| 第33卷第3期 | 地 质 与 资 源 | | Vol. 33 No. 3 |
|---|---------------------------------|----------------|---------------|
| 2024 年 6 月 | GEOLOGY AND RESOURCES | | Jun. 2024 |
| 文章编号:1671-1947(2024)03-0339-10 DOI:10.13686/j.enki.dzyzy.2024.03.009 | 中图分类号:P642.14;P631.3 文献标志码:A | 开放科学标志码(OSID): | |

利用高密度电阻率法进行多年冻土探测的研究与应用

杜海双1,2,王书明2,宋庆元1,周传芳1,殷启春1,张天恩1,2,孙 桐1

1. 中国地质调查局 哈尔滨自然资源综合调查中心,黑龙江 哈尔滨 150000;

2. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074

摘 要:多年冻土退化后,融区周期性冻结和融化作用会严重损害输油管道的稳定性.为查明原油管道埋设区多年冻土分布、发育现状,计划分别采用二维、三维高密度电法进行探测.为了进一步研究高密度电法不同探测方式的有效性和冻土的电阻率响应特征,首先在管道下部空间建立未融化、半融化、贯穿融化3种模型,采用 EarthImager 2D 和 EarthImager 3D 软件进行有限单元法正 演和圆滑约束的最小二乘法反演;随后根据数值模拟结果,对比研究3种模型电阻率响应特征及反演结果的差异性,总结二维、三 维高密度电法勘探效果;最后利用勘探实例进一步验证.结果表明,高密度电法在多年冻土探测领域是一种行之有效的方法:二维 高密度电法对未融化、贯穿融化探测效果优于半融化状态;三维高密度电法采集数据更加丰富,目标体形态展示更加直观精细,反 演结果更加接近理论模型,适用各种冻土融化状态.野外实例进一步验证了数值模拟结果,三维高密度电法的应用也对多年冻土 精细探测领域提供了新思路.

关键词: 高密度电阻率法;二维模型;三维模型;多年冻土;原油管道

RESEARCH AND APPLICATION OF PERMAFROST DETECTION BASED ON ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

DU Hai-shuang^{1,2}, WANG Shu-ming², SONG Qing-yuan¹, ZHOU Chuan-fang¹,

YIN Qi-chun¹, ZHANG Tian-en^{1,2}, SUN Tong¹

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Harbin 150000, China;

2. School of Geophysics and Spatial Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: After degradation of permafrost, the periodic freezing and melting in thawing areas will seriously damage the stability of oil pipelines. The 2D and 3D electrical resistivity tomography (ERT) are used respectively to detect the distribution and development status of permafrost in the buried area of crude oil pipelines. To further study the effectiveness of different exploration modes of ERT and resistivity response characteristics of permafrost, firstly, three models for unthawed, half-thawed and through-thawed permafrost are established in the space beneath the pipeline, and EarthImager 2D and EarthImager 3D software are applied for the forward modeling of finite element method and smoothness constrained least-squares inversion. On the basis of numerical simulation results, then, the resistivity response characteristics and differences of inversion results between the three models are compared and the exploration effects of 2D and 3D ERT are summarized. Finally, the results are further verified by exploration practice. The results

基金项目:中国地质调查局项目"大兴安岭山区生态地质调查"(DD20191014);"小兴安岭黑河地区自然资源综合调查"(DD20230504).

作者简介:杜海双(1990—),男,工程师,主要从事地球物理勘探工作,通信地址 黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路1号,E-mail//cug_dhs@126.com 通信作者:王书明(1966—),男,教授,主要从事电(磁)法理论和应用研究,通信地址 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388号,E-mail//whwsm@hotmail.com

show that the ERT is an effective method in permafrost survey. The detection effect of 2D ERT on the unthawed and through-thawed permafrost is better than on half-thawed permafrost. The data collected by 3D ERT is more abundant, the display of object morphology is more intuitive and precise, and the inversion results are closer to the theoretical model, which is suitable for permafrost of various melting states. The field examples further verify the numerical simulation results, and the application of 3D ERT also provides a new idea in the field of permafrost fine detection. **Key words**; electrical resistivity tomography; 2D model; 3D model; permafrost; crude oil pipeline

