

汪双杰 王 佐 陈建兵 编著

青藏高原工程走廊 冻土环境与高速公路布局

QINGZANG GAOYUAN
GONGCHENG ZOULANG
DONGTU HUANJING YU GAOSUGONGLU BUJU

上海科学技术出版社





青藏高原工程走廊

冻土环境与高速公路布局

汪双杰 王 佐 陈建兵
编著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

!! 青藏高原工程走廊冻土环境与高速公路布局 / 汪双杰, 王佐, 陈建兵编著. —上海: 上海科学技术出版社, "#\$%."

!! ISBN &'% - ' - ()' % - *%"" - %

! ! . " 青...! #. " 汪... \$王... %陈...! &. " 青藏高原—冻土区—高速公路—道路工程—设计! ' . " U)\$". *+

!! 中国版本图书馆 CIP 数据核字("#\$')第"&)%+%号

青藏高原工程走廊冻土环境与高速公路布局
汪双杰 王 佐 陈建兵 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路' \$号! 邮政编码 "##"*(! www. sstp. cn)
!!!!!!! 印刷
开本 '%', \$#&"! \$/\$+! 印张 \$%."(! 插页)
字数)## 千字
"#\$%年+月第\$版! "#\$%年+月第\$次印刷
ISBN &'% - ' - ()' % - *%"" - %/U • (&
定价: \$*#. ## 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

本书针对青藏高原多年冻土区高速公路布局及其冻土环境耦合问题,开展工程容量评价和选线方法研究,提出青藏高速公路的建设模型和线位布局。主要内容包
括以下几方面:青藏工程走廊冻土环境特征和综合勘察技术;青藏工程走廊工程地
质评价方法及结果;气候变化背景下青藏工程走廊多年冻土演化规律预测模型及预
测方法;基于青藏工程走廊构筑物群的相互热影响和青藏工程走廊工程风险,以及
工程容量评价方法;多年冻土区公路路线选择的分层目标法、基本理论、选择层模
型、困难度模型和可靠度模型;青藏高速公路建设的影响因素,如线形指标、冻土地
质、干扰工程和生态环境等;青藏高速公路的建设模式;青藏高速公路的线位布局。

本书可供公路工程、铁路工程、冻土工程、岩土力学与工程等方面从事勘察、设
计、科研和教学的科技人员和研究生学习参考。



前言

京藏高速公路(G6)作为西藏地区唯一的进藏高速公路,已纳入国家“71118”高速公路网。随着公路建设形式从一般二级公路整治改建到新建高速公路的转变,多年冻土区高速公路建设技术研究的对象也将从关注单一道路工程本身转变为全工程走廊及其内部多线性工程所构成的复杂系统。青藏工程走廊内现有工程分布密集、相互作用影响显著,青藏公路经多次整治改建,路域环境破坏严重,冻土病害也依然存在,已不能满足高速公路升级改造的要求。因此,结合青藏两省区地缘政治特点与实际交通需求,考虑高原脆弱的生态环境与西藏生产、生活物资保障的交通组织等问题,科学规划高原多年冻土区青藏高速公路的建设方案,研究合理的路线走廊、合适的建设形式、恰当的建设规模以及适宜的技术标准是青藏高速公路建设必须首先解决的技术问题。

本书以作者多年来在冻土地区工程理论和技术方面的研究成果为基础,针对青藏高速公路线位布局问题,应用理论分析、数值计算、现场勘查等方法,开展工程地质评价、选线方法研究和工程容量评价,最终给出了青藏高速公路的建设模型和线位布局。本书研究对象为青藏高速公路,研究区域为青藏工程走廊,重点解决了青藏高速公路布局问题和青藏工程走廊工程容量问题。书中还介绍了以下创新成果:针对在高海拔高寒地区建设高速公路的重大技术需求,创新集成多年冻土区勘察和综合物探技术进行冻土勘察,揭示工程走廊范围内多年冻土时空分布规律;阐释多年冻土区高速公路布局及冻土环境效应,评价高速公路建设后青藏工程走廊工程容量的变化及其对冻土与环境的影响,检验和优化高速公路布局;研究分析高原冻土工程走廊已产生的次生冻融灾害,以及各类冻土结构物的工程病害,确定多年冻土

