

工程冻土学

冻土学原理

第五册

〔俄〕Э.Д.叶尔绍夫 主编
张长庆 译
武筱舫 校
Principles of Geocryology



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS



工程冻土学

冻土学原理

第五册

〔俄〕С.П.叶尔绍夫 主编
张长庆 译
武筱舫 校
Principles of Geocryology



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

工程冻土学 / 叶尔绍夫主编 ; 张长庆译. -- 兰州 :
兰州大学出版社, 2016.3

(冻土学原理 ; 5)

ISBN 978-7-311-04859-4

I. ①工… II. ①叶… ②张… III. ①岩土工程—冻
土学—研究 IV. ①P642.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第055873号

责任编辑 魏春玲 张国梁 赵 方 谢 芮

封面设计 郇 海

书 名 工程冻土学

作 者 [俄]3.Д. 叶尔绍夫 主编
张长庆 译

出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路222号 730000)

电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)

网 址 <http://www.onbook.com.cn>

电子信箱 press@lzu.edu.cn

印 刷 甘肃兴方正彩色数码快印有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 23.25

字 数 435千

版 次 2016年3月第1版

印 次 2016年3月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-311-04859-4

定 价 88.00元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

中文版序

多年冻土占据了地球陆地面积的 25%。俄罗斯是地球上多年冻土分布面积最大的国家,其国土面积的 65% 分布有多年冻土。俄罗斯是开展多年冻土研究最早的国家,早在 1757 年就发表了冻土研究的科学文章,并在一百多年前就建成了跨越 2200 km 多年冻土的西伯利亚大铁路。俄罗斯也是最早成立专门的冻土研究机构,开展系统的科学研究和工程实践,把冻土研究提升为一门科学的国家。俄罗斯出版过一系列的冻土学专著和教科书,摆在我们面前的这套系列巨著则集以往成果之大成,全面、系统地总结了冻土学及其各分支学科的基本学术方向,代表了冻土研究的世界水平。这套系列巨著共分六册,现将每册的内容简介如下,从中也可领略俄罗斯构筑的冻土学体系的博大精深。

第一册 冻土学的地球物理和化学基础

冻土是一个复杂(多组分、多相、多孔隙)的物理化学系统,它包含能互相转换的三相水(未冻水、冰、水汽),所以冻土的性状非常易变。这一学术方向就是要研究自然界正冻、已冻和正融过程中冻土性状变化的规律和特点,是冻土学的重要理论基础。

第二册 成岩冻土学(冷生岩石学)

多年冻土区的成岩因素和过程在风化、搬运、沉积和岩化各阶段与非冻土区有着重大的、本质上的差别。冻土区的成岩结果也十分特殊(粉尘性、冰角砾岩、冷生组构、特殊的矿物和岩石组合等),是一种特殊的、独立的沉积成岩类型,由此产生了一种新的岩石学理论——冷生岩石学。

第三册 区域冻土学和历史冻土学

这一学术方向研究季节冻土层、多年冻土层以及冻土地质过程和现象的发生和发展历史,其分布和组构的地带性和区域性规律。本册还研讨了地球以外的太阳系行星及其卫星上的冷生岩土带。

第四册 动力冻土学

用热力学和热物理学的理论和方法研究季节冻土和多年冻土及其伴生的冻土地质现象形成、变化规律和预报方法。

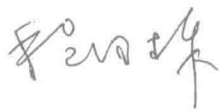
第五册 工程冻土学

研究工程建筑与多年冻土之间的热学、力学和化学相互作用的理论,制订工程冻土预报及调控方法,提出冻土区各种工程建筑设计、施工和运营的工程地质保障。

第六册 冻土预报和冻土带的生态问题

冻土对气温变化及人为影响高度敏感,极易发生变化。冻土区的生态系统也十分脆弱,一旦破坏极难恢复。所以必须对自然(全球变暖)和人为(经济开发)影响下冻土及其上生态系统的可能变化做出预报,及时采取必要的保护措施。

中国是地球上多年冻土分布的第三大国,但冻土研究直到新中国成立后才得以开展。几十年来中国的冻土研究得到了长足的发展,特别是青藏铁路的成功建成,使中国的工程冻土研究在国际上占有了一席之地,但冻土学理论的研究仍亟待提升。西部大开发和东北复兴对中国的冻土研究提出了更高的要求,尤其在全球转暖的情况下,冻土研究面临着极大的挑战,必须回答冻土对全球化转暖的响应和反馈问题,提出必要的应对措施。相信这套系列巨著的翻译、出版,将对中国冻土研究水平的提高起到重要的推动作用。



