

Jiyu Shuire Ouhe Xiaoying de
Dongtu Luji Wendingxing Yanjiu

基于水热耦合效应的 冻土路基稳定性研究

毛雪松 马 翥 著
王秉纲 主审



人民交通出版社

China Communications Press

基于水热耦合效应的 冻土路基稳定性研究

毛雪松 马 磊 著
王秉纲 主审

人民交通出版社

致 谢

在本书部分成果的研究、撰写和出版过程中得到了以下项目的资助,作者谨致谢忱。

- 国家自然科学基金资助项目(50708009)
- 国家西部交通建设科技基金项目(2007 318 223 01-1;2009 318 000 027)
- 西藏自治区交通厅科技项目(藏交建科合字 2007 1 号)
- 陕西省自然科学基金(2006E209)

前 言

路基的不均匀沉陷、季节性冻结与融化引起路基的不均匀变形是冻土地区道路早期破坏的重要原因之一。路基的不均匀变形主要体现在土体的水、热、力稳定性上。土体中的温度场、湿度场及应力场的相互作用是一个极其复杂的热力学、物理化学和力学的综合问题;土体的水分作为温度及应力变化的载体,是冻胀、融沉的前提;温度及荷载效应是土体中水分迁移的动力,会引起水分的不均匀集聚;土体中的水分会随着温度的降低或升高而冻结或融化,改变土体的力学性质。路基的变形是湿度、温度、行车荷载综合作用的结果。湿度和荷载是致使路基发生变形类病害的关键因素,温度的改变则加速了路基病害的发生和发展。依托国家自然科学基金“基于水分迁移的路基长期强度与变形特性研究”(50708009)、交通运输部西部交通建设科技项目“路基湿度—温度—荷载耦合效应的影响研究”(2007 318 223 01-1)、“水、热、力耦合效应与路基路面温度场变化规律的研究”(2002 318 812 03)及西藏科委项目“青藏公路路基纵向裂缝机理及处治技术研究”,作者自 2001 年至今针对冻土路基内部温度场变化、水分迁移特性等进行了研究。本书是作者十年来对路基水热稳定性研究成果的总结与提炼。

全书共分为 9 章,第 1 章介绍了冻土地区筑路的工程地质条件;第 2 章介绍了冻土路基典型病害形式及影响因素;第 3 章介绍了冻土路基的温度场,建立了伴有相变的温度场控制方程及数值求解的方法,分析了多年冻土地区典型路基温度场变化特性;第 4 章结合冻土特性,研发了土体水分迁移测试系统,进行了土体水分迁移聚冰试验,分析了冻结过程中水分迁移聚冰机制;第 5 章基于水分迁移动力,建立了冻土路基湿度场的控制方程,分析了典型冻土地区路基湿度场变化特性;第 6 章进行了试验路基、试槽路基及现场路基的水热动态测试,分析了路基水热变化特性;第 7 章建立了冻土路基变形场与应力场控制方程,分析了冻结与融化条件下应力场和变形场的变化特性;第 8 章基于水热耦合效应揭示了冻土路基病害的形成过程;第 9 章提出了冻土路基稳定技术。

本书相关成果在研究过程中得到了我国著名公路专家王秉纲教授的悉心指导,在此深表感谢!特别要感激的是为青藏高原冻土地区公路修筑技术科学研

究而献身的公路交通领域著名专家胡长顺教授,在他的指导下,作者进入了研究冻土筑路技术的领域,愿为完成导师未竟的事业而努力钻研!感谢国家自然科学基金委、交通运输部西部交通建设科技项目中心、西藏自治区交通运输厅、西藏自治区公路局、西藏自治区交通科学研究所等单位对研究工作的资助和支持!最后,还要感谢长安大学冻土课题组的研究人员十年来的共同合作和不懈努力!