区青藏高原高速公路建设模式。

本书第1章由汪双杰完成,第2章由彭惠、于晖完成,第3章由牛富俊、林战举、彭惠完成,第4章由彭惠、陈建兵完成,第5章由汪双杰、张驰完成,第6章由王佐、邵广军完成,第7章由汪双杰、王佐完成。全书由汪双杰、王佐审定。

本书撰写过程中,金龙博士在资料和文献的整理分析方面做了大量的工作;路勋教授级高工、于晖博士提供了丰富的第一手青藏走廊地质勘察资料;单永森教授级高工在青藏高原高速公路布局研究方面提出了宝贵的建设性意见;中国科学院寒区旱区环境与工程研究所相关研究为本书提供了有益的借鉴。本书同时得到了诸多研究人员和现场技术人员的支持和帮助,在此对他们的辛勤劳动表示感谢。

目 录

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 中国多年冻土分布概况 / 2
 - 1.1.1 高纬度多年冻土 / 2
 - 1.1.2 高山多年冻土 / 4
 - 1.1.3 高海拔多年冻土 / 5
- !!!!!!
- 1.2 青藏工程走廊自然地理环境概述 / 7
 - 1.2.1 青藏工程走廊地理位置 / 7
 - 1.2.2 青藏工程走廊气候特征 / 7
- !!!!!!
- 1.3 国内外冻土工程与环境研究现状 / 8
- !!!!!!
- 1.4 青藏高速公路功能定位及必要性 / 18
 - 1.4.1 功能定位 / 18
 - 1.4.2 必要性和迫切性 / 24
 - 1.4.3 青藏高速公路建设面临的技术问题 / 30

第 2 章 青藏工程走廊工程地质评价与区划 / 35

- 2.1 青藏工程走廊工程地质特性 / 36

- 2.1.1 地形地貌 / 36
- 2.1.2 地层岩性 / 36
- 2.1.3 水文地质 / 38
- 2.1.4 地质构造与地震活动 / 38
- 2.1.5 特殊岩土与不良地质作用 / 39
- !!!!!!
- 2.2 青藏工程走廊冻土环境特征 / 39
- 2.2.1 多年冻土分布与发育特征 / 39
- 2.2.2 多年冻土区地质灾害发育特征 / 42
- !!!!!!
- 2.3 青藏工程走廊综合勘察技术 / 44
- 2.3.1 遥感技术在多年冻土勘察中的应用 / 45
- 2.3.2 综合物探方法在多年冻土勘察中的应用 / 53
- 2.3.3 多年冻土工程地质勘察新技术 / 63
- !!!!!!
- 2.4 青藏工程走廊工程地质评价 / 66
- 2.4.1 多年冻土工程地质评价方法 / 66
- 2.4.2 多年冻土工程地质评价结果 / 72

第 3 章 青藏工程走廊多年冻土演化规律与预测分析 / 87

- 3.1 **1957—2012** 年青藏工程走廊气候变化特征 / 88
- 3.1.1 年平均气温变化特征 / 88
- 3.1.2 年降雨量变化特征 / 89
- 3.1.3 1961—2010 年青藏高原气候特征的分析 / 90
- !!!!!!
- 3.2 **1994—2014** 年青藏工程走廊多年冻土演化规律 / 92
- 3.2.1 活动层厚度变化趋势 / 92
- 3.2.2 多年冻土地温变化趋势 / 94
- !!!!!!
- 3.3 冻土环境与工程活动的相互影响 / 96
- 3.3.1 地温差异性变化特征分析 / 96

- 3.3.2 上限差异性变化特征分析 / 101
- 3.3.3 青藏公路路基变形特征分析 / 103
- !!!!!!
- 3.4 多年冻土发展趋势与预测分析 / 107
- 3.4.1 多年冻土预测模型及其参数 / 107
- 3.4.2 多年冻土预测结果 / 112