2015. 2. 12

译者的话

《冻土学原理》是俄罗斯国立莫斯科大学地质系地冰(冻土)教研室前主任 Э. Д. Ершов(叶尔绍夫)教授生前组织全教研室的教授、副教授高级研究员、研究员们几十人并邀请俄罗斯冻土学界一些著名学者共同撰写的六卷冻土学巨著。

第一册 冻土学的地球物理和化学基础;

第二册 成岩冻土学(冷生岩石学);

第三册 区域冻土学和历史冻土学;

第四册 动力冻土学;

第五册 工程冻土学;

第六册 冻土预报和冻土带的生态问题。

这部著作汇集了当代冻土学各方面的基础理论和冻土区冻土工程的建设经验,是目前国际冻土学界唯一的一部这样的著作。这六册《冻土学原理》构成了冻土学的完整体系。但各册又可相对独立构成冻土学的分支学科。

这部著作可以作为我国冻土科研和在冻土区从事生态环境及冻土工程技术人员的重要参考资料之一,亦是年轻的冻土科研人员和博士生、硕士生的良好教材。

《冻土学原理》中文本的译校工作是在国家冻土工程重点实验室和中国科学院寒区旱区环境和工程研究所冻土与寒区工程研究室的领导马巍和吴青柏研究员的支持下邀请童伯良、刘经仁、张长庆、武筱舫四位本研究室退休人员完成的。

这套《冻土学原理》的俄语原著是 Э. Д. Ершов 教授及其他作者赠送给童伯良研究员的礼物。当时此书在俄罗斯书店早已售完。在得知我们研究室有意把此著作译

成中文出版时,Э. Д. Ершов 教授作为此著作的主编和地冰教研室主任当即欣然同意并无偿提供这部著作的中文版权,答应今后继续提供当时尚在编写的第六册原著。他只要求我们把这部著作的中文本送十套给地冰教研室,供在莫斯科大学学习的中国留学生使用。

可见这部《冻土学原理》中文本的出版是中俄两国冻土学界源自 20 世纪 50 年代延续至今的学术交流和友谊的见证之一。

童伯良

2014 年 10 月 21 日

原版序

到目前为止,已经有一系列关于冻土学的综述性著作。例如,1940年 М. И. Сумгиным、С. П. Качуриным、Н. Н. Толстихиным 和 В. Ф. Тумелем 编写的《普通冻土学》一书,在建立冻土的学科中起了重要作用。1959年冻土研究所出版了两卷本的《冻土学原理》著作集(П. Ф. Швецов、Б. Н. Достовалов 和 Н. И. Салтыков 主编),总结了普通冻土学和工程冻土学领域的理论研究成果。1967年在 В. А. Кудрявцев 领导下首次出版了《普通冻土学》教科书。也就是在这一时期发表了相当多的关于冻土学具体问题或某些方面的重要专著。所有这些著作在建立冻土学理论上发挥了巨大作用。然而这早已成为图书馆馆藏珍品了。由于近30年冻土学的理论基础和实践(工程)基础研究取得的巨大成就,冻土学的许多分支学科需要进行重要的增补。

本《冻土学原理》多卷书是一部系统论述多年冻土区学说的著作。多年冻土区占据地球所有陆地面积的25%以上,并约占俄罗斯国土的65%。本著作的作者面临如下的任务:要从自然历史方面和多年冻土区的国民经济发展出发,在总结业已建立的经典理论概念的基础上以及总结关于冻土和冻土地质过程、现象的形成与发育规律的最新资料的基础上,展示冻土学及其各分支学科和基本学术方向的现代发展水平。

冻土学是地质旋回的自然历史学科,研究冻土层及其中的冰、它们的成分、冷生结构、性质、冻土地质过程和现象形成与发育的时空规律。几百米厚(在高山地区可达1500 m以上)的冻结层构成了岩石圈的冻结带,其特征是负温(在深度10~20 m处为 -15°C)和包含大大小小的冰包体或冰晶。这没有什么可奇怪的,В. И. Вернадский 早就认为:许多具有极大科学意义和实践意义问题的解答恰恰与地表较深处的冷却界

