

doi: 10.11720/wtyht.2022.2480

孙思源,余学中,谢汝宽,等.航空电磁技术在冻土调查中的探测能力分析[J].物探与化探,2022,46(1):104-113.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2480

Sun S Y, Yu X Z, Xie R K, et al. Capabilities of airborne electromagnetic methods to detect permafrost[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 104-113. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2480

航空电磁技术在冻土调查中的探测能力分析

孙思源,余学中,谢汝宽,何怡原,单希鹏,李诗珺

(中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘 要: 准确评估冻土三维分布和阶段性变化对我国气候、水资源、生态、工程建设等方面具有重要意义。我国多年冻土大多分布在高海拔地区,利用地面物探确定多年冻土厚度具有效率低、成本高、交通不便等问题,而依据电阻率差异的航空电磁技术具有较大优势。根据青海祁连地区冻土厚度、电阻率等信息构建地电模型,并针对 AeroTEM 时间域航空电磁系统和 Impulse 频率域航空电磁系统,通过模拟冻土电阻率、厚度、冻土下低阻层、飞行高度和线圈角度变化,分析不同条件下时间域和频率域航空系统一维正演电磁响应差异,进而确定航空电磁技术对冻土顶、底界面的探测能力。模拟结果表明,在较低噪声水平下,Impulse 频率域航空电磁系统可以根据融化冻土厚度确定沼泽、湿地及湿润草甸覆盖下的冻土顶界面;AeroTEM 时间域系统可以确定冻土底界面,且当冻土下存在低阻层时,确定的底界面准确性将大幅提高。因此,在调查冻土厚度时,可综合利用频率域和时间域航空电磁数据,共同确定多年冻土的顶、底界面。本文研究成果将为航空电磁技术服务于我国冻土调查提供理论支撑。

关键词: 冻土;航空电磁;一维正演;厚度;探测能力

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)01-0104-10

0 引言

冻土是指温度在 0℃ 以下并含有冰的岩土,也包含 0℃ 以下不含冰的寒冷岩土。我国多年冻土总面积约为 $215 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土面积的 22.3%, 多年冻土区主要分布在大、小兴安岭及西部高山和青藏高原, 季节冻土和短时冻土则遍布大部分国土^[1-4]。冻土对环境变化极为敏感, 在区域水循环、气候调节等方面扮演重要角色。然而近几十年来, 随着气候变暖和冻土地区人文活动的增加, 多年冻土退化已十分显著, 对我国气候、水资源、生态、水文和工程等方面的影响也日益凸显。因此评估我国冻土三维分布、监测冻土变化, 对研究其引发的生态、水资源和环境效应具有重要意义, 同时可为我国青藏高原和大小兴安岭生态修复提供科学支撑, 为我国重大工程建设和资源开发战略提供数据保障。

地球物理勘探方法是评估冻土厚度的有效手段之一, 冻土层与非冻土层或融土层间导电特征的差异是电磁法被应用于探测多年冻土的基础^[5-8]。自 20 世纪 70 年代开始, 北美、欧洲等学者开始将航空/地面电磁勘探技术应用于冻土层研究, 以研究冻土层深度、范围、水含量、沉积物类型以及区域永久冻土含水层系统等。早在 1975 年, 美国就同时利用地面和航空电磁法开展阿拉斯加地区冻土层分布研究, 表明航空数据和地面数据的一致性^[9]。瑞士学者利用频率域和时间域航空电磁共三种装置研究高山冻土层, 其中频率域航空电磁主要用于浅部成像, 时间域航空电磁用于确定 300 m 以浅冻土深度, 研究成果与附近钻孔结果一致^[10]。近年来, 美国及加拿大学者在阿拉斯加地区和南极地区, 先后开展过大量的地面电磁法、航空雷达、时间域和频率域航空电磁探测项目, 以研究冻土层深度和分布范围, 表明电磁法在冻土层研究中具有重要作用^[11-14]。

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2021-08-07

基金项目: 中国地质调查局项目“青藏高原典型区冻土与地下水分布航空物探调查”(DD20211396)

第一作者: 孙思源(1991-), 男, 工程师, 2019 年毕业于吉林大学, 获得博士学位, 主要从事地球物理数据处理及正反演研究。Email: sunsiyuan-vip@163.com

我国冻土调查主要集中在青藏高原和东北地区,服务于交通和管道建设等重大工程和资源勘探项目。2005 年至 2008 年,中科院开展了中俄输油管线沿线的冻土调查和研究工作^[15];自 2008 年以来,中国地质调查局和相关单位围绕青海木里地区天然气水合物开展冻土调查评价,方法包括地震、地面电法、探地雷达、化探、测井等^[16]。2009 年至 2015 年,中科院实施“青藏高原多年冻土本底调查”项目,对青藏高原开展系统性的多年冻土本底调查,建立了青藏高原多年冻土本底调查信息系统^[17]。此外,一些学者对电磁法在冻土研究中的应用开展了大量工作;肖继涛等对三种典型冻土的电阻率特性进行对比,分析含水率、温度、干密度对电阻率的影响^[18];王显烈等利用电阻率测井曲线中电阻率的变化划分冻土层厚度^[19];裴发根等通过祁连冻土音频大地电磁正反演研究,分析音频大地电磁法在冻土厚度探测上的能力^[20];姚大为等利用可控源音频大地电磁法,结合地质和钻孔资料,分辨天然气水合物形成、运移所需要的冻土盖层和断裂构造^[21];檀文慧等利用高密度电法探测永久冻土区的冻土层分布范围,结果与天然气水合物地层吻合^[22];刘钊剡和韩德波利用电阻率测深法探测融化冻土厚度,研究表明在较密的点距和极距下,电阻率测深法具有探测融化层厚度变化的能力^[23];韩江涛等采用拟地震成像法反演瞬变电磁数据,在漠河地区研究永久冻土层的分布规律^[24]。与国外相比,中国以地面物探方法为主,同时冻土调查大多仅限于工程沿线及局部地区,数据分散,空白区较多;且现有数据资料老化,时效性差,难以真实反映冻土变化。

