

从第三届国际冻土会议看普通冻土学的成就和动向

童伯良

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

1978年7月10日至13日在加拿大阿尔伯达省埃德蒙顿市举行了第三届国际冻土会议。参加会议的有加拿大、美国、日本、法国、英国、挪威、丹麦、西德、阿根廷、苏联等十四国。我国应邀参加了这次会议，在会上宣读了四篇论文。会议期间共宣读了150篇论文，其中综叙性的有七篇，论述普通冻土的论文有119篇，有关工程冻土的论文有31篇。在119篇普通冻土的论文中有关区域冻土的论文有20篇，冻土现象14篇，冻土勘测方法16篇，冻土区的生态及植被6篇，冻土层的热物理14篇，冻土的物理和化学性质14篇和冻土力学性质22篇。本文只对普通冻土学方面的论文作一简介。

一、区域冻土研究

随着高纬度、极地的开发和经济建设的发展，加拿大、美国、挪威、苏联等国均在开展北半球高纬度冻土的区域研究工作。南极大陆和阿根廷的冻土研究工作正在进展。加拿大主要在育空地区、西北地区以及马尼托巴省和魁北克省北部进行工作。现已查明在加拿大西北地区马更些三角洲地带，凡水深小于0.85米的地方均有加积的多年冻土。由于冻土层距水流很近，热融作用使河岸的坡度可达四十五度之多。这一规律可用于建筑物的选址工作。加拿大地质调查局把马更

些河流域的11600个钻孔的岩芯资料输入电子计算机，按各个地区统计后进行评价。

美国阿拉斯加州中央高地和波弗特海大陆架勘探石油和天然气，敷设油管和兴建其它工程建筑物过程中很重视不同自然条件下冻土的分布规律和特征。

目前苏联冻土学者正在用不同观点和方法编制三张全国性冻土图，比例尺分别为1:250000和1:4000000，它们将综合反映各种成因类型冻土的空间分布规律及其状态的特征参数。

苏联B.A.库德里亚采夫等人把比例尺为1:2500000的《苏联地冰图》的编图原则加以简化，编制了比例尺为1:2500000的《苏联地冰图》。作者在图上依据冻土层换热作用的分带性表示：(1)按平面分布程度和深度表示多年冻土分布；(2)用年平均地温表示岩石中换热作用的水平分带和垂直分带规律；(3)冻土层的厚度。《苏联冰岩图》的作者们(A.И.波波夫等)介绍了编图原则和制图方法。此图将反映二十米内的冻土层构造、岩石的冷生成因类型和冷生成岩作用。由于1:4000000比例尺的限制，岛状冻土的分布规律在图上将不予表达。B.B.巴乌林等人论述了大地构造作用对低平原区冻土层的影响问题。他们认为在构造抬升区往往形成后生型冻土，分布着层状地下冰、大型冻胀丘、后生型冰楔和土

楔。由于大地构造作用冻土层的地温增高，其厚度相应减小100~200米，以至在冻土区边缘地带，冻土层的非连续性增大。在构造凹陷区一般广布着共生型冻土，大型冰楔和热融作用。冻土层的厚度相对增大。

西德学者在冰岛中部的研究工作（1970—1976年）表明：冰岛的岛状冻土一般分布在潮湿的泥炭、淤泥和细颗粒土中，总面积达一百八十平方公里，厚度小于6米。从1950年以来它们处于退化阶段，但近十年来与1930—1960年间相比冻结指数增长了188度·日，年平均气温下降了1.1℃，作者认为冻土已有进变化趋势。

近年来在勘探北冰洋大陆架石油和天然气时发现巴伦支喀海大陆架和罗曼诺夫海岭间有厚15—30米的冻土层，海岭外的厚度约为十米。在加拿大北部近海10—30公里范围内，海水深度小于200米处有海底冻土，目前有的地方海底水温为-0.35—-1℃。

