

探地雷达在多年冻土工程地质勘察 中的应用效果研究^①

武小鹏^{1,2}, 魏永梁¹, 张军平¹

(1. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000;
2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 由于融土和冻土之间存在明显的电性差异, 使探地雷达成为研究多年冻土的有效手段之一。本文结合工程实例, 对探地雷达在青藏高原多年冻土工程地质勘察中的应用效果进行了现场试验研究。分析了探地雷达探测多年冻土的物理前提条件, 总结了多年冻土主要地质要素的雷达图像特征和探地雷达在多年冻土工程地质勘察中的实际应用效果。研究表明融土与冻土的雷达图像特征存在明显差异: 融土雷达反射波为低频强宽振幅的稀疏波, 波形较杂乱; 冻土反射波为高频低振幅细密波, 波形较为规则; 探地雷达可较为准确地划分地层、识别多年冻土上限、确定多年冻土分布范围, 但尚不能有效确定多年冻土的含冰量; 另外, 探地雷达对细颗粒土的探测效果要明显好于粗颗粒土。文章还指出了现场探测和图像解译分析中需要注意的事项和下一步需要研究解决的问题, 建议在开展现场探测工作之前先在有钻探资料或天然地质剖面处进行对比试验, 搞清测区内主要地层的物性参数, 掌握有效波和干扰波的分布规律, 从而提高雷达探测结果的准确性和可靠性。

关键词: 探地雷达; 多年冻土; 融土; 工程地质勘察; 效果

中图分类号: P631.3⁺25 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)02-0240-06
DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0240

Study on the Application Effect of Ground-penetrating Radar in Permafrost Engineering Geological Investigation

WU Xiao-peng^{1,2}, WEI Yong-liang¹, ZHANG Jun-ping¹

(1. Northwest Research Institute Co. Ltd. of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou Gansu 730000, China;
2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Research purposes: Ground-penetrating radar is one of the important methods used in permafrost engineering geological investigations. Engineering data in addition to theoretical analysis and field tests of ground-penetrating radar in permafrost engineering geological investigations were used in this study, which summarizes the characteristics of the radar image of the main geologic factors of permafrost regions and analyzes the effect of ground-penetrating radar in permafrost engineering geological investigations. In addition, this paper reports the topics for future analysis and fieldwork. The results show that ground-penetrating radar can accurately classify stratum and aid in determination of the permafrost table and the distribution of permafrost; however, this technology cannot effectively determine the ice content in frozen soil. Moreover, the prospecting effect of ground-penetrating radar is more effective in fine-grained soil than that in

① 收稿日期: 2013-03-01

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2003G021)

作者简介: 武小鹏(1979-), 男(汉族), 甘肃平凉人, 博士研究生、工程师, 主要从事特殊土地基与路基方面的研究工作。

E-mail: gslzwxp@126.com

coarse-grained soil.

Key words: Ground Penetrating Radar; Permafrost; Thawed soil; Engineering geological investigation; Effect

0 引言

我国多年冻土面积约 215 万平方公里,占国土面积的 22.3%,主要分布在东北高纬度地区的大、小兴安岭和松嫩平原北部及西部高山和青藏高原,在世界多年冻土国家中占第三位。其中,高海拔多年冻土面积居世界之最^[1]。随着我国经济建设的快速发展,冻土地地上的工程建设越来越多^[2],以青藏高原区为例,继青藏铁路之后,相继开工建设了青藏±500 kV 直流输电线路、花石峡—香日德一级公路、共和—玉树高速公路、青海省唐乃亥—玛多—玉树 330 kV 输电线路、青海省热水—木里公路等一系列工程。在多年冻土工程建设中,面临着如何解决融沉、冻胀和各种不良冻土现象的技术难题,而这些现象的发生和发展直接或间接地受到冻土含水量、地温、岩性、水文条件、大气温度、微地形地貌、周边植被环境等诸多因素地影响。多年冻土区工程建设前必须采取有效的勘察方法,对冻土进行全面而客观的评价,作为制定工程措施、保证冻土工程稳定的前提。因此,需要采取以工程地质调查、钻探、室内外试验以及物探相结合的综合地质勘察方法^[3-4]。其中探地雷达以其高效、便捷、精度高、成本低、勘察剖面连续等诸多优势越来越受到地质工作者的重视,成为冻土工程地质物探的重要手段之一。笔者先后负责了多条多年冻土区铁路、公路和高压输电线路工程的雷达探测工作,本文通过整理笔者从事探地雷达探测多年冻土工程的经验和体会,总结多年冻土区主要地质要素雷达图像特征,分析探地雷达在多年冻土地质勘察中的实际应用效果,提出雷达探测需要注意的事项和需要进一步研究解决的问题,以期类似地区开展探地雷达探测工作提供参考。

