

铁路特殊工程地质技术丛书

冻土工程

铁道第三勘察设计院 编著

中国铁道出版社

2002年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书主要介绍我国东北多年冻土地区工程建设中出现的各种冻害及整治方法。内容包括:多年冻土的特征及冻土基础理论;工程勘察方法、要求及铁路选线原则;地基的冻胀与融沉;冻土路基、桥涵、隧道、给排水及房建工程;多年冻土区的环境保护。书中附有较多的应用实例及计算数据、图表,可供读者应用参考。

本书可供冻土地区工程技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冻土工程/铁道第三勘察设计院编著. —北京:中国铁道出版社, 2002. 1 重印(1994. 9 第 1 版)
(铁路特殊工程地质技术丛书)
ISBN 7-113-01747-9

I. 冻… II. 铁… III. 冻土区-铁路工程-工程技术 IV. U216. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 062965 号

书 名:冻土工程(铁路特殊工程地质技术丛书)

作 者:铁道第三勘察设计院 编著

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)

策划编辑:施以仁 张苍松

责任编辑:张苍松 张 悦

封面设计:马 利

印 刷:北京市燕山印刷厂

开 本:850×1 168 1/32 印张:13. 125 字数:361 千

版 本:1994 年 9 月第 1 版 2002 年 2 月第 2 次印刷

印 数:1 501~3 000 册

书 号:ISBN 7-113-01747-9/TU·379

定 价:30. 00 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

在我国东北大小兴安岭地区,约有 34 万 km^2 的多年冻土,占全国多年冻土总面积的 17%。由于这里地处欧亚大陆多年冻土的南部边缘,多年冻土的厚度较薄,区内大部分冻土是属于不稳定的。过去在这里修建铁路曾经“三进三出”、屡遭挫折,故有“高寒禁区”之称。究其原因,除气候条件(严寒)之外,主要是对边缘冻土的特性缺乏认识。因此本地区铁路的修建工作,一直是在边修建、边冻害、边摸索的情况下进行的。许多工程冻害不仅在铁路运营之前就很严重,在交付运营之后,时隔几年、十几年仍在陆续出现新的冻害。其冻害程度在我国铁路史上也是罕见的,引起路内外工程界人士的关注。有的专家看后,曾预言“如果青藏铁路上马,将会出现修得起而养不起的被动局面……”。这种议论在当时确实代表了许多人对冻土区修路的担心。后来,铁路急需向林区纵深延伸,因而各种建筑物的冻害也随着层出不穷,甚至还有的冻害竟成为当时的“拦路虎”,因此迫使我院于 1964 年初正式组建冻土队,并与施工、运营及科研单位共同协作,进行了大量的室内外试验研究工作,同时还设计了许多试验性工程,进行长期观测,从而积累了极其丰富的实际资料,并取得了可喜的科研成果。这些成果,无论在理论上或在实践上都有许多新的突破。总之广大职工在兴安岭深山密林的严寒环境里奋战几十年,终于在多年冻土区里成功地修通了两千多公里的铁路,此举不仅有力的支援了我国社会主义建设,而且为今后在冻土区继续筑路,提供了极其宝贵的实践经验。

编写本书的目的,正是为了系统的介绍东北多年冻土区修建铁路的经验及科研成果。同时也将工程中出现的问题以及行之有

效的工程措施等,全面地介绍给广大读者,作为借鉴。

书中取材是以东北大小兴安岭多年冻土地地区铁路勘测设计、施工、运营与冻土研究中所积累的实践经验为主,同时还参考国内外最新有关冻土的研究资料。通过分析对比,使笔者对冻土的共性规律及我国东北边缘冻土的特性规律,有了新的认识。

本书由铁道第三勘察设计院科学技术研究所关光涛组织编著,由崔成汗主编。第一章的第一、三、四、五节,二节的一、四、五及第二章的第一节由刘广质执笔;第一章第二节的二、三,第二章第三节由戴竞波执笔;第四章由戴竞波、赵福运共同执笔;第三、五、六章由崔成汗执笔;第七章由何杰执笔;第八章由贺长庚执笔;郑启浦编写第二章的第二节及第九章。