由于冻土分布海拔高、地理位置偏远、地形复杂、交通条件差,导致开展大范围地面地球物理勘探往往效率不高,时间和人力成本巨大。航空电磁法(频率域、时间域)则具有受地形条件限制少、探测效率高、可大面积覆盖、成本低等优点,有望实现我国冻土持续性监测。然而国内还没有航空电磁应用到冻土探测中的理论研究和实例,因此本文针对 AeroTEM 时间域和 Impulse 频率域航空电磁系统,结合青海祁连地区冻土相关信息,利用一维正演模拟分析航空电磁在确定冻土厚度和顶底界面上的探测能力,为今后航空电磁系统应用于我国冻土调查提供理论支撑。

本文通过模拟冻土电阻率、厚度、低阻层、飞行高度和线圈角度变化,分析不同条件下时间域和频率域航空系统电磁响应差异,并根据系统噪声水平分析航空电磁系统的探测能力。模拟结果表明,在

较低噪声干扰下,Impulse 频率域航空电磁系统可以根据融化冻土厚度大致确定沼泽、湿地及湿润草甸覆盖下的冻土顶界面;AeroTEM 时间域系统可以大致确定冻土底界面,而当冻土下存在低阻层时,底界面准确性将提高。因此,在研究冻土厚度中,可综合利用频率域和时间域航空电磁数据,共同确定多年冻土的顶底界面。

1 青海祁连地区冻土概况

青海祁连地区处于青藏高原东北缘,地形西高东低,海拔大多在 3 000 m 以上,年均气温 $-3.8 \sim -3.6^{\circ}\text{C}$,年均降水量一般为 250~500 mm,年内最高、最低气温分别出现在 7 月和 1 月,1 月平均气温低于 -18°C ,7 月平均温度低于 15°C 。高海拔及较低年平均气温导致该地区多年冻土及季节冻土非常发育,面积约为 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,属于典型的高山型冻土区^[25-26]。

祁连山中东部地区多年冻土年平均地温、冻土厚度等基本特征参量与海拔具有明显的相关性;海拔越高,地温越低,厚度越厚。该地区冻土层厚度为 8.0~139.3 m,而连续多年冻土厚度大多在 50~100 m 范围内变化^[25-27],多年冻土电阻率一般在 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 以上,甚至超过 $500 \Omega \cdot \text{m}$ ^[6,20-21]。随着季节变化,表层冻土不断融冻,称为季节性冻土,厚度约 1~2 m,电阻率随表层季节性冻土中水分的冻融和蒸发而发生变化^[1,20-22];7~9 月,沼泽或湿地地区融化冻土电阻率约 $20 \sim 40 \Omega \cdot \text{m}$,湿润草甸区融化冻土电阻率为 $40 \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$ 。另外,该区的部分多年冻土层下分布着低阻层。

在冻土地带,未融化冻土电阻率远高于融化冻土电阻率,二者之间存在明显的电阻率差异界面,通常冻土层电阻率高出围岩地层数倍至数十倍,且盆地冻土层的融冻界面一般呈水平或者缓倾斜渐变特征^[22],一维模拟具有一定合理性。

2 航空电磁系统

中国自然资源航空物探遥感中心于 2003 年从加拿大 Scintrex 公司引进了 Impulse 频率域航空电磁系统(图 1a),随后又于 2010~2011 年间从原加拿大 Aeroquest 公司(已被 Geotech 公司收购)引进了 AeroTEM-IV 时间域航空电磁系统(图 1b),这两个航空电磁系统在矿产和水工环勘查中发挥了重要作用。因此,本文主要针对这两套系统,进行一维正演

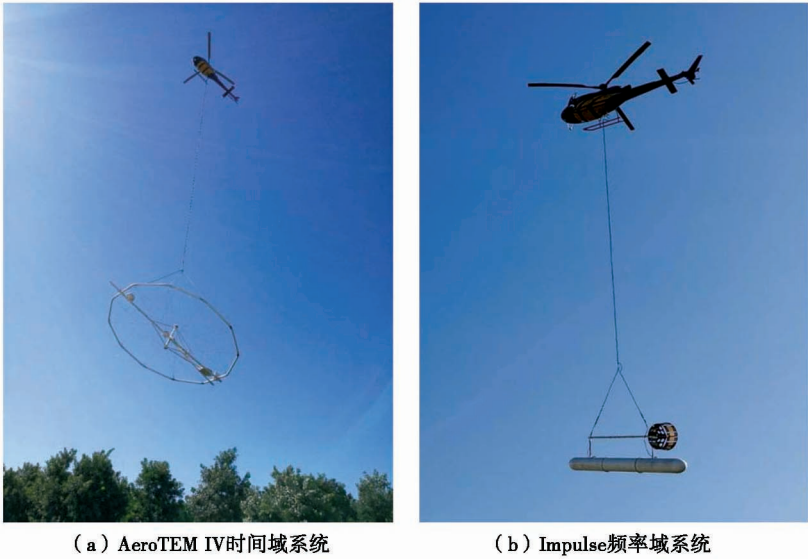


图 1 直升机航空电磁系统

Fig.1 Helicopter airborne electromagnetic system

模拟,并根据结果分析系统在冻土厚度调查中的探测能力。

2.1 AeroTEM 时间域电磁系统

该系统为直升机系统,收发装置悬挂于飞机下方 60 m,发射波形为三角波(图 1a),同时记录 X 和 Z 分量数据,能够采集 on-time 和早期 off-time 数据,拥有较大发射功率,接收信号具有较高的信噪比,保证了较大的勘探深度(可达 300 m)。系统具体参数见表 1。

表 1 AeroTEM IV 时间域航空电磁系统参数^[28]

Table 1 Parameters of time domain airborne electromagnetic system AeroTEM IV	
发射线圈类型	垂直电磁偶极
发射信号基频	25/30/75/90 Hz
发射线圈面积	122.7 m ²
发射线圈匝数	5
发射波形	三角波
发射电流	410 A
接收线圈类型	X 和 Z 分量传感器
输出数据	16 个 on-time 数据道和 17 个 off-time 数据道
采样率	10 Hz
收发矩	沿飞行方向,接收线圈位于发射线圈后方 4.5 m