1 探地雷达简介及其探测多年冻土的物理前提条件

探地雷达方法是一种用于确定地下介质分布的广谱电磁法^[5],其基本原理是通过发射天线向被探测物体发射宽频带短脉冲形式的电磁波束,电磁波在传播过程中遇到存在电性差异的地下介质或目标体时,雷达波发生反射返回地面并由接收天线接收并以波形或图像的形式显示或存储,进而通过分析

反射电磁波的时间滞后、同相性、相似性以及波形特征来研究地质体^[6]。

随着电子技术和现代数据处理技术的发展,探地雷达的应用领域迅速扩大,目前已经广泛地应用于岩土工程勘察、水文地质调查、生态环境监测、城市地下管网普查、文物及考古探测等诸多领域,取得了显著的探测效果和社会经济效益。虽然探地雷达的研究和应用在非冻土区已取得了较丰富的成果,但在冻土地区由于冻土性质的复杂性、介质的不均匀性、物探的多解性等客观因素的影响,大大增加了多年冻土区探地雷达探测和图像解译工作的复杂性,非多年冻土区积累的一些成果和经验还难以直接在多年冻土物探工作中进行转化。目前对冻土物探理论及数字处理技术研究还不够深入,尤其是对冻土中含冰层的位置、含冰量的大小、冻土的结构特征等关键数据还没有很好的解决办法,还需要进一步结合工程实例加强多年冻土探地雷达图像的数字处理、解释分析和冻土电性特征、电磁特征方面的系统研究,从而进一步提高雷达探测结果的准确性,更好地指导工程实践。

不同地层之间、水与地质体之间、冰与水之间的不同都会造成电性差异(常见地质体沉积物的介电常数为:空气 1,淡水 80,冰 3.2,粉土 5~30,粘土 5~40,花岗岩 4~6),介质之间的电性差异为利用探地雷达进行工程地质研究提供了可能。电磁波在传播过程中在不同介质界面会产生反射波,而不同地质体电磁波特性的不同又进一步反映了不同的地质信息。电磁波反射系数计算公式为

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

式中: r 为反射系数; ϵ_1 、 ϵ_2 为两种不同介质的介电常数。由式(1)可见,随着两种介质介电常数差异的增大,其反射波强度随之增大;另外,介电常数大小的不同会导致反射波相位发生改变,这对运用探地雷达进行地质勘察进一步提供了有用信息^[8]。

多年冻土是由土颗粒骨架、未冻水、冰和孔隙等多相介质在低温特定环境条件下形成的特殊物质。由于水是良导体,融化层中的水和冻土中的未冻水仍是导体,但由于冻土中冰的阻隔作用,使冻土的电阻率要比融化层电阻率大很多。冻土的导电性

差,融化层的导电性相对较好,冻土与融土的介电性质存在明显差异,这是探地雷达用于多年冻土工程地质勘察的物理前提条件。

2 探地雷达工作参数的选择及现场探测注意事项

2.1 地质雷达工作参数的选择

地质雷达工作参数直接影响地质雷达图像的质量,选择正确的雷达探测参数是保证高质量完成物探工作的前提。物探参数包括天线中心频率、时窗、波速、天线间距、采样率、测点间距等,其中天线频率、时窗、目标体中的电磁波速度对探测效果影响较大。

(1) 天线频率(f)