全书在编写过程中曾先后经郑象铎、方根男审定。另外李恩英同志为本书提供了许多宝贵材料。还有很多同志参与本书插图的描绘工作,在此一并表示谢意。

编 者

1994年1月

第二版序

由铁道第三勘察设计院编写的《冻土工程》一书第一版,自1994年问世以来,受到了广大科研、勘察设计、教学、施工等科技工作者的欢迎。书中有关数据、论点、成果资料及施工措施方法,曾被纳入勘察设计、施工手册、教材教案、规程规范中,收到了出版本书的预期效果,取得了显著的经济、社会效益。

随着工程地质勘察技术手段、治理措施方法的不断发展和建设西部大开发标志性工程——青藏铁路的实际需要,既有书籍已不能满足勘察设计、施工生产、科研攻关的要求,迫切需要本书的修订再版。

新版的《冻土工程》是在原有科研成果的基础上,结合我国东北多年冻土地地区铁路工程施工及运营后的工程维护经验,同时吸收国内外有关冻土工程研究的最新成果,对原书内容加以补充后进行的再版,各章节的结构基本保持不变。期望通过本次再版,对青藏铁路高海拔、低纬度的多年冻土工程的治理和建设,发挥出积极作用,产生深远的影响。

编者

2002年1月

目 录

第一章 大小兴安岭多年冻土及其工程地质条件·····	(1)
第一节 自然地理概况·····	(1)
第二节 大小兴安岭多年冻土的基本特征·····	(3)
第三节 多年冻土地区的不良地质现象·····	(37)
第四节 冻土的物理力学性质·····	(41)
第五节 多年冻土与季节冻土的工程分类·····	(53)
第二章 多年冻土地区工程勘察·····	(59)
第一节 工程地质勘察·····	(59)
第二节 供水水文地质勘察·····	(93)
第三节 多年冻土地区的铁路选线·····	(99)
第三章 地基基础的冻胀与融沉·····	(116)
第一节 地基基础的冻胀·····	(116)
第二节 地基基础的融沉·····	(138)
第四章 路基工程·····	(153)
第一节 东北多年冻土地区路基的主要病害及 分析·····	(153)
第二节 东北多年冻土地区路基的设计原则·····	(158)
第三节 路基地面水的排除·····	(176)
第四节 低填浅挖及零断面地段的路基·····	(180)
第五节 各种不良地质地段的路基·····	(182)
第六节 路 堑·····	(209)
第七节 施工及运营中应注意的事项·····	(219)
第五章 桥涵工程·····	(225)
第一节 桥涵冻害及分析·····	(225)

第二节	桥涵冻害的防治措施·····	(236)
第三节	桥涵的设计原则·····	(247)
第四节	人为上限的确定方法·····	(250)
第五节	桥涵冬季施工·····	(252)
第六章	隧道工程·····	(261)
第一节	隧道的冻害及分析·····	(261)
第二节	隧道冻害的防治措施·····	(266)
第三节	多年冻土及严寒地区隧道的主要设计 原则·····	(274)
第七章	给排水工程·····	(276)
第一节	多年冻土地区给排水工程的特点·····	(276)
第二节	冻害原因的分析·····	(280)
第三节	冻害防治及改善运营条件的措施·····	(282)
第八章	房建工程·····	(324)
第一节	房屋建筑的冻害及产生的原因·····	(324)
第二节	建筑场地和房屋总平面布置·····	(334)
第三节	房屋地基及基础设计·····	(338)
第四节	采暖房屋融化盘及其下的最高地温·····	(351)
第五节	房屋结构及构造·····	(369)
第六节	房屋基础施工·····	(376)
第七节	负温混凝土的外加剂(抗冻早强剂)·····	(386)
第九章	多年冻土地区的环境保护·····	(401)
第一节	多年冻土地区环境保护的重要性·····	(401)
第二节	多年冻土地区环境保护与铁路工程建设的 关系·····	(402)
第三节	多年冻土地区铁路工程投产运营中的 环境保护·····	(405)
第四节	多年冻土地区环境监测与管理·····	(407)

第一章 大小兴安岭多年冻土及其工程地质条件

第一节 自然地理概况

大小兴安岭位于我国东北部,约在东经 $115^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 、北纬 $45^{\circ}\sim 53^{\circ}$ 之间,东、北、西三面与前苏联、蒙古接壤。大兴安岭主山脉呈北北东~南南西走向,长约 1 400 km。其主要支脉伊勒呼里山自北部向东南方向呈“S”形状延伸约 230 km 与小兴安岭相连。大小兴安岭山地海拔高度一般在 300~1 300 m,南端最高可达 1 700 m 以上。山地相对高差在分水岭地段约 200~400 m;在河谷地段约 100~250 m。