0 引言

黑龙江省漠河市兴安镇是中俄原油管道漠河一大 庆线的首站,域内原油管道铺设在多年冻土发育区. 多年冻土的发育宏观上服从纬度地带性规律,微观上 又因局地地貌、上覆植被、岩性、地表水、逆温层、坡向 等因素的不同,多年冻土地温、厚度等差异明显,一般 表现为沟谷沼泽区地温最低,多年冻土厚度最大^[1-2]. 据漠河市气象站数据:漠河地区岛状多年冻土连续 率 70%~75%,多年冻土厚度大于 15 m,年平均气温 -4.1 ℃.随着全球持续变暖,近 10 年区域内年平均气 温达-3.25 ℃,比前 10 年升高了 0.85 ℃.虽然研究区 环境内净放热量减少,但是仍能保持稳定的净放热量, 所以区域内多年冻土整体变薄,并未消失^[3].

原油管道施工过程中,管道两侧 10 m 范围内植 被全部砍伐,且地表开挖,车辆、人员践踏等活动严重 扰动冻土发育环境,地下水结构遭到破坏,促使管道施 工区多年冻土融化.同时,管道运行过程中,管道上部 地表裸露,并行道路持续使用,既破坏了多年冻土隔热 层,又增加了地表受太阳热辐射量^[4],实际输油油温远 超设计油温等进一步加速了管道下部多年冻土的退 化.多年冻土最终演变为季节性冻土,且在周期性冻 结过程中冻胀融沉作用严重威胁管道的安全稳定.查 明原油管道周围冻土消融情况对管道的安全运行具有 重要意义.由于冻土消融在林区的隐蔽性和不确定 性,加之林区保护、管道运行等相关规定禁止各类工程 施工,普通勘查方法难以准确识别出地下冻土赋存情 况,因此必须借助物探的手段^[5-6].

高密度电法是一种常见的地球物理勘查方法,因 其观测精度高,数据信息量丰富,可以快速识别冻土的 空间分布特征而被广泛应用于冻土调查中^[7].目前高 密度电法探测冻土的研究主要还处于二维空间中, 因其探测冻土准确、高效的特点而被广泛采用^[8-12].针 对三维高密度电法的应用研究近年来已取得长足进 展^[13-19],但是二维、三维高密度电法对于多年冻土探测 效果的对比及应用几乎没有,这也将是今后高密度电 法应用研究的重要领域.

1 高密度电法原理

1.1 装置及数据采集

高密度电法是以岩、土体之间巨大的电阻率差异 为物性基础,通过阵列布极的方式,一次性布设几十甚 至上百个电极,而后通过预设程序自动完成数据采集, 利用采集结果研究地下空间的电场分布特征,进而查 明目标体的一种地球物理勘探方法.该方法以其低成 本、高效率、信息丰富、解释方便等优势,被广泛应用于 各类工程勘查中.高密度电法经过多年的发展,常用 的装置类型已达10余种,施工前需要根据工区实际情 况来选择合适的装置,本次二维研究工作选择温纳α 装置.这是一种特殊的四极装置,数据采集过程中,保 持 AM=MN=BN,供电和测量电极同时沿布极方向移 动,并随着相邻电极间距依次增大,最终形成一个倒梯 形数据断面.电极排列方式如图 1.



图 1 温纳装置电极排列方式

Fig. 1 Electrode arrangement of Wenner array

三维高密度电法是二维高密度电法电法装置在空



图 2 三维高密度电法电极排列方式 Fig. 2 Electrode arrangement by 3D ERT

间维度上的一种拓展创新,电极按矩形网格顺序排列 (图 2).根据电极排列方式分为二极、三极、四极 3 种 排列方式,四极装置水平分辨率最高.数据采集模式 采用十字-对角真三维测量(图 3).本次三维研究工作 选择四极装置混合偶极梯度排列.