线有关。

冻土层不是偶然的,而是有规律的、自然历史决定的生成物,以严格定义的、唯冻土层所有的现代和过去的发生(成因)、存在、发育和分布的规律为其特征。例如,地球上的实际资料能够肯定从早元古代(21 亿~25 亿年前)开始,在美洲、非洲、欧洲、亚洲、澳洲和南极洲大陆各地就存在过冻土和冰。若走出地球,则可发现太阳系大部分行星和整个宇宙的固态天体都应该是冷生体,即应该发育冻土。换言之,冻土学是更大的学科——行星冷圈学的一部分。

实质上,冻土学应该全面地、广泛地研究性质上新的、处于冻结状态的岩石的形成和发育的各方面。因而此学科已经形成的结构理应是地质学结构的缩小模型。决定冻土学的具体任务、学术和实践意义的冻土学组成部分是动力冻土学、成岩冻土学、区域和历史冻土学、工程冻土学(见图)。从这种结构可看到冻土学与地质旋回的各门学科、与各基础学科(物理学、化学、数学、力学)以及与地理学和生物学的许多学科(气候学、古地理学、地植物学、土壤学等)都有着那么重要的联系。

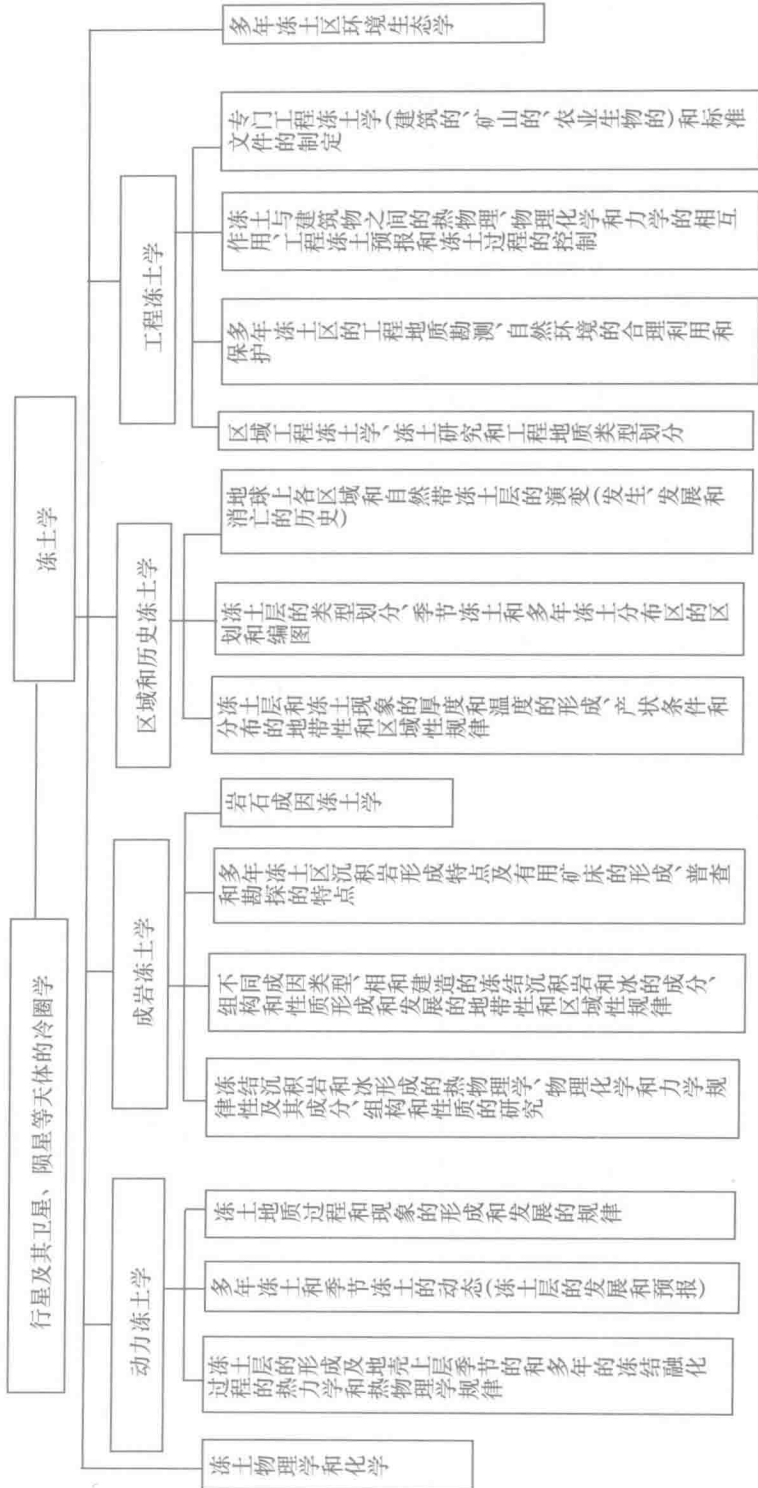
动力冻土学 研究在季节冻土层和多年冻土层发生和发展中起决定作用的冻结和融化、冷却和变暖的过程。研究正冻土、已冻土和正融土中发生的这些过程和其他过程,从能量的观点来看,实质上是提出了研究冻土发育的热力学方法。研究冻土层形成规律性的热力学和热物理学原理建立在研究“大气圈—岩石圈”系统中的热量交换、辐射热平衡和水热平衡、岩石中的温度状况和水分的相变以及地壳上层热过程的基础之上。当岩石的冻结和融化过程的热量方面与产生这些过程的环境中的地质地理条件紧密联系时就有可能研究多年冻土和季节冻土在分布面积和深度上随时间变化的动态(恢复形成和发育历史或预报将来的变化)。

