

中 国 冻 土

周幼吾 郭东信 李树德 著
邱国庆 程国栋

科 学 出 版 社

2 0 0 0

内 容 简 介

冻土环境深刻地影响着国家工程建设和人民的生活。本书全面系统地总结了新中国成立 50 年来我国冻土研究的成就,内容丰富。全书共分三篇十三章:第一篇共七章,详细地阐述了冻土的基础知识、我国多年冻土和季节冻土的形成及其发育规律;第二篇共四章,详细地论述了我国冻土的地域差异和区划,并具体地分析了各冻土区的冻土特征;第三篇共二章,主要论述了我国冻土环境的历史演变和冻土区的开发、工程建设与环境问题。本书理论结合实际,长期野外考察的第一手资料与室内分析现代化手段结合,具有理论价值和实践应用指导意义。

本书对于从事地质、地理、工程建设和区域规划、环境保护和管理等方面的科学工作者及有关高等学校师生具有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

中国冻土/周幼吾等著.-北京:科学出版社,2000.

ISBN 7-03-008285-0

I. 中… II. 周… III. 冻土-研究-中国 IV. P642.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 02209 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2000 年 8 月第一次印刷 印张: 29 1/2 插页: 6

印数: 1—1 200 字数: 667 000

定价: 0.00 元

谨以此书纪念
中国科学院
开展冻土科学研究 40 周年！

鸣 谢

- 中国科学院资源环境局“九五”项目计划
- 国家基金委基础科学人才培养基金(特殊学科点)
- 中国科学院科学出版基金
- 冻土工程国家重点实验室

对本书撰写与出版承的经费资助！

序

放在我面前的是周幼吾同志领头,郭东信、邱国庆、程国栋、李树德等同志合作撰著的《中国冻土》书稿。全书三篇十三章,另加前言、绪论,洋洋 60 余万字,系统总结了新中国建立 50 年来我国区域冻土学的主要研究成果,以多年冻土为主,包括季节冻土的考察、研究成就。内容丰富,论述全面。本书主要讲中国,也兼及世界冻土的基本情况。对冻土学中的理论和应用中的许多问题,进行了深入的探讨。读了这本书,会对中国自然界的一个重要方面——冻土有全新的认识。知识即力量,在 21 世纪冻土区基础设施建设、土地资源利用和自然灾害防治等方面,兴利除弊,这本书都将发挥重要作用。

我国多年冻土广泛分布在青藏高原、西北高山和东北的北部。这些地区交通条件、自然条件和生活条件都非常严酷。季节冻土和短时冻土则覆盖大半个中国。冻土的存在和发展,给我国经济发展带来了诸多问题。1949 年以前,我国冻土研究基本上处于空白状态。1949 年以后,随着寒区和边疆地区经济的发展,对冻土科学的需求日益殷切,这就要求建立和发展一支全国性的冻土科研队伍。1959 年冬季,中国科学院决定在兰州建立冰川冻土专门研究机构(当时称“冰川积雪冻土所筹委会”,以后几经易名,从 1978 年起称为“中国科学院兰州冰川冻土研究所”),就是促进冻土科研发展的一个重要行动。一批批爱党爱国、富有自我牺牲精神的青年学子,响应国家号召,服从组织分配,到艰苦的大西北,投身于冻土科学的创业之路。我当时负责组织这项任务的实施,和他们一起亲身经历了冻土科学研究事业从初创、发展到成熟的各个阶段,理解他们的艰辛和喜悦。在他们当中,第一位锋线人物便是本书的第一作者周幼吾同志。当时,她刚从莫斯科大学冻土专业毕业,学成回国不久,

就怀着报效祖国的壮志,抱着创业者的豪情,感到学以致用喜悦,带着三个多月的身孕,毅然决然地只身一人从北京来到西北,创建和率领第一个冻土研究组,到青藏高原上开始他们的首次腾飞。从那时起,冻土研究队伍不断壮大,研究水平逐步提高,研究范围不断拓展。目前,研究领域已覆盖了区域冻土学、冻土物理力学和物理化学等诸多方面,研究实验手段也大为改善,在各项工程建设和农业生产中发挥着越来越大的作用,取得了丰硕的成果。据不完全统计,仅中国科学院兰州冰川冻土研究所的冻土科研人员在近40年间公开发表的各类冻土学研究论文和专著,就达到730余篇(部),获得国家级和省部级三等奖以上奖励的项目已达26项。回顾中国冻土学界所走过的艰难历程,就可以体会到这样的成果确实是来之不易。以这些成果为基础的《中国冻土》专著是非常珍贵的劳动结晶。

的确,这本综合性的《中国冻土》专著,从发起组织到完全撰成脱稿,历时多年,倾注了创业一辈冻土学者的毕生心血。特别是邱国庆同志在健康很差的情况下,力疾从事艰难的工作,本人深为钦佩和感动。在撰写过程中,全书四改提纲,有的章节还三易其稿。撰写过程也是研究创新过程。从全国范围冻土形成条件的统一性和差异性出发,考虑冻土区划的原则和方案,比较区域冻土特征;在考虑全球变化的背景和各地区特殊性的基础上,阐明冻土的历史变迁与今后可能发生的变化;根据建国50年来的经验与教训,进一步讨论了保护和改善冻土环境的原则和措施,等等。所有这些,都在撰著本书时作了深入的思考研究,取得显著的进展。这对于我国社会主义经济战略重点向西推移,对于我国西部高山高原冻土区的合理开发和利用,无疑将发挥重要的作用。

目前,全球环境正经历一段变暖的时期。在全球变暖和人为活动作用增强的背景下,由于各地区具体条件的不同,冻土的反应也不一样。在这环境变迁迅速的世纪之交,冻土研究工作者们、冰川研究工作者们都应该十分注意监测冻土、冰川对气候和环境变化的

反应以及冻土、冰川变化对大区域气候环境变化的反馈作用,采取合适的兴利除弊措施,避免环境的自然变化和人为的破坏性干扰带来的恶果。在这一工作中,本书所展示的规律性将发挥重要的指导作用,并将在实践中得到进一步的检验,而且这将使中国冻土学获得更大的发展。

中国科学院资深院士

施维风

1999年5月

前 言

中国的多年冻土面积占国土面积的 22.3%，在世界上占第三位，其中高海拔多年冻土面积则居世界之最。季节冻土更遍布大部国土。冻土环境与人民生活和经济建设有着密切的关系。为开发冻土区，保证冻土上工程建筑的稳定，合理利用自然资源，保护环境，冻土学研究有着重要意义。

中国冻土研究是在冻土区工程建设实践中产生和发展起来的。20 世纪 50 年代，东北大小兴安岭林区和季节冻土区各项工程建筑中的冻土问题，首先引起地质、林业、铁道、水利等部门的重视，并开始研究。从 1960 年起，中国科学院兰州冰川冻土研究所及其前身在施雅风先生领导下，开始了我国冻土的专门研究。40 年来，该所冻土科研人员，会同生产部门的科技人员及高校师生，坚持在青藏高原、西部高山及大小兴安岭，克服气候严寒、高山缺氧等重重困难，为边疆建设做了大量工作，同时也积累了丰富的冻土科学资料。作为冻土学基础和重要分支的区域冻土学的研究，也取得长足进展，很多论文见诸于国内外许多刊物和会议论文集上，涉及冻土分布、温度、厚度、成分、冷生组构和地下冰、冻土地质过程和现象、冻土发展历史和未来变化，以及冻土区的开发利用等诸多方面。此外，还有不少资料仍待进一步整理、分析和利用。

随着中西部经济发展步伐的加快，在解决各种冻土问题中，中国冻土的系统研究成果就更为重要。从冻土学科发展来看，现阶段很有必要将中国广大的冻土区视作统一的自然体，来进行全面系统的总结。再者，当年的一批青年人，现已步入花甲之年，有的已抱病在身，将零散的资料作系统整理、分析，并加以提高，已时不我待。我们正是以此急迫的心情抓起中国冻土总结工作。