大小兴安岭属于兴安海西褶皱带。其基本岩性是以岩浆岩类侵入岩和喷出岩为主,其次是变质沉积岩。自第三纪以来,地面长期遭受剥蚀作用,致使地形比较缓和。新构造运动以缓慢翘起上升运动为主。

大小兴安岭山地河流发育,各河支流密集。除呼伦贝尔高原的乌尔逊河、克鲁伦河属于呼伦湖内陆河外,全区较大河流有额尔古纳河、嫩江、松花江等,均属于黑龙江水系。额尔古纳河是大兴安岭的西部边界,全长约 900 km,其主要支流有海拉尔河、贝尔茨河、根河等。嫩江是大小兴安岭之间的主要河流,大兴安岭东坡或东南坡和小兴安岭南坡或西南坡之所有河流均流入该河水域,如洮儿河、诺敏河、讷谟尔河等。黑龙江为中俄两国界河,是大小兴安岭北部最大河流,上游呼玛河、额木尔河、盘古河为其最大支流,下游库尔宾河、逊河、沾河等支流均汇入黑龙江。小兴安岭南坡或

东南坡的呼兰河、汤旺河等则汇入松花江。全区河流 4 月中旬至 5 月中旬解冻,流冰期较短(7~10 d)每年 10 月下旬至 11 月上旬开始结冰,并随之封冻。封冻期达 5~6 个月,冰冻较厚(0.8~3.0 m)。

组成大小兴安岭的地貌为大小兴安岭山地、呼伦贝尔高原和松嫩平原。

大小兴安岭山地的主要特点是山地地形比较发育。广泛分布第四纪沉积物,并有酸性侵入岩和喷出岩存在。残积层分布在山顶与山坡地带,厚约 2 m。主要物质成分为碎石夹黏砂土、碎石、砾石等。残坡积层分布在山麓和山间洼地较多,厚约 2~3 m,由沼泽土、角砾砂黏土、碎砾石土等物质组成。冲积层多分布在河谷地带,洪积层多分布在山前沟口地带。其主要物质成分为卵石、砂砾石以及砂层或砂黏土的透镜体等。大小兴安岭山地的植被多为原始森林、乔木及部分次生林等。

呼伦贝尔高原上丘陵平原地形发育。它的周围为丘陵山地,中部海拉尔台地构成了呼伦贝尔高原的主体。第四纪松软岩层分布广泛。在伊敏河右岸为广阔的大草原。

松嫩冲积平原河网密集,其地层主要为第四纪冲积、洪积物。植被除次生林外主要是农作物。

大小兴安岭多年冻土地区水文地质条件比较复杂,地下水的分布、埋藏和循环,主要受地质构造、地貌、气候和岩性等因素的影响。同时由于本区地处多年冻土区的南缘,冻土的分布对水文地质条件的变化影响也很大。

大小兴安岭属于高纬度大陆性气候。北受西伯利亚寒流控制,西受蒙古高压气流影响,东部小兴安岭在一定程度上阻碍着海洋气候的对流作用。所以,本区具有气候严寒、冬季特长、夏季极短的特点。若以候温高于 22 °C 为夏季则夏季只有 6~30 d;低于 10 °C 为冬季其冬季长达 210~250 d。全年气温 1 月最低,7 月最高。气温从南向北逐渐降低,充分体现了气温的纬度分带性。

但是,海拔高度又使某些地区的气温带有垂直分带的特点。

如兴安(海拔 982.1 m)和博克图(海拔 738.7 m)纬度相近,相距仅 20 km,但由于海拔高度相差 250 m,其年平均气温相差甚多(分别为 -3.3°C 与 -1.1°C)。相反,阿尔山与牙克石虽然相距甚远,可是海拔高度和纬度相近,因而其年平均气温却非常接近(分别为 -3.3°C 与 -2.8°C),足见海拔高度对气温的影响不容忽视。

大小兴安岭年降水量一般不超过 500 mm,主要集中在 6、7、8 三个月,占全年降水量的 60%~80%;9 月末至翌年 5 月上旬为降雪期,自南向北积雪逐渐增厚(5~35 cm)。

