寨组	P <sub>1</sub> d		上部以中性熔岩及凝灰岩为主,夹泥板岩、凝灰质砂岩等;下部以酸性熔岩及凝灰岩为主
		寿山沟组	P <sub>1</sub> ss		粉砂岩、凝灰质砂岩、千枚岩
石炭系	上统	阿木山组	C <sub>2</sub> a		一套海相碳酸盐岩及碎屑岩地层,中部和下部夹有少量砂岩、粉砂岩及泥岩
		本巴图组	C <sub>2</sub> b		以砂岩为主夹灰岩及火山岩组合
		色日巴彦敖包组	D <sub>3</sub> -C <sub>1</sub>		下部为紫灰色中细粒杂砂岩与钙质粉砂岩互层;上部为黄褐-紫灰色中细粒钙质长石石英砂岩与粉砂岩互层
前古生界			AnPz		花岗片麻岩、片麻状花岗岩、片岩类等

1.3 地层电阻率特征

统计了工作区钻孔测井电阻率(表 2),结果表明该区电阻率整体较低,但各地层还是存在明显的电阻率差异,电磁法可以分辨。

表 2 工作区钻孔测井电阻率统计

Table 2 Resistivity statistical results of borehole logging in working area

地层	岩性	电阻率/(Ω·m)
K <sub>1</sub> q-Q	泥岩、砂岩、粉砂岩局部夹砾岩	30
P <sub>2</sub> -P <sub>3</sub>	板岩、千枚岩、变余砂岩等	15
AnC+γ	片岩、片麻岩及岩体	220
K <sub>1</sub> h-K <sub>1</sub> d	泥岩、粉砂岩夹油页岩	15
C-P <sub>1</sub>		45

2 广域电磁法方法与技术

2.1 基本原理

广域电磁法是相对于传统的可控源音频大地电磁法和磁偶源频率测深法(MELOS)提出来的一种人工源电磁法。假如地球是均匀大地,采用水平接地电偶极源作为场源<sup>[5-6]</sup>:

$$E_{\varphi} = \frac{I\rho dL\sin\varphi}{2\pi r^3} [2 - e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad , \quad (1)$$

$$H_r = - \frac{IdL}{4\pi r^2} \sin\varphi \left\{ 6I_1\left(\frac{ikr}{2}\right) K_1\left(\frac{ikr}{2}\right) + ikr\left(\frac{ikr}{2}\right) K_0\left(\frac{ikr}{2}\right) - I_0\left(\frac{ikr}{2}\right) K_1\left(\frac{ikr}{2}\right) \right\} \quad . \quad (2)$$

式中: $I$  为电流,  $dL$  为发射源长度,  $i$  为纯虚数,  $r$  为收发距,  $\varphi$  为  $r$  与发射源的夹角,  $\rho$  为大地电阻率,  $k = \sqrt{-i\omega\mu/\rho}$ ,  $\mu$  为导磁率,  $I_0$ 、 $I_1$  和  $K_0$ 、 $K_1$  分别为以  $ikr/2$  为变量的 0 阶、1 阶和第一类、第二类修正贝塞尔函数。直接从式(1)和式(2)出发,或者转换到直角坐标:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)]。 (3)$$

式(3)是均匀大地表面上水平电偶极源的  $E_x$  的严格的、精确的表达式。根据式(3)可以定义广域意义上的视电阻率:

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)}。 (4)$$

式中: $K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN}$ ,  $\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN$ 。

式(4)构成了广域电阻率的计算基础,通过特殊的迭代技术就可以计算出广域电阻率。

2.2 方法技术要求

广域电磁法测量系统主要由发射和接收两部分组成,要想获得可靠真实的广域电磁信号,地表条件必须满足发射和接收的布设要求。根据相关行业规范,广域电磁法的发射场源布设和接收布设满足相关条件能取得良好品质的资料。

发射布设应符合以下技术要求:①场源易布设在构造简单、电性均匀的地方,尽量避开明显的干扰源,尽量减少场源影响;②采取各种措施降低发射电极接地电阻,一般应降到 20 Ω 以下,使得尽可能增加发射供电电流,增加发射信号;③场源宜布设在与目标体走向正交的方向上,收发距应大于最大探测深度的 3 倍以上。