80 年代初，施雅风先生倡议撰写《中国冻土概论》一书，周幼吾、郭东信即着手筹划此事，编写了大纲。终因专家们手头任务很重而无暇顾及和其他原因，第一次计划未能实现。1991 年，《中国冻土》申请中国科学院出版基金资助项目，得到批准，但还是因为撰稿人很忙，进展缓慢。直到 1996 年，承蒙院出版基金委再次将此书出版列入计划，中国科学院资源环境局又将中国冻土的总结列入了“九五”项目计划。这时，大部分撰稿人退休下来，才得以专心致志地撰写此书。经过三年的努力，现在终于向广大读者奉献出这本《中国冻土》。本书全面系统地展示了我国多年冻土和季节冻土形成、发育的特征和规律及其开发利用的经验，体现出区域冻土领域的新进展，反映了中国冻土研究的丰硕成果，希望它能为 21 世纪实现冻土学乃至冰冻圈科学的创新和腾飞，起抛砖引玉之作用。

应当说明的是，以往工作更多地是在多年冻土区，且集中在一些点、线上；冻土区气象站点稀少，且坐落在海拔较低的部位，这些为总结工作增添了难度。此外，本书撰写时间虽拖得长，但集中写作时间仍感不足。一些冻土学术语和看法尚来不及仔细推敲和统一。鉴于上述情况，书中难免有不足之处，敬请读者指正。

本书由绪论、三篇十三章组成。作者及分工是：周幼吾撰写绪论，第一章第一节，第二章，第三章，第九章第二节，第十一章第二节；程国栋撰写第四章；郭东信撰写第一章第二

节,第五章,第七章,第九章第一节,第十一章第一节,第十二章;邱国庆撰写第六、八、十章,第十一章第一节,第十三章,并主编书后附图;李树德合作撰写第十一章。各章均通过作者相互审阅和提出修改意见,部分章节并请有关专家审阅过。全书由周幼吾统一汇编、定稿,郭东信汇编全书参考文献,邱国庆将目录及图、表、照片名题目译成英文。

在本书编写和出版过程中,中国科学院资源环境局秦大河局长、中国科学院兰州冰川冻土研究所名誉所长施雅风院士及程国栋院士等所领导对撰写本书给予很大的关怀与支持;冻土工程国家重点实验室副主任朱元林研究员、刘永智高级工程师为本书赞助;谢应钦、王绍令和米德生审阅了有关章节和图件;金会军翻译了部分图、表题名;汤懋苍、李培基、王中隆、俞昕治、白重瑗、张志忠提供了许多气象资料;孙兴柏、陈肖柏、朱林楠、赵林、王淑娟、王雅卿等为资料收集、整理及计算等给予很大帮助;王银学清绘和参加编辑全部图件,编绘图件并得到吴青柏、刘继民、南卓铜等的帮助;何兴对打印书稿给予积极支持。本书的撰写和出版承:中国科学院资源环境局“九五”项目计划、中国科学院科学出版基金、国家基金委基础科学人才培养基金(特殊学科点)资助;并获冻土工程国家重点实验室、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所所长基金赞助。对此,作者一并表示衷心的感谢。

作 者

1999年5月

目 录

序 前 言

绪 论	(1)
第一节 冻土和冻土学	(1)
一、冻土的定义	(1)
二、冻土学	(2)
第二节 中国冻土研究简史	(3)
一、古代文献对冻土的记述	(3)
二、近代中国冻土研究	(3)

第一篇 中国冻土形成条件及其主要特征

第一章 中国冻土形成的地带性和区域性条件	(9)
第一节 中国冻土形成的气候条件	(9)
一、形成中国气候的主要因素	(9)
二、地表面辐射—热量平衡与冻土生成	(14)
三、气温、降水等与冻土的关系	(19)
四、积雪对冻土的影响	(26)
第二节 地质构造、地形在冻土形成中的作用	(30)
一、地温场形成及其对冻土影响原因分析	(30)
二、区域地形、地质构造对冻土分布及空间格局的影响	(32)
三、地质构造、地形对冻土温度、厚度的影响	(35)
四、地质构造对冻土结构、地下冰的影响	(36)
第二章 多年冻土分布、温度和厚度的空间变化规律	(37)
第一节 全球冻土分布总貌	(37)
第二节 中国多年冻土分布的基本特征	(40)
一、东北多年冻土区	(40)
二、西部高山、高原多年冻土区	(42)
第三节 多年冻土分布的地带性变化规律	(45)
一、多年冻土分布的空间变化	(45)
二、冻土层温度的地带性变化	(47)
第四节 多年冻土发育的区域性规律	(53)
一、深部地温和地中热流的分布及其对冻土层的影响	(53)
二、岩性对冻土发育的影响	(56)
三、地形对多年冻土发育的影响	(57)

四、冰川覆盖对多年冻土的影响	(58)
第三章 土的季节冻结和季节融化	(63)
第一节 季节冻结层和季节融化层的地理分布	(63)
第二节 土季节冻结和融化的发育特征	(65)
一、冻融过程	(65)
二、温度状况	(70)
三、季节冻结和融化深度	(72)
四、季节冻结和融化层成分的变化	(74)
第三节 土季节冻结和融化的影响因素	(81)
一、雪盖的影响	(81)
二、植被的影响	(82)
三、土的成分和含水量的影响	(84)
四、地表沼泽化的影响	(86)
五、地形的影响	(87)
六、水体的影响	(89)
第四章 地下冰和冻土组构	(92)
第一节 地下冰分类	(92)
一、内成冰	(92)
二、外成冰(埋藏冰)	(98)
第二节 冷生构造	(100)
一、后生冻土的冷生构造	(101)
二、共生型冻土的冷生构造	(101)
第三节 工程意义	(106)
一、多年冻土按含冰量的分类	(106)
二、高含冰量冻土的分布规律	(108)
第五章 冻土地貌地质过程及现象	(115)
第一节 冰缘作用、形态与影响因素	(115)
第二节 冰缘地貌发育的某些主要特征	(118)
一、冰缘形态类型的多样性及特殊性	(118)
二、冰缘过程的纬度与高度地带性	(119)
第三节 西部高山高原冰缘类型及其垂直带谱特征	(120)
一、大陆干旱型冰缘区(I)	(121)
二、大陆半干旱型冰缘区(II)	(124)
三、海洋型冰缘区(III)	(126)
第六章 冻土分布区的地下水	(128)
第一节 水文地质构造及其冷生改造	(128)
一、水文地质构造类型	(128)
二、水文地质构造的冷生改造	(129)
三、冷生改造的差异性	(135)
第二节 冻土区地下水类型及举例	(135)
一、地下水分类系列简述	(135)

二、各类地下水的特征及举例	(136)
第七章 融区	(145)
第一节 融区类型及其分布	(145)
一、主要由构造因素形成的融区	(145)
二、主要由地表水作用形成的融区	(148)
三、渗透—辐射融区	(150)
四、人为融区	(150)
第二节 融区稳定性及其变化	(151)
第三节 融区与经济建设	(153)

第二篇 冻土区划及各冻土区的冻土特征

第八章 冻土区划的原则和冻土图的编制	(157)
第一节 中国自然区划的一般原则	(157)
第二节 国外冻土区划与类型划分	(159)
第三节 三十多年来中国的冻土区划和类型划分工作	(161)
第四节 本书采用的冻土区划和冻土类型划分体系与冻土图的编制	(162)
一、区划体系	(163)
二、类型划分系统	(165)
三、冻土图的编制	(170)
第九章 东部冻土大区	(171)
第一节 东北多年冻土区	(171)
一、影响多年冻土形成的自然因素	(171)
二、多年冻土分布规律及其南界	(173)
三、大小兴安岭多年冻土厚度及温度状态	(178)
四、冷生构造及地下冰	(191)
五、大小兴安岭多年冻土分区特征	(194)
第二节 东部的季节冻结和季节融化	(197)
一、东北多年冻土区(I ₁)的季节融化和季节冻结	(197)
二、东北、华北温带—暖温带季节冻土区(I ₂)	(205)
三、华中及华东亚热带短时冻土区(I ₃)	(211)
四、华南亚热带—热带非冻土区(I ₄)	(213)
第十章 西北冻土大区	(220)
第一节 冻土形成条件与分布规律	(220)
一、地貌基本轮廓	(220)
二、气候条件在三度空间上的变化	(222)
三、山区垂直土壤带谱	(225)
四、冻土形成与分布的总规律	(227)
五、冻土区的进一步划分	(229)
第二节 各冻土区的冻土分布与特征	(230)
一、阿尔泰山—北塔山高寒带—温带山地多年冻土区(II ₁)	(230)

