

多年冻土 与 铁路工程

丁靖康 韩龙武 徐兵魁 杨永鹏◎编著



DUONIAN DONGTU YU
TIELU GONGCHENG

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

多年冻土与铁路工程

丁靖康 韩龙武 徐兵魁 杨永鹏 编著

中国铁道出版社

2011年·北京

内 容 简 介

本书系统总结了我国多年冻土地区的铁路修筑技术,汇集大量科研和实体工程试验观测资料,论述铁路工程稳定性与多年冻土环境的关系,提出维持多年冻土上铁路工程长期稳定的对策。全书分两篇十二章,上篇讲述多年冻土工程地质,对多年冻土地区铁路修筑中可能遇到的工程地质问题进行了讨论;下篇讲述多年冻土上的铁路工程,详细讨论了多年冻土上路基、桥梁、涵洞、房屋、隧道等工程地基基础特殊结构的热设计方法,并对铁路施工和运营中的环境工程地质问题进行了分析,提出了多年冻土环境保护要求。本书对多年冻土地区的铁路设计、施工和运营有重要参考价值。

本书可供冻土工程技术人员和有关大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

多年冻土与铁路工程/丁靖康等编著. —北京:
中国铁道出版社, 2011. 10
ISBN 978-7-113-13549-2

I. ①多… II. ①丁… III. ①多年冻土-冻土
区-铁路工程 IV. ①U215

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 203835 号

书 名: 多年冻土与铁路工程

作 者: 丁靖康 韩龙武 徐兵魁 杨永鹏

策 划: 江新锡 曹艳芳

责任编辑: 曹艳芳 编辑部电话: 010-51873017 电子信箱: chengcheng0322@163.com

编辑助理: 江新照

封面设计: 崔 欣

责任校对: 孙 玫

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京信彩瑞禾印刷厂

版 次: 2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张: 27.25 字数: 685 千

印 数: 1 ~ 3 000 册

书 号: ISBN 978-7-113-13549-2

定 价: 138.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010) 51873170 (发行部)

打击盗版举报电话:市电 (010) 63549504,路电 (021) 73187

前 言

我国多年冻土面积约 215 万 km^2 ，占国土面积的 22.3%。主要分布在东北的大、小兴安岭和西部的青藏高原。

2006 年，青藏铁路（格尔木—拉萨段）建成通车。这是世界上海拔最高的多年冻土区铁路，通过多年冻土区长度约 550 km。青藏铁路的成功修建是我国多年冻土区铁路筑路技术研究成果的集中体现。

我国多年冻土地区的铁路建设始于 20 世纪 50 年代。自 1952 年开始，在东北大、小兴安岭先后建成牙林线、嫩林线、伊加线和朝乌线等多年冻土区铁路，总长约 1 500 km。1956 年，铁道部第一设计院的勘测设计人员进入青藏高原多年冻土区，开始青藏铁路的勘测设计工作。1960 年，铁道部高原研究所在青海格尔木成立，并在海拔 4 750 m 的风火山北麓建立了我国首座多年冻土定位观测站，修建了 50 m 碎石路基，拉开了青藏铁路多年冻土区筑路技术研究的序幕。1961 年，铁道部科学研究院西北研究所在兰州成立。1962 年，高原冻土铁路修筑的研究正式列入铁道部十年科技发展规划，并交西北研究所组织实施。1965 年，铁道部第三勘测设计院组织开展了东北多年冻土区铁路工程研究。至此，铁路多年冻土研究进入全面发展时期。1984 年，穿越天山多年冻土区的南疆铁路吐鲁番至库尔勒段建成通车，标志着我国多年冻土地地区铁路修筑进入了一个新的发展阶段。

半个多世纪来，西北研究所、第一勘测设计院、第三勘测设计院、齐齐哈尔铁路局等单位的冻土工程技术人员，在多年冻土地地区铁路修筑技术方面，做了大量研究工作，取得了很多成果。如：块石路基、热棒路基、隔热层路基、通风管路基、遮阳棚（板）路基等特殊路基；桥梁桩基试验与设计计算；房屋架空通风基础；隧道防、排水工程中的泄水隧洞；铁路防冻给水管路与防冻储水池；热棒基础涵洞；冻土区挡土墙的设计和计算等。这些成果均已纳入我国多年冻土区铁路勘察、设计和施工的有关规程规范中，成为我国多年冻土区已有铁路维修、养护和新线设计、施工的依据。