在开展高纬冻土研究的同时，高山冻土的研究工作逐渐展开。日本的藤井理行总结了北半球高山冻土与气温的关系，认为高山冻土下界的位置大致与年平均气温-1—-3℃等温线相当。随着纬度的升高冻土下界自南往北逐渐下降，平均每向北推移一度冻土下界的海拔下降90—100米。作者依据最热和最冷月份的月平均气温来区分连续多年冻土和非连续多年冻土。据他统计，北半球冻土的高山冻土面积可达二百三十万平方公里，占北半球冻土面积的11%（见下表）。

亚 洲	西藏高原	$157.8 \times 10^4 \text{ km}^2$
	喜马拉雅山	$10.0 \times 10^4 \text{ km}^2$
	天山和帕米尔	$19.1 \times 10^4 \text{ km}^2$
欧 洲	阿尔卑斯山	$0.5 \times 10^4 \text{ km}^2$
北美洲	海岸山脉和落基山脉	$27.8 \times 10^4 \text{ km}^2$
	美国落基山脉和内华达州山脉	$17.4 \times 10^4 \text{ km}^2$
合 计		2326000 km^2

据苏联资料，苏联中亚天山和帕米尔的冻土面积为 11×10^4 平方公里。连续冻土区和岛状融土区和岛状冻土区的下界海拔，在北侧分别为3500米、3200米和2700米；在南侧分别为4400米、4100米和3700米。A.П. 戈尔布诺夫估计天山冻结松散层的厚度为150—200米，最低地温为-4—-5℃；在帕米尔则为100—150米和-2—-3℃，最高峰处冻土层可厚达数百米之巨，地温为-20℃。

在加拿大落基山脉海拔2519—2103米处的年平均地温为-1—-1.5℃。该处已位于森林线之上，山上冰洞中就有多年冻土。在无雪盖的山岭部位地温可降至-4.1℃。

据西德的D.勃斯和瑞士的W.哈勃里资料，瑞士阿尔卑斯山上的石流每年顺坡向下蠕动5—100厘米。钻探和电测深资料证实石流下埋藏有多年冻土，其含冰量达50%。他俩认为石流分布的下界即是非连续多年冻土区的下界，可以作为航判标志之一。勘探资料表明：阿尔卑斯山上的岛状多年冻土分布于有森林覆盖的山坡上，非连续冻土区下界海拔在北侧是2400—2600米，在南侧为2600—2800米，最高可达3500米。海拔4800米以上为连续冻土区。

在利用深部地温资料推算古代气温方面，B.T.鲍洛巴也夫假设地表温度从气温最低时期以来呈直线变化规律，由此推导出计算公式。作者从计算中获得二万年前的气温比现在低10—13℃，多年冻土的厚度可达600—800米。

由上述可知高纬多年冻土的研究工作已在系统地研究其形成规律，分布和发育特征。近年来证实了海底多年冻土的存在。高山冻土的研究工作尚处于初始阶段。国际上应用电子计算机处理大量冻土岩性资料，并分区进行评价的方法，我们可以引用和推广。

二、冻土现象

在冻土区与地下水作用相关的冻胀丘和冰椎的生成条件受到人们的重视。加拿大R.马凯教授多年来对波弗特海边的大型冻胀丘进行了细致的研究。在图克托亚克图克镇的海边上冻胀丘有的可高达四十八米,底部直径达一百二十米,丘内冰层厚四十米。据冻胀丘的增长速率推算得知其形成年代约为四万年。目前正在现场进行冻胀丘生成作用的试验工作。

地下水冰椎的多年变化取决于融区的动态。苏联H.H.罗马诺夫斯基等人认为冰椎对其下伏土层的热作用在冰椎周期性变化中起着显著的作用。由于冰椎分布位置的周期性变化使冰椎场的面积远比冰椎体的真实面积大。随着地球上气候条件的改变,冰椎动态有定向性变化,此外新构造运动等区域性因素对它亦有影响。