二、天山高寒带山地多年冻土区(Ⅱ ₄)	(234)
三、准噶尔盆地西部山地高寒带冻土区(Ⅱ ₂)、准噶尔盆地温带季节冻土区(Ⅱ ₃)及塔里木盆地暖温带季节冻土区(Ⅱ ₅)	(271)
四、河西走廊—阿拉善温带季节冻土区(Ⅱ ₆)	(282)
第十一章 西南(青藏高原)冻土大区	(299)
第一节 青藏高原多年冻土形成的自然条件	(299)
一、地质构造背景及地貌格局	(299)
二、高原隆起对多年冻土形成的作用	(302)
三、气候条件在三度空间上的变化	(304)
四、土壤—植被垂直带谱类型	(306)
五、青藏高原冻土分区	(308)
第二节 各冻土区冻土分布与特征	(309)
一、阿尔金山—祁连山高寒带山地多年冻土区(Ⅲ ₁)	(309)
二、柴达木盆地温带季节冻土区(Ⅲ ₂)	(326)
三、青南—藏北高原北部高寒带大片多年冻土区(Ⅲ ₃)	(329)
四、藏北高原南部高寒带大片—岛状多年冻土区(Ⅲ ₄)	(353)
五、喜马拉雅山高寒带山地多年冻土区(Ⅲ ₅)	(358)
六、青藏高原东缘高寒带岛状山地多年冻土区(Ⅲ ₆)	(360)

第三篇 中国冻土历史演变与冻土区的开发

第十二章 中国冻土形成历史	(366)
第一节 历史冻土研究若干进展与问题	(366)
第二节 古冻土存在确定依据及原则	(367)
一、古冰缘与古环境、古温度	(368)
二、反映寒冷环境存在的标志与古冻土	(376)
三、古冻土界线确定原则	(376)
第三节 中国现存多年冻土历史演变主要阶段及其南界(下界)	(377)
一、晚更新世以前阶段	(377)
二、晚更新世冰盛期阶段	(378)
三、全新世冻土历史演变及现今多年冻土形成时代	(383)
第十三章 冻土区的开发利用 and 环境保护	(387)
第一节 冻土的基本性质	(390)
一、相变特性	(391)
二、物质迁移特性	(392)
三、热物理特性	(394)
四、体积膨胀—收缩特性	(395)
五、强度特性	(398)
第二节 冻土区开发中存在的问题	(401)
一、冰冻所造成的问题	(401)
二、热融所造成的问题	(403)

三、冰冻和热融综合作用所引起的问题	(404)
四、脆弱的生态环境及其变化	(406)
第三节 冻土区的开发利用及环境保护的原则和经验	(408)
一、冻土区开发利用和环境保护的迫切性	(408)
二、防治冻害、保护和改善冻土环境的基本原则	(410)
三、防治冻害、保护和改善冻土—地质环境的若干经验	(413)
参考文献	(424)
附录 I :图、表英文译名	(439)
附录 II :照片	
附图:中国冻土区划及类型图	
附表:中国冻土分区说明表	

GEOCRYOLOGY IN CHINA

by Zhou Youwu Guo Dongxin Li Shude
Qiu Guoqing Cheng Guodong

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences)

CONTENTS

Foreword

Preface

Introduction	(1)
I . Frozen ground and geocryology	(1)
1. Definition of frozen ground	(1)
2. Geocryology	(2)
II . A brief introduction to the history in the frozen ground studies in China	(3)
1. Some records of frozen ground in the ancient Chinese literatures	(3)
2. Studies of frozen ground in China in modern times	(3)

Part I Development Conditions of Frozen Grounds in China and Their Major Characteristics

Chapter 1 The zonal and regional conditions for the development of frozen ground in China	(9)
Section 1 The climatic condition for the development of frozen ground in China	(9)
1 . The major factors for the development of climate in China	(9)
2 . The radiation-heat balance at the ground surface and the development of frozen ground	(14)
3 . The relationship of mean annual air temperature, precipitation with the frozen ground	(19)
4 . The effect of snow deposit on frozen ground	(26)
Section 2 The effect of geologic structure and terrain on the development of frozen ground	(30)
1. The development of temperature field and its effect on the frozen ground	(30)
2. The effect of regional terrain and geologic structure on the distribution and pattern of	

frozen ground	(32)
3. The effect of geologic structure and terrain on the temperature and thickness of frozen ground	(35)
4. The effect of geologic structure on the cryostructure and ground ice in frozen ground	(36)
Chapter 2 Distribution, temperature and thickness of permafrost	(37)
Section 1 General look of permafrost distribution in the whole world	(37)
Section 2 The basic characteristics of permafrost distribution in China	(40)
1. Northeastern China permafrost region	(40)
2. Western China alpine and plateau permafrost region	(42)
Section 3 The zonal law of permafrost distribution	(45)
1. The zonal change of distribution of permafrost	(45)
2. The zonal change of temperature in frozen ground	(47)
Section 4 The regional law of permafrost development	(53)
1. The distribution of ground temperature and heat-flow in depths and their effect on frozen ground	(53)
2. The effect of lithological characteristics on the development of frozen ground	(56)
3. The effect of terrain on the development of frozen ground	(57)
4. The effect of glacial cover on the permafrost	(58)
Chapter 3 The seasonal freeze and seasonal thaw of ground	(63)
Section 1 The geographical distribution of seasonal-freezing layer and seasonal-thawing layers	(63)
Section 2 The development characteristics of seasonal-freezing and seasonal-thawing grounds	(65)
1. Freezing-thawing processes	(65)
2. Thermal regime	(70)
3. Depth of seasonal-freezing and seasonal-thawing	(72)
4. The change of the composition in seasonal freezing and seasonal thawing layers	(74)
Section 3 The factors affecting the seasonal freezing and seasonal thawing processes	(81)
1. Effect of snow deposit	(81)
2. Effect of vegetation	(82)
3. Effects of composition and water content in soils	(84)
4. Effect of surface bogging	(86)
5. Effect of terrain	(87)
6. Effect of waters	(89)
Chapter 4 Ground ice and permafrost structures	(92)
Section 1 Classification of ground ice	(92)
1. Introgenetic ice	(92)
2. Extrogenetic ice (Buried ice)	(98)
Section 2 Cryogenic fabrics	(100)
1. Cryogenic fabrics in epigenetic permafrost	(101)
2. Cryogenic fabrics in syngenetic permafrost	(101)
Section 3 Engineering application	(106)

1. Classification of permafrost by ice content	(106)
2. Distribution of permafrost with a high ice content	(108)
Chapter 5 Geomorphological-geological processes and features of frozen ground	(115)
Section 1 Periglaciation, forms and the affecting factors	(115)
Section 2 Some major characteristics in the developing of periglacial landforms	(118)
1. Types of the periglaciation	(118)
2. Processes of the periglaciation	(119)
Section 3 The periglacial types in the alpine and plateau region in the western China and their characteristics of altitudinal spectrum	(120)
1. Continental arid periglacial region (I)	(121)
2. Continental semi-arid periglacial region (II)	(124)
3. Maritime periglacial region (III)	(126)
Chapter 6 Ground water in the frozen-groundregion	(128)
Section 1 The hydrogeological structures and their cryoreform	(128)
1. Types of hydrogeological structure	(128)
2. Cryoreform of the hydrogeological structure	(129)
3. Differentiation of cryoreform	(135)
Section 2 Types of ground water in the frozen-ground-regions	(135)
1. A brief introduction to the classification of ground water in the frozen-ground-regions	(135)
2. Characteristics and examples of ground water	(136)
Chapter 7 Talik	(145)
Section 1 Types and distribution of taliks	(145)
1. Taliks formed mainly by the geostructural factors	(145)
2. Taliks formed mainly by the effect of surface-waters	(148)
3. Infiltration-radiation taliks	(150)
4. Technical taliks	(150)
Section 2 Stability and change of talik	(151)
Section 3 Talik and the economic construction	(153)