2.2 Impulse 频率域电磁系统

该系统是一种吊舱式直升机航空电磁、磁综合系统,由 Impulse 直升机频率域航空电磁系统、CS-3 航空铯光泵磁力仪、收录系统、GPS 导航定位系统、无线电高度计、气压高度计等组成。其吊舱呈圆筒型(图 1b),长 9 m,内安装有航电线圈系统和磁探头,其线圈系统如图 2 所示,具有 2 种线圈对(水平共面和直立共轴)、发射 6 个频率,探测深度可达 80 m。系统具体参数见表 2。

表 2 频率域航空电磁 Impulse 系统参数^[29]

Table 2 Parameters of frequency domain airborne electromagnetic system Impulse	
线圈装置	水平共面装置和垂直共轴装置
发射频率	水平共面:930、4650、23250 Hz 垂直共轴:870、4350、21750 Hz
发射磁矩	800 Am ²
收发矩	6.5 m
采样率	30 次/s
输出数据	二次场 H_x 、 H_z 实虚分量
零点漂移	低频小于 20×10^{-6} /h、中频小于 40×10^{-6} /h、高频小于 60×10^{-6} /h(预热 2 h 后,温度在 25 ℃ 以内)
噪声水平	低频 2×10^{-6} 、中频 3×10^{-6} 、高频 5×10^{-6}

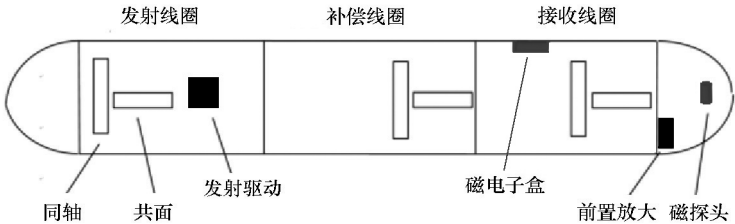


图 2 Impulse 频率域系统吊舱内装置示意

Fig.2 Bird sketch of Impulse system

3 频率域和时间域航空电磁一维正演

目前频率域航空电磁系统主要采用水平共面装置(HCP)和直立共轴装置(VCX),测量磁场水平和垂直分量 H_z 和 H_x ,而在实际数据解释中,以 H_z 分量应用最为广泛;时间域航空电磁系统主要采用吊舱或回线装置,在接收线圈中测量二次场变化率 dB_z/dt 。在极坐标 (r, φ, z) 下,垂直磁偶极子产生的垂直分量 H_z 为^[30]

$$H_z = \frac{m}{4\pi} \left\{ \frac{3z_+^2 - R_+^2}{R_+^5} - T_2(z_-) \right\}, \tag{1}$$

式中: m 为发射磁矩; $z_{\pm} = h \pm z$, $R_+ = \sqrt{r^2 + z_+^2}$, h 为线圈对地高度, r 为收发距; $T_2(z_-)$ 是与一阶贝塞尔函数有关的汉克尔积分。

负阶跃电流时间域航空电磁响应可根据反傅里叶变换,利用

$$B_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{B(\omega)}{-i\omega} e^{i\omega t} d\omega \tag{3}$$

计算得到。式中: $B_s(t)$ 是负阶跃电流下的时间域电磁响应, $B(\omega)$ 为频率域响应。任意发射波形的电磁响应可通过电流 I 与 $B_s(t)$ 的卷积获得:

$$\frac{dB}{dt} = - \frac{dI}{dt} * \frac{dB_s}{dt} = - \frac{d^2 I}{dt^2} * B_s. \tag{4}$$

因此,通过波形数据和频率域电磁响应,可计算相应波形下的时间域电磁响应。

4 正演模拟与分析

4.1 冻土厚度影响分析

根据祁连地区地下冻土相关信息,设置如图3所示地电模型,其中冻土电阻率 $300 \Omega \cdot m$,基底 $500 \Omega \cdot m$,冻土下地层电阻率 $100 \Omega \cdot m$,基底上方地层总厚度为 $500 m$,设置冻土厚度分别为 $50、60、70、100 m$ 。实际飞行中,受电线、高压塔、房屋等人文干扰影响,为保证飞行安全,飞行高度通常在 $40 \sim 60 m$ 之间变化,本文正演默认飞行高度为 $50 m$,分别得到 AeroTEM 系统中 17 个时间道的 dB_z/dt 和 Impulse 系统水平共面装置中 3 个频率的 H_z 实虚分量,如图4所示。

图4显示:冻土厚度每变化 $10 m$,AeroTEM 系统第一道变化约 $30 nT/s$,第三道变化约 $19 nT/s$,第五道变化约 $12 nT/s$,在信号早期具有一定差异,而质量较好的实际数据测线噪声水平一般不超过 ± 8

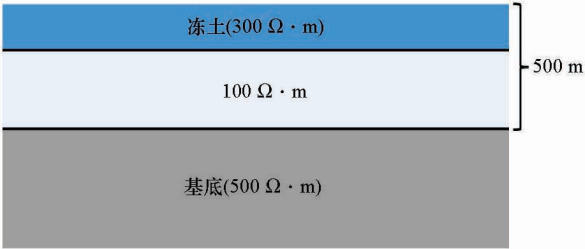


图3 冻土地电模型1

Fig.3 Goelectric model 1 of frozen soil

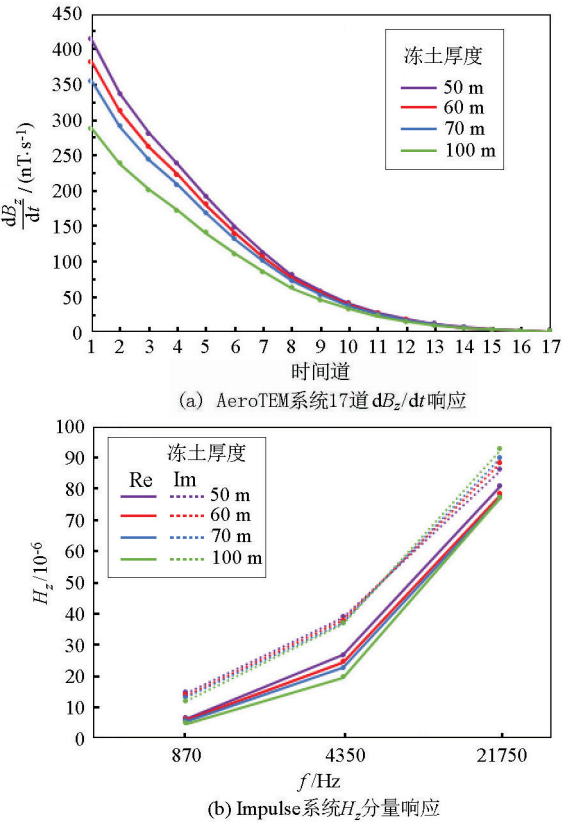


图4 不同厚度冻土模型的电磁响应

Fig.4 Response of permafrost models with different thickness

nT/s ,具备一定底界面探测能力;对于 Impulse 系统,厚度变化造成的 H_z 实、虚分量变化较小,不同频率间均不超过 5×10^{-6} ,与系统噪声水平接近,因此由冻土厚度引起的差异基本被噪声淹没,Impulse 系统无法区分冻土底界面。