美国学者T.L.佩韦对阿拉斯加州的楔形冰冰晶光轴方向和冰体内融化问题进行了研究。日本低温研究所亦参加了阿拉斯加州地下冰的研究工作,对有楔形冰分布的多边形地段进行了系统的岩矿和碳的稳定同位素分析。丹麦学者利用古冰楔遗留体中的水分不同于围岩的水分,从而影响到地表农作物生态这一规律作为丹麦西部和西德北部古多边形土的航判标志,

R.马凯教授在加拿大马更些河三角洲波弗特海边进行着土的冻劈作用和冰楔生成机理的研究工作。苏联的C.E.格列奇谢夫推导出冻结裂缝形态特征参数的计算公式。式中考虑了土的自重和热流变化,按半无限空间二条裂缝边缘处的热弹应力分布课题得解。作者指出:在目前气候条件下多边形的宽度只能变化于6—40米范围内,若大于四十米就存在有隐伏的裂缝或其它因素。B.H.科尼舍夫认为矿物在寒冻风化作用下的

崩解,取决于它的比表面能,因此矿物的阳离子价数越高,它的抗寒冻风化性就越大。试验资料证实了上述论点。

苏联的Г.Ф.格拉维斯用碳14和孢粉资料证明:北极近海低地的热融作用主要发生于海侵时期,这与冰期是一致的。由此作者提出该区的热融作用是随气候和海平面变化的假设。

在冻土区的建设过程中往往会引起当地原有自然条件的改变或破坏,促发或加剧冻胀、热融和侵蚀等破坏作用,从而影响或破坏建筑物的稳定和使用。另一方面,这些破坏作用对冻土区自然生态环境亦有深远影响。对此加拿大、美国和苏联等国均十分重视,自七十年代初以来一直进行着专题研究。加拿大冻土学者正研究冻土区森林火灾和铲除植被对冻土地温的影响。森林火灾对冻土区的木本植物破坏严重。在岛状冻土区森林火灾往往使地下冰发生热融,形成湖塘。在连续冻土区,由于地表沼泽化,泥炭层在火灾中保存较好,冻土退化较轻,仅第一、二年发生融沉。1968年伊努维克市郊大火后,次年地表下沉八厘米,1972年地表又生长起植被,但植被恢复的过程很慢,而且一些原有植物种类消失了,相反,出现了个别相对喜暖的新种。1965年在图克托亚克图克镇进行石油地震观测时,把地表植被铲除了0.16米,宽4—5米。二年后地表开始融化下沉,到1978年7月已成为一条深达0.5米左右的小水沟。沟底季节融化层厚0.3—0.5米,而沟边仅0.15米。马更些河三角洲地带的波弗特海岸近几十年后退了150米。这是由于高含冰量的三角洲相沉积物受海浪的热力和机械侵蚀作用的结果。加拿大的冻土学者对此已采取了有效的防护措施。正在进行预报工业污水和工程建筑物对多年冻土层的作用问题。加拿大政府依据多年来冻土研究资料已建立了保护冻土区自然生态环境的法令,以便更好地规划冻土区的建设,监测生

态环境的变化。加拿大北方和印第安事务部对加拿大北纬六十度以北地区编制了比例尺为1:250000土地利用和人为地表敏感性图。加拿大地质局编制了比例尺为1:1000000的马更些河三角洲和育空地区北部的地表敏感性图。图上按地质地貌条件分区表示出地表敏感性,可能被破坏的程度以及防治措施的类型。

美国的寒区研究和工程实验室(CRREL)制定了1976—1979年育空河到普罗特霍页湾公路干线、石油和天然气管道在建筑和使用期间预报各种破坏作用和防治措施的研究计划。

苏联冻土学者通过冻土工程地质水文地质测绘来研究工程建筑区的冻土特征和发展过程。尤其注意工程建筑物对冻土地温动态和冻土层的影响。他们防治破坏作用的主要原则是保护土壤和植被的隔热性和抗侵蚀性,调节地表水流,保证排水,以及强化破坏作用,促使冻土层早日达到新的稳定。在定量评价方面还有许多工作要继续深入地研究。