由于作者水平有限,书中的疏漏和不足之处在所难免,诚请读者批评指正。

作 者

2011 年 7 月

目 录

第 1 章 冻土地区筑路的工程地质条件	1
1.1 冻土及其物质组成	1
1.2 我国冻土的分布及特征	8
1.3 冻土的公路工程分类	15
1.4 我国公路冻土分区	18
第 2 章 冻土路基典型病害形式及影响因素	22
2.1 多年冻土地区路基不均匀变形	22
2.2 多年冻土地区路基纵向裂缝	25
2.3 季节冰冻地区路基冻胀、融沉与翻浆	30
2.4 影响冻土路基稳定性的因素	35
第 3 章 冻土路基的温度场	48
3.1 伴有相变的路基非稳态温度场控制方程及数值求解	48
3.2 冻土路基温度场实际边界条件的确定	59
3.3 路基土热参数	64
3.4 多年冻土路基温度场特性	71
第 4 章 冻结土体的水分迁移动力	84
4.1 概述	84
4.2 土体水分迁移试验系统	87
4.3 封闭系统下冻结与融化过程中土体水分迁移动力	90
4.4 冻结条件下土体水分迁移聚冰试验	102
4.5 冻结过程中水分迁移聚冰机制	114
第 5 章 冻土路基的湿度场	118
5.1 达西定律和质量守恒原理	118
5.2 冻土路基水分场控制方程及数值求解	121
5.3 路基土体水分运动参数	136
5.4 多年冻土地区路基湿度场特性	148
第 6 章 冻土路基的水热变化特性	153
6.1 试验路基的水热变化特性	153

6.2	试槽路基湿度—温度—荷载耦合试验	158
6.3	季节冰冻地区典型路基水热特性现场测试	170
第7章	冻土路基的应力场与变形场	183
7.1	冻土路基应力场与变形场控制方程及数值求解	183
7.2	冻土的力学参数	192
7.3	冻结过程中的路基应力场和变形场	201
7.4	融化过程中路基应力场和变形场	206
第8章	基于水热耦合效应的冻土路基病害分析	210
8.1	冻土路基水热力耦合模型	210
8.2	典型多年冻土路基水热力耦合效应分析	212
8.3	青藏公路湿地路段纵向裂缝的数值模拟	216
8.4	典型季节冰冻地区路基冻胀与融沉	223
第9章	冻土路基稳定技术	230
9.1	多年冻土地区路基稳定技术	230
9.2	季节冰冻地区路基稳定技术	252
参考文献		264

第1章 冻土地区筑路的工程地质条件

1.1 冻土及其物质组成

1.1.1 基本概念

冻土一般是指温度在 0°C 或 0°C 以下,并含有冰的各种岩土。按岩土冻结状态保持时间的长短,冻土又可分为多年冻土与季节冻土。季节冻土是指冬季冻结、夏季融化的土。在年平均气温低于 0°C 的地区,冬季长,夏季短,冬季冻结的土层在夏季结束前还未全部融化,便又随气温的降低开始冻结了,这样地面以下一定深度的土层常年处于冻结状态,这就是多年冻土。通常认为,多年冻土是指处于 0°C 以下且冻结状态的持续时间在两年或两年以上含有冰的岩石和土体。

地壳表层的土冬季冻结而夏季融化,称为季节冻融层,又称季节活动层。根据年均地温及下伏冻土的关系,其可分为季节冻结层和季节融化层。季节冻结层指寒季冻结,暖季融化,其年平均地温大于 0°C 的地壳表层,其下伏层为未冻土或不衔接多年冻土层;季节融化层指寒季冻结,暖季融化,其年平均地温小于 0°C 的地壳表层,其下伏层为多年冻土层,如图 1-1 所示。



图 1-1 季节冻融化层示意图

根据是否有人类工程活动的影响,多年冻土上限分为多年冻土天然上限和多年冻土人为上限。前者是指天然条件下多年冻土层顶面的埋藏深度;后者是指人为条件影响下多年冻土层顶面的埋藏深度。多年冻土下限是指多年冻土层底面的埋藏深度,一般是指多年冻土层底面地温为 $0\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ 的界面。

1.1.2 冻土的物质组成

一般而言,土体是由固、液、气等多相介质组成的非连续体,在空间分布上既有连续性,又有变异性,其变异性主要体现在土体中水分的存在与迁移,致使土体的性质发生改变。冻土与之相比增加了一种新的固体物质——冰,即冻土是由土颗粒、空气、未冻水及冰四相体构成。

根据温度和含冰状况,冻土可以分为未冻土(或融土)、寒土、已冻土、正冻土和正融土。

未冻土(或融土):温度高于 0°C 且不含冰晶的土;

寒土:温度低于 0°C 且不含冰晶的土(含水率小或水溶液浓度高的土);

已冻土:温度低于 0°C 且含有冰晶的土;

正冻土:处于低于 0°C 的降温过程且冰晶形成及生长(有相界面移动)的土;