Part II Geocryological Regionalization and the Characteristics of the Frozen-ground Regions

Chapter 8 Principles of geocryological regionalization and the compilation of geocryological map	(157)
Section 1 General principles of physicogeographical regionalization in China	(157)
Section 2 Geocryological regionalization and classification in abroad	(159)
Section 3 Geocryological regionalization and classification in China in the past 30 years	(161)
Section 4 Systems in geocryological regionalization and classification and the compilation of geocryological map in the present work	(162)

1. System in geocryological regionalization	(163)
2. System in geocryological classification	(165)
3. Compilation of geocryological map	(170)
Chapter 9 Eastern China geocryological area	(171)
Section 1 Northeastern China permafrost region	(171)
1. Factors affecting the development of permafrost	(171)
2. Distribution and south limit of permafrost	(173)
3. Thickness and thermal regime of permafrost in the Da Hingganling Mts. and Xiao Hingganling Mts.	(178)
4. Cryostructure and ground ice	(191)
5. Regional characteristics of permafrost in the DaHingganling Mts and XiaoHingganling Mts.	(194)
Section 2 Seasonal-freezing and seasonal-thawing in the eastern China	(197)
1. Seasonal-freezing and seasonal-thawing in the permafrost region in the Northeastern China cold-and moderate-temperate zone(I ₁)	(197)
2. Seasonally-frozen-ground region in the Northeastern and Northern China moderate-warm temperate zone (I ₂)	(205)
3. Short-time frozen ground region in the Middle and Eastern China subtropic zone (I ₃)	(211)
4. Non-frozen ground region in the Southern China subtropic and tropic zone (I ₄)	(213)
Chapter 10 Northwestern China geocryological area	(220)
Section 1 The development condition and distribution law of frozen ground	(220)
1. Basic outline of landform	(220)
2. Changes of climatic condition in the three-dimensions	(222)
3. Altitudinal spectrim of soils in mountains	(225)
4. The general law of the development and distribution of frozen ground	(227)
5. Making further regionalization	(229)
Section 2 Distribution and characteristics of frozen ground in the geocryological regions	(230)
1. Altay-Beita shan high-cold zone mountain permafrost region(II ₁)	(230)
2. Tianshan high-cold zone mountain permafrost region(II ₄)	(234)
3. Mountain permafrost region west of the Zhunger Basin(II ₂), Zhunger Basin seasonally frozen-ground region in the moderate temperate zone(II ₃) and the Tarim Basin seasonally frozen ground region in the warm temperate zone(II ₅)	(271)
4. Hexi Corridor-Alashan seasonally frozen ground region in the moderate temperate zone (II ₆)	(282)
Chapter 11 Southwestern China geocryological area (Qinghai-Xizang Plateau)	(299)
Section 1 Natural conditions for permafrost formation	(299)
1. Geology, tectonics and geomorphology	(299)
2. Impacts of the elevation of the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau on permafrost formation	

.....	(302)
3. Three dimensional variations of climatic parameters	(304)
4. Vertical zonation of soils and vegetation on the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau	(306)
5. Permafrost regionalization	(308)
Section 2 Distribution and characteristics of frozen ground in the geocryological regions	(309)
1. Alpine permafrost zone in Altun-Qilian Mountains (Ⅲ ₁).....	(309)
2. Temperate seasonally frozen ground zone in Qidam Basin (Ⅲ ₂)	(326)
3. Predominantly continuous permafrost zone from southern Qinhai to northern part of northern Tibet (Ⅲ ₃)	(329)
4. Predominantly continuous-island permafrost zone in southern part of the Northern Xizang (Tibet) (Ⅲ ₄)	(353)
5. Alpine permafrost zone in the Himalayas (Ⅲ ₅)	(358)
6. Island alpine permafrost zones in the eastern rim of the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau (Ⅲ ₆)	(360)

Part Ⅲ Historical Evolution of Permafrost and Exploitation of Frozen-ground Regions in China

Chapter 12 Development history of frozen ground in China	(366)
Section 1 Some progresses and problems in historical geocryology in China	(366)
Section 2 Basis and principles for the reconstruction of the paleo-permafrost	(367)
1. Paleo-periglacial processes, paleoenvironment and paleotemperature	(368)
2. Indicators of cold environment and paleopermafrost	(376)
3. Principles for the reconstruction of the boundary of the paleopermafrost	(376)
Section 3 The major stages of the historical evolution and the south limit (lower limit) of permafrost	(377)
1. Before late Pleistocene	(377)
2. Maximum glaciation in late Pleistocene	(378)
3. The historical evolution of permafrost in Holocene and the formative period of the present permafrost	(383)
Chapter 13 Exploitation of frozen-ground regions and environment protection	(387)
Section 1 The basic behaviours and characteristics of frozen ground	(390)
1. Behaviour and characteristics in phase change	(391)
2. Behaviour and characteristics in material migration	(392)
3. Behaviour and characteristics in thermal physics	(394)
4. Behaviour and characteristics in expansion-contraction	(395)
5. Behaviour and characteristics in mechanics	(398)
Section 2 The environmental problem in the exploitation of frozen ground regions	(401)
1. The problems from freezing	(401)
2. The problems from thawing	(403)

3. The problems from the comprehensive effect of freezing and thawing	(404)
4. The frail ecological environment and its change	(406)
Section 3 Some principles and experience in the exploitation of frozen ground region and the environment protection	(408)
1. The urgency in the exploitation of frozen ground region and the environment protection	(408)
2. The basic principles in the prevention and cure of freezing injury, the protection and improvement of the geocryological environment	(410)
3. Some experience in the prevention and cure of freezing injury, the protection and improvement of the geocryological environment	(413)
References	(424)
Appendix I : The Titles of Figures and Tables	(439)
Appendix II : Photographs	
Appendix Map: The Map of Geocryological Regionalization and Classification in China	
Appendix Table: Summary of Permafrost Regionalization in China	

绪 论

第一节 冻土和冻土学

一、冻土的定义

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和土壤。温度在 0°C 或 0°C 以下,但不含冰的岩土和土壤,称作寒土。寒土又可分出不含冰和重力水的干寒土,及不含冰但含负温盐水或卤水的湿寒土(cryopeg)。在自然界,情况要复杂得多,作为冻土层或冻土区整体来说,既包含冻土本身,也包括寒土在内。所以,冻土区(cryolithozone)即指岩土温度在 0°C 或 0°C 以下的那部分地壳,不论岩土中是否含有冰;或者按Э.Д.Ершов等(1988)的说法,不论岩土中是否有水的相成分存在。岩土温度为正温的称作非冻土,非冻土中曾经处于冻结状态的岩土称为融土。

按土的冻结状态保持时间的长短,冻土一般又可分为短时冻土(数小时、数日以至半月)、季节冻土(半月至数月)以及多年冻土(数年至数万年以上)三种类型。地球上这三种冻土类型分布的地区(或地带)称作短时冻土区(带)、季节冻土区(带)及多年冻土区(带)。在多年冻土区中的某些地段,因具有特殊的水热条件而不能发育多年冻土,这些地段称为融区。融区中可以发育季节冻土或短时冻土。

近地表每年冬季冻结、夏季融化的土层称为活动层。根据活动层成因又有季节融化层与季节冻结层之分。前者是指多年冻土(年变化深度处年平均温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$)上地表土层发生的季节融化,后者是指融土(年平均地温 $> 0^{\circ}\text{C}$)上地表土层发生的季节冻结。季节融化层回冻时与冻土层衔接的,称为衔接冻土层。如果二者不衔接则称为不衔接冻土层,其表层的活动层实际为季节冻结层。融土上的季节冻结层,如遇到冷夏不能融透,冻土可保留一二年至几年的,称隔年冻土层(pereletok),这是一种介于季节冻土与多年冻土之间的过渡形式的冻土。