4.2 冻土电阻率影响分析

冻土电阻率与水的冻结程度和冻土岩性有关,识别冻土电阻率的变化可以有助于了解地下温度和岩性变化。设置如图5所示的地电模型,其中冻土电阻率分别选取 $200、300、500、1000 \Omega \cdot m$,厚度固定为 $50 m$,冻土下地层电阻率 $100 \Omega \cdot m$,厚度为 $450 m$,基底 $500 \Omega \cdot m$,正演计算时间域和频率域航空电磁响应,结果见图6。

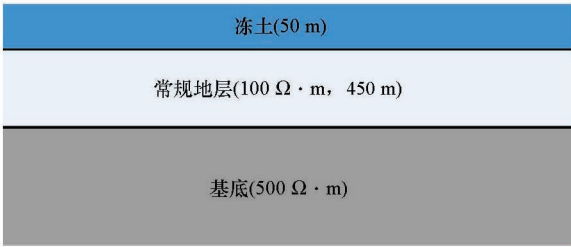


图 5 冻土地电模型 2

Fig.5 Geoelectric model 2 of frozen soil

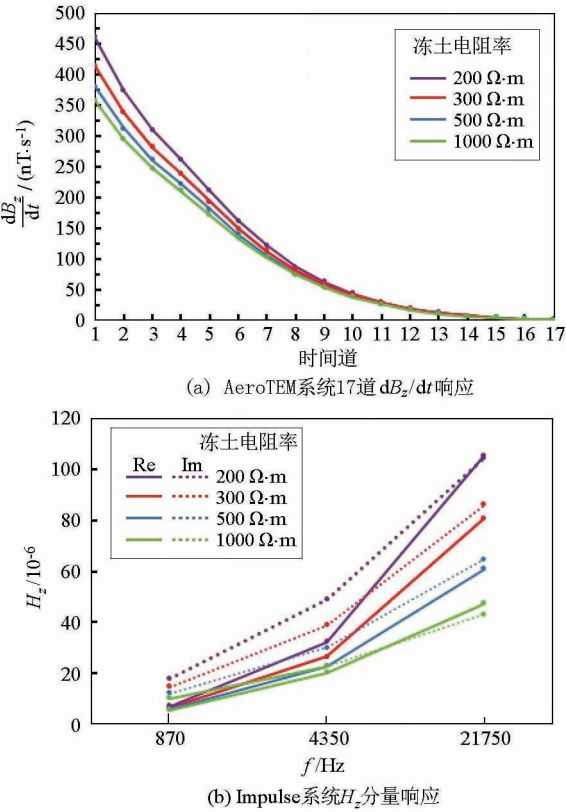


图 6 不同电阻率冻土模型的电磁响应
Fig.6 Response of permafrost models with different resistivities

图 6 显示,高阻冻土电阻率的变化对频率域和时间域响应均有较明显影响。频率域高频响应差异约在 20×10^{-6} ,中频响应的虚分量变化比实分量,但随着电阻率的升高,这种影响逐渐减弱,同时,随着电阻率的升高,频率域和时间域响应幅值整体减弱,尤其是频率域响应,当电阻率达 $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 时, H_z 实、虚分量均低于 45×10^{-6} ,低频下 H_z 分量甚至低于 10×10^{-6} ,整体响应极易受噪声影响,时间域响应的影响超过 25 nT/s 左右;因此,时间域和频率域航空电磁均能够识别冻土电阻率变化,但随着电阻率的增加,这种识别能力逐渐减弱,且易受噪声干扰。

4.3 融化冻土影响分析

7~10 月,随着温度变化,祁连地区表层季节性冻土融化,形成低阻层,厚度一般在 $1 \sim 2 \text{ m}$ 。为了分析融化冻土厚度和电阻率变化的影响,设计了如图 7 所示的地电模型:多年冻土电阻率为 $300 \Omega \cdot \text{m}$;融化冻土电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m}$,代表湿地及湿润草甸;多年冻土和表层融化冻土厚度共 50 m ,融化冻土厚度随温度和海拔变化,分别设置为 $0、1、2、4 \text{ m}$;冻土下地层电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$,厚度为 450 m ;基底电阻率 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 。正演计算时间域和频率域航空电磁响应,结果如图 8 所示。