该区年蒸发量远远大于降水量,全年总蒸发量一般都大于 1 000 mm,5~7 三个月蒸发量最大,约占全年总蒸发量的 50%左右。

全年日照总时数为 2 400~2 900 h,5、6、7、8 四个月日照最强,11、12、1 三个月日照最弱。

以上各种自然条件影响着大小兴安岭多年冻土的稳定与发展。在多年冻土南界如嫩江至加格达奇一带,由于人类活动频繁导致多年冻土的上限下降,厚度减薄,多年冻土逐年退化。

第二节 大小兴安岭多年冻土的基本特征

一、多年冻土的定义及其平面分布

(一) 多年冻土的定义

凡温度为负温或零温,并含有冰的各种土均称为冻土。如果土中只有负温度而不含冰时则称为寒土。冬季冻结、夏季全部融化的土层称为季节冻土,季节冻结层又称季节作用层、活动层。冻结状态持续 2 年以上的土层称为多年冻土。

多年冻土地区的表层土夏季融化,冬季冻结,所以是季节冻土。根据其与下伏多年冻土的关系又可分为:季节冻结层——夏季融化,冬季冻结时不与多年冻土层衔接或其下为融土层;季节融化层——夏季融化,冬季冻结时与多年冻土完全衔接的土层。不

衔接多年冻土属于前者；衔接多年冻土属于后者。

（二）多年冻土的平面分布

多年冻土的分布一般是受地理纬度和海拔高度控制的，前者称为高纬度多年冻土，后者称为高海拔多年冻土。东北大小兴安岭地区的多年冻土属于高纬度多年冻土，这里一年内有 8~9 个月冰冻期，随着纬度的增高多年冻土的分布面积也逐步增大。20 世纪 70 年代后期，由中国科学院冰川冻土沙漠研究所、牙克石林业设计院、铁道部第三勘测设计院（以下简称铁三院）共同组建调查组，在多年工程地质勘察和长期观测的基础上，对大小兴安岭多年冻土地区进行了大面积的调查，并首次编制了《东北大小兴安岭多年冻土分区图》，填补大小兴安岭多年冻土分区图的空白。如图 1—1 及表 1—1。

原图中的三个冻土分带为大片连续多年冻土带、岛状融区多年冻土带和岛状多年冻土带，分别相当于图 1—1 及表 1—1 中的不连续多年冻土带、大片岛状多年冻土带及零星岛状多年冻土带。

据调查统计，大小兴安岭 80% 以上隧道无多年冻土，大中桥河床下也多无多年冻土，小桥涵沟床半数以上为非多年冻土，这证明大小兴安岭不存在大片连续多年冻土。

多年来的勘察与 20 世纪 50 年代大小兴安岭 3 个观测区的观测资料表明，自北向南多年冻土由大兴安岭西北部（包括牙林线）的不连续多年冻土带过渡到大兴安岭东南部及整个小兴安岭大片岛状多年冻土带（包括嫩林线）以致最南端的零星岛状多年冻土带，其多年冻土面积逐渐减少，充分体现了多年冻土的纬度分带性。

二、多年冻土的厚度及其剖面分布

（一）多年冻土的厚度

在多年冻土地区，地表以下的一定深度内，每年夏季融化，冬季冻结，该层称为季节融化层。在该深度以下的土则终年处于冻结状态，称为多年冻土。这一深度称为季节融化层底板或多年冻土上限。从地表到这一深度的距离即为季节融化层厚度或多年冻