青藏铁路的运营实践表明，采用上述研究成果修建的高原多年冻土区铁路是成功的。这充分说明，我国多年冻土地地区的铁路修筑技术已达先进水平。

本书以青藏铁路建设中的工程技术问题为基础，系统总结了我国多年冻土地地区铁路修筑中的多年冻土环境工程地质问题和各类铁路工程勘测、设计、施工和运营中的特殊铁路工程技术问题。内容包括多年冻土区铁路选线、建筑选址、冻土地基基础设计原则和计算方法、冻土物理力学参数的确定、热防护措施设计以及冻土环境保护要求等。

谨以此书献给我国多年冻土地地区的铁路建设者。

作 者
2011 年 7 月

目 录

上篇 多年冻土工程地质

第1章 概 论	3
1.1 全球多年冻土的分布概况	3
1.2 多年冻土的形成与发展	4
1.3 多年冻土地区的铁路	4
1.4 多年冻土地区筑路的特殊工程地质问题	5
第2章 我国多年冻土的分布和特征	8
2.1 我国多年冻土的类型和分布	8
2.2 我国多年冻土的基本特征	11
2.3 我国多年冻土的自然区划	18
第3章 多年冻土工程地质与水文地质	19
3.1 多年冻土上限及其变化特点	19
3.2 不良冻土现象	22
3.3 多年冻土的物理状态分类	26
3.4 多年冻土的工程分类	26
3.5 活动层土体的冻胀性分级	29
3.6 多年冻土的地温分区	30
3.7 多年冻土地区的地下水	31
第4章 冻土的工程性质	33
4.1 土矿物颗粒的物理—化学特性	33
4.2 冻土的组成成分	39
4.3 冻土中未冻水与冰的动力平衡	44
4.4 土中孔隙水的冻结过程	47
4.5 冻土的结构和构造	48
4.6 冻土的物理性质	50
4.7 冻土的热物理性质	58
4.8 冻土的电学性质	62
4.9 冻土的力学性质	64

4.10	冻土融化下沉与压密特性	89
4.11	土冻结过程特性与冻胀防治	94
第5章	铁路工程冻土地基基础的设计和计算	115
5.1	热力学和传热学的基本概念	116
5.2	太阳辐射与地表能量平衡	121
5.3	试验数据处理与土工设计参数的确定	126
5.4	冻土地基、基础的热设计问题	134
5.5	地基多年冻土的利用原则与热稳定性评价	152
5.6	多年冻土地区的铁路选线与建筑选址	154
5.7	铁路工程地基基础的设计和计算	156
第6章	热棒(桩)地基和基础	164
6.1	热棒(桩)制冷技术的发展	164
6.2	热棒(桩)制冷工作原理	166
6.3	热棒(桩)的热传输技术特性	167
6.4	热棒(桩)的用途	168
6.5	热棒(桩)的安全性	169
6.6	热棒(桩)地基的热工计算	170

下篇 多年冻土上的铁路工程

第7章	路基工程	181
7.1	多年冻土上路基的稳定性与路基设计	183
7.2	路堤临界高度与路堑临界换填厚度	193
7.3	热棒路基	204
7.4	块石(碎石)路基	217
7.5	通风管路基	227
7.6	隔热层路基	231
7.7	遮阳棚路基和遮阳板护坡路基	239
7.8	沼泽湿地路基	240
7.9	路基边坡防护	241
7.10	以桥代路	266
7.11	过渡段路基	267
7.12	路基排水设计	268
7.13	路基冻胀防治	271
第8章	桥梁工程	274
8.1	多年冻土上桥梁冻、融病害类型及产生机理	274

8.2	冻土桩—地系统形成的物理过程和工作特性	277
8.3	冻土桩基静载试验	277
8.4	多年冻土中的钻孔灌注桩	299
8.5	多年冻土上桥梁地基基础的设计和计算	312
第9章	涵洞工程	321
9.1	多年冻土地区涵洞工程的冻融病害与防治对策	321
9.2	多年冻土地区涵洞工程的热工特性	324
9.3	多年冻土地区涵洞的设计和计算	326
9.4	多年冻土地区涵洞的施工	333
第10章	房屋工程	334
10.1	房屋建筑选址	334
10.2	地基多年冻土的利用原则	334
10.3	房屋地基基础的设计	335
10.4	多年冻土上的人工地基	349
10.5	岛状多年冻土地区的房屋地基和基础	351
第11章	隧道工程	357
11.1	多年冻土区隧道工程的环境工程地质问题	357
11.2	冻土隧道—围岩系统的热力学特性	358
11.3	冻土隧道冻融病害产生机理与防治对策	361
11.4	多年冻土地区隧道工程的设计	363
11.5	多年冻土隧道施工	365
第12章	多年冻土地区的铁路施工、运营与环境保护	369
12.1	我国的多年冻土环境及其特点	370
12.2	气候转暖、人类经济活动与多年冻土环境	371
12.3	多年冻土铁路环境工程地质问题	376
12.4	铁路施工、运营中的多年冻土环境保护	383
	参考文献	387
	附录A 冻土学和冻土学词汇	392
	附录B 路基模型试验	399
	附录C 低温混凝土配合比的设计与施工	411
	附录D 多年冻土工程类型的野外物理状态判别方法	422
	附录E 多年冻土地温场监测注意事项	425