图 3 三维高密度电法数据采集方式

Fig. 3 Data acquisition mode by 3D ERT

a—供电电极(current electrode); **b**—测量电极(potential electrode)

1.2 高密度电法正反演原理

目前高密度电法正演方法主要有两种:有限差分 法和有限单元法.其中后者计算精度更高,地形计算 更准确,所以本次二维、三维模型正演工作均使用有限 单元法.基于稳定电流场电位和电场的偏微分方程, 将电位的微分方程问题转化为泛函的变分极值问题进 行求解^[19].根据场的微分方程及其边界约束条件,其 变分方程为:

$$\begin{aligned} \mathsf{F}(\mathsf{u}) &= \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \sigma(\nabla \mathsf{u})^2 + \sigma \nabla \mathsf{u}_0 \cdot \nabla \mathsf{u} \right] \mathrm{d}\Omega \\ &+ \int_{\Gamma^{\infty}} \left[\frac{\sigma \cos(\mathsf{r},\mathsf{n})}{2\mathsf{r}} \mathsf{u}^2 + \frac{\sigma' \cos(\mathsf{r},\mathsf{n})}{\mathsf{r}} \mathsf{u}_0 \mathsf{u} \right] \mathrm{d}\Gamma \end{aligned} \tag{1}$$

式中, *u*—异常电位; σ—介质电导率; *n*—边界外法 线方向; *r*—电源点到边界上点的向径; *Γ*—边界^[19].

建立相应的变微分方程后,将连续的求解区域离 散化,即按一定规则将地下求解空间均匀剖分为多个 节点相连的网格单元.通过求解各结点的电位值,进 而得到地下半空间场的空间分布特征.

基于圆滑约束的最小二乘法是目前应用较为广泛的反演方法,该方法的特点是简单、收敛快.首先是将 一个均匀介质地下模型作为初始模型,此初始模型可 以剖分为多个紧密排列的电阻率为常数的矩形块,然 后利用迭代非线性最优化方法来求解出每一个矩形块 的电阻率值.迭代过程中采用平滑约束最小二乘法, 得出的结果与实际测量的视电阻率值非常接近^[19].圆 滑约束的最小二乘法方程表示为:

$$(\mathbf{J}^{\mathsf{T}}\mathbf{J}+\boldsymbol{\lambda}\mathbf{C}^{\mathsf{T}}\mathbf{C})\mathbf{\bar{p}}=\mathbf{J}\mathbf{\bar{g}}$$
(2)

式中, *J*—雅可比偏微分矩阵; λ—阻尼因子; *C*—平 滑滤波因子; *p*—模型参数改正矢量; **g**—测量视电阻 率与计算视电阻率对数差的偏差矢量.

1.3 物性基础

岩性、温度、含冰量和含盐量等是影响多年冻土电 阻率的主要因素^[11-12]. 从表 1、表 2 可以看出,随着含 冰量的升高,多年冻土电阻率呈现巨大差异化:岩石在 冻结状态下电阻率远远高于常温状态,且温度越低,电 阻率越大.随着多年冻土的融化及冻土的隔水作用, 非冻结区域岩土体含水量明显升高,电阻率显著减小, 尤其是融化的土体,电阻率一般不超过 100 Ωm,这为 高密度电法的施工提供了理论基础.

342

表1 冻土区第四系冻土电阻率统计表

 Table 1 Resistivity statistics of the Quaternary permafrost in permafrost region

| 141, jet- | 今冰旱 | 电阻率/ Ω m | | |
|-----------|------|-----------------|--------|--|
| 石庄 | 百小里 | 冻结 | 非冻结 | |
| | 少冰冻土 | 200~400 | 20~100 | |
| 黏性土 | 多冰冻土 | 400~900 | | |
| | 富冰冻土 | 900~2000 | | |
| | 饱冰冻土 | 2000~5000 | | |
| | 含土冰层 | >5000 | | |

据文献[11].

表 2 不同温度下岩心电阻率统计表

| Table 2 | Statistics o | f core resistivity | at different | temperatures |
|---------|--------------|--------------------|--------------|--------------|
|---------|--------------|--------------------|--------------|--------------|