土上限的埋深。

东北大小兴安岭多年冻土分区说明表

表 1—1

冻土分带名称		冻土分区名称及符号		年平均气温(°C)	年平均地温(°C)	冻土厚度(m)	冻土分布特征
I	不连续多年冻土带			一般 低于 -5.0	一般 -1.0~ -2.0, 最低可达 -4.4	一般 50~80 有的地方超过 100	此带纬度高,冻土厚度大,温度低,平面分布广泛。多年冻土分布于除大河河床及大河融区以外的所有河谷台地上、阴坡以及山前缓坡上和大部分的山岭顶部。阳坡一般无多年冻土,厚层地下冰及裂隙冰极为发育,冰厚由几厘米到数十厘米乃至 3~4 m。季节融化深度较小,一般只有 0.3~1.5 m,冰椎、冰丘发育
II	大片岛状多年冻土带	II ₁	大兴安岭北部山地大片岛状冻土区	-3.0~ -5.0 左右	-0.5~ -1.5	20~50	本区多年冻土在平面分布上连性中断。冻土厚度和温度受岩性、植被、坡向的控制较大,层状地下冰及裂隙冰较为发育,季节融化深度一般在 0.5~2.5 m 左右,热喀斯特现象已有出现
		II ₂	大兴安岭阿尔山山地大片岛状冻土区	-3.0~ -4.0		20~30	本区受海拔(1 000~1 300 m)控制,冻土略具垂直分布的特点,河床下及向阳坡、半阴坡、裸露陡坡一般为融区,松散层较薄,层状地下冰不常见,寒冻风化非常强烈,石河、石海分布较多
III	零星岛状多年冻土带	III ₁	呼伦贝尔高原丘陵零星岛状冻土区	-0.5~ -2.5	0~ -1.0	5~15	呼伦湖以西,冻土仅分布于少数山间沼泽化洼地中。呼伦湖以东,冻土岛仅出现在个别沙丘间湿地及湖群湿地边缘。剖面上多为不衔接,含冰量很小,有时呈干冻结状态。季节融化深度一般为 2.5~3.0 m
		III ₂	大兴安岭西坡丘陵零星岛状冻土区	-2.5~ -3.5	0~ -0.7	10~20	本区多年冻土仅分布于山间谷地、河漫滩、阶地及阴坡植被覆盖地带。季节融化深度一般较大(2.5~3.5 m),但在塔头草、泥炭化沼泽地带只有 1.0~1.3 m。季节性冰椎、冰丘分布较多,热喀斯特现象亦有出现

冻土分带名称		冻土分区名称及符号		年平均气温(°C)	年平均地温(°C)	冻土厚度(m)	冻土分布特征
Ⅲ	零星岛状多年冻土带	Ⅲ ₃	大兴安岭东坡丘陵零星岛状冻土区	-0.4~ -2.5	0~-0.5	5~20, 一般5~ 10居多	由于森林大举砍伐,工农业生产等活动普遍进行,冻土分布极为零星,多出现在河漫滩、低阶地、山间沟谷地的沼泽化地带。大中河流下一般无冻土。自南而北,冻土岛大小由几十米,一二百米,逐渐增大到数百米,剖面上衔接的为多。季节融化深度0.7~3.0 m。冻土现象多呈季节性变化,以潜水冰椎、冰丘融化泥流等较为普遍
		Ⅲ ₄	小兴安岭低山丘陵零星岛状冻土区	0~ -1.0	0~ -1.0	5~15	本区地势南高北低。冻土主要分布于山地针叶林带,即讷谟尔河、沾河、库尔滨河、汤旺河等上游的山间谷地及阴坡,北部仅在沼泽化湿地出现,河流下游一般无冻土。季节融化深度一般地区2.5~3.0 m,泥炭厚度较大的沼泽化地带及森林茂密的山地则为1.0~1.2 m,厚层及层状地下冰亦有少量分布
		Ⅲ ₅	松嫩平原北部边缘零星岛状冻土区	0~ -1.0	0~ -0.3	一般 小于10	海拔高度300~400 m,大部均为耕地。冻土分布极为零星,仅出现在低洼潮湿的沼泽化地带。多呈塑性冻土状态,含冰量一般较小,很少有冰丘、冰椎
Ⅳ	季节冻土带			0~ +3.5			由东南向西北最大季节冻结深度逐渐增厚,由1.8~1.9 m过渡到2.4~2.5 m。在大兴安岭东麓及小兴安岭南麓一带,季节冻土厚度为2.5~2.8 m,个别可超过3.0 m

多年冻土层的底部称作多年冻土下限，下限处的地温值为 0°C 。下限以上为多年冻土，以下为融土。上限和下限之间的距离称为多年冻土厚度。

多年冻土厚度是多年冻土的重要标志之一，它反映着冻土的发育程度。冻土层的厚度对评价建筑物地基稳定性有着重要意义，是进行各类型建筑地层基础设计不可缺少的依据。

(二) 多年冻土的剖面分布

在大小兴安岭地区，多年冻土层的厚度和面积一样，同样受纬度地带性制约。由冻土南界往北，随着纬度增高，冻土温度降低，多年冻土平面分布面积增大，其厚度亦逐渐增大。有人作过粗略计算；大约每向北推进 100 km (约 1 个纬度)，冻土厚度增加 $10\sim 15\text{ m}$ 。