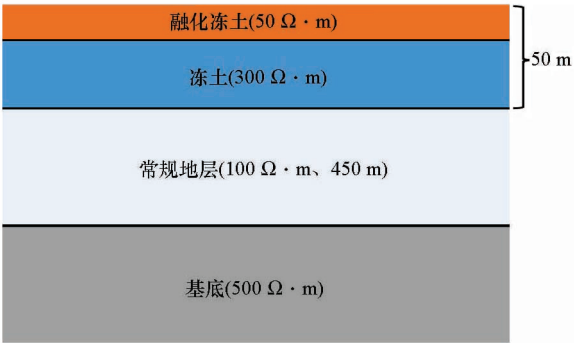


图 7 冻土地电模型 3

Fig.7 Geoelectric model 3 of frozen soil

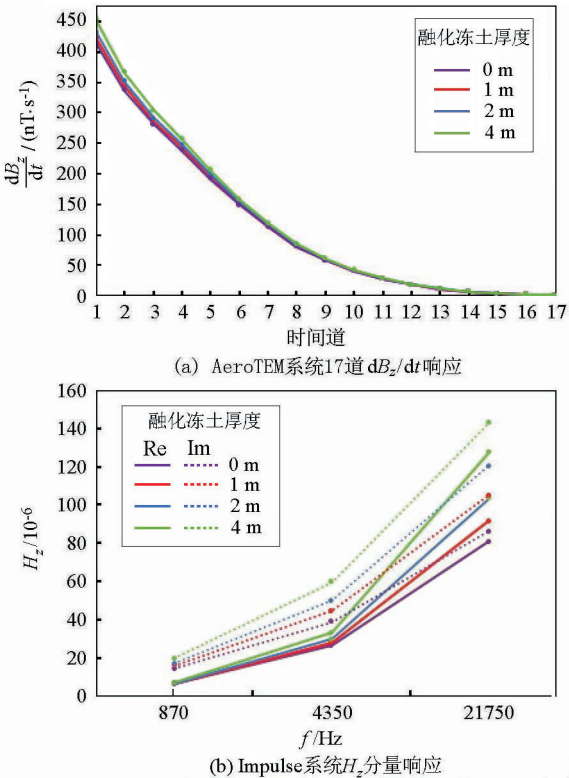


图 8 不同厚度融化冻土模型的电磁响应
Fig.8 Response of melting permafrost models with different thickness

图 8 显示:在 1~4 m 范围内,AeroTEM 时间域系统对融化冻土厚度变化不敏感,每增加 1 m 引起的早期第一道响应变化不超过 10 nT/s;Impulse 系统高频信号对融化冻土厚度反应较敏感,其中虚分量比实分量变化更大,平均增加 1 m 引起的高频响应差异实分量约为 12×10^{-6} ,虚分量约为 16×10^{-6} ,虚分量大于理论高频噪声水平的 3 倍。因此,相对于时间域系统,频率域系统更容易确定融化冻土厚度,进而辨别多年冻土顶界面变化,但噪声不能过大。当然,随着水分蒸发,融化冻土电阻率增加,Impulse 系统对融化冻土厚度的敏感性也将大幅降低。

4.4 冻土层下低阻层影响分析

由于祁连部分地区冻土层下有低阻层存在,而航空电磁对低阻层敏感,因此有必要分析低阻层对确定冻土厚度的影响。设计如图 9 所示的模型 4:基底以上地层厚度共 500 m,其中冻土电阻率 $300\ \Omega\cdot\text{m}$,厚度 50 m 或 80 m,常规地层电阻率 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,低阻层电阻率取 $25\ \Omega\cdot\text{m}$ 或 $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 。模拟不同情形下低阻层对系统响应的影响,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,对比 2 个系统,冻土下低阻层对 AeroTEM 系统影响更大。当冻土厚度 50 m 时,不同情形下,前五道早期道响应差异均大于 25 nT/s,而频率域系统下,中频响应差异最大,但仍不超过 8×10^{-6} ,无法从噪声中区分。当冻土厚度达 80 m 时,低阻层的影响减弱,时间域系统下已很难与无低阻层且冻土厚 50 m 时进行区分,且此时无论是频率域响应还是时间域响应,均小于无低阻层时的响应。这一情况也对应了反演中的多解性问题,需要增加约束信息,如钻孔信息或横向约束来区分。本次模拟表明,在冻土厚度一定时,冻土下低阻层的存在可帮助 AeroTEM 系统识别冻土层的底界面,且低阻层的电阻率越低、厚度越厚,系统的识别能力越强。

4.5 飞行高度影响分析

以图 7 中的模型 3 为例,分析飞行高度对 Impulse 系统识别融化冻土能力的影响。首先固定融化冻土厚度为 2 m,计算飞行高度分别为 40、45、50 m 时的频率域电磁响应。另外在飞行高度为 40 m 时,分别计算表层融化冻土厚度为 0、1、2、4 m 时的电磁响应,结果如图 11 所示。

图 11 显示,随着飞行高度降低,高频的电磁响应强度大幅增加,尤其是虚分量,因此飞行高度越低,有用信号越强。此外,当飞行高度固定为 40 m 时,融化冻土每米变化引起的高频响应差异实分量约为 16×10^{-6} ,虚分量约为 30×10^{-6} ,与图 8 飞行高度 50 m 响应相比,高频响应差异进一步增大,识别

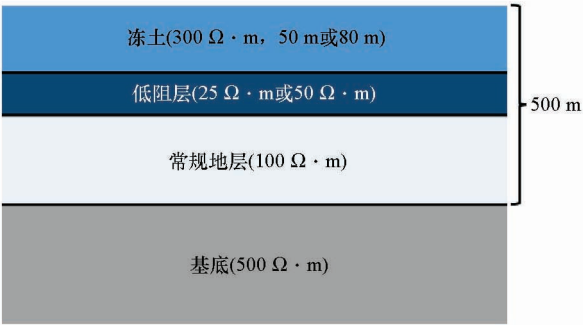
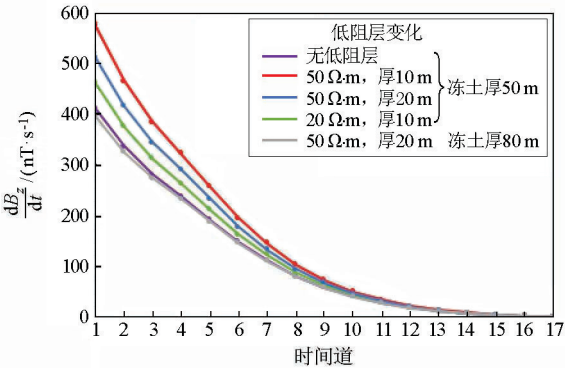
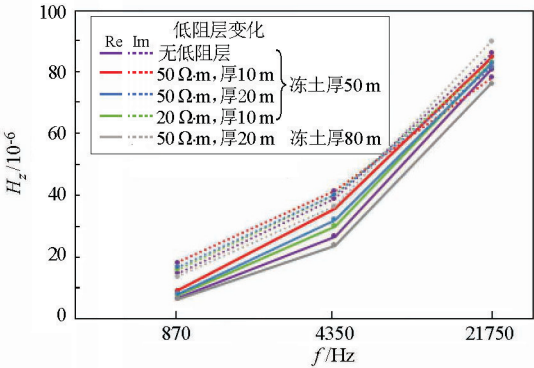