| 样品 采样 | | | 电阻率/Ωm | | | |
|-------|-------|-----------|--------|---------|------------|--|
| 编号 | 深度/m | 石性 | 常温 | | -15~ -18 ℃ | |
| 4-1 | 10.10 | 泥岩 | 857.9 | 3133.5 | 15733.1 | |
| 4-2 | 14.35 | 粉细砂岩 | 1829.7 | 6677 | 33261 | |
| 1-1 | 23.3 | 中细粒长石岩屑砂岩 | 3182.8 | 11351.6 | 72129.9 | |
| 1-2 | 28.15 | 粉砂质泥岩 | 2578.2 | 17999.2 | 34647.2 | |
| 1-3 | 42.05 | 粉砂岩 | 2426.7 | 9209.7 | 30603.4 | |
| 1-4 | 65.05 | 粉细砂岩 | 3197.5 | 14440.5 | 29379.3 | |
| 1-5 | 78.7 | 细粒岩屑砂岩 | 3926.2 | 17713.2 | 32321 | |
| 1-6 | 83.85 | 中粒岩屑砂岩 | 2885.1 | 13353.6 | 42678.3 | |

据文献[13,20].

2 数值模拟与分析

2.1 二维模型的建立及反演

根据研究区实际地层情况,二维模型中包括了 3 个地层 D1、D2、D3,厚度分别为 5、41、>60 m,电阻率 分别为 10、100、1 000 Ωm;冻土厚度 32 m,电阻率为 2 000 Ωm.根据研究区冻土发育特征,在管道下部建 立一个截面矩形(尺寸约 70 m×32 m)的岛状多年冻 土,并依据受管道影响大小细分出未融化、半融化和贯 穿融化 3 种模型.

二维高密度电法选择温纳 α 装置,电极距 10 m, 电极数 56 根,测线总长度 550 m,模型在 Z 方向深度 约为 103 m.对 3 个模型均采用 EarthImager 2D 软件 选择狄利克雷边界条件,基于圆滑约束的最小二乘法进行反演,反演过程中收敛误差分布见表 3,分析模型的视电阻率响应特征,模型及反演结果见图 4.

表 3 二维反演过程收敛误差统计表 Table 3 Statistics of convergence error in 2D inversion process

| 模型 | 迭代次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|---------|--------|-------|------|------|------|------|
| 未融化 | 拟合误差/% | 21.43 | 13.41 | 3.03 | 2.44 | 2.13 | 1.94 |
| | 二阶范数 L2 | 114.77 | 44.93 | 2.30 | 1.48 | 1.13 | 0.94 |
| 半融化 | 拟合误差/% | 20.77 | 13.29 | 2.63 | 2.31 | 2.08 | 1.92 |
| | 二阶范数 L2 | 107.89 | 44.17 | 1.78 | 1.33 | 1.08 | 0.92 |
| 贯穿融化 | 拟合误差/% | 20.27 | 12.83 | 2.81 | 2.38 | 2.11 | 1.86 |
| | 二阶范数 L2 | 102.72 | 41.18 | 1.97 | 1.42 | 1.11 | 0.87 |

由表3可见,3种模型的收敛误差随迭代次数增 加迅速减小. 迭代3次后, 收敛误差均接近或小于 3%, 二阶范数均小于3, 说明拟合效果较好. 由3种 冻土模型视电阻率正反演断面图(图4)发现,地下介 质垂向分层与模型契合程度不高,但冻土响应特征明 显:冻土发育区均呈现不同规模、不同幅值的高阻异 常,且异常尺寸基本与模型一致.未融化冻土模型反 演断面图(图 4a)在水平方向 225~320 m、深度 13~ 34 m 范围内存在明显扁平椭圆状高阻响应, 异常幅 值基本位于模型中心位置;半融化冻土模型反演断面 图(图 4b)高阻异常规模变化不大,融化区位置异常 存在明显下凹,异常幅值明显减小且位置移动至水平 方向 290 m、深度 25 m;贯穿融化冻土模型反演断面 图(图 4c)高阻异常变为两个明显的小规模高阻异 常,幅值明显减小,且两个高阻异常中间呈现"八"字 形隔断, 与模型一致, 同时,3种模型在水平方向、深 度 15~20 m 范围内均呈现出一条高阻假异常带,与 模型不符.

综上,二维高密度电法可以行之有效地对多年冻 土融化情况进行探查,且无论是未融化、半融化、贯穿 融化状态,均能够在视电阻率反演断面中具有不同响 应特征.相对而言,高密度电法对未融化和贯穿融化 模型反映更加准确,但是反映的异常规模均与模型尺 寸有一定差异.