第4章 构筑物群热干扰状况下的公路风险分析与工程容量评价 / 119

- 4.1 青藏工程走廊构筑物群相互热干扰 / 120
- 4.1.1 青藏工程走廊已建工程热影响状况分析 / 120
- 4.1.2 青藏公路热影响范围 / 120
- 4.1.3 青藏工程走廊已建工程热影响范围计算模型 / 124
- 4.1.4 满足青藏工程走廊线性道路相互热不干扰的最小安全距离 / 131
- !!!!!!
- 4.2 青藏工程走廊公路风险分析 / 135
- 4.2.1 多年冻土热融蚀敏感性预估模型 / 135
- 4.2.2 多年冻土地温、活动层厚度数值计算 / 137
- 4.2.3 多年冻土热融蚀敏感性分布预测 / 140
- 4.2.4 青藏高速公路工程风险区划 / 141
- !!!!!!
- 4.3 青藏工程走廊工程容量评估评价 / 148
- 4.3.1 青藏工程走廊“工程容量”评价方法 / 148
- 4.3.2 已建工程及青藏高速公路相互热影响(一级评价层) / 149
- 4.3.3 冻土地质、地形地貌、冻融灾害综合评价(二级评价层) / 149
- 4.3.4 自然环境保护及风沙灾害(三级评价层) / 160

第5章 多年冻土区公路路线选择分层目标法 / 165

- 5.1 路线选择分层目标法基本理论 / 166

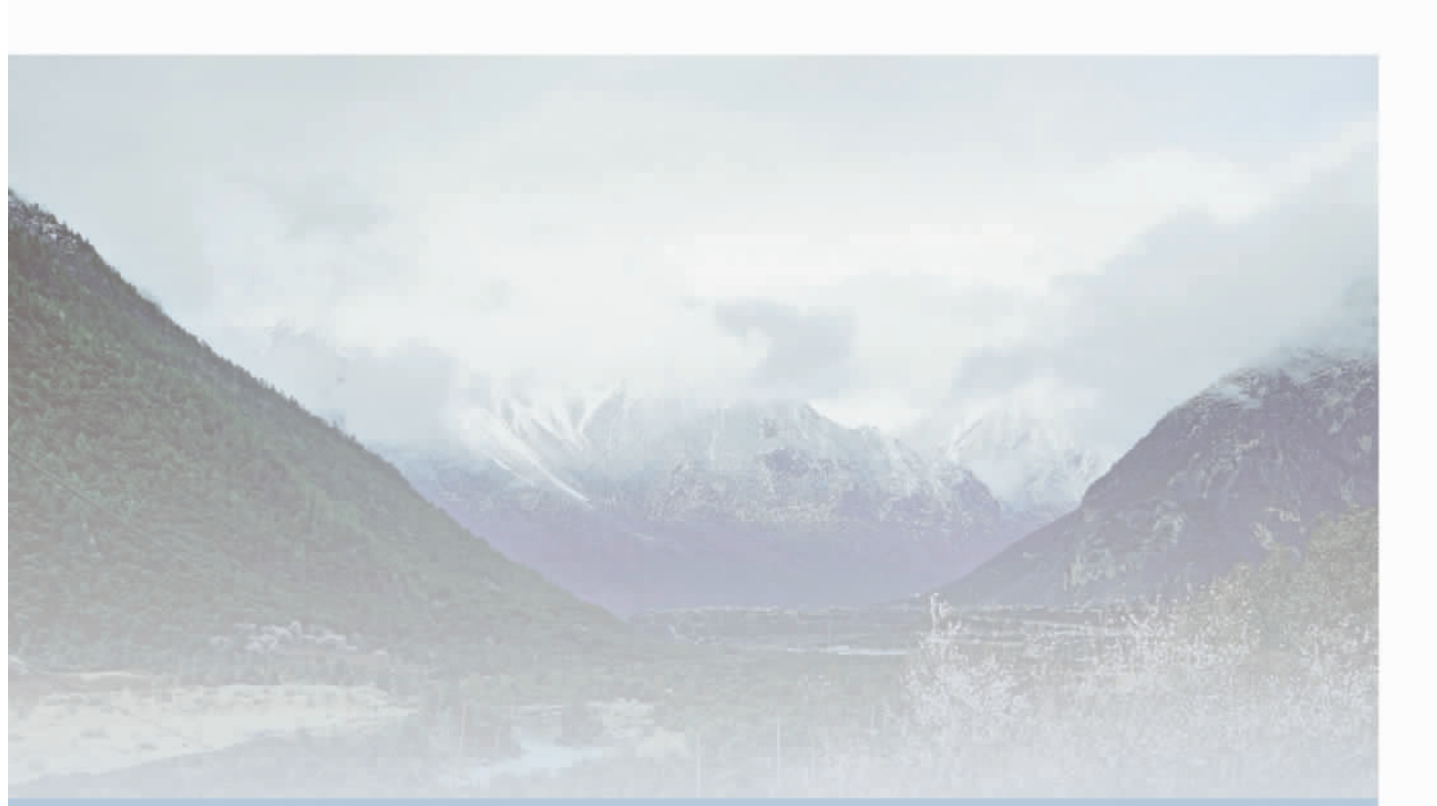
- 5.1.1 理论模型 / 166
- 5.1.2 划分依据 / 167
- 5.1.3 层次分析法确定权重 / 169
- !!!!!!
- 5.2 走廊带选择层模型 / 170
- 5.2.1 走廊带选择层模型技术路线图 / 170
- 5.2.2 影响因素分析 / 170
- 5.2.3 模型构建 / 171
- !!!!!!
- 5.3 基本线位层选线困难度模型 / 171
- 5.3.1 基本线位层选线模型技术路线图 / 171
- 5.3.2 影响因素分析 / 172
- 5.3.3 模型构建 / 173
- !!!!!!
- 5.4 最终线位层可靠度模型 / 176
- 5.4.1 最终线位层选线模型技术路线图 / 176
- 5.4.2 可靠度模型构建 / 176
- 5.4.3 方案优选方法 / 182
- !!!!!!
- 5.5 实例应用 / 186
- 5.5.1 项目背景简介 / 186
- 5.5.2 走廊带选择层路线方案 / 187
- 5.5.3 基本路线方案 / 188
- 5.5.4 最终路线方案 / 191