三、冻土层热学

各种地质地理因素对土在冻融过程中的热作用仍然是一个受重视的问题。北美国家从1973年以来在室内外收集并观测气候因子中的冬、夏气温及其变幅对地温和季节冻土层的作用。研究不同类型的土、植被、雪盖和地表水对地温的影响。加拿大F.H.奈乔尔松于1973—1976年在一块面积为7500米²的土地上铲除其植被,冬季树立防雪栅(1973—1974年积雪仅15厘米,1975—1976年最大积雪可达1.5米)。四年半后,该处年平均地温上升了1.8℃,季节融化层自原来的2.8米增大到6.5米,并使其含水量有所下降。在5.5米处的年热流量增大了 23×10^6 焦耳·米⁻²。1974—1976年间R.J.E布朗博士在马尼托巴省北部和基瓦廷连续多年冻土区

研究了年平均地温与年平均气温间的关系后认为:不同地段上15米深处的年平均地温与当地的气候条件、植被、土的类型和当地大型水体的距离有关。季节冻结层和季节融化层的厚度分别与冬季和夏季气温值相关。这些定性研究结果已被应用于冻土区矿区露天开采工作中。

苏联冻土学者对冻土与气候的关系进行了分析,认为目前气象台站上所测得二米高处的气温不能完全反映其地面下的冻土状态而是反映一定水平范围内的热量状态。从反映冻土状态来说,以地表温度最好,但它的测试方法至今尚不理想。因此,一些冻土学者想从测量地表热量平衡各分量入手来研究冻土的热动态。但也有人认为热量平衡值具有明显的分带性,与冻土地温资料不符。例如具有最低地温的冻土不是在北冰洋沿岸,而是在苏联雅库梯自治共和国的北部,因此对它持怀疑态度。这是由于对冻土的生成与气候之间的关系缺乏全面了解所致。M.K.加弗里洛娃根据各类气候因素与冻土生成之间关系把它们划分为六大类:(1)宇宙气候:地球在宇宙中的位置、太阳的引力和地热状态;(2)天体气候:地球的形状,黄道面倾角的年变化,地球自转,地球大气圈,地球的形式;(3)大气候:海洋和陆地的分布;(4)中气候:海拔高程,大地形,大水体;(5)小气候:植被,中、小地形,中、小水体,冰川,冰堆和工程建筑物;(6)土壤-岩石气候:岩性,含水量,地下水,化学作用。目前人们在解决许多冻土问题时已能有成效地利用人造中小气候因素。对于作者把影响冻土的一切地质地理因素统统归为气候因素的作法是否妥善,我们认为还是值得商榷的。

对影响冻土热状态的地表热量平衡各分量的研究工作苏联是从五十年代开始的。七十年代以来又有所加强。H.Г.莫斯科连科等人总结了天然地表(R下角标1)和除去

植被地表 (R下角标2) 的辐射平衡值 (R) 与总辐射量 (Q) 间的经验公式: $R_1 = 0.08 + 0.44Q$; $R_2 = 0.11 + 0.49Q$; 前者的相关系数为0.703, 后者的为0.78。对地中热流值 (B) 亦建立了类似的经验公式: $B_1 = 0.007(1 + 4.3Q)$; $B_2 = 0.027(1 + 5.4Q)$ 。前者的相关系数为0.723, 后者为0.835。

