

青藏铁路多年冻土勘察的物探方法选择及其应用效果

王文龙

(铁道第一勘察设计院 物探公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在青藏铁路的建设过程中, 多年冻土是一个关键问题, 开展物探工作时, 会遇到较非冻结区更为复杂和多变的勘测对象, 因此, 选择合理的工作方法就显得尤为重要。作者论述了目前开展的各种物探方法的优劣, 给出了利用综合物探方法勘察青藏铁路多年冻土的结果。实践证明, 开展综合物探是勘探多年冻土的一种行之有效的办法。

关键词: 青藏铁路; 多年冻土; 综合物探技术; 勘探方法

中图分类号: P631.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2003)02-0150-05

随着我国国民经济发展战略的西移和科学技术的进步, 青藏铁路格拉段的建设已经成为了现实。线路通过地段广泛地分布着高原型多年冻土, 冻土带北边界位于昆仑山北麓的西大滩, 南边界位于西藏自治区安多县北侧央尔布茸, 线路里程约为 550 km。查明多年冻土在三维空间的分布情况、特征、类型等实际情况, 了解和分析多年冻土地区温度场、水分场、盐分场等诸多物理场的基本数据, 研究和认识它们与多年冻土的相互响应、相互影响等问题, 对铁路的设计、施工乃至后期维护均有十分重要的意义。

在冻土勘查中, 地球物理勘探以其特有的速度快捷, 成本低廉, 方法多样, 剖面布设灵活、可变, 资料连续等诸多优点成为冻土勘查工作中的重要组成部分。实际上, 物探工作贯穿着青藏铁路冻土勘探的始终。60~80 年代初, 我国科技工作者先后进行了直流电测深法、直流电剖面法、偶极电位差比较法、中子测井、地震勘探法等物探应用技术研究, 并在后期开始了冻土的导电性、介电常数和超声性质等物理性质的室内研究工作。90 年代开始, 主要进行了以探地雷达为主的大量工程物探研究工作, 为多年冻土地区铁路、公路工程设计与施工提供了可靠的科学依据和大批急需的技术参数, 解决了大量的工程实际问题。

目前, 如何在众多的物探方法中选择有效的方法技术, 对冻土的多样性进行快速、准确的识别, 成为在多年冻土区开展各项工作的关键和基础。

1 多年冻土勘探的地球物理特征

在多年冻土地区, 外界温度的变化会引起地下温度梯度的变化, 导致土体中所含水分的迁移、冻结和变化, 引起冰在地质体中的不同部位以不同形式进行富集或消散, 形成不同冻土类型。冻土的这种形成和动态变化会对地质体的物理性质产生更为突出的影响。

青藏线冻土按岩性可分为两类, 一类是以第四系坡积、洪积物组成的非成岩型冻土, 另一类是已成岩型冻土, 如: 泥岩、沙岩、灰岩等。在已成岩型中, 泥岩由于冻与不冻其物理性质明显不同, 造成显著物性差异, 因而我们用物探方法是可以解决泥岩冻与不冻的问题。而其它岩石(砂岩、灰岩)在冻与不冻的情况下, 其物理性质变化并不明显, 用物探方法也就不好区分。

通过总结前人资料、测试室内模型并对大量物探勘测资料进行正反演, 我们发现第四系沉积物和泥岩冻融间最明显的物性差异是岩石的纵、横波速度(v_p, v_R), 其次是电阻率 ρ 和介电常数 ϵ , 第四系沉积物中的季节冻土与多年冻土也存在明显的物性差异(表 1)。

表 1 冻土与融层、季节冻土与多年冻土的物性参数

	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$v_R/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(\Omega \cdot m)$	ϵ
融化	< 2000	< 400	< 800	4 ~ 20
冻结	2700 ~ 3500	500 ~ 1800	1000 ~ 2700	< 3.5
季节冻土	2700 ~ 3000	500 ~ 800	1000 ~ 1500	差异不明显
多年冻土	> 3000	> 1100	1500 ~ 2700	

泥岩虽然在波速上与第四系沉积物相当,但在电阻率这一物性参数上是一个特例。高矿化度泥岩(如沱沱河南岸的泥岩)在冻结状态下,由于低温盐析的作用,使得岩石内形成了1个导电网络,在冻结后电阻率极低,一般小于 $20 \Omega \cdot m$,而在融化状态下,则为 $30 \Omega \cdot m$ 左右;低矿化度泥岩在融化状态下,一般电阻率为 $30 \sim 40 \Omega \cdot m$,在冻结状态下,电阻率一般大于 $100 \Omega \cdot m$ 。泥岩中季节冻土与多年冻土的电阻率差异表现也并不显著。季节冻土与多年冻土在介电常数上差异不明显。