天线中心频率是雷达探测中最重要的参数,与地质雷达的探测深度和分辨率有着直接的关系。在介质的电性特征一定的情况下,天线的中心频率越低,雷达的探测深度越大,分辨率越低;天线的中心频率越高,雷达的探测深度越小,但分辨率越高。因此,理论上天线的中心频率 f (单位 MHz) 可根据探测目标的深度用式(2)初步选定:

$$f = \frac{150}{x \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中: x 为探测目标的空间分辨率(m),即地质雷达方法分辨最小探测目标体的能力; ϵ_r 为介质的相对介电常数。

但除了天线中心频率,介质的电性特征也会影响探测深度。一般来说,在雷达设备和天线频率确定的情况下,雷达的探测深度随地下介质的电导率升高而下降,随地下介质的含水量升高而下降,随地下介质的导电成分含量升高而下降,随地下介质的杂乱程度而下降,反之亦然。所以在选择天线中心频率时要兼顾探测深度和分辨率,同时还要考虑探测目标的电性特征以及天线的尺寸是否符合测试地点的需要。一般来说,在满足分辨率和测试地点需要的条件下,应尽量降低地质雷达的中心频率。

(2) 时窗(W)

时窗是指从数据采集开始到数据采集结束之间的时间长度,时窗选择主要取决于最大探测深度 H_{\max} 与介质的电磁波速度 v ,时窗 W (单位 ns) 的大小可由式(3)估算:

$$W = 1.3 \times \frac{H_{\max}}{v} \quad (3)$$

式中: H_{\max} 为需要探测的深度(单位 m); v 为介质中

电磁波的传播速度(m/ns)。

时间窗口的设定合理与否将影响反射波的显示效果,如选的过小将丢失深部数据信息,选的过大将降低垂向分辨率,影响细部异常特征的显示。一般以预探测目标体的雷达反射图像出现在整个图像窗口的 $2/3$ 深度以上为宜。

(3) 波速的标定

雷达波在介质中的传播速度是由介质的电性特征决定的,介质不同,雷达波在其中的传播速度也不同。一般应在正式探测前通过对既有钻孔资料或已知地质剖面的地方反复测量进行波速标定,力求将误差降至最低,增加探测精度。还要注意介质发生变化,必须进行再次标定。

(4) 天线间距

当使用分离式发射天线和接收天线时,适当选取发射天线与接收天线之间的距离可使来自目标体的回波信号增强。天线间距 S 的选择应使最深目标体相对接收天线与发射天线的张角为临界角的 2 倍,即天线间距 S 可参考式(4)计算结果进行选取:

$$S = \frac{2H_{\max}}{\epsilon_r} \quad (4)$$

实际测量中,由于加大天线间距会增加现场工作的不便且会使分辨率降低,因此选择的天线间距常常小于该数值,常取目标体最大深度的 20%。

最后要指出,虽然有理论公式来计算测量参数,但由于各地区的地质情况千差万别,加之其他干扰因素的存在,这些理论公式都有其局限性,所以在实际操作过程中要根据经验数据或者选择几组不同的参数进行对比探测,反复研究反射波的细部特征和探测效果,最后选取探测效果最佳的天线和参数完成探测工作。

2.2 探地雷达现场探测注意事项

由于受地质条件的复杂性、介质的不均匀性、电磁波的散射和衍射、多次波及杂波以及物探资料本身的多解性等问题的影响,大大增加了探地雷达图像解译工作的复杂性。为了提高雷达探测结果的可靠性,现场探测过程中还应注意以下几点:

(1) 在开展探地雷达探测工作之前先通过钻探资料、天然地质断面等进行对比试验,调查测区内有效波和干扰波的分布规律,选择合理的探地雷达工作参数和探测方法。

(2) 对于非空气耦合式天线,测量过程中应保持工作天线与探测面平行,距离相对一致,最好能紧贴地面进行探测。

(3) 连续测量时天线移动速度应均匀, 应与仪器的扫描速率相匹配; 点测时应在天线静止时采样。

(4) 测量过程中应详细记录测区内可能对雷达图像造成影响的各种干扰, 比如表形态变化情况、含水率变化情况、测区内的金属体或较大体积的独立物体、无线电射频源等, 并在雷达图像上进行标记, 以便更好地进行探测图像的解译和判定。