在季节冻土带,正温下土层中热周转只有一部分用于冬季冻结层的融化,充分利用其余部分则存在潜在季节融化。在多年冻土带,负温下土层中热周转仅部分用于夏季季节融化层的冻结,而非全部被利用,存在土的潜在季节冻结。此概念对解决冻土理论和实际有着重要的意义(В.А.Кудрявцев,1978)。

在多年冻土区内,不同成因和面积大小不等的融区,制约着多年冻土分布的连续性。因而多年冻土(区)又有连续分布(连续性在90%以上)和不连续分布(连续性小于90%)之分。后者又可进一步分为断续、大片、岛状及零星分布的冻土(区)。

连接多年冻土岛最南缘的线,称为多年冻土区的自然地理南界(М.И.Сумгин,1937,1940)。相当于年变化深度处(即年较差等于零的深度)年平均地温为 0°C 的等值线,为地球物理南界(В.А.Кудрявцев,1954)。而И.Я.Баранов则认为,地球物理南界应当是相当于土的季节冻结层底面多年平均温度为 0°C 的等值线。对于山地多年冻土,

与其相应的为多年冻土分布下界,也应有自然地理下界和地球物理下界之分。由于实际资料不足,本书中一般用的是自然地理南界和下界。

现代多年冻土分布面积,占全球陆地面积的 25%。原苏联和加拿大国土面积的 50%,美国阿拉斯加面积的 75%,中国国土面积的 22%为多年冻土。季节冻土则遍布世界各大洲和中国的大部分国土。这些数字本身就说明了冻土与人类关系的密切性。

二、冻土学

研究冻土、土的冻结和融化、冻土地质过程和现象的形成、发育和分布规律及其在自然或人为影响下的变化和控制的科学统称冻土学(Geocryology)。这里所指的冻土,包括冻土本身,即含冰的冻结岩石、松散土及土壤,也应包括干的和湿的寒土(岩土)在内。

冻土学是在冻土区经济开发的实践中产生和发展起来的。经济发展的需要,使得冻土学首先在俄罗斯发展成为独立的科学。还在 16 世纪,文献中已出现有关西伯利亚和北美有冻土存在的报道。M. B. 罗蒙诺索夫曾发表“冻土地”的科学综述(1757 年),对“冻土地”的形成及其与气候、地形的关系等提出看法。19 世纪前半期,已初步获得西伯利亚冻土层的温度、厚度、埋藏条件和分布情况的资料。著名的谢尔金探井(116 m 深度内)的冻土温度资料就在 1925 年测得。与此同时,报道了北美哈得孙湾深处的岩石为永久冻结,埃什绍利茨湾沿岸有很厚的地下冰体。从 19 世纪后半期,西伯利亚工农业发展、人口大量迁移,特别是西伯利亚大铁路干线的建设,对研究冻土才有了更大的要求和给予很大的推动。应西伯利亚大铁路建设的需要,俄国地理协会制定并出版了《西伯利亚冻土研究指南》(1895 年)。出现了 Л. А. 亚切夫斯基的《论西伯利亚的永久冻土》报告(1889 年)、А. И. 沃耶伊科夫的关于西伯利亚铁路沿线冻土的第一篇综合报道(1889 年)。并出版了 Н. С. 鲍格达诺夫的《永久冻土与永久冻土上的建筑物》(1912 年)、А. Б. 利沃夫的《阿穆尔铁路西段在永久冻土条件下供水水源的普查与勘探》(1916 年)等书。1917 年后,冻土研究进入有计划有目的的发展时期,成立了冻土研究的科学机构。М. И. 苏姆金的《苏联境内永久冻结土壤》专著出版(1927 年),标志冻土学已成为一门独立学科。《普通冻土学》(1940)、《冻土学原理》(1959)、《苏联冻土学》(1988)等一系列专著,显示出冻土学在原苏联的发展达到较高的深度和广度。第二次世界大战中,亚北极地区军事工程建设受冻土问题困扰,促使美国军事部门成立专门机构开展冻土研究。60 年代末北极海发现大量石油,70 年代阿拉斯加石油管道的修建,都促使冻土研究迅速发展。

冻土学在其形成初期(20 世纪 30 年代),即分为普通冻土学和工程冻土学两个分支。普通冻土学研究冻土带的形成、发展历史和分布规律,冻土层的成分、性质、组构,冷生过程和现象,以及冻土带的温度动态和厚度等。工程冻土学研究在人类经济活动下冻土的行为、性质及其控制。工程冻土学以普通冻土学为基础,二者在实验室研究和现场试验研究的基础上结合起来。冻土学在发展中不断分化出新的研究方向,如冻土热物理学、冷生成岩学、农业冻土学、冻土区自然环境保护等。冻土学所解决的基本问题,一方面属于自然—历史科学范畴,另一方面又属于工程和其他应用科学范畴。因而,冻土学与地质、地理、地球物理、生物学、技术科学以及数理化等学科都有着密切联系,是综合性很强的学科,也是在以上学科接合处形成的边缘学科。

第二节 中国冻土研究简史

一、古代文献对冻土的记述^{*}

在春秋战国时期(公元前 770~前 221),礼仪论著的《礼记·月令》记道:“孟冬之月,水始冰,地始冻。仲冬之月,冰益坚,地始坼(坼,裂之意)。季冬之月,冻方盛,水泽腹坚……孟春之月,东风解冻”,清楚地记述了冬春季节土的冻结与融化过程和寒冻裂缝形成现象。《后汉书·东夷传》记载生活在黑龙江中下游、乌苏里江流域的古民族挹娄“处于山林之间,土气极寒,常为穴居。”南朝(公元 551~554)《魏书·乌洛侯传》描述额尔古纳河及呼伦池一带“其土下湿,多雾气而寒,民冬则穿地为室,夏则随原阜畜牧”。以上均记述了东北地区地温低、土地潮湿的现象及当地居民“穿地为室”的御寒办法。清初杨宾在《柳边纪略》中也记载了东北地区的冻土现象:“而树根盘错,乱石坑呀,秋冬冰雪凝结,不受马蹄,春夏高处泥淖数尺,低处汇为波涛,或数日或数十日不得达。”

明代徐霞客(1587~1641)在“五台山游记”中写道:登中台“余先趋台之南,登龙翻石,其地乱石数万,涌起峰头,下临绝坞,中悬独耸”,生动地描绘出“龙翻石”(今称之为“石海”)之壮观。并记载了在雪后,阳坡已冰消雪融,而中台北仍然“阴崖悬冰数百丈,曰万年冰”,实已察觉到阴、阳坡冻融作用的差异。

此外,三国时期古人已采用冻结法施工,一夜间将砂料冻结成城墙,使军队顺利通过渭河而取胜。如西晋(公元 265~316)陈寿在《三国志》中记载:“姜子伯说公曰:今天寒,可起沙为城,以水灌之,可一夜而成。公(指曹操)从之,乃多作缣囊以运水,夜渡兵作战,比明,城立,由是公军尽得渡渭。”

我国历史悠久,文献资料丰富。有关冻土和冻土现象的记载,尚有待今后进一步发掘。

二、近代中国冻土研究

从 20 世纪 40 年代,一些地理学家报道过西部高山有多年冻土。如刘培桐(1943)在“中国气候与土壤之关系(续)”一文中提到“高山冰沼土”,说“此类土常与高山草原土分布于同一区域,但地形较平坦,下积冰层,终年不融。”还提到“在滇西海拔 3 800 m 以上亦常见此类土之分布”、“余皓民在松潘一带,亦见有冰沼土。”陈正祥(1943)在“河西走廊”一文中也提到“高山冰沼土”,说“这种土分布在雪线附近,或雪线以上,土心常永久冻结,仅在祁连山高处发现。”显然,这里所提的“高山冰沼土”即为多年冻土。在日本侵占我国东北期间,《满洲矿业协会志》、《东北区的地质及地志》(1941~1944)上,零星报道过札鲁诺尔、海拉尔等地有多年冻土,并对其温度、厚度及埋藏条件作过叙述。此外,《雪冰》、《低温科学》等刊物(1940~1943 年)登载过日本人对我国东北地区的冻土及房屋、铁道等冻害作调查和试验的一些结果。