图 4 高密度电阻率法二维模型及反演结果



a—未融化冻土模型(model of unthawed permafrost); b—半融化冻土模型(model of half-thawed permafrost); c—贯穿融化冻土模型(model of through-thawed permafrost); I—视电阻率拟断面图(apparent resistivity pseudosection); II—二维反演断面(2D inversion section); III—理论模型(theory model)

2.2 三维模型的建立及反演

三维模型中整体背景电阻率设定为 200 Ωm,冻

土电阻率为 2 000 Ωm. 在管道下部空间建立长方体 (35 m × 30 m × 16 m)多年冻土模型,并细分为未融

表 4

化、半融化和贯穿融化3种模型(图5).



图 5 不同融化状态冻土三维模型

Fig. 5 3D models of permafrost in different melting states a-未融化冻土(unthawed permafrost); b-半融化冻土(half-thawed permafrost); c-贯穿融化冻土(through-thawed permafrost)

三维高密度电法是在二维的基础上,考虑实际施 工条件,选择混合偶极梯度装置:模型在X方向电极 距采用 5 m, 电极数 14 根; Y 方向线距 10 m; Z 方向 深度约 15.7 m, 电极总数 56 根. 利用 EarthImager 3D 软件,正演采用有限元法,反演采用基于圆滑约束的最 小二乘法,选择狄利克雷边界条件,分析模型的电阻率 响应特征.反演过程中拟合误差见表 4,反演结果见图 6.

由表4可见,3种融化状态的冻土模型收敛误差 随迭代次数增加均迅速减小.迭代3次后,收敛误差 均小于 5%, 二阶范数小于 1%, 说明拟合效果较好. 其 中贯穿融化模型仅通过2次迭代,收敛误差就达到 3.5%,收敛速度更快,说明贯穿融化的反演结果更加

| | 8 | | | - |
|------|---------|------|-----|-----|
| 模型 | 次数 | 1 | 2 | 3 |
| 未融化 | 拟合误差/% | 13.8 | 5.4 | 4 |
| | 二阶范数 L2 | 5.3 | 1.1 | 0.6 |
| 半融化 | 拟合误差/% | 14.7 | 5.7 | 3.8 |
| | 二阶范数 L2 | 7.7 | 1.2 | 0.6 |
| 贯穿融化 | 拟合误差/% | 5.1 | 3.5 | |
| | 二阶范数 L2 | 1.3 | 0.5 | |

三维反演过程收敛误差统计表 Table 4 Statistics of convergence error in 3D inversion process









Fig. 6 Inversion results of 3D model of different melting states by ERT

a一未融化冻土(unthawed permafrost); b一半融化冻土(half-thawed permafrost); c-贯穿融化冻土(through-thawed permafrost)

接近理论模型. 从 3 种融化状态的冻土模型视电阻率 反演断面图(图 6)可以看出,不同模型在地下空间电 阻率异常响应特征明显:未融化冻土三维模型反演立 体图(图 6a)在 X 方向 21.7~43.3 m、深度 2.5~15.7 m 范围内存在规则椭圆球状高阻响应,电阻率变化均匀; 半融化冻土三维模型反演立体图(图 6b)呈现中部凹 陷的山峰状高阻响应,凹陷部位与模型融化区吻合较 好,尺寸相当;贯穿融化冻土三维模型反演立体图(图 6c)则表现为两个明显的小规模圆柱状高阻异常,与理 论模型接近.

三维高密度电法对未融化、半融化、贯穿融化冻土 模型都具有较好的适用性和准确性.相对于二维高密 度电法来说,三维高密度电法数据信息更加丰富,反演 结果也更加清晰直观,能准确反映目标体空间形态,但 是其在同样电缆数量条件下探测深度明显小于二维高 密度电法^[7].因此,在二维高密度电法探测的基础上, 可以使用三维高密度电法对重点区域浅部精细探测.