3 工程实例及应用效果分析

作为多年冻土工程地质勘察的主要手段之一, 探地雷达的主要探测目的是: ①探测一定深度范围内主要地层分布、厚度及其变化情况, 如覆盖层厚度、基岩埋深、风化程度及起伏特征等; ②结合钻探资料, 对冻土的分布特征进行研究, 重点是查明冻土的分布范围; ③确定多年冻土上限。下面以笔者完成的青海省共和至玉树高速公路(下称共玉高速)和青藏±500 kV 直流输电线路工程多年冻土探地雷达探测成果为例, 分析多年冻土区典型地质要素的雷达图像特征。

3.1 划分地层

当地层由多个存在电性差异的层面组成时, 反射电磁波波形受粒径、级配、密实度、含水率等多种因素的影响。粒径均匀的粉土、粘性土和砂土其雷达反射波同相轴连续、平直, 为高频低幅细密波、波形较为规则、均匀。粒径不均匀的粗颗粒土如卵石土、碎石土、砾石土等其雷达反射波形为低频强宽幅疏松波(弯曲、粗宽), 而粒径越不均匀反射波形频率越低、波形越杂乱, 同相轴连续性越差。基岩的雷达图像特征主要受岩性、风化程度和岩体破碎程度的影响。基岩风化程度越高、越破碎, 风化后的岩石粒径越不均匀, 其雷达反射波同相轴连续性越差、频率越低、振幅越强, 波形也较为杂乱, 反之亦然。图 1 为共玉高速公路某取土场地层划分雷达解译成果图。地表覆盖 3.5~4 m 厚的碎石土, 下伏微风化板岩, 两者雷达图像特征存在明显差异。

3.2 确定多年冻土上限

由于冻土和融土介电特性差异较大, 因此冻土雷达反射波相位特征、振幅大小、反射波组形态特征都与融土有很大区别。图 2 为青藏±500 kV 直流输电线路工程多年冻土天然上限探地雷达解译成果图。从图中可以看出, 在融化层内雷达反射波为低频强宽振幅的稀疏波, 波形较杂乱; 在冻土层内地层均一, 反射波为高频低振幅细密波, 波形较为规则,

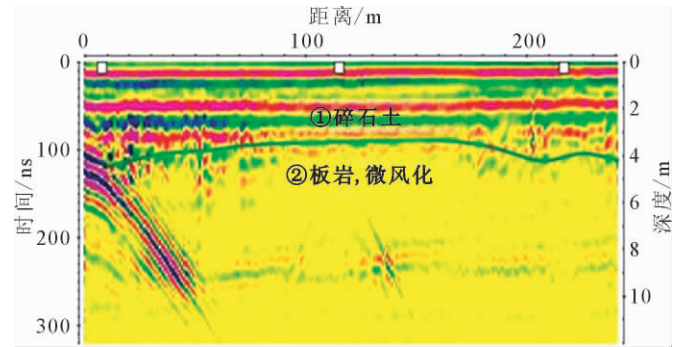


图 1 共玉高速某取土场地层划分雷达图像

Fig. 1 Ground penetrating radar image of soil-taken field along Gonghe-Yushu expressway.

由浅到深反射波形逐渐衰减。但由于含冰量对冻土介电性质的影响有限, 从探地雷达图像中尚不能有效分辨多年冻土的含冰量情况。该分析结果与钻探验证结果一致。另外, 由于冻土的隔水作用, 冻融界面附近土体含水率一般较大, 介电常数也就较大。且在多年冻土地区, 在反复的冻融循环分凝机制作用下, 上限附近一般存在分凝冰^[8], 这也为探地雷达判断冻融界面提供了重要依据。

3.3 查明多年冻土分布范围

查明多年冻土分布范围是冻土工程地质勘察的基本任务之一。在 2011 年 8 月进行的共玉高速公路二期多年冻土工程地质勘察中, K364+152 钻孔显示为融区, 而 K364+414 钻孔显示该处为多年冻土, 季节融化深度 3.3 m。为了确定多年冻土边界, 在该段沿线路纵向进行了探地雷达探测, 图 3 为探地雷达划分多年冻土边界的解译成果图。从图中可以看出, K364+100~K364+405 段地表以下 0~12 m 深度范围内几乎全部为低频强宽幅疏松波(弯曲、粗宽), 波形杂乱; K364+405~K364+550 段地表以下 0~3.2 m 深度范围内雷达波形也为较为杂乱的低频强宽幅疏松波, 但 3.2 m 以下雷达图像为高频低振幅波, 波形较规则。因此推测在平面上 K364+405 为融区与多年冻土的分界线, 即 K364+405 往小里程方向为融区, 往大里程方向为多年冻土。而对于 K364+405 以后的多年冻土区, 地表至 3.2 m 为季节融化层, 其下为多年冻土。施工过程中挖探结果与上述判断结果完全吻合。