正融土:处于低于 0°C 的升温过程且冰晶逐渐减小(有冻融界面移动)的土。

1) 土颗粒

自然界中的土一般由大小不等的土颗粒混合组成,土颗粒由各种矿物颗粒或矿物集合体组成,矿物颗粒具有不同的形状和大小。土颗粒的级配、矿物成分、比表面积及表面活动特性等直接影响土的结构构造特性、土体强度、水分迁移特性、冻结时冰形成和冻胀特性等。

2) 未冻水

土体冻结后,并非土中所有的液态水全部转化为固态的冰,由于颗粒表面能的作用,其中始终保持一定数量的液态水称为未冻水。冻土中未冻水含量与温度之间保持着动态平衡的关系,即温度降低,未冻水含量减小,反之亦然。冻土中未冻水是冻土中液态水迁移的源泉。由于冻土中未冻水含量随温度变化,固态和液态水的相变导致土体的性质随温度而变。

冻土中未冻水含量主要取决于三大因素:土质(包括土颗粒的矿物化学成分、分散度、含水率、密度、水溶液成分和浓度等)、外界条件(温度和压力)以及冻融历史。

3) 冰

土的冻结过程实际上是指土中液态水或水汽相变成固态冰的过程。冰晶或冰层与矿物颗粒在空间上的排列和组合形态就形成了冻土的冷生构造。当水由液体状态过渡到固体状态(冰)时,除了由流动不稳定物质变成具有相对稳定性物质外,体积还有所增加,引发土体的冻胀。当温度升高,冰由固态变为液态,

使得土体的状态发生改变,强度降低,引发土体的融化。冻土中冰的形成或消失对自然环境和人类的工程活动产生直接的影响。

土的冻结以土中孔隙水结晶为表征。通常情况下,土中水都不可能恰在 0°C 冻结,往往会出现过冷现象。这主要是由于各类土的颗粒分散度、矿物成分、含水程度、土粒被不同类型阳离子饱和情况以及孔隙水中的可溶岩成分和浓度不同,土的起始冻结温度也有所不同。同一类土的冻结温度随土体的含水率而变化,含水率越大,其起始冻结温度也升高;相反,含水率越小,起始冻结温度则降低。

4) 气

土中气体主要为空气与水汽,一般与大气连通,处于动平衡状态,对土的性质影响不大。少数情况下,土中存在封闭气体时对土的性质有一定的影响,主要表现在对水分迁移有较大的影响。另外,封闭气体的突然逸出也会造成土体突然的沉陷。

1.1.3 冻土类型划分

1) 冻土平面连续性划分

多年冻土按平面连续性可以分为连续多年冻土(连续性超过90%)和不连续多年冻土(连续性低于90%)。不连续多年冻土又可以分为:断续多年冻土(连续性90%~75%)、大片多年冻土(连续性75%~60%)、岛状多年冻土(连续性60%~30%)和稀疏岛状多年冻土(连续性低于30%)。

前苏联的 Ершов 根据冻土分布的连续性,将多年冻土带划分为连续多年冻土带和不连续多年冻土带,如表 1-1 所示。

前苏联按多年冻土连续程度分带

表 1-1

多年冻土带	多年冻土亚带	连续系数(%)	年平均地温($^{\circ}\text{C}$)
连续多年冻土带	连续多年冻土亚带	>95	<-3
	大片连续多年冻土亚带	90~95	$-0.5\sim-3$
不连续多年冻土带	多年冻土断续分布	75~90	$-0.2\sim-2$
	大片—岛状多年冻土带	25~75	$1\sim-1$
	岛状及稀疏岛状多年冻土带	<25	$2\sim-0.5$

2) 冻土温度类型划分

我国多年冻土温度普遍较高,道路通过地段,多年冻土年平均地温(即年变化层底面的年平均温度)一般均高于 -3°C ,多数是在 -2°C 以上。不同温度多年

冻土对外界气温变化的响应有很大差异。在相同人类工程的作用下,其稳定性也有很大差别;对填土路堤(特别是沥青路面)反映的敏感性有很大差异。

根据多年冻土区公路工程的特点,对公路构筑物而言,以天然条件下冻土状态的变化和多年冻土年平均地温的变化对冻土工程性质的影响程度作为依据,可按多年冻土的年平均地温将其分为低温型冻土、过渡型冻土和高温型冻土三种类型(表 1-2)。对低温型冻土,即使含冰量较大的饱冰冻土及含土冰层(融沉系数 $A_0=0.25$),其年内融沉量也小于 2cm,冻土路基处于稳定状态;对过渡型冻土,其年内融沉量为 2~4cm,冻土路基处于次稳定状态,冻土地温偏低时路基趋于稳定状态,地温偏高时趋于不稳定状态;对高温型冻土,其年内融沉量大于 4cm,冻土路基处于不稳定状态。