第 6 章 基于既有公路建设与运营状况的青藏高速公路建设模式分析 / 199

- 6.1 青藏高原既有公路技术状况调查与分析 / 200
- 6.1.1 青藏高原既有公路线形概况 / 200
- 6.1.2 青藏高原既有公路路基、路面概况 / 203
- 6.1.3 青藏高原既有公路构造物概况 / 209

- 7.3.1 西大滩至不冻泉段线位布局 / 245
- 7.3.2 不冻泉至楚玛尔河段线位布局 / 249
- 7.3.3 楚玛尔河至秀水河段线位布局 / 249
- 7.3.4 秀水河至雅玛尔河段线位布局 / 251
- 7.3.5 雅玛尔河至沱沱河段线位布局 / 258
- 7.3.6 沱沱河至开心岭段线位布局 / 260
- 7.3.7 开心岭至十二工区段线位布局 / 261
- 7.3.8 十二工区至温泉兵站段线位布局 / 263
- 7.3.9 温泉兵站至安多段线位布局 / 266

参考文献 / 271



第 1 章

绪 论

1.1 中国多年冻土分布概况

冻土工程与常规岩土工程最大的区别在于它坐落于冻土上(中)。而冻土是气候的产物,其中赋存着冰(厚层地下冰、含土冰层、富冰、饱冰、少冰等),极易受外界环境的影响。因此,这种与环境的“唇齿相依”的关系决定了冻土工程的易变性、敏感性、不稳定性和复杂性。