A. B. 帕夫洛夫对不同景观条件下的热量平衡各分量值进行了测定, 获得中、高纬度地区的地面反射率一般为16—25%。由于高纬度地带的积雪期长, 故地表反射率一般随纬度升高而增大, 夏季地面反射率无分带性, 有效辐射为总辐射量的23—32%。冬季辐射平衡值则为49—52%, 具有明显的分带性。这主要由于随纬度增高, 总辐射量下降所致。蒸发耗热占总辐射的11—39%。在春夏季节, 它的规律性不强, 在秋季它与辐射平衡值的比值增大, 夏季此比值在北纬45度到50度处达到最大值。由此向南由于土中水分不足向北则由于地表温度和气温下降均趋于减小。乱流换热一般占总辐射的9—31%, 达6—19千卡/厘米², 它与蒸发耗热的比值在中纬度处最小, 由此向南向北均有所增大。暖季冻土区的地中热流一般占总辐射量的5—6%, 占辐射平衡值的10—15%, 比非冻土区的值大, 并在融化开始时期有峰值。一年内地表散热强度是不一样的, 初冬时散热量最大, 一般在10—11月可散去冬季散热总量的50—60%。作者的资料表明: 泥炭中的换热量小于砂砾石。由于土中含水量的关系, 在天然条件下, 亚粘土的换热量大于亚砂土和砂土。作者认为: 由土的冻结和融化状态所决定的导热系数间的差值远比因含水量引起的小。由此所引起的年平均地温的差值一般不超过测试仪器的精度。但是, 作者亦指出: 苔藓泥炭土的年平均地温差值可达-1.5℃。地表水体分布区冬季的热量平衡工作至今极少。夏季水域区的热平

衡值 ($R_{水}$) 为无森林的开阔地 ($R_{无}$) 的20—40%。相反, 秋季水体的反射率有所降低。而随着水体深度的增大, 辐射平衡值亦增大。作者在两个湖上作了全年观测。夏季, 水体反射率是陆地上无森林地段反射率的三分之一; 冬季二者相差很小, 但 $|R_{水}| > |R_{无}|$ 。当水体和土壤的年辐射平衡值相等时, 水体的换热量将比土的大6—8倍, 导致冻土区湖底形成融区。随着温度下降, 雪盖的导热系数急剧减小。它在严冬的隔热保温作用将比暖冬时大。

加拿大有三篇论文探讨了冻土热过程的计算模型, 了解到雪盖与土的非线性换热作用是由于土的潜热和导热性能随温度不同所造成的。同时, 由这些因素所引起的年平均地温差值可能与因雪盖的保温作用相当。M. I. 希帕尔德等人确立的层状冻土中热流与质量流的联立计算方程式的电算模型中用变形参数计算冻胀量。室内外的验证工作表明: 它与室内模型中的水分和温度分布相符, 但比野外的冻结深度值大, 故尚需继续改进。

冻土热物理的任务不但要提出土在冻融过程中的边界条件, 而且要提供数学模型, 并获得微分方程解。在这方面最通用的是斯蒂芬算题。在Г. M. 费立达姆 (1973) 和B. A. 库德里亚采夫 (1974) 的著作中已有简单的斯蒂芬算题的近似解。库氏的现场快速算法可对周期性稳定状态的冻融作用中各个地质地理因素作用作定量评价。在解抛物线型的一维斯蒂芬算题方面A. Ф. 丘德诺夫斯基提出的数学模型可以表示各类粗颗粒土中的冻融作用。

含水量不大的细颗粒土的冻融过程中, 未冻水的相变具有很大的意义。1972年Г. П. 巴切利斯和B. Г. 麦拉麦达已获得该题的通解, 后者并在1976年提出自动模型装置。计算结果表明: 冻土在融化过程中由于相变作用可使融化深度急剧减小, 并使冻土层的

温度剧增。这种现象在粉质土中也可见到。但在土的冻结过程中这种现象只对含水量稍大于最大分子含水量的情况需要加以考虑。对含水量大的细颗粒土冻融过程中的温度场,经过一些简化(主要不考虑热流变化作用),基本上仍可用斯蒂芬题的类线性方程式。其换热换质特征取决于土的含水量。目前已获得一定边界条件斯蒂芬题的算法和自动模型计算装置。计算结果与实验室内高岭土冻结时的换热换质资料相比是满意的。只是在计算时要求有详细的冬季地表温度资料。这种计算方法还可根据剖面上的冻土构造资料恢复古气候条件,研究季节融化层中的成冰作用和由冻结层上水引起的冻胀作用,评价土的冻胀性等。许多计算结果表明:随着天然含水量的增加,成冰作用的最佳温度和冻胀作用的非线性关系越显著。