2 冻土勘察的物探方法的选择

由于冻土是由颗粒骨架、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,其物理性质除与土体原有物理性质密切相关外,还与所在位置的温度场、水分场和应力场等密切相关。这些物理场的变化又会导致所含地下冰和水分的迁移和聚散,进一步导致勘察对象物理性质的变化。因此,在多年冻土区开展物探工作时,会遇到较非冻结区更为复杂和多变的勘测对象,我们不能完全照搬非冻土区的物探方法所取得的成果。

由于第四系沉积物和泥岩在冻结和融化状态下,存在物性的显著差异,这为我们应用物探方法寻找冻土提供了良好的地球物理前提。

地震折射法:利用的是冻土的波速差异,应用的前提是在层状介质模型下,下层纵波速度大于上层纵波速度,因为只有这样,我们才能获取到下层介质的纵波速度及深度。其局限性是,地表松软,激发条件很差时难以追踪折射波。

多点瞬态瑞雷波法:是近年发展起来的一种较新的物探方法,它利用了瑞雷面波在不均匀层状介质中传播具有频散性这一特征进行分层。该方法在冻土勘探中具有良好的分层性,可有效地划分融化层、季节冻土、多年冻土等地质界面,但当地表介质不均匀或激发条件差时,勘探深度大大减小。

对称四极电测深法:通过测量不同深度电阻率的数值来区分地层。由于前述冻层与融层电阻率差异明显,所以从得到的视电阻率曲线,进行反演来获得各层厚度和电阻率。该方法的优点是曲线直观,若对冻土模型认识充分,可在野外直观地判释冻土的存在与否和冻土上限。

探地雷达法:超高频($106 \text{ MHz} \sim 1 \text{ GHz}$)电磁波在地下传播过程中,由于不同介质的介电常数不同,在界面上波阻抗会引起电磁波反射,通过对这些反

射波信号的处理、分析得到雷达影像,它能较为直观地反映地质体的几何形态。探地雷达的缺点是:地表水系发育时无法工作,另一个就是不能有效地划分季节冻土和多年冻土。由于探地雷达测量是连续剖面,频率高,因此在条件充分的情况下,可以准确地划分出冻融边界。

高密度电阻率法:是一种电法勘探的变种,虽然测量的仍是岩层的电性差异,但它具有成本低,效率高,反映地电、地质信息更丰富、更直观,资料解释简单方便等优点。

可以看出,所选择的这些物探方法都有各自的优势和局限,为了较好地冻土进行勘查,有必要进行综合物探。可依据以下两方面进行。

(1) 勘察对象的重点有所不同。总体而言,在少冰和多冰冻土区域,土体冻结后地质体的电性特征的变化会较其弹性特征的变化更为明显,因此,勘测重点为冻土的分布特征时应优先考虑电法勘探方法,勘测重点为地质体的岩性变化时应优先考虑地震勘探方法。在富冰、饱冰和含土冰层冻土区域,地质体的电性与弹性特征在土体冻结前后均有很大变化,在冻土的勘探中无明显优略差异,只是地震勘探方法在冻土的分层方面有时会更好一些。井中勘探方法主要在钻孔中从深度变化的角度对冻土进行精细勘测研究。

(2) 工作效率、勘探精度和勘探深度的不同特性。电法勘探中的电磁高频部分,勘探精度高,效率高,但深度有限;在 $20 \sim 30 \text{ m}$ 深度范围内,探地雷达的勘探精度和效率最高,成为在此深度范围内冻土勘察的首选方法;低频部分勘探深度可达上千米,但精度和效率低。电法直流部分和地震勘探方法勘探深度可达几十或上百米,但精度和效率较低,其中直流电法虽为很成熟的方法并且以前一直在冻土勘察中得以应用,但由于勘探精度和效率的限制现已应用不多。重力勘探方法的优点是使用的仪器非常简单、便捷,但勘探精度很低,只能用于巨厚层地下冰或埋藏冰川的勘测。所以,在多年冻土地区开展物探工作,应根据勘探目标、研究内容、勘探深度、工作时间等几方面综合考虑来选用不同方法。

根据物性的差异,我们认为选用地震折射波法、多点瞬态瑞雷波法、对称四极电测深法、高密度电阻率法、探地雷达法在青藏高原勘查冻土与融区范围、季节冻土深度、多年冻土上限是较为理想的物探方法组合。