3 工程实例应用与分析

3.1 地质概况

工作区地处大兴安岭漠河市兴安镇大片岛状多年 冻土分布区.近年来,随着全球气温升高、人类活动加 剧等影响,冻土消融加快.研究区大地构造位于漠河 盆地南缘,断裂构造发育.原油管道建设时在林区同 步造成宽度约 20 m的砍伐带,带内地表裸露,仅有少 量草本植物覆盖,管道沟槽开挖深度约 2.5 m.通过实 际地质调查得知,该区地形平缓,地层近水平状,自上 而下主要划分为4层:第一层为腐殖土层,褐色,主要 由近地表枯枝落叶及腐殖层组成,厚度约为 0.5 m;第 二层为黏土层,黄色,主要成分为粉质黏土,厚度约为 2 m,富水性较高;第三层为孙吴组,褐黄色,主要由砾石、粗砂组成,顶部松散,底部为弱胶结、半胶结状态,厚度约 35 m,层内冻土发育;第四层为漠河组砂岩,褐黄色,以中粗粒砂岩为主,比较破碎,厚度未见底^①.

3.2 工作方法

采用美国 AGI 公司的 SuperSting R8 型高密度电 法仪. 二维工作以原油管道为中点, 剖面总长度 550 m, 电极数 56 根, 点距 10 m, 采用温纳装置; 三维工作在 以二维剖面与管道交点为几何中心的矩形网格内一次 性布设 4 段 56 根电极, 点距 5 m, 线距 10 m, 其中每 条线 14 根电极, 测线长度 65 m, 矩形网格区面积 65× 30 m², 采用混合偶极梯度装置. 施工布置详见图 7.



图 7 高密度电法施工布置图 Fig. 7 Construction layout of high-density ERT

3.3 二维电阻率反演成像及分析

图 8 是垂直原油管道采用温纳装置二维测线剖面 的电阻率断面等值线图,从图中可以看出电阻率异常 在剖面上明显划分为 3 层,层位过渡位置电阻率跳跃 性突变.第一层为浅部 0~12 m 深度处的低阻层,沿剖 面方向厚度均一,电阻率值在 150~500 Ωm 之间,应为





风化壳及砂岩组成的季节性冻土层. 第二层为 12~45 m 深度范围内的高阻层, 电阻率值在 1 500~8 000 Ωm 之间,应为冻结砂岩,平均厚度约 25 m. 该层上部电阻 率由 500 Ωm 左右突然增大到 1 500 Ωm,下部电阻率 由 1 500 Ωm 左右突然降低到约 400 Ωm. 原油管道穿 过位置,高阻冻结区被低阻区隔断,且该位置自地表至 97 m 深度范围内低阻区域连通,说明该位置多年冻土 已完全退化. 第三层为 45 m 以下相对低阻区,非冻土 层,电阻率在 27.7~400 Ωm 之间,推测为砂岩,且局部 含水.

根据二维反演结果,地下连续高阻体在原油管道位 置被低阻区隔断,且在原油管道位置地表至深度 97 m 的范围内电阻率 27~150 Ωm 的低阻区相互连通,低阻 区两侧高阻区在浅部向管道方向尖灭.但是管道下部 低阻贯通区仅依据二维高密度电法工作无法确定为冻 土溶融导致,还是因测线附近低阻体体积效应引起.

3.4 三维电阻率反演结果及分析

把采用三维矩形网格排列电极采集到的真三维数据,经过圆滑约束反演,其结果如图9.三维高密度电法反演切片(图10)及旋转等值面图(图11)蕴含丰富的地质信息.根据实际需要分别提取水平和垂直角度切片信息及旋转视图下的等值面反演结果分析工作区三维电性结构特征,图件显示工作区地下电阻率等值线平缓连续,多年冻土导致的高阻体起伏形态、规模清晰直观.管道铺设区深部显示低阻体将连续多年冻土切割成两部分,导致区内连续多年冻土呈现"凹"字形. 在三维施工探测深度范围内,管道下部15.7 m深度范围内多年冻土未见上界面,与二维探测结果相互佐证.





3.5 工程验证与结果

多年冻土野外实际探测中,采用高密度电法基本 能够识别出多年冻土溶融状态、分布和发育情况.二 维高密度电法可以快速查明多年冻土整体赋存现状,





即原油管道径向乔木林内地下多年冻土连续性发育, 上界面埋深约 10 m,厚度约 25 m,仅在原油管道位置 被隔断,钻孔位置冻土埋深约 8.5 m. 在相同电缆数量 的情况下,三维高密度电法虽然探测深度相对较浅,但 是在其有效探测深度范围内,则能准确反映多年冻土 空间立体形态,即原油管道下部多年冻土融化,沿管道 方向形成沟槽状融区. 钻孔显示冻土埋深约 5.3 m.