多年冻土温度分类

表 1-2

冻土温度类型	年平均地温(℃)	融化速率(cm/年)	年内融沉量(cm)	路基稳定状况
低温型冻土	<-2.0	0~8	0~2	稳定
过渡型冻土	$-2.0 \sim -1.0$	8~16	2~4	次稳定
高温型冻土	$-1.0 \sim 0$	>16	>4	不稳定

注:表中融化速率、年内融沉量、路基稳定状况均对饱冰冻土及含土冰层而言。

3) 冻土融沉性划分

具有不同含冰特征的多年冻土,在自然和人类活动的热力作用下,产生不同程度的融化沉降和压密变形。冻土的含冰特征和融沉特性是影响多年冻土路基变形的重要因素之一,成为冻土最为特殊的工程性质。

根据冻土总含水率和融沉性质的差异,冻土可以分为少冰冻土(不融沉)、多冰冻土(弱融沉)、富冰冻土(融沉)、饱冰冻土(强融沉)和含土冰层(融陷)5 种类别(或等级),如表 1-3 所示。融沉系数表示冻土融化后在自重作用下的融缩特性,即冻土融化的体变系数等于融沉系数。

冻土融沉性分类

表 1-3

土的名称	总的含水率 $\omega(\%)$	平均融沉 系数 δ_0	融沉 等级	融沉 类别	冻土类型
碎(卵)石、砾、粗中砂 (粒径小于 0.07mm 的 颗粒含量不大于 15%)	$\omega < 10$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉	少冰冻土
	$\omega \geq 10$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉	多冰冻土

续上表

土的名称	总的含水率 $\omega(\%)$	平均融沉 系数 δ_0	融沉 等级	融沉 类别	冻土类型
碎(卵)石、砾、粗中砂 (粒径小于 0.07mm 的 颗粒含量大于 15%)	$\omega < 12$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉	少冰冻土
	$12 \leq \omega < 15$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉	多冰冻土
	$15 \leq \omega < 25$	$3 < \delta_0 \leq 10$	III	融沉	富冰冻土
	$\omega \geq 25$	$10 < \delta_0 \leq 25$	IV	强融沉	饱冰冻土
粉、细砂	$\omega < 14$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉	少冰冻土
	$14 \leq \omega < 18$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉	多冰冻土
	$18 \leq \omega < 28$	$3 < \delta_0 \leq 10$	III	融沉	富冰冻土
	$\omega \geq 28$	$10 < \delta_0 \leq 25$	IV	强融沉	饱冰冻土
粉土	$\omega < 17$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉	少冰冻土
	$17 \leq \omega < 21$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉	多冰冻土
	$21 \leq \omega < 32$	$3 < \delta_0 \leq 10$	III	融沉	富冰冻土
	$\omega \geq 32$	$10 < \delta_0 \leq 25$	IV	强融沉	饱冰冻土
黏性土	$\omega < w_p$	$\delta_0 \leq 1$	I	不融沉	少冰冻土
	$w_p \leq \omega < w_p + 4$	$1 < \delta_0 \leq 3$	II	弱融沉	多冰冻土
	$w_p + 4 \leq \omega < w_p + 15$	$3 < \delta_0 \leq 10$	III	融沉	富冰冻土
	$w_p + 15 \leq \omega < w_p + 35$	$10 < \delta_0 \leq 25$	IV	强融沉	饱冰冻土
含土冰层	$\omega \geq w_p + 35$	$\delta_0 > 25$	V	融陷	含土冰层

多年冻土含冰量在垂直剖面的分布特点是在冻土上限附近含冰量最大。因此,在根据多年冻土的含冰量类别划分地段时,一般取多年冻土上限以下 0.5~1.0m 深度范围的总含水率来确定多年冻土含冰量的类别。

以上对冻土含冰特征的分类主要是根据室内试验测定的冻土总含水率划分界限的。在现场工程地质勘察中,不可能做到有点必测,而只能在一定范围对典型地段典型剖面进行试验,更多场合是凭工作人员的实践经验进行现场判断。表 1-4(吴紫汪,1979)给出了现场初步判断的方法。