3 多年冻土的地球物理模型及判释原则

为了更好地对野外第一手资料进行合理、充分的解释和利用,我们通过对前人资料的研究、分析并结合此次青藏线冻土勘察成果,建立起了 2 种典型的冻土地球物理模型——高阻高速型和低阻高速型^[1],并且确定了多年冻土的一般判释原则。

(1) 探地雷达法。由于冻土与非冻土之间存在明显的电阻率及介电常数的差异,而电磁波在冻土层中的衰减性极弱,所以当电磁波遇到冻土层时会产生一个很强的反射波,表现在雷达影像上为一位于直达波后的强振幅、同相轴连续性好的影像层(图 1)。由此我们可以判定冻土的存在与否。

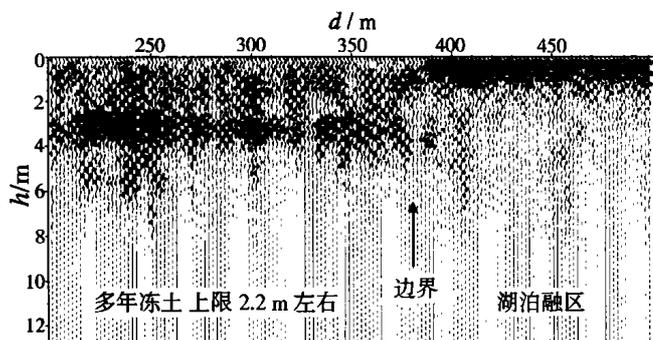


图 1 多年冻土的探地雷达影像

(2) 电阻率法。冻土之前,电阻率变得相对较低,然后随着勘探深度的增大而逐渐进入到季节性冻土和多年冻土区域,电阻率亦随着深度的增大而增大,如果勘探深度达到了冻土下限,则电阻率应逐渐减小。故其在电测深曲线上应表现为 A 型(未见冻土下限)或 AK 型(出现冻土下限)曲线(图 2)。

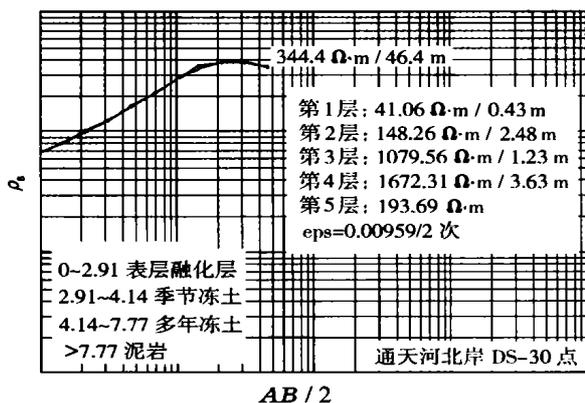


图 2 多年冻土典型的电测深曲线及反演

需要指出的是,由于地下物质的不同,电阻率的上升幅度亦不相同。特别是低矿化度的泥岩,冻结时电性差异不像其它冻土那样明显,一般其上升幅

度较小,只有 $100 \sim 200 \Omega \cdot m$ 。当曲线呈下降状态时,主要是高矿化度的泥岩冻土的反映,由于其电阻率很低,在电测深曲线上反映为一迅速下降的 D 型曲线,这时仅靠电法很难确定冻土的存在与否,应参考其它物探方法综合分析。

(3) 多点瞬态瑞雷波法。瑞雷波频散曲线在融区内一般表现为典型的两层曲线(图 3a),上部为地表覆盖层(如地表土、细砂土等),其瑞雷波速度较低, $v_R = 180 \sim 300 \text{ m/s}$,下部的瑞雷波速度 $v_R = 300 \sim 500 \text{ m/s}$ 。此类曲线一般在同一剖面内规律性较好。而在冻土区,瑞雷波频散曲线大多呈现为三层曲线(如图 3b),分别对应着表层覆盖层(融化层, $v_R = 180 \sim 400 \text{ m/s}$),季节性冻土层 ($v_R = 500 \sim 800 \text{ m/s}$),多年冻土层 ($v_R > 1000 \text{ m/s}$)。

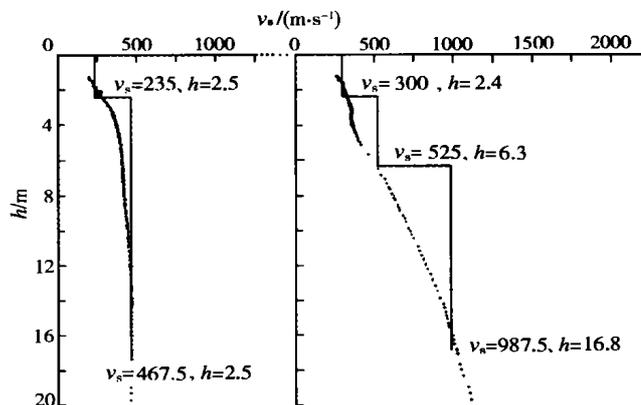


图 3 瑞雷波频散曲线

(4) 地震折射法。利用地震折射法可以有效地判定高速层的存在。在青藏高原多年冻土区,一般认为季节性冻土 $v_p = 2700 \sim 3000 \text{ m/s}$,而多年冻土的纵波波速为 $v_p > 3000 \text{ m/s}$ 。利用纵波速度可以判定冻土的存在与否,但是当季节冻土厚度较小时很难区分季节性冻土和多年冻土。