^{*} 尹承庆、王银学查阅了部分历史资料。

新中国成立后,1949~1959年间,东北冻土区的地质、矿藏调查、林业开发、铁路和公路修建以及工业民用建筑等各项生产的需要,大大促进了冻土科学研究。刘国昌(1951)在研究当时的内蒙古牙克石造纸厂地基问题时,谈论到当地冻土层的厚度和季节融化深度。辛奎德、任奇甲在整理以往东北冻土零星调查资料基础上,1956年发表了“中国东北地区多年冻土的分布”一文,这是我国第一份关于东北多年冻土分布特征的系统总结,并在冻土分布图上划出东北多年冻土区南界,认为南界相当年平均气温 0°C 等值线和1月平均气温 -24°C 等值线。同年,根据原苏联水文地质专家B.П.鲁萨诺夫的建议和指导,在内蒙古额尔古纳旗某矿区曾建过我国第一个冻土观测点。1957年,铁道部门在勘测设计大小兴安岭森林铁路中,调查了冻土分布和各种冻土工程地质现象,并取得多年冻土区工程地质勘测及铁路建筑等经验。这些都集中反映在《多年冻土的工程地质和铁路建筑》(铁道部第三设计院,1958)一书中。1957~1959年间,地质和水电部门曾派人参加了中苏黑龙江联合考察中的冻土调查工作。

这期间,季节冻土研究工作也在开展。如:北京市的季节冻结深度和道路翻浆的观测研究(中国科学院地理研究所,1953~1954;北京市政工程设计院,1956);水电部长春水利科学研究所开展土坝冬季施工研究,并出版《碾压式土坝的冬季施工》一书(1954)。该所1956年在我国最早筹建冻土实验室。随后建筑和林业部门(建筑科学研究院,内蒙古林业设计院等)开始建立观测站和筹建冻土实验室。

1954年青藏公路通车,青藏高原冻土问题引起交通、铁道等部门的关注。1956年铁道部开始勘测青藏线,对沿线冻土作初步调查。

由上可见,新中国成立后的前10年内,我国冻土研究已得到许多生产部门的重视,已积累了一些冻土资料,并作出一些初步总结。

1960年,中国科学院在兰州成立由施雅风主持的冰川积雪冻土研究所筹委会,设立冻土研究组,开始冻土研究。同年,铁道部高原铁路科研所在兰州相继成立。两所会同一些高校,于1960~1962年间有成效地开展青藏公路沿线冻土综合考察。铁道兵在青藏高原地下冰最发育的风火山地区修筑了铁路试验工程,此后高原铁路科研所坚持了风火山长年观测站。1963年,“青藏高原冻土初步考察”一文(周幼吾、杜榕桓)第一次向国内外报道了青藏高原多年冻土的分布特征、温度状况、厚度、组构、地下冰及冻土地质地貌现象等。1965年,《青藏公路沿线冻土考察论文集》(中国科学院地理研究所冰川冻土研究室)出版,在以往冻土考察研究基础上,就高原冻土分布及分区特征、冰缘地貌、冻土区地下水、冰的结构和化学以及植被等专题,进行了系统总结,标志我国冻土研究成长起来。与此同时,地质部门在青海高原东部结合地质普查,积累了许多冻土资料,反映在“青海高原东部的多年冻土”一文中(范锡朋,1963)。

接着,在1963~1964年,中国科学院开展了唐古拉山南麓西藏土门地区的冻土调查研究,并建立了世界上海拔最高(4 950 m)的冻土长年观测站。1965年起,又在祁连山木里煤矿地区开展冻土和供水条件调查,并建立冻土长年观测站。60年代初,在东北成立的以丁锡祉为首的冰缘地貌组,较系统地开展东北地区的冰缘地貌调查研究。1964~1965年,中国科学院会同铁道、林业部门,在大兴安岭牙林铁路沿线开展冻土和工程冻害调查,并对个别严重病害地段进行观测。

这段时间,在多地区的、密切结合生产实际的冻土调查中,积累了大量冻土基本科学

资料。野外工作已应用地球物理勘探方法,并初步开展冻土物理力学和热学性质的试验。1966年在兰州建成我国第一个有相当规模的冻土低温实验室。

以上科研工作和所创建的室内外条件以及一批冻土科研人才成长起来,为我国冻土科学事业的发展打下良好的基础。

1966~1977年间,冻土科研主要结合工程建设项目,如青海热水煤矿(1969~1974)、格尔木至拉萨输油管道(1972~1973)、南疆铁路(1972~1976)及拟建的青藏铁路(格尔木—拉萨段)(1974~1978)等,对各项工程,就冻土工程地质条件评价、冻土物理力学性质及冻土地基基础稳定等方面,中国科学院兰州冰川冻土研究所做了大量现场调查和室内外试验、观测、研究工作,并积累了许多科学资料。当时发表的论文表明,对祁连山高山冻土分布特征及其变化规律有较全面的认识(热水冻土队,1976);对青藏公路冻土力学性质进行系统总结(青藏冻土力学研究小组,1976);提出有限体系能量平衡法确定冻土温度场的主要指标(丁德文,1976);推导出便于工程实践中采用的多年冻土南界(下界)附近季节融化深度的计算公式(程国栋,1976)。此外,这阶段有许多科研总结和报告未出版,值得提出的有:国家下达的“青海木里煤田聚乎更矿区冻土与水源问题”项目,中国科学院兰州冰川冻土研究所科技人员经过1965~1968年的系统调查、观测和试验研究,提出了矿区冻土工程地质分区和工业民用建筑稳定性评价,以及矿区供水条件报告,汇集于《木里煤田聚乎更矿区冻土与水源问题研究资料汇编》(1971)中。另外,有关青藏高原多年冻土区铁路修筑中工程技术问题的多年研究成果,反映在铁道部第一设计院、西北铁路科研所和中国科学院兰州冰川冻土研究所共同主编的《青藏高原多年冻土地区铁路勘测设计细则》(1972)中。

1974年,国家组织青藏铁路建设中的冻土问题科研大协作,由中国科学院兰州冰川冻土研究所、铁道部第一设计院和西北铁路科研所等单位,开展了青藏铁路沿线冻土分布、冻土力学和热学性质、冻土地基稳定等13个专题的研究。

在东北大兴安岭,铁道部第三设计院冻土队从70年代初,对冻土分布特征、温度状况,冻土区地下水、冻土上各项工程建筑,做了大量观测、试验和研究。1973~1974年,内蒙古大兴安岭林业设计院主持,中国科学院兰州冰川冻土研究所、北京大学及一些林业部门的专家参加,对东北多年冻土进行了多学科的综合考察,积累了区域冻土资料,划出多年冻土自然地理南界。

1975年《冻土》一书(中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所)出版,通俗而系统地介绍了冻土知识和我国以往研究成果,并附有第一张小比例尺的中国冻土分布图。

1978年以后,我国冻土研究进入出成果时期,出现了一批系统性成果。

东北冻土研究:提出东北大小兴安岭多年冻土分区及特征,并编制出东北多年冻土分布图(1:300万)(郭东信等,1981;东北冻土研究协作组1983)。专题总结出大兴安岭多年冻土的地温特征(戴竞波,1982)。在1979、1980年又两次对大兴安岭北部、呼伦贝尔草原、长白山和黄岗梁等地区进行考察,再次明确了东北多年冻土自然地理南界的地理位置,南界以年平均气温 0°C 等值线为轴线在 $0\sim\pm 1^{\circ}\text{C}$ 间作南北摆动(鲁国威等,1993)。以后通过对东北土的季节冻结和季节融化层底面温度的研究,加深了对东北各冻土分区地温状况的认识,提出东北多年冻土地球物理南界与年平均气温 -5°C 等值线基本一致的看法(周幼吾等,1996)。