4) 按冻胀率划分

冻土根据冻胀率的大小分为不冻胀、弱冻胀、冻胀、强冻胀和特强冻胀土 5 类,如表 1-5 所示。

土的平均冻胀率 η 按式(1-1)计算。

$$\eta = \frac{z}{Z} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中: z ——土的总冻胀值, mm;

Z ——相应冻结深度, mm, 不包括冻胀量。

多年冻土含冰特征的现场初步判断的方法

表 1-4

含冰特征	融沉分级	粗 粒 土		黏 性 土	
		冻结状态特征	融化过程特征	冻结状态特征	融化过程特征
少冰冻土	不融沉	结构较为紧密, 仅在空隙中有冰晶存在	融化过程中土的结构没有变化, 不发生颗粒重分布现象	整体状冻土构造, 肉眼看不见冰层, 多数小冰晶在放大镜下可见	融化过程中土的结构没有变化, 不发生颗粒重分布现象, 没有渗水现象
多冰冻土	弱融沉	有较多冰晶充填在空隙中, 偶尔可见薄冰层及冰包裹体	融化后产生小的密实作用, 但结构外形基本不变, 有明显的渗水现象	以整体状冻土构造为主, 偶尔可见微冰透镜体或小的粒状冰	融化过程中土的结构形态基本不变, 但有体积缩小现象并有少量渗水现象
富冰冻土	融沉	除空隙被冰充满外, 可见冰晶将颗粒包裹, 使卵砾石相互隔离或存在较多的土冰透镜体	融化过程中发生明显的颗粒重排列(密实)作用, 并有大量水分渗出, 土表面可见水层	以网状、层状冻土构造为主, 冻土中可见分布不均匀的冰透镜体和薄冰层	融化过程中发生明显的矿物颗粒重分布(密实)作用, 并有较多水分渗出
饱冰冻土	强融沉	卵砾石颗粒基本为冰晶所包裹或存在大量的土冰透镜体和冰透镜体	融化过程使冻土结构破坏, 土(石)发生密实作用, 最后水土(石)界限分明	以层状、网状冻土构造为主, 在空间上冰、土普遍相间分布	融化中发生崩塌现象, 融化后呈流动状态, 在容器中融化, 最后水土界限分明
含土冰层	强融陷	冰的体积大于土颗粒的体积	融化后水土(石)分离, 上部可见水层	以中厚层状构造为主, 冰的体积大于土的体积	融化后完全呈流动体

按冻胀率分类

表 1-5

土组 分类号	土组名称	土质 干湿 状态	调查时土的 天然含水率 $w(\%)$	达到最大冻深时 地下、地表水位距 冻结线的最小距离 $h_w(m)$	平均 冻胀率 $\eta(\%)$	冻胀 等级	冻胀类别
I	含细粒土砾 (砂), 粒径小于 0.075mm 的颗粒 含量不大于 15%	干燥	不考虑	不考虑	$\eta \leq 1$	1	不冻胀
II	细粒土质砂 (黏土质砂), 粒 径小于 0.075mm 的颗粒含量不小 于 15%	干燥	$w \leq 12$	>1.0	$\eta \leq 1$	1	不冻胀
				≤ 1.0	$1 < \eta \leq 3.5$	2	弱冻胀
		中湿 潮湿	$12 < w \leq 18$	>1.0	$1 < \eta \leq 3.5$	2	弱冻胀
				≤ 1.0	$3.5 < \eta \leq 6$	3	冻胀
		过湿	$w > 18$	>0.5	$3.5 < \eta \leq 6$	3	冻胀
				≤ 0.5	$6 < \eta \leq 12$	4	强冻胀
III	粉土质砂	干燥	$w \leq 14$	>1.0	$\eta < 1$	1	不冻胀
				≤ 1.0	$1 < \eta \leq 3.5$	2	弱冻胀
		中湿 潮湿	$14 < w \leq 19$	>1.0	$1 < \eta \leq 3.5$	2	弱冻胀
				≤ 1.0	$3.5 < \eta \leq 6$	3	冻胀
		过湿	$19 < w \leq 23$	>1.0	$3.5 < \eta \leq 6$	3	冻胀
				≤ 1.0	$6 < \eta \leq 12$	4	强冻胀
IV	粉质土	干燥	$w \leq 19$	>1.5	$\eta \leq 1$	1	不冻胀
				≤ 1.5	$1 < \eta \leq 3.5$	2	弱冻胀
		中湿 潮湿	$19 < w \leq 22$	>1.5	$1 < \eta \leq 3.5$	2	弱冻胀
				≤ 1.5	$3.5 < \eta \leq 6$	3	冻胀
		过湿	$22 < w \leq 26$	>1.5	$3.5 < \eta \leq 6$	3	冻胀
				≤ 1.5	$6 < \eta \leq 12$	4	强冻胀
		过湿	$26 < w \leq 30$	>1.5	$6 < \eta \leq 12$	4	强冻胀
				≤ 1.5	$\eta > 12$	5	特强冻胀
		过湿	$w > 30$	不考虑			