4 应用实例

在青藏铁路初、定测的地质勘察中,我们应用综合物探方法对多年冻土的分布范围、空间分布规律进行了勘探,并且取得了良好的地质效果,为铁路的地质选线提供了较为全面和可靠的物探资料。

4.1 工作布置

在野外施工中,根据物探工作的任务要求,在不同阶段,我们针对不同工点采用了不同的工作方法和工作布置。

在初测阶段,主要采用了直流电测深法、地震折射法和探地雷达剖面法,利用冻土与融区的电性差异、波速差异以及对电磁法不同反映,划分冻融边

界,查明岛状冻土的分布及多年冻土的上限,从宏观上了解多年冻土的范围及分布规律。

在定测阶段物探工作则是要准确划分线路位置上的冻融边界,确定冻土上限,圈出岛状冻土区内岛状冻土的边界。因此我们在工作中,主要采用了直流电测深法、多点瞬态瑞雷波法、探地雷达剖面法和高密度电阻率法,在工作布置上主要是沿线路中心布设剖面,地震和电法点距一般为 50 m 左右,如发现异常需加密测点。

4.2 工作成果

4.2.1 青藏线多年冻土南北边界的确定

青藏线多年冻土区的北边界位于昆仑山北侧的西大滩断陷谷地中(海拔 4 200 m 左右),青藏公路 109 国道呈东西向穿越谷地。

在平面上,以青藏公路 K2878 为界,公路以南及以西出现大片连续的多年冻土区,与昆仑山在该处的山前凸出山嘴呈现明显的相关性。保守估计,从 1995 年开始,冻土在公路下的发育又向西退移了 1.3 km。

从断面上看,越靠近冻土区边界,多年冻土的上限也越深,一般为 4~7 m。随着向冻土腹地及昆仑山山前靠近,多年冻土的上限也越浅。

青藏线多年冻土南界位于西藏自治区安多县以北央杂尔布茸一带,海拔 4 700~4 800 m。

本地区下伏基岩为砂岩、灰岩和泥岩,呈交错分布,从前面的论述中,我们可以看出物探方法对于砂岩、灰岩地区的冻土是无效的,物探工作在该地段不能有效、准确地划分冻土界线。

通过综合分析物探资料,发现在该地区沿线路存在冻融交错的现象,推测多年冻土的南界应位于 DK1512+800 以南(地质划分界线为 DK1513+350)。

4.2.2 大河融区的特征

在青藏高原多年冻土区内,分布着若干条大的河流,如沱沱河、通天河、布曲河等。沿这些河流均分布着大河融区,其形态通常是沿着河流呈条带状分布,融区范围与河流流量、水温及河流与构造的关系有关。河流融区主要是由地表水的作用造成的。

从构造地质上看:沱沱河融区和通天河融区均属于断陷盆地,通天河两岸下伏基岩虽然都是泥岩,但是其物性存在明显差异,说明两岸泥岩不属于同一类型。两岸的融区范围也不尽相同,南岸为 1.4 km,北岸达 2.4 km。冻土上限一般为 3~4 m。

沱沱河南岸泥岩呈高矿化度,电阻率在冻结后

比融化状态下更低,可低到 $10 \Omega \cdot m$ 左右。融区范围仅有 50~100 m。而北岸至乌鲁山为一过渡带,其间广泛地分布着岛状冻土,冻结的泥岩电阻率一般 $>300 \Omega \cdot m$ 。冻土上限一般为 4~5 m。

布曲河融区:青藏铁路大体沿布曲河走向延伸,由于受构造与河流的影响,使得测区内存在大量的融区与冻土交替的现象,对于其间出现的部分岛状冻土,其分布范围受到自然地理条件的控制,呈现出阴坡范围大、阳坡范围小的特征。

表 2 列出了几条具有可对比性的河流融区的范围变化情况(以物探成果确定),可见河流融区的南北两岸边界都有不同程度的后移,尤其是通天河北岸移动范围最大,可达 1.2 km。从整体上看,北岸的融区范围一般大于南岸。