图 9 冻土地电模型 4

Fig.9 Geoelectric model 4 of frozen soil



(a) AeroTEM系统17道 dB_z/dt 响应



(b) Impulse系统 H_z 分量响应

图 10 不同低阻层的电磁响应

Fig.10 Response of permafrost models with different Low resistivity layers

融化冻土能力进一步增强。

以图 3 中的模型 1 为例,分析飞行高度对 AeroTEM 系统识别冻土厚度变化识别能力的影响。首先固定冻土厚度为 70 m,计算飞行高度分别为 40、45、50 m 时的时间域电磁响应,另外在飞行高度为 40 m 时,分别计算多年冻土厚度为 50、60、70、100 m 时的电磁响应,计算结果如图 12 所示。

由图 12 可知,随着飞行高度降低,电磁响应强度一定程度增加,每 5 m 变化约 22 nT/s,有用信号增强。此外,当飞行高度固定为 40 m 时,平均多年

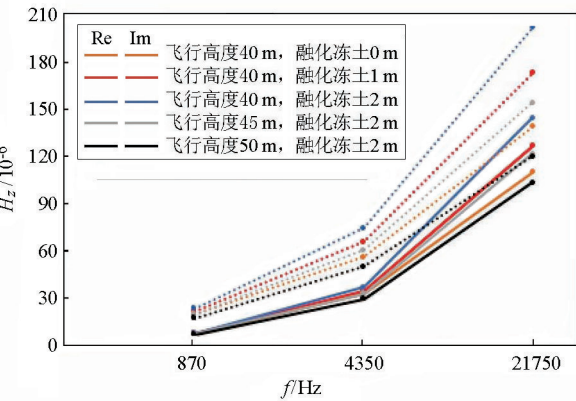


图 11 模型 3 不同飞行高度的 Impulse 系统 H_z 分量响应
Fig.11 H_z response of Model 3 with different flight altitudes

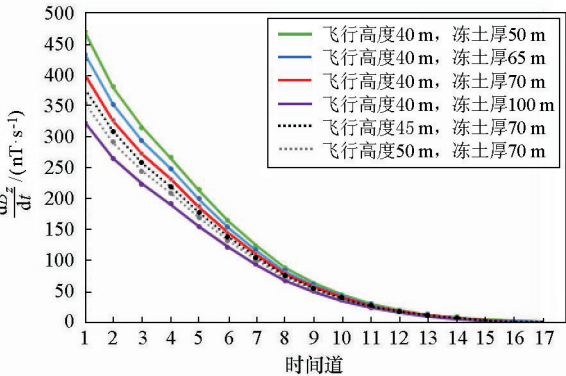


图 12 模型 1 不同飞行高度的 AeroTEM 系统 dB_z/dt 响应
Fig.12 dB_z/dt response of Model 1 with different flight altitudes

冻土每 10 m 变化引起的第一道响应差异约为 33 nT/s,第三道响应差异约为 21 nT/s,第五道响应差异约为 12 nT/s;与图 4 中飞行高度 50 m 响应相比,电磁响应差异变化不大,识别冻土厚度能力受飞行高度影响较低,但信噪比可进一步提升。

4.6 线圈俯仰角影响分析

实际飞行中,风速、飞行速度的变化会导致吊舱或线圈与水平方向呈现一定角度,对接收线圈中观测的电磁响应产生影响。飞行姿态一般用俯仰角、翻滚角和方位角等 3 个角度来描述,在实际飞行中,俯仰角受风速和飞行速度的影响最大,因此本文只讨论俯仰角对冻土探测能力的影响。

以图 7 中的模型 3 为例,分析俯仰角对 Impulse 系统识别融化冻土能力的影响。首先固定融化冻土厚度为 2 m,飞行高度 50 m,计算俯仰角为 0°、5°、10°和 15°时的频率域电磁响应,结果如图 13 所示。

图 13 显示,随着俯仰角的增大,高频电磁响应强度逐渐增加,其中 5°俯仰角引起的变化不大,但当俯仰角达到 10°和 15°时,高频响应差异超过 10×

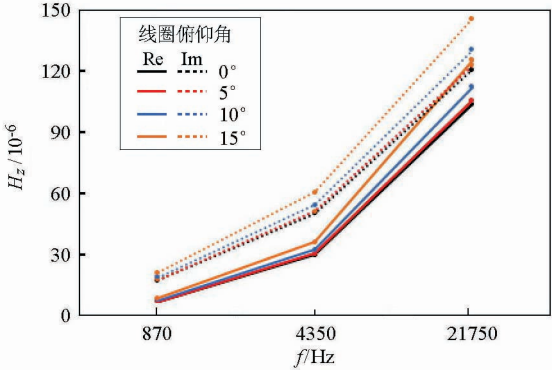


图 13 模型 3 不同线圈俯仰角的 Impulse 系统 H_z 分量响应
Fig.13 H_z response of Model 3 with different coil pitch Angles

10^{-6} ,与融化冻土厚度变化引起的响应差异相当。因此,由俯仰角引起的差异对融化冻土识别能力影响较大,需要在飞行前注意风向和风速的变化,飞行中对飞行速度进行控制,确保俯仰角不超过 5°。

以图 3 中的模型 1 为例,分析俯仰角对 AeroTEM 系统识别冻土厚度变化识别能力的影响。首先固定多年冻土厚度为 70 m,飞行高度 50 m,计算俯仰角为 0°、5°、10°和 15°时的频率域电磁响应,结果见图 14。

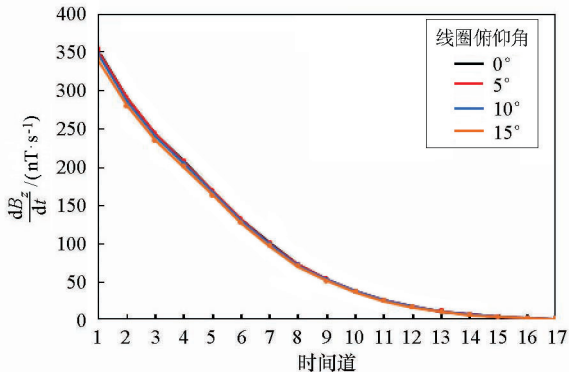


图 14 不同线圈俯仰角模型 1 的 AeroTEM 系统 dB_z/dt 响应
Fig.14 dB_z/dt response of Model 1 with different coil pitch Angles