动力冻土学的另一重要部分是研究冻土地质过程的热物理、物理化学和力学本质、形成和发展的规律性及其预报。冻土地质过程的结果产生所谓的自然地质现象,即诸如寒冻裂缝、地面冰和地下冰、冻胀丘、热融丘、融冻泥流、热侵蚀沟、冰锥等等这样的特殊冻土地形和新的地质体。

成岩冻土学(冷生岩石学) 根据多年冻土区发育于沉积岩中及其分阶段改造过程中的化学、物理化学、物理力学作用,揭示冻结沉积岩和冰的分散性、化学—矿物成分、结构—构造特点和组构形成的一般规律和局部规律。

虽然冻结沉积岩的成分、组构和性质与其冻结方式和条件以及沉积和构造形成的特点和速度紧密相关,但成岩冻土学赋予不同成因冻土层的研究以特殊的意义。此时,多年冻土区沉积岩形成过程及其结果是那么的特殊,以至于最近被划分为独立的岩石成因类型——冷生类型,这是最年轻的,仅在元古代才最终形成的岩石成因类型,越接近于现代,这种岩石成因类型的意义就越大。

冻土学的结构和学术方向



区域和历史冻土学 研究季节冻土层和多年冻土层的形成和发展,它们的分布、产状条件和温度、冻土层组构和厚度,以及冻土地质过程和现象的地带性与区域性规律。在此基础上,按照它们的成分、冷生组构、成因、年代、热量交换条件划分冻土类型,并对多年冻土发育区进行区划和编图。这一冻土学分支学科的重要学术方向是研究整个地球、各区域、各大陆冻土发生和发展的历史。

工程冻土学 是冻土学非常实用的分支学科,研究多年冻土区各种工程建筑物的设计、施工和营运的工程地质保障,为存在季节冻土和多年冻土的地区经济开发提供选择最可靠和最经济的方式的依据。此时任何具体的、特定形式的工程地质勘测都是在研究区域工程冻土学的基础上进行的。根据工程地质勘测的结果编制不同建筑类型的工程地质图,然后根据定性和定量研究冻土与建筑物之间相互作用的结果,对工程项目施工和营运期内地基和基础的性状做具体工程冻土预报。当预报情况不佳时,要采取有目的地改变(改造)冻土环境(土的温度、成分、含冰量、冷生组构和性质)及冻土工程地质过程和现象的办法,即设计控制冻土过程的措施。

最后,在研究冻土学的现代发展趋势时,必然会看到,在冻土学的基础上有效地利用关于地球冻土学说的知识和规律的一门更大的学科——**行星冷圈学**,已经开始形成:火星冷圈学正在快速发展着,月球冷圈学原理正在建立,木星及其卫星的冷圈学资料正在积累之中,等等。换言之,可以说冻土学将发展成行星冷圈学或宇宙冷圈学。