上篇 多年冻土工程地质

第1章 概 论

1.1 全球多年冻土的分布概况

地球陆地总面积约为 14 950 万 km^2 。多年冻土占整个地球陆地面积的 1/5，约 3 000 万 km^2 。除大洋洲外，各洲均有分布。主要分布在高纬度的极地和极地附近寒冷地区以及低纬度高山区。北半球，多年冻土主要分布在欧亚大陆、北美洲大陆及北冰洋中的岛屿（包括格陵兰、冰岛等）。南半球，多年冻土主要分布在南极洲及其周围岛屿和南美洲南端的火地岛和福克兰群岛。

从多年冻土的分布和形成条件来看，全球多年冻土可分成两大类：一是处于高、中纬度的大陆多年冻土；二是处于中、低纬度的高山和高原多年冻土。

大陆多年冻土区包括欧亚大陆、北美大陆和南极洲大陆的各多年冻土区。

欧亚大陆多年冻土区包括北欧诸国北部，往东到俄罗斯欧洲部分北部、乌拉尔山及西伯利亚的绝大部地区、蒙古国和中国东北以及阿尔泰山地区。欧亚大陆多年冻土区的南界在亚洲最南可达 $45^\circ \sim 46^\circ \text{N}$ ，其分布面积约 1 000 万 km^2 。

北美大陆多年冻土区包括美国阿拉斯加和加拿大一半以上的国土以及格陵兰岛和北冰洋中的大多数岛屿。

高山和高原多年冻土区包括欧亚大陆多年冻土区以南的天山、帕米尔、青藏高原及欧洲的高加索、阿尔卑斯山、比利牛斯山等多年冻土区和南美洲安第斯山、新西兰库克山、非洲乞力马扎罗山等多年冻土区。

位于欧、亚大陆北部，北极圈附近的俄罗斯、中国和北美大陆北部的加拿大、美国，是世界上多年冻土分布最广的国家。俄罗斯多年冻土分布面积约 1 000 万 km^2 ，占俄罗斯国土面积的 58%，是世界上多年冻土分布最多的国家；其次为加拿大，多年冻土面积约 490 万 km^2 ，占加拿大国土面积的 49%；我国多年冻土面积约 215 万 km^2 ，占国土面积的 22.3%，在世界多年冻土国家中占第三位，其中，高海拔多年冻土面积居世界之最，主要分布在东北高纬度地区的大、小兴安岭和松嫩平原北部及西部高山和青藏高原。美国多年冻土面积约 140 万 km^2 ，占美国国土面积的 15%，集中分布在阿拉斯加地区。此外，在挪威、瑞典、芬兰、冰岛、智利等国家，多年冻土也有零星分布，但面积很小。南极洲的绝大部分位于南极圈内，面积约 1 405 万 km^2 ，由大陆、陆缘冰和岛屿组成，大陆面积约 1 239 万 km^2 ，98% 为冰覆盖。冰层平均厚度 2 000 m，最大厚度 4 750 m。裸露的大陆仅见于周边地区。格陵兰岛的绝大部分位于北极圈（纬度 $66^\circ 33' 23.9''$ ）以内，面积约 217 万 km^2 ，82% 的面积为冰覆盖，冰层平均厚度 1 500 m，最大厚度 3 410 m。