我国的冻土区包括多年冻土和季节冻土区,其分布面积约占全国陆地总面积的 68.6%。多年冻土的分布面积为 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占全国领土面积的 22.3%, 属于世界第三冻土大国。青藏高原是我国乃至世界高海拔多年冻土的代表,多年冻土面积达 $1.49 \times 10^6 \text{ km}^2$, 与极地相比,这里具有多年冻土厚度薄、地温高和太阳辐射强等特点,从而导致了高原多年冻土变化的特殊性。作为工程承载基础的多年冻土,其热稳定性差,对外界温度变化十分敏感,由冻融作用引起的不良地质现象,当它们威胁到建筑物安全运营和工程稳定性时,就演变为一种灾害,特别是在高含冰量、高温多年冻土地段,较小的工程热扰动就可能会引起冻土发生极大变化,会直接导致工程失稳。

世界上多年冻土的分布面积约占陆地面积的 23%, 主要分布在俄罗斯、加拿大、中国和美国的阿拉斯加等地。其中,我国的多年冻土分布面积仅次于俄罗斯($1\,000 \times 10^4 \text{ km}^2$)和加拿大($390 \times 10^4 \sim 490 \times 10^4 \text{ km}^2$), 约为美国冻土面积($140 \times 10^4 \text{ km}^2$)的 1.5 倍, 是世界上第三大冻土大国, 约占世界多年冻土分布面积的 10%。我国位于欧亚大陆东南部,就陆地(包括海南岛,不包括其他岛屿)而言,从北向南大致穿越了 35 个纬度(北纬 $53^\circ \sim 18^\circ$), 东西向为 61 个经度(东经 $135^\circ \sim 74^\circ$)。我国的地势西部高、东部低,辽阔的疆域和复杂的地形,使我国的冻土独具特色,其主要分布在东北大、小兴安岭和西部高山、青藏高原等地。中国东北的多年冻土位于欧亚大陆高纬度多年冻土区南缘,最南端达北纬 46.5° ; 青藏高原的多年冻土位于高纬度多年冻土南界以南,属高海拔多年冻土,是世界上中、低纬度地带海拔最高、面积最大的多年冻土区,占中国多年冻土总面积的 70%。根据多年冻土赋存状况,我国多年冻土可以划分为高纬度多年冻土、高山多年冻土和高海拔多年冻土等三个类型。

1.1.1 高纬度多年冻土

我国高纬度多年冻土主要分布在东北大、小兴安岭和松嫩平原北部,面积约 $39 \times 10^4 \text{ km}^2$, 介于北纬 $46.5^\circ \sim 53.5^\circ$, 海拔几百米至 1 000 m 左右。涵盖大兴安岭北部和中部的针叶林区、小兴安岭的针阔叶混交林区、松嫩平原森林草原区北部及内蒙古高原(呼伦贝尔—锡林郭勒高原)干草原、荒漠草原区北部。气候属于我国最寒冷的寒温带和中温带的北部。太阳总辐射和辐射平衡的分布大致与纬线相等,降水由沿海向内陆递减。

自南向北或由东南至西北,高纬度多年冻土分布及其特征具有明显的纬度地带性规律。依上述方向,多年冻土面积由 5%~20% 增加到 70%~80%;冻土温度由 0~-1.0℃ 下降到 -1.0~-2.0℃,最低为-4.2℃;冻土厚度由 5~20 m 增厚到 60~80 m,乃至超过 100 m;多年冻土类型由零星岛状多年冻土过渡为岛状融区多年冻土、大块多年连续冻土。由于地貌、冬季逆温、植被、松散层厚度差异等自然条件的影响,使多年冻土分布、形成、发育的上述纬度地带性规律受到一定干扰,使其在纬度地带背景上又展现出区域性或地段性差异。

在大块连续多年冻土地区,虽然多年冻土在水平及垂直方向上大体是连续的,但在不同地貌部位冻土分布及发育状况差异甚大。在苔藓发育、松散层较厚的山间谷底、沼泽洼地、低级阶地,多年冻土非常发育,冻土厚度可达 60~80 m,个别地段大于 100 m;相反,在树木稀少、松散层较薄的阳坡及半阳坡,一般冻土发育较差或者存在融区,冻土厚度一般小于 20 m;阴坡及半阴坡冻土发育状况介于上述两者之间。