续上表

土组 分类号	土组名称	土质 干湿 状态	调查时土的 天然含水率 $w(\%)$	达到最大冻深时 地下、地表水位距 冻结线的最小距离 $h_w(m)$	平均 冻胀率 $\eta(\%)$	冻胀 等级	冻胀类别
V	黏质土	干燥	$w \leq w_p + 2$	> 2.0	$\eta \leq 1$	1	不冻胀
				≤ 2.0			
		中湿 潮湿	$w_p + 2 < w \leq w_p + 5$	> 2.0	$1 < \eta \leq 3.5$	2	弱冻胀
				≤ 2.0			
		过湿	$w_p + 5 < w \leq w_p + 9$	> 2.0	$3.5 < \eta \leq 6$	3	冻胀
				≤ 2.0			
		过湿	$w_p + 9 < w \leq w_p + 15$	> 2.0	$6 < \eta \leq 12$	4	强冻胀
				≤ 2.0			
		过湿	$w > w_p + 15$	不考虑	$\eta > 12$	5	特强冻胀

- 注：1. 土的干湿状态参照现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)相应条款确定。
2. w_p 为土的塑限含水率。
3. 塑性指数大于 22 时，冻胀性降低一级。
4. 粒径小于 0.005mm 的颗粒含量大于 60% 时，为不冻胀土。
5. I、II 类土当填充细料大于全部质量的 40% 时，其冻胀性按填充料类别划分。

1.2 我国冻土的分布及特征

我国多年冻土在高海拔的青藏高原和高纬度的大小兴安岭地区集中分布，西部高山多年冻土零星散布在青藏高原周围。随着海拔和纬度的增加，多年冻土的面积、厚度和连续程度逐渐加大。多年冻土的连续程度由下界或南界附近的岛状分布过渡到大片及连续分布。近年来，由于全球气候变暖和区域内人类经济活动的增强，多年冻土正处于逐渐退化之中，具体表现为：南界北移、下界上移；连续程度降低；面积缩小；地温升高；上限下降，厚度减薄；融区扩展，冻土岛消失。因此，多年冻土的分布和发育状况正处于动态变化之中。

冻土是大气圈与岩石圈热质交换的产物。冻土的平面分布规律直接受到冻土存在条件的控制，而影响冻土存在的因素是极其复杂的。从热学观点来看，冻

土作为一种特殊的自然历史地质体,其存在主要受气象—水文因素、地质—地理因素和土质因素的影响。各类因素对冻土平面分布的影响并非等价的。其中,气温反映了辐射、大气环流、乱流和地面复杂情况(如地形、地面覆盖,尤其是水陆分布)的综合影响,具有纬度和高度分带性,是制约冻土生存的主导因素,它控制了冻土分布的总体格局;地表岩性、地表径流、地表覆盖物、朝向、坡度及局部热源是制约冻土生存的次级因素,造成了冻土平面分布中的局部差异;土体的性质则主要影响冻土的状态差异。

1.2.1 大小兴安岭(高纬度)多年冻土的分布和特征

高纬度的大小兴安岭多年冻土区位于欧亚大陆多年冻土区的南缘地带,自北纬 $46^{\circ}30'$ ~ $53^{\circ}30'$,海拔几百米至一千米。气候上属于我国最寒冷的寒温带和中温带的北部。