综上所述，世界多年冻土主要分布在：俄罗斯、加拿大、中国、美国、挪威、瑞典、芬兰、蒙古等国家。季节冻土和冰缘现象发育的主要国家有：日本、波兰、法国、德国、印

度、捷克、匈牙利等。

1.2 多年冻土的形成与发展

冻土是在岩石圈—土壤—大气圈之间的热、质交换过程中形成的。多年冻土是在特定气候条件下，大气圈与地表之间长期相互作用的结果。

众所周知，地表土壤、岩石层中的热量，来自太阳的短波辐射和岩石圈下部的高温塑流地幔层以及地壳岩层放射性元素的衰变。地幔和岩石圈中的热量，以热流 q 通过地壳岩石，源源不断地向地面传输，并散发至大气中。到达地表的太阳短波辐射（包括直接辐射和散射辐射），在去掉地表的反射辐射和有效长波辐射后，地面得到的是净辐射热能 Q_j 。因此，地表土壤、岩石层获得的热量为 Q_j 与 q 之和。这些热量主要消耗于大气与地表间的湍流热交换、水分蒸发耗热、和地面与地中的热交换（地中土的升温或冷却、水的相变等）。

在这种热、质交换过程中，如果地表土壤、岩石层（10 m 至数百米）连续多年获得的能量小于失去的能量时，则形成多年冻土。

太阳辐射是地表热量的主要来源，是影响多年冻土发育的主要因素。通过太阳辐射和地表能量平衡观测，可正确判定、评价多年冻土的发展趋势。

多年冻土的保存与发展，取决于地表与地中的热交换。在一个接触层热交换周期中（寒季和暖季），地表放出的热量等于或大于吸收的热量时，多年冻土得以保存和发展。否则，多年冻土将衰退和消亡。

1.3 多年冻土地区的铁路

多年冻土地区的铁路建设始于 19 世纪晚期。俄罗斯是在多年冻土地区进行铁路建设最早的国家。目前，俄罗斯在多年冻土地区已修筑了 7 条干线铁路，通过多年冻土地区长度达 10 000 km 以上。1892 年俄罗斯开始修建第一条西伯利亚大铁路，即后贝加尔铁路。该线全长 9 446 km，穿越多年冻土地区约 2 200 km，1902 年建成通车。20 世纪 70 年代，又开始修建第二条西伯利亚铁路，即贝阿铁路。该铁路西起贝加尔湖北部的乌斯季库特，东至阿穆尔河（黑龙江）下游的共青城，全长 3 500 km，通过多年冻土地区长度约 2 500 km，于 1984 年建成通车。目前正在修建的别尔卡基特—托莫特—雅库茨克铁路全长 818 km，几乎全部位于多年冻土区。另外，秋明经苏尔古特至乌连戈叶、沃尔格达至沃尔库塔、彼尔姆至谢尔吉布斯克、卡尔波戈雷至阿拍吉特几条南北向铁路干线，几乎全部从多年冻土地区通过，铁路北端已进入北极圈。

加拿大在二战期间，开始在多年冻土地区修建铁路。目前，加拿大在多年冻土地区共有铁路五条，即：埃得蒙顿—丘吉尔港（哈得森湾）；利贾纳—海利克（大努湖）；梅尼埃港—谢费维尔；珀斯—林莱克；锡基特波蒂奇—林莱克。五条铁路穿越多年冻土区长度约 2 000 km。

美国在 1904 年开始修建从阿拉斯加南部港口苏瓦德至中部城市费尔班克斯的阿拉斯加铁路，线路总长 756 km，通过多年冻土地区长度约 350 km。

我国多年冻土区铁路总长约 1 900 km，主要集中在东北大兴安岭多年冻土区和青藏高原

多年冻土区。计有：青藏线（多年冻土区线路长度约 550 km）；牙林线（约 350 km）；嫩林线（约 470 km）；潮乌线（约 90 km）；伊加线（约 230 km）、林碧线（约 80 km）、塔韩线（约 80 km）等。穿越天山的南疆铁路，亦有约 50 km 线路通过天山多年冻土区。

其他国家在多年冻土地区建设的铁路就比较少了。在北极圈内，挪威有铁路约 180 km；瑞典有铁路约 300 km；芬兰有铁路约 420 km。

在南美洲秘鲁、智利和玻利维亚三国交界的安第斯高原（海拔 4 000 m 以上）上，有三条高原铁路，即：秘鲁的中央铁路；智利的堪拉浩雪铁路（从智利沿海港口安托法加斯塔至玻利维亚高原城市乌尤尼）；玻利维亚的波托西支线铁路。其中，堪拉浩雪铁路最高点海拔 4 825.2 m，但由于该处纬度在南纬 20°附近，多年冻土的分布下界应在 5 000 m 以上。故三条铁路都未通过多年冻土区。