4 结论

(1) 实践证明, 由于融土和冻土之间存在明显的电性差异, 这使得探地雷达成为一种研究多年冻土的有效手段, 通过探地雷达与现场调查、钻探等多

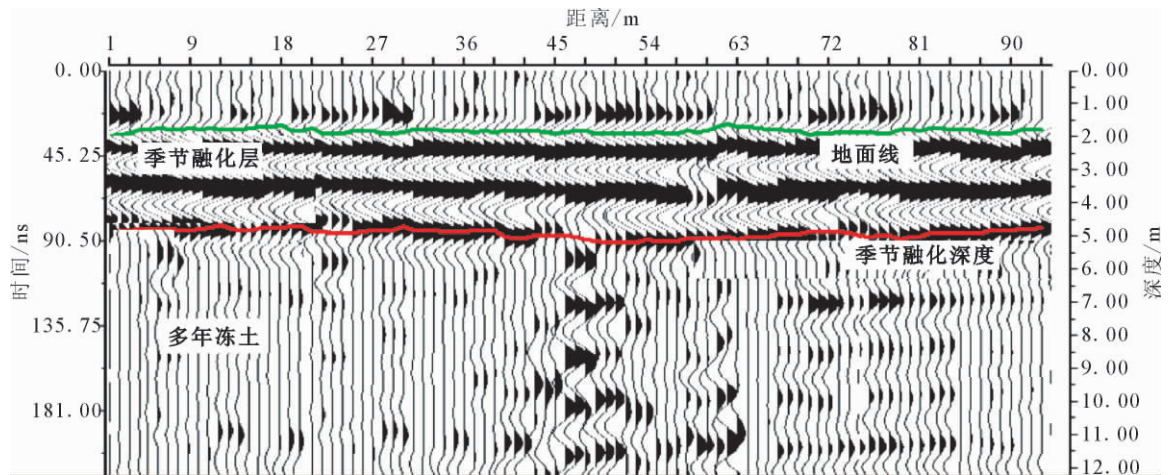


图 2 多年冻土上限探地雷达解译成果图

Fig. 2 Ground penetrating radar image of permafrost table.