除上述四个分支学科之外(每一分支学科都理应单独成册予以研究),冻土学中一个重要的课题已经形成并得到了长足发展,即从分子运动和热力学的观点研究自然界及正冻土、已冻土、正融土物理化学和力学过程的规律性,已成为冻土学自身的任务。这个课题一般被简单地称为冻土物理学和化学,是一门中间学科,成为研究自然(地质地理)环境中冻土性状的理论基础。其实质在于:冻土是一个复杂的(多组分、多相、多孔隙、多分散性)、非常动态的物理化学系统,它包括处于平衡状态并能互相转换的三相水(未冻水、冰、水汽)。因此,冻土的性状在很大程度上取决于这种物理化学土系统形成(冻结)、进一步存在(负温下)和发展(融化或冻结—融化循环)进程中发育的热力学、热量物质交换、化学、物理化学、力学和结构—构造形成等过程。不了解上述过程不仅不能熟练地解释冻土层和冻土的发育史、它们的形成和分布条件、冻土地质过程和现象的形成和发展特点,而且也不能随着国土的经济开发而有科学依据地提出预报它们的变化和有目的地改造(控制)它们的建议。显而易见,冻土物理学和化学是冻土学的基本学术问题,是动力冻土学、成岩冻土学、区域和历史冻土学、工程冻土学的重要理论基础,因而,应单独予以研究。

随着多年冻土区经济开发的速度越来越快,自然环境的人为荷载是那么的沉重,使得现有的冻土生态系统业已建立的准平衡状态遭到剧烈破坏。多年冻土区在生态

方面与许多早就存在的观念不同,是最为脆弱的,其景观对人为影响高度敏感,并且景观的恢复又极其缓慢,更何况常常是不可逆的。正因为如此,多年冻土区各地(西西伯利亚、亚马尔半岛、中雅库特、诺里尔斯克、布拉茨克、南雅库特等庞大的地区生产综合体,贝加尔-阿穆尔铁路干线、东北地区的砂矿采掘区等)的人为破坏的后果在许多情况下是不可预测的和难以控制的,这就需要在全国范围内不可推迟地解决最复杂的生态问题。因此,近年来冻土学还产生了一个具有中间学科性质的基础学科课题——**多年冻土区的环境生态学**。

《冻土学原理》是由我国各部委、各机构、各部门的资深冻土学专家集体编写的:莫斯科大学、俄罗斯建设部建筑工程勘测生产和科研所、全俄国家建设委员会建筑勘测科学与生产联合公司、全俄水文地质和工程地质研究所、运输建筑工程研究所、俄罗斯科学院西伯利亚分院冻土研究所、全俄天然气科学研究所、保加利亚科学院泥炭研究所等。莫斯科大学地质系冻土教研室编写了本书的科学方法手册。

序 言

本专著系《冻土学原理》的第五卷。着重论述工程冻土学的科学原理,研究对象乃是与工程建筑物相互作用的寒区地质体。科学而有步骤地选择以最安全、最经济方式开发生产领域乃是工程冻土学研究的目的。

工程冻土学作为冻土学的一部分,其发展不仅密切触及地质学与冻土学,而且涉及其他许多学科:技术科学(建筑学、水利工程学、采矿学)、地理科学(气候学、水文学、地貌学)、基础科学(数学、物理学、化学、力学)和其他学科。

工程冻土学的基本方向是:1)建立工程建筑物与多年冻土之间热学、力学、化学相互作用理论;2)制订开发地区冻土过程、动态的工程冻土预报及其控制方法;3)分析、总结寒区经济开发经验并制订多年冻土建筑施工与工程勘测标准;4)制订工程冻土学岩石监测与环境保护的科学基础。

解决工程冻土学所有课题的方法都是基于对研究对象的系统观察。在此应将“大气-冻土-工程建筑物”体系作为其各部分相互关联、相互作用的统一体进行研究。应该指出的是,这个土工系统总是在极其活跃和不断地变化着。由此,在工程冻土学中预报由于经济开发而导致冻土条件的空间与时间变化至关重要。在本书各章节中作者将力图表达这些主要观点。

在将本书手稿付诸出版的过程中,莫斯科国立大学地质系冻土学教研室的同仁们 O. H. 巴特里科, H. B. 戈尔捷娃, Л. B 依米里雅诺娃, T. Ю. 莎特洛娃和 A. H. 考兹洛夫曾做了许多努力,作者对此表示由衷的感谢。