接收布设应符合以下技术要求:①接收电极  $MN$  与土壤接触良好,两电极埋置条件基本相同,通过各类手段尽量降低接地电阻,接地电阻应小于 2 kΩ,如遇基岩裸露等特殊地区,可适当放宽,但不应大于 10 kΩ;②接收电极不能埋在树根处、水流旁等,同时应避免沟、坎边,  $MN$  方位误差应小于 1°。

3 研究技术路线

极寒条件下施工主要有以下几个影响因素:①极寒条件下地表浅部会形成 2~4 m 的冻土层,土层结冰后电阻率急剧升高,导致发射电极的接地电阻率高,发射电流小,影响发射功率;②极寒条件影响仪器的正常工作,接收机电脑、发射控制器等电子设备会无法正常启动,电池损耗增加,造成设备损坏

等;③冻土层的浅部高阻同时也会提高接收端的接地电阻;④极寒条件会使得路面结冰,影响行车安全,隐含交通隐患,同时低温对施工人员也有影响。

为了解极寒条件对数据采集质量的影响,寻找极寒条件下施工的工艺流程,采取措施保障数据采集质量,开展了以下研究:①开展实验段 16 个测点所在剖面 10 km 春季数据的正反演研究分析,为实验提供依据;②开展同 16 个测点的同发射位置、同接收位置和同电流大小的极寒条件(未揭穿冻土层)和春季条件下(以前在春夏采集过广域电磁数据)对比实验;③开展同 16 个测点的同发射位置、同接收位置和同电流大小的极寒条件下发射电极揭穿冻土层和未揭穿冻土层对比实验。

为了减少极寒条件对仪器设备和安全等造成的影响,根据多年的施工经验和实验过程中出现的各种问题,采取了如下措施:

- 1)所有施工车辆必须进保暖车库,同时每天必须进行设备安全性检查。生产用的所有仪器包括发射和接收电极线必须进保暖仓库。
- 2)电子仪器设备配备保暖箱,防止因温度过低电子元件失灵,保证仪器设备的正常运行,发射配备保暖帐篷。
- 3)购置一定数量的气钻机和电钻机,用于挖掘冻土层,便于布设接收和发射电极。
- 4)早上在车开出暖库之前先在库内开启燃油加热器 30 min,等水温上升到 80 ℃ 左右,再启动发电机预热 40 min,在施工过程中发电机零负载情况下不停机,保证发射系统正常工作。
- 5)为了降低发射接地电阻,尽量多布发射极,发射坑挖到 30 cm 以后,放置铝板,撒盐水,用冻土掩盖好,在发射之前先供电预热 2 h 左右,利用其发射自身的能量使其冻土层融化,降低接地电阻。
- 6)发射及接收车辆做好防滑措施,发射点预先设计,预先踏勘,设计好发射车辆运输路线,对各个接收点预先踏勘,做好各类安全措施,预防事故发生。施工人员做好防寒保暖措施,穿防风衣服,穿防滑鞋子等,每人配备热水袋和手套等保暖装备。

4 实验结果分析

实验剖面 16 个点(见图 1),剖面方向 24.1°,点距 100 m,剖面长 1.5 km,剖面为已知地质典型剖面。发射  $AB$  距 1.1 km,  $AB$  方向 25.6°,收发距 18.1 km,发射电流 80 A,实验过程中接收电极  $MN$  位置不变,发射  $AB$  位置不变,保证统一的发射和接收地质条



件,便于对比实验。

4.1 反演结果分析

根据区内已知钻孔资料进行了 10 km 的春季数据反演(图2)。从反演断面来看,156~171号反演

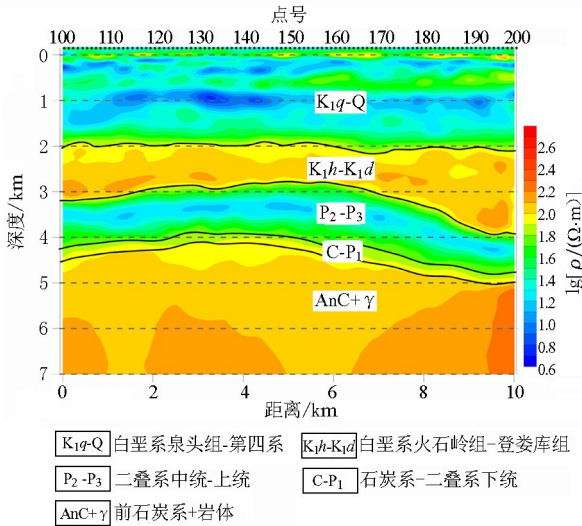


图 2 实验段二维反演综合地质断面

Fig.2 Comprehensive geological section based on 2D resistivity inversion of the test section