为验证实测资料反演解释的准确性,随后在二维施工剖面 250 m 位置采用背包钻进行工程验证揭露显示:0~0.48 m 为褐色腐殖土层,未冻结;0.48~2.87 m 为黄色黏土,未冻结;2.87 m 以深为褐黄色砂、砾石层,钻孔深度达到 6.03 m 时,岩心内出现大量碎粒冰块,钻探结束.对比二维、三维高密度探测结果,二维高密度电法误差达到 2.47 m,而三维结果误差仅为 0.73 m,分析是因为二维高密度电法采集数据采用的是 10 m 点距,分辨率较低,另外受地表黏土层低阻效应影响,导致误差较大.

两者综合解释表明,原油管道穿过区地下连续多 年冻土退化严重,并已形成贯穿融区.证实二维、三维 高密度电法的综合应用在高纬度多年冻土调查中行之 有效.

4 结论

利用二维、三维高密度电法对原油管道下部未融 化、半融化、贯穿融化多年冻土模型进行了正、反演数 值模拟,得到了不同融化状态下多年冻土电阻率响应 特征,并利用现场实测资料作进一步分析和验证,得出 如下结论: 1)二维、三维高密度电法是一种较为有效的探测 多年冻土的方法,能够快速查明多年冻土的分界面、冻 土位置,但探测的冻土规模则比实际偏小,融区规模相 对偏大.对于二维高密度电法,管道下部半融化状态 冻土虽然有一定响应,但是融化特征无法有效识别,融 区表现不明显.

2)三维高密度电法采集的数据包含多方位、多层次空间立体信息,反演后利用多向切片和旋转视图可以更加直观展现地下冻融信息.三维高密度电法可以有效减弱二维探测模式下存在的体积效应,提高勘探分辨率和解释精度,且不会出现假异常,探测效果较好.

3)野外实例进一步验证了理论模型正、反演结果 的准确性,通过高密度电法的综合应用可以有效识别 多年冻土发育现状.但是受限于电缆数量,三维模拟 和试验并未达到足够深度,仍需在以后工作中进一步 验证.

参考文献(References):

[1]俞祁浩,白旸,金会军,等.应用探地雷达研究中国小兴安岭地区 黑河-北安公路沿线岛状多年冻土的分布及其变化[J].冰川冻土, 2008,30(3):461-468.

Yu Q H, Bai Y, Jin H J, et al. The study of the patchy permafrost along the Heihe-Bei'an highway in Xiao Hinggan Mountains with ground penetrating radar[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 461-468.

- [2]金会军,于少鹏,吕兰芝,等.大小兴安岭多年冻土退化及其趋势 初步评估[J].冰川冻土,2006,28(4):467-476.
 Jin H J, Yu S P, Lü L Z, et al. Degradation of permafrost in the Da and Xiao Hinggan Mountains, Northeast China, and preliminary assessment of its trend [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 467-476.
- [3]王银学,赵林,李韧,等.影响多年冻土上限变化的因素探讨[J]. 冰川冻土,2011,33(5):1064-1067.
 Wang Y X, Zhao L, Li R, et al. A study of factors which control variation of permafrost table[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1064-1067.
- [4]杨扬. 中俄原油管道及伴行道路对大兴安岭多年冻土热干扰研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.

Yang Y. Study on China-Russia crude oil pipeline and accompanying road thermal interference on Greater Khingan permafrost[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.

[5]贾立国,吴继红.高密度电法测量的应用及其在森林区的优势[J]. 地质与资源,2014,23(2):181-183.

Jia L G, Wu J H. Application of multi-electrode resistivity survey in

forest-covered areas[J]. Geology and Resources, 2014, 23(2): 181–183.