图 14 显示,随着俯仰角的增大,电磁响应强度逐渐减弱,但不同俯仰角间响应差异不大,其中 10°引起的响应差异约为 6 nT/s,小于噪声水平。因此,俯仰角对 AeroTEM 系统冻土厚度探测能力的影响有限,但仍需要在飞行前注意风速和飞行中对飞行速度进行控制,确保俯仰角不超过 10°。

5 结论

针对 AeroTEM 和 Impulse 航空电磁系统,通过

一维正演模拟不同条件下冻土地区时间域和频率域响应,分析航空电磁技术对祁连地区冻土厚度和顶底界面探测能力。分析结果表明:

1) Impulse 系统可分辨表层低阻融化冻土厚度变化,确定湿地及湿润草甸地区多年冻土顶界面,但对底界面变化敏感度较弱; AeroTEM 系统对表层融化冻土敏感度较弱;

2) AeroTEM 系统对冻土厚度的变化比 Impulse 系统敏感,可用于确定多年冻土的底界面,但对表层融化冻土厚度变化敏感度较弱;

3) 冻土层下的低阻层可以提高 AeroTEM 系统对冻土底界面的识别能力,且随着低阻层厚度增加、电阻率降低,识别能力越强;

4) Impulse 系统和 AeroTEM 系统对多年冻土电阻率变化均较敏感, Impulse 系统更易区分,但随着电阻率的增加,两个系统的整体响应也越来越弱,低频响应和晚期响应容易被噪声淹没;

5) 飞行高度越低,2 个系统的响应越强,信噪比越高,同时能够提升 Impulse 系统的融化冻土探测能力,但对 AeroTEM 系统探测能力提升有限,因此有必要尽量保持较低的飞行高度;

6) 由于风速和飞行速度,线圈或吊舱而存在俯仰角对 Impulse 系统冻土探测能力影响较大,对 AeroTEM 系统冻土探测能力影响较小,因此需要保证 Impulse 系统飞行平稳,保持吊舱水平。

根据以上结论,综合利用高质量的 AeroTEM 和 Impulse 航空电磁数据,可以识别冻土层的顶底界面变化,但冻土厚度准确性受飞行高度、飞行平稳性和系统噪声影响较大,实际应用效果有待验证。此外,航空电磁法受人文干扰严重,数据处理技术对结果影响较大;同时时间域航空电磁系统质量较大,在高海拔地区对飞机起降点的高度、温度和风速要求较高,这些不足之处也应在冻土调查中引起足够重视。

参考文献 (References):

[1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.
Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000.

[2] 柳瑶.冻土电阻率模型及其试验研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2015.
Liu Y. Establishment and experimental study of frozen soil resistivity model [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2015.

[3] 祝有海,赵省民,卢振权.中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力[J].天然气工业,2011,31(1):15-19.
Zhu Y H, Zhao S M, Lu Z Q. Resource potential and reservoir distribution of natural gas hydrate in permafrost areas of China

[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(1): 15-19.

[4] 王通,俞祁浩,游艳辉,等.物探技术在多年冻土探测方面的应用[J].物探与化探,2011,35(5):639-642.
Wang T, Yu Q H, You Y H, et al. The application of electromagnetic technology to permafrost exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(5): 639-642.

[5] 祝杰,李平,刘应冬.高寒冻土条件下 CSAMT 在地热勘探中的试验研究[J].地矿测绘,2020,3(1):58-59.
Zhu J, Li P, Liu Y D. Experimental study of CSAMT in geothermal exploration under alpine frozen soil condition [J]. Geological and Mineral Surveying and Mapping, 2020, 3(1): 58-59.

[6] 王武,赵林,刘广岳,等.瞬变电磁法(TEM)在多年冻土区的应用研究[J].冰川冻土,2011,33(1):156-163.
Wang W, Zhao L, Liu G Y, et al. Geophysical mapping of permafrost using TEM [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011,33(1): 156-163.

[7] Efremov V N. Delineating the thawed and ice-rich zones based on apparent electromagnetic resistivity of frozen ground [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2014(3): 262-265.

[8] 顾钟炜.北美多年冻土调查中使用的几种电磁方法[J].冰川冻土,1981,3(4):88-98.
Gu Z W. Several electromagnetic methods used in permafrost surveys in North America [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981,3(4): 88-98.

[9] Hoekstra P, Sellmann P V, Delaney A. Ground and Airborne Resistivity Surveys of Permafrost Near Fairbanks, Alaska [J]. Geophysics, 1975, 40(4): 641-656.

[10] Hauck C, Guglielmin M, Isaksen K, et al. Applicability of frequency-domain and time-domain electromagnetic methods for mountain permafrost studies [J]. Permafrost & Periglacial Processes, 2010, 12(1): 39-52.

[11] Minsley B J, Abraham J D, Smith B D, et al. Airborne electromagnetic imaging of discontinuous permafrost [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(2): L02503.

[12] Pastick N J, Jorgenson M T, Wylie B K, et al. Extending airborne electromagnetic surveys for regional active layer and permafrost mapping with remote sensing and ancillary data, Yukon Flats Ecoregion, Central Alaska [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2013, 24(3): 184-199.

[13] Foley N, Tulaczyk S, Auken E, et al. Mapping geothermal heat flux using permafrost thickness constrained by airborne electromagnetic surveys on the western coast of Ross Island, Antarctica [J]. Exploration Geophysics, 2020, 51(1): 84-93.

[14] Key K, Siegfried M R. The feasibility of imaging subglacial hydrology beneath ice streams with ground-based electromagnetics [J]. Journal of Glaciology, 2017, 63(241): 755-771.

[15] 杨思忠,金会军,于少鹏,等.中俄输油管道(漠河—大庆段)主要冻土环境问题探析[J].冰川冻土,2010,32(2):358-366.
Yang S Z, Jin H J, Yu S P, et al. An Investigation into the Permafrost Environment along the Chinese-Russian Oil Pipeline Route from Mohe to Daqing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 358-366.