最近已获得在沉积物加积作用条件下土的冻融问题的各种解。在自动模型装置上解此类问题既可以定量地研究冻结融化的一般规律,也可以计算工程建筑物的建筑土方工程量和最佳雪盖厚度,计算在海侵或海退以及侵蚀条件下岩石圈顶部的温度场。

把数学分析与数理统计结合起来予报大区域冻土的动态是很好的途径。这样可以确定研究区内各种地质地理因素的变化范围,例如:土在空间的均一性,气候、雪和植被在时间和平面上的可变性等。

在电子计算机上解多维斯蒂芬问题,主要应用有限元法中的积分-内插法(平衡法),但至今尚未获得最简单条件下的典型解。这是今后需要努力解决的问题。

今后在研究冻土的形成和发育条件时需要研究下列问题:

(1) 定量地研究土在冻结融化过程中的热量和物质迁移;

(2) 地质地理因素对冻土发育的定量关系;

(3) 不同地质历史时期多年冻土和季节冻土层的地温场动态;

(4) 制定冻土予报的基础以及在改造大自然和人类活动中制约冻结作用的原则和措施。

四、冻土的物理性质和化学性质

近五年来对冻土物理性质的研究工作取得了一些进展,如:使用扫描型电子显微镜和核磁共振仪研究冻土的物质成分;用试验模拟方法研究细粒土的冻结过程及其伴生的成冰作用等。

美国的A.R.泰斯等人的试验表明:在 -0.2 — -25°C 范围内冻土的未冻水量不仅与其温度成正比,而且与其含冰量或总含水量成正比(图1)。苏联的B.И.克弗利维

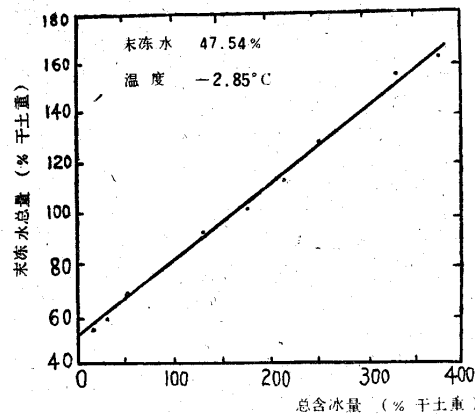


图1 未冻水量与总含水量关系图

泽和B.Φ.基谢廖夫等对冻结粘土和模型体用核磁共振仪研究水分相变作用。他们测定

了未冻水的相成分，水膜的厚度和水分子的活动性。试验表明：在正常情况下，如果多相体系内只存在冰-气或冰-疏水物质时，出现水分子激化的温度高于 25°K ，只比冰点低 $15-20^{\circ}\text{K}$ ，如果冰与亲水物质接触则激化温度出现在 $170-190^{\circ}\text{K}$ ，即比冰点要低 $50-100^{\circ}\text{K}$ 。在 T 小于 260°K 范围内激化水分子的相对含量(N_n)随温度的变化规律是类似的。当 T 大于 260°K 时， N_n 就急剧增大(图2)。作者认为活动水分子是由冰表面开始

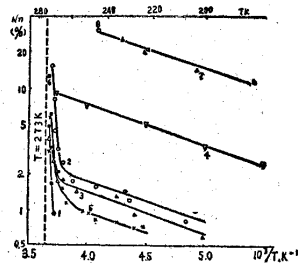


图2 几种物质的活动水相对含量与温度倒数关系

- 1. 氟塑料; 2. АЭРОСИЛ; 3. Na-蒙脱土;
- 4. Ca-高岭土; 5. 2.5%蛋白质溶液; 6. 冰屑;
- 7. 有吸附水层的; 8. 有吸附水层的Ca-高岭土。