- [6]Kneisel C, Hauck C, Fortier R, et al. Advances in geophysical methods for permafrost investigations [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2008, 19(2): 157-178.
- [7]Kneisel C, Emmert A, Kästl J. Application of 3D electrical resistivity imaging for mapping frozen ground conditions exemplified by three casestudies[J]. Geomorphology, 2014, 210: 71–82.
- [8]周阜成. 圈定多年冻土的一种地球物理方法——偶极装置电位差比 法[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 41-52.

Zhou F C. Geophysical method for locating permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(3): 41-52.

[9]朱占龙. 高密度电法在冻土勘察中的应用研究[J]. 工程地球物理 学报, 2019, 16(5): 723-729.

Zhu Z L. The application of high density electrical method to permafrost survey [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16 (5): 723–729.

- [10]柳瑶,胡照广,姜华,等.应用高密度电阻率法探查高纬度冻土区 地基下岛状冻土分布[J].森林工程,2014,30(6):161-165.
 Liu Y, Hu Z G, Jiang H, et al. Application of high-density resistance to detect island permafrost distribution under the foundation in high-latitude frozen regions[J]. Forest Engineering, 2014, 30(6): 161-165.
- [11] 叶莉,李非,黄小年.综合物探技术在东北公路工程多年冻土勘察中的应用与研究[J].灾害学,2018,33(S1):25-29.
 Ye L, Li F, Huang X N. Application and research of comprehensive geophysical prospecting technology in permafrost exploration of northeast highway project[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33 (S1):25-19.
- [12] 贠正利,黄小年.综合物探方法在青藏工程走廊多年冻土辨识中的应用[J].工程勘察,2019,47(11):71-78.
 - Yun Z L, Huang X N. Application of integrated geophysical method to identify permafrost in Qinghai-Tibet engineering corridor [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(11): 71-78.
- [13]白登海,于辰.电阻率层析成象理论和方法[J].地球物理学进展, 1995,10(1):56-75.

Bai D H, Yu C. Theory and methods of resistivity tomography [J]. Progress in Geophysics, 1995, 10(1): 56-75.

[14]吴小平, 汪彤彤. 电阻率三维反演方法研究进展[J]. 地球物理学

进展,2002,17(1):156-162.

Wu X P, Wang T T. Progress of study on 3D resistivity inversion methods[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(1): 156-162.

 [15]施龙青,濯培合,魏久传,等.三维高密度电法技术在岩层富水性 探测中的应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2008,27
 (6):1-4.

Shi L Q, Zhai P H, Wei J C, et al. Application of 3D high density electrical technique in detecting the water enrichment of strata [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology Natural Science, 2008, 27(6): 1–4.

- [16]施龙青, 翟培合, 魏久传, 等. 三维高密度电法在底板水探测中应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 733-736.
 Shi L Q, Zhai P H, Wei J C, et al. Application of three-dimensional high density resistivity to detection of floor water [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 733-736.
- [17]施龙青,牛超,翟培合,等.三维高密度电法在顶板水探测中应用
 [J].地球物理学进展,2013,28(6):3276-3279.
 Shi L Q, Niu C, Zhai P H, et al. Application of three-dimensional high density resistivity technique in detecting roof water[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3276-3279.
- [18]苏永军,黄忠峰,范翠松,等.三维高密度电法在海水入侵界面探测中应用——以莱州湾地区为例[J].地质调查与研究,2018,41
 (2):134-137,152.

Su Y J, Huang Z F, Fan C S, et al. Application of the three-dimensional high density resistivity method to detection the interface of saltwater intrusion: A case study of Laizhou Bay [J]. Geological Survey and Research, 2018, 41(2): 134–137, 152.

- [19]王志鹏,刘江平,易磊. 2D、3D 高密度电法探测断层效果及其应用
 [J].科学技术与工程,2019,19(25):75-82.
 Wang Z P, Liu J P, Yi L. Effect and application of 2D and 3D high density resistivity method for fault detection [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(25):75-82.
- [20]张志厚,刘国兴,唐君辉,等. 漠河地区天然气水合物远景调查之——电法探测岩石性永久冻层的应用研究[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):887-895.
 Zhang Z H, Liu GX, Tang J H, et al. The prospective investigation of gas hydrate in Mohe region: The application research of using electrical method to explore the ever frozen layer [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(3): 887-895.