[16] 文怀军,鲁静,尚璐君,等.青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层

- 序地层研究[J].中国煤田地质,2006,18(5):19-21.
- Wen H J, Lu J, Shang L J, et al. A sequence stratigraphic discussion of the Jurassic coal measures in the Juhugeng coalmine area in Qinghai province [J]. Coal Geology of China, 2006, 18(5): 19-21.
- [17] 史健宗,南卓铜,石伟,等.青藏高原多年冻土本底调查信息系统[J].遥感技术与应用,2010,25(5):725-732.
- Shi J Z, Nan Z T, Shi W, et al. An Information System for the Permafrost Background Investigation over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(5): 725-732.
- [18] 肖继涛,柳瑶,胡照广,等.三种典型冻土的电阻率特性对比分析[J].森林工程,2015,31(6):116-121.
- Xiao J T, Liu Y, Hu Z G, et al. Comparative analysis on resistivity characteristics of three typical permafrost [J]. Forest Engineering, 2015, 31(6): 116-121.
- [19] 王显烈.用测井曲线解释冻土层厚度[J].冰川冻土,1991,13(1):91-94.
- Wang X L. Interpreting the permafrost thickness with logging curves [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1991, 13(1): 91-94.
- [20] 裴发根,方慧,杜炳锐,等.AMT 正演模拟及反演求导方法在探测冻土厚度中的应用——以青海木里地区多年冻土层为例[J].物探与化探,2016,40(2):405-410.
- Pei F G, Fang H, Du B R, et al. The application of AMT forward modeling and inversion derivation method to detecting permafrost thickness: A case study of Muli permafrost area in Qinghai Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(2): 405-410.
- [21] 姚大为,王书民,雷达,等.CSAMT 在祁连山永久冻土区天然气水合物调查中的应用[J].工程地球物理学报,2013,10(2):132-137.
- Yao D W, Wang S M, Lei D, et al. Application of CSAMT to Qilian Mountain Permafrost Region Gas Hydrate Investigation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(2): 132-137.
- [22] 檀文慧,钱卫,巴晶,等.祁连山冻土区天然气水合物高密度电阻率法勘探应用[C]//中国地球科学联合学术年会,2016.
- Tan W H, Qian W, Ba J, et al. Application of high-density resistivity method in gas hydrate exploration in qilian Mountain permafrost area [C]// Annual Meeting of Chinese Geoscience Union, 2016.
- [23] 刘钊剡,韩德波.电阻率测深在探测冻土层融化深度方面的应用[J].工程勘察,1996,24(2):64-66.
- Liu Z Y, Han D B. Application of resistivity sounding in detecting thawing depth of frozen soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1996, 24(2): 64-66.
- [24] 韩江涛,刘国兴,唐君辉.TEM 拟地震成像法在漠河地区探测永久冻土层的应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(6):1060-1064.
- Han J T, Liu G X, Tang J H. Application of Transient Electromagnetic Pseudo-Seismic Interpretation Imaging Method to Explore Permafrost Strata in Mohe Region [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(6): 1060-1064.
- [25] 王生廷,盛煜,吴吉春,等.祁连山大通河源区冻土特征及变化趋势[J].冰川冻土,2015,37(1):27-37.
- Wang S T, Sheng Y, Wu J C, et al. The characteristics and changing tendency of permafrost in the source regions of the Datong River, Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 27-37.
- [26] 吴吉春,盛煜,于晖,等.祁连山中东部的冻土特征(I):多年冻土分布[J].冰川冻土,2007,29(3):418-425.
- Wu J C, Sheng Y, Yu H, et al. Permafrost in the Middle-East Section of Qilian Mountains (I): Distribution of permafrost [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 418-425.
- [27] 吴吉春,盛煜,于晖,等.祁连山中东部的冻土特征(II):多年冻土特征[J].冰川冻土,2007,29(3):426-432.
- Wu J C, Sheng Y, Yu H, et al. Permafrost in the Middle-East Section of Qilian Mountains (II): Characters of permafrost [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 426-432.
- [28] 殷长春.航空电磁理论与勘查技术[M].北京:科学出版社,2018.
- Yin C C. Airborne electromagnetic theory and exploration technology [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [29] 王卫平,王守坦.频率域航空电磁法及应用[M].北京:地质出版社,2011.
- Wang W P, Wang S T. Frequency domain airborne electromagnetic method and its applications [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [30] 黄威.时间域航空电磁系统仿真与关键技术研究[D].长春:吉林大学,2016.
- Huang W. Time-domain Airborne Electromagnetic Simulation and Key Technologies [D]. Changchun: Jilin University, 2016.

Capabilities of airborne electromagnetic methods to detect permafrost

SUN Si-Yuan, YU Xue-Zhong, XIE Ru-Kuan, HE Yi-Yuan, SHAN Xi-Peng, LI Shi-Jun

(China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: It is critical for climate, water resources, ecology, and engineering construction in China to accurately assess the three-dimensional distribution and periodic change of permafrost. Permafrost is mainly distributed in high-elevation regions in China. Therefore, the surface geophysical prospecting suffers from low efficiency, high cost, and poor transportation in determining the thickness of per-

mafrost in China. In contrast, the airborne electromagnetic methods using resistivity difference enjoy great advantages. This study established a geoelectric model based on the thickness and resistivity of permafrost in Qilian area, Qinghai Province. Then, by simulating the thickness and resistivity of permafrost, low resistance layer under permafrost, flight height, and changes in the angles of receiver coils, this study analyzed the differences in electromagnetic responses under different conditions obtained from one-dimensional forward modelling using time-domain and frequency-domain airborne electromagnetic systems AeroTEM and Impulse. Based on this, this study assessed the capability of airborne electromagnetic methods to detect the top and bottom interfaces of permafrost. According to the simulation results, frequency-domain airborne electromagnetic system Impulse can determine the top interface of the permafrost covered by a marsh, wetland, or moist meadow according to the thickness of melted permafrost under a low noise level. In comparison, time-domain airborne electromagnetic system AeroTEM can determine the bottom interface of the permafrost, with the determination accuracy significantly improving when low-resistivity layers occur beneath the permafrost. Therefore, the top and bottom interfaces of permafrost can be jointly determined using frequency and time-domain airborne electromagnetic data. The results of this study will provide theoretical support for the future application of airborne electromagnetic methods to permafrost surveys in China.

Key words: permafrost; airborne electromagnetic method; one-dimensional forward modelling; thickness; detection capability

(本文编辑:沈效群)