1.4 多年冻土地地区筑路的特殊工程地质问题

多年冻土地地区的铁路运营实践表明：多年冻土地地区的铁路建筑，必须运用特别的设计理念、选择合理型式的基础和地基处理方法、采用特殊的施工工艺，才能确保和维持铁路工程的长期稳定。否则，多年冻土上的铁路工程必然会出现大量变形，甚至破坏。

多年冻土地地区铁路工程的设计、施工和运营，需要考虑和解决的核心问题是：（1）在采用保持地基多年冻土冻结状态原则设计时，应选用合理的建筑结构和基础类型，通过特殊的施工方法，来保持地基多年冻土的冻结状态，维持地基多年冻土的地温在施工和运营期间始终在设计允许的变化范围内。（2）允许地基多年冻土在施工和运营期间融化时，应控制地基的融化下沉速率和下沉总量始终在设计允许范围内。

多年冻土地地区的铁路工程地基基础系统，是位于地表半无限热力学系统中的一个子系统。即多年冻土地地区的铁路工程地基基础系统，首先是一个热力学系统，维持多年冻土上铁路工程稳定的问题，首先是一个热工问题。在铁路的施工与运营期间，应保证系统与外界的热交换，不影响铁路工程地基基础的热学稳定，这是多年冻土地地区筑路与一般地区不同的地方。

冻土是一种含有冰的多相岩体，在负温条件下，其强度和变形特性与一般软岩相比，具有良好的工程性质。但随着土温的升高，冻土的工程性质迅速变化，冻土工程的可靠度（稳定性）迅速降低。在地基多年冻土融化时，很多情况下，将引起建筑物的大量变形，甚至破坏。冻土中，冰和未冻水的存在，使冻土具有明显的流变特性。多年冻土地地区严寒的气候和特殊的水文地质条件，使冷生过程和冷生现象发育。

经验表明，在多年冻土地地区，许多严重的工程问题都是由高含冰量多年冻土的生成与退化引起的。地基高含冰量多年冻土的融化，将使地基失去承载能力，引起建筑物的变形和破坏。地基中高含冰量冻土的生成，将引起建筑物的严重冻胀变形。

多年冻土地地区的工程施工，将影响多年冻土地地区许多自然过程的发展速度和规模，特别是对冻结和融化过程及其伴生现象的影响尤为明显。施工活动对多年冻土的影响可以是直接的，也可以是间接的。多年冻土地地区的工程活动引起的环境工程地质问题主要有：多年冻土的衰退和融化；热喀斯特、地面沉陷、热融滑塌发育；冰锥、冰丘活动加剧；活动层厚度加

大,地下水位下降,植被衰退,土地荒漠化加剧等。

近 30 多年来,全球气温升高和人类经济活动加剧给多年冻土环境带来的影响是巨大的。我国的多年冻土出现了明显衰退,由此产生的环境工程地质问题,给多年冻土地区铁路工程建设造成的损失也是巨大的。

多年冻土环境的热敏感性和冻土的特殊工程性质,使得多年冻土地区的铁路工程建设过程复杂化。为维持多年冻土上铁路工程的稳定,除设计合适的冻土工程结构和基础形式外,还要求采用保护多年冻土环境的特殊施工方法。100 多年来的多年冻土地区筑路经验表明:“没有多年冻土环境的热稳定,就没有多年冻土上铁路工程的稳定。”稳定的多年冻土环境是维持多年冻土区铁路工程热、力学稳定的前提。

多年冻土环境是地质历史变迁与现代气候变化的产物。存在于大气、植被、活动层和多年冻土间的热平衡状态,是上述变迁和变化的结果。维持、改善现有热平衡状态,提高多年冻土环境的热稳定性,则多年冻土是相对稳定的。

多年冻土工程地质条件与多年冻土环境特征密切相关。多年冻土环境,决定着多年冻土的特征、分布和埋藏条件;决定着冻土的构造特征和物理力学特性;决定着冻土区冷生过程与现象的发育程度。国内外多年冻土区铁路工程的运营实践表明:要维持多年冻土区铁路工程的稳定,必须根据铁路通过地带多年冻土环境的特点,采用不同的、合理的环境保护措施,来确保多年冻土环境的热稳定。

100 多年来,尽管冻土工程师们,在多年冻土地地区铁路选线、建筑结构与地基基础设计、施工等方面,作了大量的研究,采用了许多新的结构与热防护措施,但多年冻土区铁路路基工程的病害发生率仍维持在 20% ~ 40%。据 1996 年俄罗斯铁路部门对后贝加尔铁路(西伯利亚大铁路)多年冻土地地区路基冻融病害的调查,其病害率竟达 40.5%;据 1994 年调查,贝阿铁路路基的病害率,亦达 26.7%;我国大兴安岭地区铁路线路的病害率也在 30% 以上。