青藏高原冻土研究：对区域冻土特征及其影响因素有了系统总结(王家澄等,1979;樊溶河等,1982;童伯良等,1983)。编制出版了青藏公路沿线多年冻土分布图(1:60万)(童伯良、李树德等,1982),该图给出了不同类型多年冻土的平面分布界线及分区特征。对青藏公路沿线各类融区的分布和形成条件,作了系统的研究和总结(郭东信等,1982;邱国庆,1982;邱国庆和郭东信,1983)。通过中德青藏高原东北部自然景观及气候地貌联合考察(1981)、青藏高原东部水文地质普查和编图(1:100万)(1987~1988),以及青藏高原综合考察(横断山,1981~1983;西昆仑山,1988),对青藏高原多年冻土分布特征和形成发育规律有了更全面的认识(Cheng Guodong, 1987; Wang Shaoling, 1987; Luo Xiangrui, 1987; 王绍令等,1991;李树德等,1983,1990)。近期编制出版了《青藏高原冻土图》(1:300万)(李树德等,1996)。

天山、祁连山、阿尔泰山冻土研究：通过南疆铁路天山越岭地段冻土研究和随后的天山冻土调查研究(1972~1981)及中俄天山冻土联合考察(1990~1992),天山地区多年冻土分布发育特征及温度动态有了系统总结(邱国庆等,1981,1983; Qiu Guoqing, A. P Gorbunov, 1993)。对祁连山地区多年冻土分布特征(郭鹏飞等,1983)及阿尔泰山冻土(童伯良等,1986)均有了专题论述。

80年代初,在大量实际资料基础上,对我国多年冻土的基本特征和分布发育的地带性、区域性规律,已有全面的论述(周幼吾等,1980,1982)。给出中国多年冻土区面积有 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。根据决定多年冻土发育的主导条件——纬度地带性和高度带性,将我国多年冻土明确划分出高纬度多年冻土(东北)和高海拔多年冻土(西部)两种类型的多年冻土,后者又有高山多年冻土与高原多年冻土之分。1990年出版了中级科普《中国的冻土》一书(郭东信)。运用统计分析方法,提出了中国多年冻土平面区划指标(丁德文等,1982)和1:400万中国冻土分布图的编制原则和方法(徐学祖等,1983),并由此对中国冻土分布规律有进一步认识,明确划出季节冻土和瞬时冻土的分布界线(徐学祖等,1983)。中国冰雪冻土图(1:400万)(施雅风,1988)表现出我国各类冻土的分布规律以及冻土区主要的冷生现象,反映出我国区域冻土30多年来的研究成就。

关于高海拔多年冻土分布下界与气温、经纬度和雪线的关系有过一些探讨,并给出数学模式和统计公式(程国栋等,1982; Cheng Guodong, 1983; 徐学祖等,1983; 邱国庆,1983)。北半球高海拔多年冻土分布的三向地带性理论的提出(程国栋,1983; 邱国庆与程国栋,1995),进一步深化了对高海拔冻土分布发育规律的认识。

对我国广泛分布的多年冻土上限附近的厚层地下冰成因,除分凝、胶结一分凝成因及重力水胶结成因说法(周幼吾,1965,1982; 王春鹤,1982)外,又提出重复分凝机制新学说(程国栋,1982),并为国内外一些成冰实验研究所证实。近年来在东北发现冰楔(彭海云等,1990;童伯良,1993),在西昆仑山甜水海、黄河源头的鄂陵湖及东北古莲月牙湖均发现有地下纯冰体(李树德等,1990;王绍令等,1990;王保来,1990),从而改变了以往中国没有冰楔和大块冰体的看法。对于冻土地质、地貌过程和现象(冰缘地貌)的类型、分区及特征,已提出系统总结(崔之久,1980,1981;谢又予,1981;程国栋、邱国庆,1983),并开展定位定量观测研究(崔之久、朱诚,1989;崔之久等,1993)。对第四纪以来特别是晚更新世以来中国冻土的演变,已形成初步认识(郭东信等,1981;徐叔鹰等,1989,1990; Zhou Youwu et al., 1991; 邱国庆与程国栋,1995; Qiu Guoqing and Cheng Guodong, 1996)。关于冻土

区地下水特征、形成和运动规律及分类,取得一定进展(郑启浦,1989;郭鹏飞,1989;林凤桐,1989,1990;王保来等,1988;吴紫汪,1990),并有专著问世(杨润田、林凤桐,1986)。

北方干旱区土壤季节冻结过程中水分和盐分迁移、盐渍土形成及其改良利用问题,在室内外已做了不少研究,并在甘肃河西走廊农场具体实践,取得成效。出版有《甘肃河西走廊季节冻结盐渍土及其改良利用》一书(邱国庆等,1996)。在全球变化和人为活动影响下冻土环境的变化及预测方面,已有良好开端,如冰冻圈动态变化研究(程国栋等,1996,1997)、大兴安岭森林火灾对冻土环境影响研究(周幼吾等,1983,1994)等。

在勘测和测试技术上,多年来较成功地应用直流电测深法探查多年冻土的分布(黄以职等,1981,1983)。采用航空像片研究冰缘现象和厚层地下冰取得一定进展,并试验利用卫星像片判释多年冻土及冻土环境的变化(梁风仙等,1989,1990,1993)。中国科学院高原观测研究站(设在格尔木)的建立,为国内外同行深入观测研究青藏高原冻土、冻土与工程、冻土与生态环境等创造了良好的条件。

在冻土物理力学及物理化学性质大量室内外试验研究基础上,提出各种土的冻胀分类方案和冻胀预报模型(王正秋,1983,1986;陈肖柏等,1987,1991;Chen Xiaobai et al., 1988,1991),提出了以考虑冻土融沉性为主的多年冻土的工程分类(吴紫汪,1979)。针对渠系与公路冻害原因及防治的“土冻胀与盐胀试验研究及其应用”课题(在陈肖柏等主持下),在东北和西北广大地区取得了良好的成果和效益。冻土物理力学和热学的基本参数和实验方法等,业已纳入国家有关规范,如建筑地基基础设计、岩土工程勘察、冻土工程地质勘测、铁道工程、水工建筑物抗冻设计等。

冻土工程国家实验室在中国科学院兰州冰川冻土研究所建成,并于1991年向国内外开放,为冻土科学今后的深入发展和培养人才提供了良好的实验条件。一些前沿性基础性课题研究,已在该实验室取得长足进展。出版了《冻土中水分迁移的实验研究》(徐学祖等,1991)、《冻土强度与蠕变》(吴紫汪等,1994)、《土的冻胀和盐胀机理》(徐学祖等,1995)、《冻融土中的水热输运问题》(李述训等,1995)等书。

在道路、水利、工业与民用建筑等以往大量工作基础上,完成并出版了一些著作,如《路基冻害及防治》(赵云龙,1984)、《土的冻胀与建筑物冻害防治》(童长江等,1985)、《冻土路基工程》(吴紫汪等,1998)、《冻土工程》(铁道部第三勘测设计院,1994)等。水利部门出版有《抗冻技术》、《工程与冻土》刊物。此外,在两淮煤矿人工冻结凿井中、大兴安岭冻土黄金开采方面也做过许多研究,出版有《冻结凿井冻土壁的工程性质》(吴紫汪等,1988)一书及一些论文。

近20年来,我国冻土科学技术的国内外学术交流也很活跃。1980年中国科学院兰州冰川冻土研究所牵头建立中国地理学会冰川冻土分会,1978年以来,已举行过五届全国冰川冻土学术会议,均有论文集出版。我国冻土学界的代表自1978年以来参加过第三至第七届国际冻土学会议及国际土冻结会议等学术会议,我国作为东道主举办了第六届国际冻土会议(1993年),程国栋当选为国际冻土协会主席,标志我国及中国科学院的冻土学研究得到国际上的高度评价。《冰川冻土》杂志(季刊)1979年正式出版,对促进我国冻土研究和国内外学术交流起到重要的作用。

总之,以上事实表明,我国冻土研究在紧密结合生产实践中发展起来,以中国科学院兰州冰川冻土研究所(现改名为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)为中心,已形成