表 2 春季与极寒条件下未揭穿冻土层施工参数对比

类别	发射接地电阻	发射电流	接收接地电阻	高频叠加次数	低频叠加次数	采集时间
极寒条件未揭穿冻土层	15 Ω	80 A	1.5~20 kΩ	30 次以上	6 次以上	2 h
春季	8.9 Ω	80 A	200~900 Ω	30 次以上	6 次以上	2 h

对极寒条件下和春季的频率电阻率信息绘制成双对数坐标的频率—电阻率曲线,以连续两个点 170、171 号点为例(图 3)。通过对比实验,发现两次频率—电阻率曲线类型一致,两次曲线一致性良好,总均方误差小于 5%,反映两次电磁响应是一致的,高频部分极寒条件下同频率电阻率略大于春季的电阻率,推测应是冻土层高阻的反映。实验证明,极寒条件下和春季施工能达到同样的效果,都能满足技术规范要求。

4.3 冻土层的影响

为了对比极寒条件下未揭穿冻土层和揭穿冻土层广域电磁法采集信息的差异,在同一位置用挖掘机挖掘深度 2.2 m,完全揭穿冻土层,布设发射电极后再覆盖,保证发射电极为无冻土层状态(图 4b)。发射极接地电阻为 7.1 Ω,发射电流 80 A,仪器各项指标正常;接收极接地电阻 1 000~2 000 Ω,一个排列接收时间 2 h,高频叠加 30 次以上,低频叠加 6 次以上,施工参数(表 3),揭穿冻土层以后发射接地电阻达到了与春季一个数量级的电阻率,其余参数与未揭穿冻土层一致,具备了对比的条件。

电阻率比较低,与物性资料相符,区分了 5 套地层,深部埋深 3 000 m,发现有一套约 350 m 厚的低阻带清晰反映,低阻连续,反应了 P<sub>2</sub>—P<sub>3</sub> 地层稳定,并且连续存在,该地层为工作区目标层,烃源岩地层。

4.2 不同季节的实验结果

极寒条件下在春季发射同一位置布设发射,发射坑深度 30 cm,未揭穿冻土层。经过预发射 2 h 预热后,发射接地电阻降低为 15 Ω,发射电流 80 A,达到了技术规范要求,仪器各项指标正常,接收接地电阻 1.5~20 kΩ,一个排列接收时间 2 h,高频叠加 30 次以上,低频叠加 6 次以上。表 2 给出了两次施工的参数,可见只有发射接地电阻和接收接地电阻有差异,其余与春季参数是一致的。发射接地电阻通过增加发射电极数量和预热融化冻土层等措施使得发射接地电阻最大程度地降低,以达到和春季一样的发射电流,满足技术规范要求;接收电极通过 4 根电极并联等方法尽量降低接地电阻,以满足技术规范要求。接收电极端未采取预热降低电阻的方式,是因为在实际数据采集过程中接收端数量较大,通过预热的方式不现实,不符合实际情况。