在多年冻土地地区的工程活动中,要正确、全面评价多年冻土环境对工程的影响是困难的。例如,1976 年,美国修建阿拉斯加输油管线工程时,由于对多年冻土的影响估计不足,致使工程建设费用由最初预算的 10 亿美元,增加至决算时的 80 亿美元。在阿拉斯加州,每年用于道路工程的养护费用约 80 亿美元,其中 20% 的支出与多年冻土有关。这就充分说明,认识多年冻土环境的特殊性,加强对铁路工程与多年冻土环境相互影响的研究,于多年冻土地地区铁路工程建设是多么重要。

多年冻土地地区筑路将遇到以下主要冻土工程地质问题。

- (1) 地基多年冻土的衰退和融化对铁路工程的危害;
- (2) 地基活动层土体冻结、融化过程对铁路工程稳定性的影响;
- (3) 不良冻土现象对铁路工程的危害。

尽量减少对现存地表状态(植被覆盖、水体分布、沼泽湿地分布、裸露地表的岩性成分和密实度等)的破坏和对地基多年冻土的热干扰,是维持冻土工程稳定的重要方法。缺少对多年冻土环境和冻土工程特性的充分认识,将导致极高的施工和养护费用,有时甚至使工程毁坏而不得不废弃重建。

多年冻土地地区铁路建筑技术的核心问题,是铁路工程基础合理型式的选择和多年冻土地基的正确处理。多年冻土地地区铁路工程的设计和施工,常采用以下方法。

(1) 合理选择铁路线路：充分考虑多年冻土工程地质条件的特殊性，为提高铁路工程的稳定性，应将线路布置在多年冻土热稳定性好，向阳、干燥的低含冰多年冻土分布地带；避开不良冻土现象、地下水发育地带和高含冰量多年冻土分布地带。

(2) 选择良好的站后工程建筑场址：多年冻土地区建筑物的选址，对建筑物的长期稳定有重要意义。地基良好的冻土工程地质条件是冻土工程稳定的基本保障。

(3) 减小和消除地基活动层土冻融循环过程对铁路工程建筑物的影响：施工前，采用热学、力学等物理化学方法对地基土进行改良和处理，使地基活动层土体具有良好的抗冻融循环性能；采用适应多年冻土环境特点的合理基础型式；采用柔性结构等能适应大变形的建筑结构。

(4) 控制地基土的热状态，防止地基多年冻土衰退：保护好多年冻土环境，在建筑物施工和运营期间，把地基多年冻土的热状态控制在允许的变化范围内，来保持铁路工程的稳定。

(5) 合理组织施工，采用快速施工方法：尽量减少地基多年冻土的暴露时间，是减少施工热干扰的有效方法。因此，多年冻土地区铁路工程的施工，应尽量采用“爆破开挖、快速施工”方法，并加强施工场地排水和暴露多年冻土的临时隔热防护，以减少对地基多年冻土的热干扰，加速工程—地基系统热平衡的恢复，提高铁路工程的稳定。

多年冻土地区的铁路建设已有 100 多年历史。在这 100 多年的铁路设计、施工和运营中，积累和总结出了不少成功的经验，使今天多年冻土地区的铁路建设得以蓬勃发展。但由于多年冻土环境的复杂性及当今全球气候转暖，在多年冻土出现严重衰退条件下，如何维持多年冻土地区铁路工程的长期稳定，仍是一个值得关注和探讨的问题。

第2章 我国多年冻土的分布和特征

2.1 我国多年冻土的类型和分布

我国多年冻土的类型与分布如图 2-1 和表 2-1 所示。

我国是世界上主要的多年冻土国家，多年冻土面积约 215 万 km²，居世界第三位，其中，高海拔多年冻土面积居世界之最，主要分布在东北高纬度地区的大小兴安岭、松嫩平原北部、蒙古高原和西部高海拔的青藏高原以及西部、东部的部分高山区（图 2-1）。