融化所造成的。作者还获得不同温度条件下活动水层厚度的资料以及降低冰点与表面曲率半径间的关系(图3)。作者据此认为：

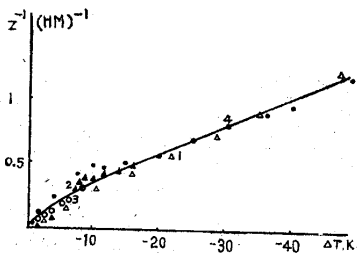


图3 孔隙半径倒数与冰点下降值关系图

- 1. 2. 4. 硅胶; 3. 非孔酸性АЭРОСИЛ

亲水介质的冰点降低值首先是由水分子与矿物质之间的互相作用力所决定的。发现冰体表面存在活动未冻水层有助于理解冻土强度和变形的机理。

美国的M.库迈用扫描型电子显微镜观察南极土壤颗粒的形态和成分，并把它与风化作用程度联系起来，确定它们的相对年代。

苏联的T.H.热斯特科娃对各类细颗粒土中形成冻土构造和结构的试验资料表明：土中开始产生析冰作用的临界含水量与土的成分、容重、初始含水量以及冻结速度相关。试验中减小容重和增加含水量能促进成冰作用。但各类土的临界容重和含水量不是常数，而是随冻结速度变化的。在冻结过程中剖面上的水分(包括冻结面上的水分)是变化的(图4)。土的冻结速度取决于冻结

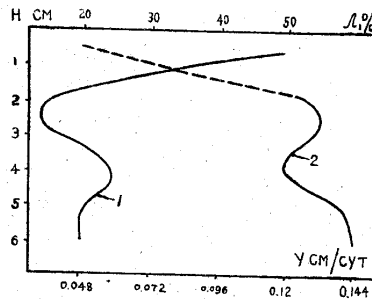


图4 冻结速度(1)和总含冰量沿土样深度变化

作用和成冰作用。土的原生构造在冻结过程中对冻土构造的形成有制约作用。冻土构造本身在长时期内有再造作用，例如：冰体的净化 and 由网状构造渐变为层状构造。冻结土中的开放性裂隙和平行等温面对冻土构造的形态影响最大。

美国的G.R.奥尔霍埃夫特指出：冻土的电性与频率相关。冻土的电性在低频时与土的温度、荷载和电场强度有明显的关系

(图5、6)。随着频率的增长,这种关系

隙。亦可以用它来解释。

五、冻土野外勘测方法

加拿大的冻土物探学者每年召开一次北美冻土物探学术座谈会,交流经验协调科研工作。冻土电法勘探中的交流电法是当前美国、苏联、加拿大三国侧重研究的项目。目前在加拿大冻土区用地面电磁电阻率法测量多年冻土的平面分布。仪器型号有EM-31和EM-34两种。EM-31电磁电阻率仪重九公斤。仪器一端能发射一个工作频率为39.2千赫的电磁场,被仪器的另一端接收,测量深度为3.6米。此仪器最适用于探测季节冻土层和冰楔。EM-34电磁电阻率仪,可测深15—30米,由二人操作,共重16.3公斤。据美国和加拿大的资料,低频率(200—400千赫)对多年冻土最敏感。加拿大设计了EM-16R甚低频电磁仪仅重三公斤,工作频率范围为15—25千赫。加拿大多伦多大学的物探人员用声频地磁测量法(AMT)和无线电频率干涉法测试冻土的电性和构造。试验结果表明:不论冬夏季节,季节融化层对这两种方法的影响不大。美国的R.R.尤特伯格确定了250兆赫雷达波具有穿透冻土层的能力。它可以确定冻土层的厚度和冻土区的地下反射物。但有时雷达波测得的冻土厚度值偏大。此法还可测定断层,地质构造的延伸方向和隐伏构造。加拿大地质调查局用脉冲雷达等方法在现场测定冻土的介电常数。他们认为频率为10—100兆赫的冻土介电常数主要是由孔隙水决定的。在现场测得介电常数后就可以了解孔隙水的状态和冻融界面的位置。