莫斯科国立大学地质系冻土学教研室

Э.Д. 叶尔绍夫 Л.Н. 赫茹斯塔廖夫

一九九九年

目 录

序言	1
----------	---

第一篇 工程建筑物与多年冻土之间相互作用的理论原理

第一章 工程建筑物与多年冻土之间的热相互作用	1
1.1 问题的提出	1
1.2 解定常问题的分析法	4
1.3 按建筑原则 I 施工时计算地温的定常周期解	9
1.4 非定常问题的精确分析解	10
1.5 近似分析解	15
1.6 数值解	23
第二章 工程建筑物与冻土之间的力学相互作用	32
2.1 冻土地基中应力状态的形成	32
2.2 评价冻土变形的基本假定	41
2.3 桩基中冻土应力—应变状态的形成	48
2.4 冻土的临界强度和计算强度	54
2.5 土体融化时应力—应变状态的形成	57
第三章 工程建筑物与冻土之间的物理—化学相互作用	63
3.1 工程建筑物荷载引起的冻土中的物理—化学过程	63

3.2	正冻和正融土与工程建筑物基础的物理-化学相互作用	67
3.3	土体的冻胀及其对建筑物的作用	70
第四章	工程建筑物与冻土热力相互作用的概率-统计计算	86
4.1	土工体系的可靠度	86
4.2	评价可靠度的数值法	88
4.3	评价可靠度的解析法	91
4.4	按造价优化可靠性	95
4.5	概率-统计计算在工程冻土学中的实际应用	99
 第二篇 工程冻土学研究		
第五章	国民经济开发中寒区工程冻土条件分区	106
5.1	按建筑原则进行寒区分区	106
5.2	按危险冻土过程划分寒区	113
5.3	按人为冻土过程对生态条件的影响程度进行寒区区划	119
第六章	寒区工程冻土勘测方法原理	130
6.1	勘测要求和勘测阶段	130
6.2	寒区工程地质勘测的方法特点	134
6.3	复杂冻土条件下工程地质勘测的特点 (富冰土,盐渍土,泥炭土分布区,地震区)	142
6.4	冻土图的形式和比例尺	151
第七章	各类建筑工程的工程冻土学研究特点	154
7.1	工业与民用建筑工程的工程地质勘测	154
7.2	矿山开采业与地下建筑的工程地质勘测特点	157
7.3	线路建筑物工程地质勘测的特点	161
7.4	水工建筑物工程地质勘测的特点	167
7.5	在工程防护和在农业生物工程中的工程地质勘测特点	170
第八章	建筑成本(造价)工程冻土图	173
8.1	编图方法	173
8.2	设计房屋建筑物时成本图的利用	175
8.3	工程勘测规划中建筑成本图的应用	178

第三篇 寒区岩土工程学原理

第九章 工业与民用建筑物	184
9.1 建筑物类型及其结构	184
9.2 房屋建筑物的冷却设施	190
9.3 保障多年冻土上房屋建筑物稳定的方式	193
9.4 地基与基础计算	200
第十章 公路与铁路	205
10.1 寒区铺设道路的特点	205
10.2 道路结构及其稳定性保障方式	208
10.3 路基对不良冻土过程的防护	217
10.4 路基计算	218
第十一章 天然气与输油干管	226
11.1 一般原理	226
11.2 管道敷设方式	230
11.3 管道跨越障碍物	235
11.4 管道计算	238
第十二章 矿山开采与地下结构物	251
12.1 寒区矿山作业的特点	251
12.2 多年冻土中采矿巷道结构及确保其稳定性的方式	253
12.3 矿山巷道计算	263
第十三章 水工结构物	269
13.1 水工结构物的类型和结构	269
13.2 大坝和堤堰	271
13.3 当地材料坝	272
13.4 坝工设计、施工、运行的冻土学特点	281
第十四章 冰构筑物	291
14.1 冰雪作建筑材料	291
14.2 冰仓库	294
14.3 冰渡口	296
14.4 冰码头,导流堤坝	297
14.5 冰岛	298

14.6 冰砌体与地下巷道砌面	299
第十五章 寒区土壤改良学	300
15.1 冻土过程控制手段的分类	301
15.2 建筑土壤改良	305
15.3 开挖多年冻结砂矿的工程准备	315
第十六章 寒区工程建筑物运行的特点和冻土监测	329
参考文献	337