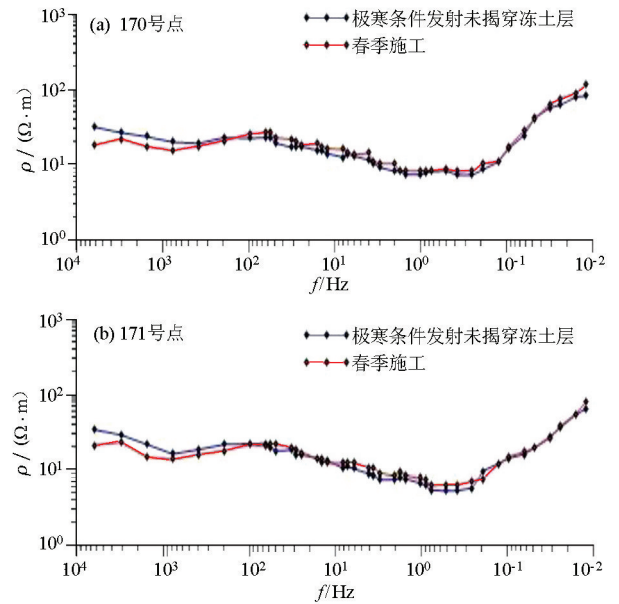


图 3 春季与极寒条件未揭穿冻土层频率—电阻率曲线  
Fig.3 Comparison of frequency-resistivity curves of unexposed permafrost under spring and extreme cold conditions



图 4 未揭穿 (a) 与揭穿冻土层 (b)

Fig.4 Unexposed (a) and exposed permafrost (b)

表 3 极寒条件下揭穿与未揭穿冻土层采集参数

Table 3 Collection parameters of exposed and unexposed permafrost under extremely cold conditions

类别	发射接地电阻	发射电流	接收接地电阻	高频叠加次数	低频叠加次数	采集时间
极寒条件未揭穿冻土层	15 Ω	80 A	1.5~20 kΩ	30 次以上	6 次以上	2 h
极寒条件揭穿冻土层	7.1 Ω	80 A	1.5~20 kΩ	30 次以上	6 次以上	2 h

将 2 种情况下的电阻率信息绘制成双对数坐标的频率—电阻率曲线,以连续 160、161 号点为例(图 5)。通过对比实验,发现两次频率—电阻率曲线类型一致,同时两次曲线一致性较好,均方根误差都小于 5%,也说明揭穿冻土层和未揭穿冻土层广域电磁响应是一致的,在实际数据采集过程中未揭穿冻土层只要采取相应降低发射接地电阻的措施,满足技术要求能达到同样的勘探效果。

5 结论

实验证明广域电磁法能在极寒环境下开展工作。在极寒条件下对仪器要采取保暖措施,在野外给仪器设备放入保暖箱或空调环境,配备应急电源设备防止极寒条件设备电池损耗快,只要采取有效的对仪器设备的保暖措施,能保证仪器能正常工作;夜间所有仪器设备包括车辆等进保暖库,早上在车库内预热发电设备。

通过发射预热等方法融化冻土层降低发射接地电阻,使得发射接地电阻达到规范技术要求。极寒条件下安全为第一位,要加强对人员、仪器、车辆等的安全检查,采取各类安全措施,预防安全事故的发生。发射位置及测线点位位置一定要提前预勘查,规划人员车辆的路线,配备防冻防滑装备,了解干扰、地形等情况,保证人员仪器安全。

极寒条件形成的冻土层与春季相比为高阻,电磁信号可以穿透高阻层,接收电极能接收到电磁信

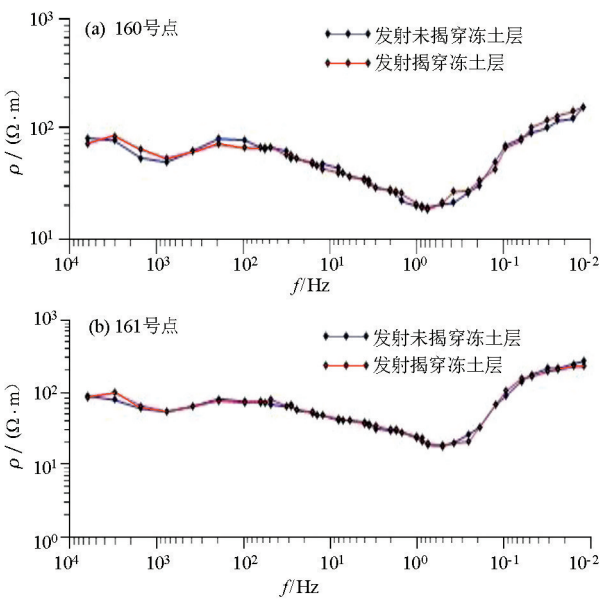


图 5 极寒条件未揭穿冻土层与揭穿冻土层频率—电阻率曲线

Fig.5 Comparison of frequency-resistivity curves between unexposed and exposed permafrost under extremely cold conditions

号,从实验结果来看极寒条件与春季电阻率曲线一致性较好,仪器设备运行良好。极寒条件下因为要采取很多措施存在施工效益比较低,同时安全风险比较大,为了安全尽量在地形条件比较好的地区开展施工,同时对施工人员和仪器都是严峻的考验。广域电磁法能在极寒条件下开展工作,并且能取得良好的勘探效果。

参考文献 (References) :

[1] 何继善.大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1809-1816.  
He J S.Theory and technology of wide field electromagnetic method [J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (9): 1809-1816.