为一个包括普通冻土、冻土物理力学及工程冻土学的较完整的冻土学研究体系。今后,随着国民经济的日益发展,尤其是我国中西部的迅速发展,冻土学不仅对冻土区各项工程建设,同时也必将对冻土区水资源、石油和天然气、黄金等矿藏的开发利用,以及冻土区的农牧业、生态环境乃至全球变化做出更大贡献。而且,随着宇宙科学的发展,综合性更强的新科学——行星或宇宙冻土学将会更快地形成。面向 21 世纪,我国冻土学研究立足中国、放眼全球和宇宙,一定会具有强大的生命力和广阔的前途。

第一篇 中国冻土形成条件 及其主要特征

第一章 中国冻土形成的地带性和区域性条件

第一节 中国冻土形成的气候条件

从冻土热物理学观点来看,冻土是在岩石圈—土壤—大气圈系统热质交换过程中形成的。自然界许多地理地质因素参与这一过程,影响和决定冻土的形成和发展。气候就是其中对冻土有重要作用的因素。

在我国,冻土有广泛的分布。多年冻土区的面积要占到全国土地面积的五分之一强,季节冻土则遍布大部国土。在我国三大气候区,即东部季风区、西北干旱区和青藏高寒区(图 1-1),均有冻土分布。在三大气候区进一步划分的 12 个气候带中,多年冻土主要分布在寒温带、中温带北部和高原寒带、高原亚寒带及高原温带。季节冻土(包括短时冻土)的南端可到亚热带北部。冻土分布与气候带的赋存性正说明冻土与气候有密切的关系。各气候带的地貌、植被、土壤特征及主要气候要素列于表 1-1。

一、形成中国气候的主要因素

《中国自然地理·总论》(1985)中明确指出,中国气候的基本特点有三:一是季风气候明显;二是大陆性气候强;三是气候类型多种多样。气候特点的形成是所有自然因素综合影响的结果,但主要决定于我国的地理位置和地形特点、大气环流以及太阳辐射的特点。

1. 地理部位和地形特点

我国位于欧亚大陆东南部、太平洋的西岸,西南面有全球最高最大的青藏高原,且邻近印度洋。最北境到北纬 $53^{\circ}31'$ (黑龙江省漠河附近),最南境到北纬 $4^{\circ}15'$ (南沙群岛的曾母暗沙),南北跨纬度 $49^{\circ}16'$ 。因此,太阳入射角南北相差 30° 以上,引起气候、植被、土壤等因素呈纬度地带性变化。我国经度位置,大致介于 $73^{\circ}40'$ (帕米尔高原东缘)与 $135^{\circ}05'$ (黑龙江省抚远以东)之间,东西跨越近 62 度经度。由东往西,距海越远,气候越干旱。我国的地形起伏多山,山地、高原和丘陵约占全国土地面积的 65% 。地势西高东低,呈梯级分布。第一个梯级为青藏高原,平均海拔在 $4\ 000\text{ m}$ 以上,第二个梯级是北起大兴安岭、太行山,经巫山至雪峰山一线以西,海拔大致在 $2\ 000\sim 1\ 000\text{ m}$ 的高原和盆

表 1-1 中国各气候带的

气候带		地貌	植被、土壤	太阳年总辐射(MJ/m ²)
I	寒温带	大兴安岭北部台原、低山与中山	针叶林、漂灰土地带	<4 606 (东部)
II	中温带 (温带)	大兴安岭低山与中山,小兴安岭低山与丘陵,东北东部山地,三江平原,东北平原 内蒙古高平原,华北山地与高原北部,阿拉善高平原,北山残山,河西走廊,阿尔泰山、天山山地、准噶尔平原与山地	针叶、阔叶混交林棕暗壤,森林草原黑土黑钙土,干草原栗钙土,荒漠草原棕钙土、灰钙土,干旱山地植被土壤垂直地带	4 606~5 443 (东部) 5 443~6 700 (西部)
III	暖温带	华北平原、山东低山丘陵、山西中山与高原,秦岭、淮阳中山与低山北部;塔里木盆地	落叶阔叶林棕壤,森林草原褐土,干草原黑垆土,干旱荒漠灰漠土棕漠土	5 025~5 443 (东部) 5 862~6 700 (西部)
IV	北亚热带	长江中下游平原、华中华东低山丘陵北部,大巴山中山与低山,淮阳低山与丘陵,大别山北麓平原	常绿阔叶、落叶阔叶混交林,黄棕壤	4 606~5 025
V	中亚热带	华东华南低山与丘陵,鄂西黔中滇东中山高原与山原中、北部,滇西横断山高山峡谷,川西南滇中高山与高原,四川盆地,大喜马拉雅极高山	常绿阔叶林,红、黄壤	4 606~5 862 3 350~4 190 (四川盆地)
VI	南亚热带	华东华南低山与丘陵,滇桂中山与丘陵,滇西山原与高原,台湾平原与山地	南亚热带雨林季雨林,成分常绿阔叶林,砖红壤性红壤	4 606~5 025 4 606~5 862 (台湾)
VII	边缘热带	琼雷台地与山地,台湾平原与山地,东沙群岛	热带雨林季雨林,砖红壤	5 025~5 443 5 443~5 862 (台湾南部)
VIII	中热带	西沙群岛和中沙群岛的南海北部海域	热带雨林	5 443~5 862
IX	赤道热带	南沙群岛至曾母暗沙的南海南部海域	热带雨林	5 443~5 862
X	高原寒带	藏北台原北部(唐古拉山与昆仑山之间)海拔 4 800~5 100 m	高寒荒漠,高山草原	6 700~10 050
XI	高原亚寒带	藏北台原南部(冈底斯山以北),东昆仑东部山原,青南藏东山原,祁连山地,海拔由东往西由 3 400 m 至 4 800 m	高山草原,高山草甸	6 280~10 050
XII	高原温带	喜马拉雅极高山,藏东川西山原,柴达木盆地	亚高山草原,高山草甸,亚高山森林草甸,干旱荒漠灰漠土,棕漠土	>10 050 (阿里) 5 025~5 443 (藏东) 4 606~6 280 (川西) 6 280~7 118 (柴达木)

注:本表中气候带、气候要素系根据《中国自然地理》(总论)、(气候)(1985),《中国气候》(张家诚等,1985);地貌、

自然景观和主要气候要素

年平均气温 (℃)	年平均气温 较差(℃)	年降水量 (mm)	年蒸发量 (mm)	干燥度
<-4	>46	400~500	<1 000	<1.0
-4~8	34~45	600~800 以上至 50~60 以下	1 000~2 000 (东部) 2 000~2 500, 2 500 以上 (西部) <1 500 (西部山区)	0.75~2.0 (东部) 2.0~16.0 (西部)
8~14	28~36	500~600 至 800~900, 50~60 以下	1 500~2 000 (东部) >2 500 (西部)	1.0~1.5 (东部) 4~16(西部)
14~16	25~28	900 至 1 400~1 600	<1 500	0.5~1.0
16~18	20~25 12(滇中)	1 400~1 800 (江南) 1 000~1 200 (四川盆地) 1 000 左右 (滇中)	<1 500 <1 000 (四川盆地)	0.5~0.75 0.75~1.0 (滇中)
18~22	15~20 10(台湾)	1 600~2 000 (东部) 1 000~1 500 (滇南)	1 500~2 000	0.5~0.75 0.5~1.0 (滇南)
22~24 24~25 (台湾)	8~12	1 400~2 400 <1 000 (海南岛西 部沿海)	>1 500	0.5~1.0
24	6	1 500 左右		<0.5
24~26	2	1 500~2 000		<0.5
-2~-4 <-4	24~26	100	2 000~2 500	2~6
0~-4 <-4	22~24 26~30 (祁连山地)	600~800 (东部) 400~700 (中部) 100~300 (西部、 祁连山区)	1 500~2 000 <1 500 (东部) 2 000~2 500 (西部)	1~2 2~6(西部)
0~6 <0 (极高山)	22~24 16~20 (川西山地) 20~30 (柴达木)	50~100 (阿里) 500~1000 (川西山地) <50 (柴达木盆 地中心)	1 500~2 000 (东部) 2 000~2 500 (西部)	0.75~1.0 (川西山地) 2~16 (柴达木)

植被、土壤根据《中国自然地理图集》(1984)等有关资料编制。