最薄的多年冻土层存在于零星岛状多年冻土带的南界附近，一般仅几米至十几米。以上多年冻土厚度可概括的构成了多年冻土在剖面上的分布图(图 1—2)。表 1—2 是东北多年冻土地区临近南界附近的一些地点的冻土厚度情况。

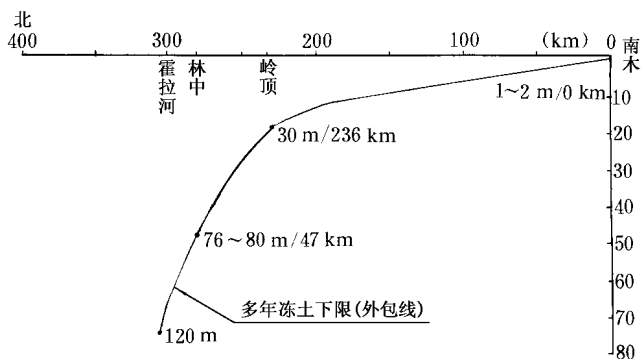


图 1—2 大小兴安岭多年冻土剖面分布规律示意图

最厚的多年冻土层分布于大兴安岭最北部的不连续多年冻土带内，一般为 $40\sim 70\text{ m}$ 。在背阳的山间谷底生长塔头草或厚层苔藓的沼泽中和低级阶地上，多年冻土厚度可超过 100 m 。在北纬 $52^{\circ}27'\sim 53^{\circ}03'$ ，东经 $121^{\circ}52'\sim 122^{\circ}04'$ 的漠河县霍拉河盆地中，实

测到的冻土最大厚度为 120 m。表 1—3 是大兴安岭不连续多年冻土带内一些地点的多年冻土下限资料：

大小兴安岭多年冻土南界附近一些地点冻土厚度 表 1—2

冻土南界	西 段			中 段			东 段	
大地貌单元	大兴安岭西坡	大兴安岭分水岭	呼伦贝尔高原	大兴安岭东南麓			小兴安岭山地丘陵	
地 点	阿尔山地区	伊利克得	海拉尔	小黑山	后达拉滨	大杨树	蔡家岗	乌拉嘎
冻土厚度(m)	2.0~3.0 最厚 16~18	4.1	11.7	2.75	13.3	1.0~2.0 最厚 6~7	4.0~6.0 最厚 10	3.0~7.0

注：本表中阿尔山地区、大杨树、蔡家岗、乌拉嘎的厚度引自《大小兴安岭多年冻土南界考察报告》。1974 年 10 月牙克石林业设计院等。

大兴安岭不连续多年冻土带内一些地点

的多年冻土下限资料

表 1—3

地 点	得尔布尔		安格林	伊图里河	阿木尔(劲涛)	古 莲(西林吉)	莫尔道嘎
	贮木场	青年岭林场					
多年冻土下限(m)	54.4	40.0	55.1	40.0	62.0	66~70	50.0
地 点	老 潮 河		古莲煤矿(霍拉河盆地)				
	砖 场	粮 库	东 部		西 部		
多年冻土下限(m)	45.0		30.0		16~32		67~120

注：表中数据阿木尔为铁道部第三勘测设计院资料；古莲为黑龙江林业设计院资料；古莲煤矿引自《大兴安岭北部霍拉河盆地地质构造在冻土形成中的作用》一文，见《冰川冻土》1989 年 11 卷第三期。其他资料均引自《大兴安岭多年冻土特征探讨》一文，见 1976 年牙克石林业设计院《林业科研与设计》第一期。

虽然多年冻土层厚度变化的总规律是由南界往北随纬度增高逐渐增大，但由于还受到地质地理因素的影响，亦存在着纬度高处的冻土厚度反而较纬度低处薄的现象。即使在同一谷地里，由于地貌、岩性、植被、地质构造、地表水、地下水、坡向等条件的差异，亦会使多年冻土层的厚度有较大的变化。其另一种规律是：最厚的多年冻土层均分布在沟谷底部或盆地中心植被覆盖良好的沼泽