[2] 胡涂,李帝铨. $E-E_x$  广域电磁法对低阻薄层分辨能力探讨[J].物探化探计算技术,2014,36(3):297-303.  
Hu T,Li D Q. Distinguish ability on thin resistant layered structure of  $E-E_x$  mode of wide field electromagnetic sounding method[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(3): 297-303.

[3] 郑冰,李帝铨.广域电磁法和大地电磁法在中国南方某页岩区块的对比实验[J]. 油气地球物理,2015,13(3):45-49.  
Zheng B,Li D Q.Comparative test of wide field electromagnetic method and MT at a shale gas block in the south of China[J].Petroleum Geophysics, 2015, 13(3): 45-49.

[4] 赵福海,王导丽,张明鹏,等.松辽盆地北部石炭-二叠系底埋深综合物探预测技术[J].矿产与地质,2018,32(1):116-121.  
Zhao F H,Wang D L, Zhang M P, et al. The comprehensive geophysical prediction technique of the bottom buried depth of Carboniferous-Permian in the northern Songliao Basin [J]. Mineral Resources and Geology, 2018, 32(1): 116-121.

[5] 何继善.广域电磁法和伪随机信号电法[M].北京:高等教育出版社,2010.  
He J S.Wide field electromagnetic sounding methods and pseudo-random signal coding electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[6] 何继善.广域电磁测深法研究[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(3):1065-1072.  
He J S.Wide field electromagnetic sounding methods [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41 (3):1065-1072.

[7] 吴旭.探析广域电磁法在隐伏矿产资源勘查中的应用[J].世界有色金属,2018,(6):147-149.  
Wu X. Application of wide area electromagnetic method in concealed exploration of mineral resources [J]. World Nonferrous Metals, 2018, (6):147-149.

[8] 刘益中,詹少全,李爱勇,等.AMT 在印尼某铁矿区勘查中的应用[J].物探与化探,2012,36(4):559-561.  
Liu Y Z,Zhan S Q,Li A Y,et al.The Application Of Amt Method To The Exploration Of An Iron Ore District In Indonesia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012,36(4):559-561.

[9] 詹少全,陈中,李爱勇,等.重磁电综合解释在突泉盆地油气勘查中的应用[J].矿产与地质,2017,30(1):131-137,142.  
Zhan S Q,Chen Z,Li A Y,et al. Application of combined gravity-magnetic-electrical explanation method in Tuquan Basin oil and gas exploration [J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 30 (1): 131-137,142.

[10] 李金铭.地电场与电法勘探[M].北京:地质出版社,2005.  
Li J M.Geolectric field and electrical exploration [M].Beijing: Geological Publishing House, 2005.

A study of the wide field electromagnetic method under extremely cold conditions

ZHAN Shao-Quan, LI Ai-Yong, WANG Dao-Li, HAO Hong-Lei, WANG Lei

(No. 814 Geological Party, East China Bureau of Mineral Exploration and Development, Zhenjiang 212005, China)

**Abstract:** In order to extend the construction field of the wide field electromagnetic method and break through the restricted area of the wide field electromagnetic method application under extremely cold conditions, the authors studied the experimental technology of wide field electromagnetic method under extremely cold conditions. A comparative test was carried out between the exposed permafrost in spring and the extremely cold conditions and the exposed permafrost and the unexposed permafrost in the extremely cold conditions. The feasibility of construction under extremely cold conditions was explored. Various warm-keeping methods and measures to overcome the high resistance of frozen soil layers were applied in practice, and a set of exploration technological means under extremely cold conditions were summarized, which can be used to carry out the wide field electromagnetic method construction under extremely cold conditions so as to ensure the quality of data.

**Key words:** wide field electromagnetic method; extremely cold conditions; permafrost

( 本文编辑:沈效群)