在岛状多年冻土分布区,区域自然条件不同,冻土分布及特征亦有差别。在呼伦贝尔高平原上,冻土岛多存在于湖沼湿地边缘,冻土面积不超过总面积的 10%,冻土厚度为 3~5 m 至 10~15 m;在大兴安岭南部的东、西丘陵地带,冻土岛仅沿河漫滩、低级阶地呈断续条带状分布,冻土岛大小自南向北增大,冻土面积由 10% 增加到 30% 左右;在小兴安岭山地,冻土岛只分布于植被茂密及沼泽地的山间谷底或河漫滩,其面积为 20% 左右。高纬度多年冻土典型地貌如图 1-1 所示。



1-1

尽管不同地貌部位的冻土分布及发育状况差别很大,但是不论是北部或是南部,冻土分布及发育都有一个共同特点:低处冻土厚度较大、温度较低。这一特点对冻土退化过程亦有

制约作用。冻土退化过程为先阳坡,后阴坡;先高处,后低处;先山上,后谷底。高纬度多年冻土分布状况见表 1-1。

1-1

	($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)	(%)	(m)
多年分布(或断续分布)	<-5	-4~0	70~80	50~100
大片—岛状分布	-5~-3	-1.5~2	30~70	20~50
岛状和稀疏岛状及零星分布	-3~0	-1~3	5~30	

1.1.2 高山多年冻土

高山多年冻土主要分布在西部内陆如阿尔泰山、天山、祁连山等山系一定的海拔高度以上位置,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。由下界随海拔高度上升,冻土分布的连续性增大,由岛状至大片连续分布过渡,冻土温度随之降低、厚度随之增大,具有明显的垂直分布性。各山系气候、地理、地质条件不同,多年冻土分布的下界亦不相同。

阿尔泰山横亘于中、蒙、俄三国边境。我国阿尔泰山属该山脉的中段和西段,山脊从东南向西北升高,海拔高度一般 1 000~3 500 m,最高峰友谊峰 4 374 m。山麓地带冬季负温期 5~6 个月,中、高山地带长达 7~8 个月,绝对最低气温可达 -50°C 。由于受北冰洋气团的影响,降水丰富,并随高度升高降水量增大,低山区 300~400 mm,中山带 500~600 mm,高山带 800~900 mm。冬季降雪时,低、中、高山带积雪厚度超过 2 m,稳定积雪期一般 6~7 个月。阿尔泰多年冻土区位于高纬度欧亚大陆多年冻土南界附近,因受海拔高度的影响,南界一直延伸到北纬 46° 以南,属高纬度山地多年冻土,分布面积约为 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2 800 m 以上是大片连续多年冻土带,年平均气温 $-11.5 \sim -9.4^{\circ}\text{C}$,多年冻土厚度由数米增至 400 m。

在我国境内,天山自西向东延伸 1 700 km,跨越 21 个经度(东经 $74^{\circ} \sim 95^{\circ}$);南北宽 100~400 km,跨越 1~5 个纬度(北纬 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$),主要的山脊线一般都在海拔 4 000 m 以上,最高峰为西部的托木儿峰(7 443.8 m)。气温随高度的增大而剧烈下降,在海拔 3 000 m 左右,年平均气温约为 -2.0°C ;而在海拔 4 000~4 500 m 的山脊,年平均气温可达 $-12 \sim -8^{\circ}\text{C}$;3 000 m 以上负温季节可达 7~8 个月。雪线附近,年降水量达 500~700 mm 甚至 1 000 mm 以上,以固态降水为主,年降水量的 70%~90%都集中在 4—9 月。多年冻土分布总面积为 $6.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。高度是冻土分布的主导因素,下界最低海拔,阴坡为 2 700 m,阳坡为 3 100 m,天山对冻土分布的影响比青藏高原和祁连山显著。据初步统计,阴坡多年冻土下界一般比阳坡低 300~400 m,纬度增加 1° ,多年冻土下界下降 171.2 m;经度增加 1° ,多年冻土下界下降 10.6 m。在多年冻土下界附近,冻土温度较高($-0.2 \sim -0.1^{\circ}\text{C}$),冻土厚度不足 20 m,具有很大的不稳定