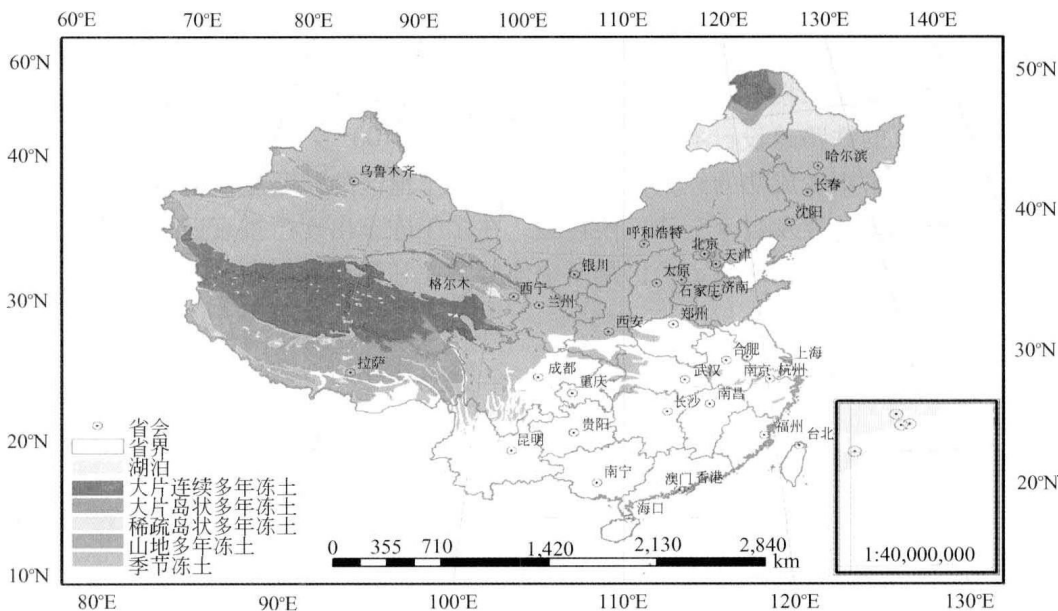


图 2-1 我国多年冻土分布及类型

图 2-1 中东北和西南的两大片深蓝和浅蓝色部分和星点分布的浅蓝色斑点就是我国的多年冻土。从图可以看出，我国的多年冻土主要分布在我国的西部高原和高山地区；东部平原和中、高山区，除北纬 50°附近的高纬度地区有大片多年冻土分布以外，其余地区仅有少量多年冻土分布。即我国的多年冻土主要有两大片：西部高海拔的青藏高原多年冻土和东北高纬度的大、小兴安岭多年冻土。其余的多年冻土则分散分布在我国西部和东部的部分高山区。

多年冻土的存在和分布是地质历史变迁和近代气候变化的产物。影响和决定多年冻土形成和发展的因素有：气候条件、地形、地貌和地质构造等。其中，气候条件对冻土的形成和发展有着重要影响。在高纬度和高海拔地区，严寒的气候条件（年平均气温低于 0℃），是多年冻土生成和保存的基本条件。在我国三大气候区（东部季风区、西北干旱区和青藏高

寒区)中,多年冻土均有分布。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五个寒冷气候带中,这些气候带的自然景观和主要气候要素如表2-2所示。

表2-1 我国多年冻土的分布和特征

多年冻土类型		分布地域	多年冻土面积 (×10 ⁴ km ²)	年平均气温(°℃)、 (海拔高度(m))	多年冻土年平均地温 (°℃)
高纬度多年冻土		东北大、小兴安岭	38 ~ 39	-2.0 ~ -4.0 (500 ~ 1 500)	-0.5 ~ -2.5
高海拔 多年冻土	高山 多年 冻土	阿尔泰山	1.1	-4.4 ~ -8.4 (2 200 ~ 2 800)	-0.5 ~ -4.0
		天山	5.3	< -2.0 (2 700 ~ 2 800)	
		祁连山	8.5	< -2.0	
		横断山	0.7 ~ 0.8	-2.2 ~ -3.9 (4 600 ~ 4 900)	
		喜马拉雅山	7.5	< -2.5 ~ -2.0 (4 900 ~ 5 000)	
		黄冈梁山	0.7	< -2.9 (1 500 以上)	
		长白山		< -2.0 ~ -3.0 (1 800 以上)	
		太白山		< -2.0 ~ -3.0 (3 100 ~ 3 200)	
	高原多年冻土	青藏高原	150	-2.0 ~ -7.0 (4 300 以上)	-0.5 ~ -3.0