表 2 大河融区宽度范围 m

河流名称	南岸		北岸	
	前人结论	现在成果	前人结论	现在成果
沱沱河	20	50~100		
通天河	100	1400	1200	2400
休冬曲	10	300	20	500
邦杂陇巴	200	300		

4.2.3 温泉构造融区

温泉融区位于唐古拉山北侧、唐古拉山兵站附近,海拔 4 800 m 左右。区内地下温泉发育,地温较高($0.5 \sim -1.0 \text{ } ^\circ\text{C}$),属高温冻土区。谷地地表湿地发育,地下温泉水上升至地面,形成地表水漫流,从而造成大面积融区,多年冻土与融区相间分布。

在 9 km 的物探工作剖面上,剖面两端进入多年冻土,剖面中存在 6 个多年冻土岛,最大宽度 520 m,最小宽度 150 m。多年冻土上限 3~3.5 m,下限 16~20 m。

4.3 初步认识

(1)冻土分布规律:①根据多年冻土特征,可将其分为融区、过渡带(岛状冻土区)、多年冻土区,而在多年冻土区内,由于河流、构造、温泉的影响,存在着若干个大的融区,如沱沱河融区、通天河融区、温泉融区等;②河流融区中普遍存在北岸融区范围大于南岸的现象;③冻土上限随海拔的增高有减小的趋势,例如西大滩 4~7 m、沱沱河 4~5 m、通天河 3~4 m、唐古拉 2.4 m、安多南界 4 m 左右;④发育在山坡上的岛状冻土区,存在阴坡范围大于阳坡的现象;⑤多年冻土发育区往往与地表湿地及流水形态相吻合;⑥多年冻土区内的融区范围受到地质构造、河流、地热及建筑工程(如公路、输油管道)等因素的影响。

(2)物探方法只适用于第四系沉积物及泥岩冻土类型的勘查,而对其它岩性形成的冻土不能有效分辨。

(3)通天河、沱沱河南北两岸地层岩性(含同一岩性)存在着较为明显的物性差异,说明两岸的沉积环境是不同的。

5 结论与建议

作为多年冻土调查的重要手段——地球物理勘探方法,在冻土的勘查和研究中始终发挥着重要的作用。每一种物探方法都有各自的优势和应用范围,因此,我们在应用时,要根据勘探任务的不同,选用不同的勘探方法,最好选用不同方法的组合进行综合物探。

虽然物探方法有局限性,但是实践证明,综合物探仍是一种行之有效的勘探多年冻土的方法。

根据我们的工作,提出以下建议:加强冻土物探数字信号的处理与研究,以便解决冻土中含冰层的位置、含冰量、冻土的结构特征、冻土层的厚度等关键数据的计算问题;加强多年冻土体的室内正演分析计算,以此建立不同冻土模型的信号特征,提高解释水平;加强冻土电性特征、电磁特征、弹性特征的系统研究。

参考文献:

- [1] 李来喜,韩永琦. 青藏线冻土地球物理模型的建立[J]. 物探与化探,2002,(1).
- [2] 俞祁浩. 物探技术在我国多年冻土勘测中的应用[J]. 冰川冻土,2002.
- [3] 王文龙,陈天逵. 浅论高密度电阻率法在工程勘测中的应用效果[J]. 物探与化探,1995,(3).

THE SELECTION AND EFFECTIVENESS OF GEOPHYSICAL METHODS IN THE EXPLORATION OF PERPETUALLY FROZEN GROUND ALONG THE QINGHAI - TIBET RAILWAY

WANG Wen-long

(*Geophysical Exploration Company, No. 1 Investigation and Designing Institute Ministry of Railways, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: During the construction of the Qinghai - Tibet Railway, the perpetually frozen ground constitutes a key problem. The geophysical exploration will meet more complex and changeable objects in the perpetually frozen ground area than in the non - frozen area. Hence, the selection of rational working methods seems to be especially important. Based on a discussion on the strong and weak points of various currently - used geophysical techniques, the author advances the idea of integrated geophysical exploration with the enumeration of some practical examples. Practice shows that the integrated geophysical exploration is an effective means in the exploration of perpetually frozen ground.

Key words: Qinghai - Tibet Railway; perpetually frozen ground; integrated geophysical technique; investigation method.

作者简介: 王文龙(1964 ~),男,河北省正定县人,1984年毕业于西安地质学院,获工学学士学位,现任铁道第一勘察设计院物探工程新技术开发公司物探高级工程师,一直从事于物探生产和研究工作,曾发表过关于高密度电法、孔中电磁波透视等方面的论文数篇。