苏联的B.П.麦利尼科夫等人提出了冻土剖面电状态概念。它是由一组参数决定的,它们反映地质体的状态,电磁场形状和一些决定或反映电磁场的物理化学过程。作者指出了冻土层顶部电化学性质的可变性,

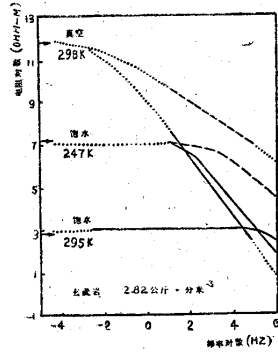


图5 不同状态下岩石电阻与电流频率关系

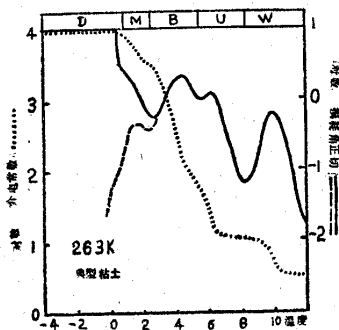


图6

减弱到几兆赫时就可以忽略不计。冻土的电性随频率变化的规律提示我们在判释土的电磁测量时必须了解导电率和位移电流。

美国的B.哈利特对冻结过程中孔隙水中溶解质的再分布问题进行了研究,在严寒气候条件下由土溶液中沉淀的碳酸盐和铁镁化合物表明,孔隙水通常是过饱和的。冰体增长时的分选作用很可能是形成这一现象的主要原因,它将使冻结面上的溶解质增多,从而影响冻结面的形态和分布,以及冰体的萌芽和增长。细颗粒土中薄冰层间的均匀孔

并介绍了二个冻土电状态理论模型，毛细管模型和冰-胶结物表面电极化模型。IO. A. 阿维季扬在使用脉冲电磁测量时，把频率范围扩大到无线电频率范围。为了解释实测资料，作者在计算曲线量板时考虑了位移电流，并以图解资料为例研究了理论曲线的性质。

加拿大的J. A. 亨特用地震折射法研究波弗特海底冻土，测得在西径135度以东，从海岸到水深90米处有厚度大于三十米的冻

土。他对位于浅层的，厚度小的高速层使用折射能衰减测量法效果较好；对厚层的使用了以模型分布为基础的分散法和从层底离散反射法。

为了测量马更些河三角洲地区冻结砂土的地温和钻孔测井工作，加拿大的冻土物探人员设计了一种无钻头轻便水力钻机。用这种钻机在高含冰量的细砂土地层中打一个深150米的孔仅费时四小时。



(上接第51页)

填，由于冰体不断增生，在长期挤压应力作用下楔周围砾石才呈现定向排列。现今所见砂楔是晚更新世冰期之后地质历史过程改造之结果。

据国外报导，冰楔现今仅是于气候相当严寒的高纬度地区，如阿拉斯加等地。这里年平均气温低达 $-6.0\sim-8.0^{\circ}\text{C}$ 。由此推测，在晚更新世冰期，青藏高原的年平均气温要比现在低 $2.0\sim4.0^{\circ}\text{C}$ 。目前保存着砂楔的一些地区（如布曲河、通天河、沱沱河二级阶地）冻土层已消退而成为融区，说明晚更新世冰期之后，青藏高原上冻土分布范围

已有缩小。

参 考 文 献

- (1) 杜榕桓、谢自楚，青藏公路沿线冰缘地貌特征，青藏公路沿线冻土考察，科学出版社，1964年。
- (2) 赵希涛、郭旭东、高福清，珠穆朗玛地区第四纪地层，珠穆朗玛地区科学考察报告（第四纪地质），科学出版社，1976年。
- (3) 郭旭东，珠穆朗玛峰地区第四纪间冰期和古气候，珠穆朗玛地区科学考察报告（第四纪地质），科学出版社，1976年。