大小兴安岭多年冻土的形成与存在的主导因素是一定纬度下出现的负年平均气温,其形成及分布具有显著的纬度地带性规律。自北向南,随年平均气温升高($-5\sim 0^{\circ}\text{C}$),多年冻土所占面积的百分比由 80% 减至 5% 以下,由大片分布至岛状和稀疏岛状甚至零星分布。受其他区域因素(海拔、地质构造、岩性、大气降水等)影响也表现出地域差异。多年冻土南界在受到纬度地带性的制约下,同时又受到东西方向上两高(大兴安岭和小兴安岭)夹一低(松嫩平原)的地形影响,呈“W”形。岛状、稀疏岛状和零星分布冻土区南北宽为 200~400km,其面积比大片连续冻土区要大得多。

1) 大小兴安岭(高纬度)多年冻土的南界

20 世纪 70 年代内蒙古大兴安岭林业设计院、中国科学院兰州冰川冻土研究所、铁道部第三设计院等单位组成冻土科研协作组,对东北多年冻土南界进行了实地考察研究,确定了东北多年冻土南界线。该线在新巴尔虎右旗西北方向由蒙古进入我国境内,经新巴尔虎右旗,沿哈拉哈河溯源而上,绕过阿尔山南端,通过五叉沟折向东北方向,经巴林附近,达松嫩平原北部的伊拉哈与讷河之间,之后沿小兴安岭西南麓经南岔向东北方向,距罗北县 50km 附近穿过黑龙江进入俄罗斯境内。

资料分析表明,20 世纪 70 年代确定的东北多年冻土南界基本上摆动在当时的年平均气温等值线 $+1.0\sim -1.0^{\circ}\text{C}$ 。南界西段大致摆动在年平均气温等值线 $-1.0\sim 0^{\circ}\text{C}$;南界中段(松嫩平原及大小兴安岭东南山麓)大约与年平均气温 0°C 等值线吻合;南界东段位于 $0\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 。分析认为,这种情况出现的原因可能与水分有关。一般认为,冻土为一定历史时期的产物。从冻土退化

角度考虑,由于该地区年降雨量自东南向西北逐渐减小,因此南界东段表层土体含水率应大于西段表层土体含水率。东段土体湿度大,阻碍了地温升高,延缓了冻土退化的速度;相反,西段土体湿度小,地温易于升高,冻土退化速度相应较快。此外,南界东段和西段植被和自然景观的不同也是产生温度位移差异的主要原因。

2) 大小兴安岭(高纬度)多年冻土的分布规律和特征

东北大小兴安岭多年冻土分布、冻土温度和厚度总体格局受纬度控制。在同一地区不同的地形部位,因为受坡向、植被、岩性、地表水以及河流等地质地貌因素的影响,冻土的发育程度及年平均地温有较大的差异。低处冻土温度低于高处,低洼处冻土更为发育,在大片多年冻土区,山间洼地和河谷阶地的泥炭沼泽化地段,冻土温度低,地下冰发育。因此,在大小兴安岭多年冻土地区,采用有限观测孔的地温数据进行分析,难以描述该区域冻土发育总体的地带性分布规律。随着海拔高度影响的叠加,使大兴安岭地区的多年冻土比小兴安岭地区更为发育,并且使得东北多年冻土的自然地理南界呈“W”形分布。岛状冻土分布区南北宽为 200~400km,远大于大片多年冻土面积。这一广阔地带实际上是多年冻土与季节冻土相互过渡的地带,该区域冻土对地表热交换条件变化反应十分敏感。

1.2.2 青藏高原及西部高山(高海拔)多年冻土的分布和特征

该区域多年冻土分布在阿尔泰山、天山、祁连山及青藏高原上,由于多年冻土分布主要受海拔高度的控制,称之为高海拔多年冻土。高山高原多年冻土仅出现在一定海拔高度以上,岛状冻土出现的最低海拔高度的连线即为多年冻土分布下界。由下界往上,冻土分布连续性增大,由岛状分布至大片分布再至连续分布,冻土厚度随着海拔高度的增加而增厚,具有明显的垂直地带性规律。

1) 高海拔多年冻土分布下界

高海拔多年冻土分布下界(海拔高度)具有随纬度降低而升高的基本规律(表 1-6)。程国栋对北半球(北纬 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$)高海拔多年冻土下界资料进行拟合得到以下指数函数关系:

$$H = 3\,650e^{-0.003(\varphi-25.37)^2} + 1\,428 \quad (1-2)$$

式中: H ——多年冻土下界的海拔高度, m;

φ ——地理纬度, ($^{\circ}$)。

通过对我国西部气象资料进行统计分析,干燥度对多年冻土下界的影响,在