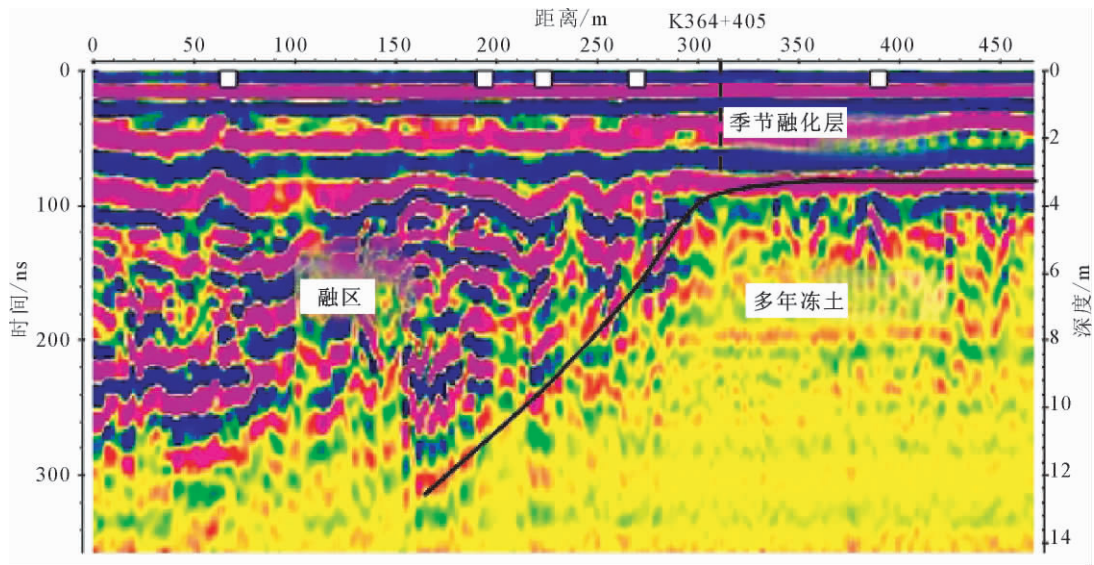


图 3 探地雷达划分多年冻土边界解译成果图

Fig. 3 The image of ground-penetrating radar in dividing distribution of permafrost.

种勘察手段的结合,可以对多年冻土进行快速勘探,较为准确地划分地层分界线,识别多年冻土上限,确定多年冻土分布情况。但由于含冰量对冻土介电性质的影响有限,因此探地雷达在确定多年冻土含冰量方面的效果不是十分理想。

(2) 由于受冻土的复杂性、仪器性能、介质的不均匀性、电磁波的散射和衍射、多次波及杂波、物探资料本身的多解性等问题的影响,大大增加了探地雷达图像解译工作的复杂性。因此,建议在开展探地雷达探测工作和图像解译之前先通过钻探资料、天然地质断面等进行对比试验,搞清测区内有效波和干扰波的分布规律,初步确定各反射层与地层层位的对应关系,选择合理的探地雷达天线型号、工作参数和探测方法。在探测过程中应详细记录测区内

的各种干扰,从而提高雷达探测结果的准确性。

(3) 由于细颗粒土含水率相对较大,冻与不冻其介电性质存在显著差异,因而其地质雷达探测效果要明显好于粗颗粒土。

(4) 目前我国对冻土物探理论及数字处理技术研究还不够深入,尤其是对冻土中含冰层的位置、含冰量的大小、冻土的结构特征等关键数据还没有很好的解决办法,建议加强多年冻土探地雷达图像的数字处理、解释分析和冻土电性特征、电磁特征方面的系统研究,进一步提高雷达资料解释精度和可靠度,更好地指导工程实践。

[参考文献]

- [1] 汪双杰,李祝龙,章金钊,等.多年冻土地区公路修筑技术[M].

- 北京:人民交通出版社,2008.
- WANG Shuang-jie, LI Zhu-long, ZHANG Jin-zhao. Highway Construction Technology on Permafrost Regions[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] 王兰民,孙军杰.特殊土动力学的发展战略与展望[J].西北地震学报,2007,29(1):88-93.
- WANG Lan-min, SUN Jun-jie. Development Strategy and Prospects for Study of Special Soil Dynamics[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(1): 88-93.
- [3] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路工程地质勘察规范(JTJ C20-2011)[S].北京:人民交通出版社,2011.
- CCCC First Highway Consultants Co., Ltd.. Code for Highway Engineering Geological Investigation[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [4] 苏文俊,侯宗博.综合地质预报技术在岩溶区隧道施工中的应用.西北地震学报,2011,33(增刊):330-334.
- SU Wen-jun, HOU Zong-bo. Application of Integrated Geological Prediction Technologies in Tunnel Construction in Karst District[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Supp.): 330-334.
- [5] 俞祁浩,程国栋.物探技术在我国多年冻土勘测中的应用[J].冰川冻土,2002,24(1):102-108.
- YU Qi-hao, CHENG Guo-dong. Application of Geophysical Methods to Permafrost in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1): 102-108.
- [6] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路工程物探规程(JTG/T C22-2009)[S].北京:人民交通出版社,2009.
- CCCC First Highway Consultants Co., Ltd.. Guidelines for Highway Engineering Geophysical Exploration[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [7] 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 Qi-hao, BAI-yang, JIN Hui-jun, 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.
- [8] 程国栋.厚层地下冰形成的分凝机制[J].寒区旱区科学与技术,1983,8(1):57-66.
- CHENG Guo-dong. The Mechanism of Repeated-segregation for the Formation of Thick Layered Ground Ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 1983, 8(1): 57-66.