表2-2 我国多年冻土分布地区的自然景观和主要气候要素

气候带	地 貌	植被、土壤	太阳年总辐射(MJ/m^2)	年平均 气温($^{\circ}\text{C}$)
I 寒温带	大兴安岭北部台原、低山与中山	针叶林,漂灰土	<4 606(东部)	< -4
II 中温带	大兴安岭中山、低山;小兴安岭低山、丘陵;天山	针叶、阔叶混交林,草原黑土	4 606~5 443(东部); 5 443~6 700(西部)	-4~8
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	-2~-4或更低
XI 高原亚寒带	藏北台原南部,海拔3 400~4 800 m	高山草原、高山草甸	6 280~10 050	0~-4或更低
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	>10 050(阿里);5 025~5 443(藏东);4 606~6 280(川西);6 280~7 118(柴达木)	0~6或低于0

地质构造和地形、地貌对冻土形成和发展的影响,主要表现在地形(高山、河谷平原)、地貌(包括植被和雪盖)不同,地表得到的太阳辐射能量不同,因而,多年冻土的发育程度不同。如:山区较之河谷平原,气温要低,寒季要长,多年冻土的年平均地温要低,

厚度要大；阴坡较之阳坡，由于获得的太阳辐射能量较少，多年冻土的年平均地温要低，厚度要大；植被覆盖良好地段较之裸露地段，由于植被叶面蒸腾、光合作用耗热大，地表暖季获得的太阳辐射能量较少，多年冻土的年平均地温要低，厚度要大。地质构造和岩相（热物理性质变化）不同，地中热流的大小不同。在地质构造带，岩浆和地下水活动频繁，地中热流 q 大，多年冻土的年平均地温较高，厚度要小；岩石圈的年代越古老，放射性元素的衰变越弱， q 越小，多年冻土的年平均地温要低，厚度要大。即地形、地貌和地质构造对多年冻土的温度和厚度都有重要影响。

根据多年冻土的生成和保存条件，我国的多年冻土大体可以划分为高纬度多年冻土和高海拔多年冻土两种类型。

（1）高海拔多年冻土

我国的高海拔多年冻土主要分布在我国西部的青藏高原和西部、东部的部分高山区。因此，高海拔多年冻土又可划分为高原多年冻土和高山多年冻土。高原多年冻土分布在西部青藏高原；高山多年冻土主要分布在西部的阿尔泰山、天山、祁连山、阿尔金山、横断山、喜马拉雅山以及东部的太白山、五台山、长白山、黄岗梁山等高山区。

青藏高原是新构造运动强烈的地区，南北跨越近10个纬度，东西横穿约26个经度，其面积约200万 km^2 。高原地势高耸，海拔平均在4000m以上，高原腹部地区，海拔高度达4500m以上。青藏高原特有的海拔高度，决定了它具有 $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的年平均气温，这就为高原多年冻土的形成和保存，提供了必要的低温条件。青藏高原多年冻土区是世界中、低纬度地带海拔最高、面积最广的冻土区，多年冻土面积约占我国多年冻土区面积的72%。

青藏高原地势西北高、东南低，西北部寒冷干燥，东南部较温暖湿润。因而，高原西北部多年冻土最为发育，呈连续分布，年平均地温低、厚度大，为大片连续多年冻土区。从西北向东南，随纬度和海拔高度的降低，气温升高，多年冻土由大片连续分布过渡为岛状分布。

高原地区河流下切强烈，第四系沉积多为粗颗粒砂卵石土和碎石土。

高山多年冻土的分布受纬度和海拔高度控制。翻开中国地形图，横断山脉以西的西部高原，有阿尔泰山、天山、祁连山、喜马拉雅山等诸多大山系分布。在东部中、高纬度地区有秦岭、太行山、长白山等高山分布，在这些山系的顶峰及其相邻地区，当由纬度和海拔高度决定的气候条件适合多年冻土的生成和保存时，则有多年冻土分布。

高山多年冻土的分布下界受纬度控制，随纬度的降低，多年冻土的分布下界升高。

（2）高纬度多年冻土

我国的高纬度多年冻土集中分布在我国东北的大、小兴安岭地区，是欧亚大陆高纬度多年冻土区的南部边缘。

大兴安岭为北东～南西走向，小兴安岭为北西～南东走向，两山呈“人”字形分布，其地势整体呈现西北高、东南低。大兴安岭东坡较陡峻，西坡则是较为平缓的丘陵山地，海拔高度在600～1400m；小兴安岭山势较平缓，海拔在500～800m。由于高纬度地区气温具有明显的随纬度升高而降低的特性，故该区多年冻土的分布和特征也具明显的纬度地带性。自南而北，随着纬度的升高，年平均气温降低，多年冻土的年平均地温降低，多年冻土厚度增加，分布面积逐渐增大，多年冻土的连续性由岛状分布，逐渐过渡为大片连续分布。