

中铁西北科学研究院有限公司

青藏铁路 冻土环境和冻土工程

张鲁新 熊治文 韩龙武 ◎ 著



人民交通出版社
China Communications Press

中铁西北科学研究院有限公司

青藏铁路 冻土环境和冻土工程

张鲁新 熊治文 韩龙武 ◎ 著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书从冻土和冻土工程的环境地质学属性介绍了青藏铁路冻土工程的研究方法、研究内容以及工程实践。全书共分6章,第1章为青藏铁路冻土环境,第2章为青藏铁路冻土工程次生环境,第3章为冻土环境和冻土工程研究方法,第4章为冷却地基思想和青藏铁路冻土工程,第5章为运营期冻土区线路变化和工程病害防治预警,第6章为青藏铁路冻土工程施工和建设管理技术。

本书可供冻土区工程建设勘察、设计、施工、运营管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

青藏铁路冻土环境和冻土工程 / 张鲁新, 熊治文,
韩龙武著. — 北京: 人民交通出版社, 2011.8
ISBN 978-7-114-09193-3

I. ①青… II. ①张… ②熊… ③韩… III. ①青藏高
原—冻土区—铁路工程 IV. ①U21

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第110811号

Qingzang Tielu Dongtu Huanjing He Dongtu Gongcheng

书 名: 青藏铁路冻土环境和冻土工程

著 作 者: 张鲁新 熊治文 韩龙武

责任编辑: 陈志敏 王 霞 付宇斌

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787 x 1092 1/16

印 张: 29.25

字 数: 736千

版 次: 2011年8月 第1版

印 次: 2011年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09193-3

定 价: 88.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

写在前面

中铁西北科学研究院走过了 50 年的艰辛历程,50 年的历史始终是和青藏高原的探秘、对青藏铁路的向往休戚相关的。在 50 年短暂而漫长的探秘之路上,有贡献一生的前驱者,有仍然雄心壮志、奋斗不已并谆谆教诲后来者的中流砥柱,更有前赴后继、孜孜不倦追求的年轻一代,他们都给了我们写作这本书的责任和动力。而促使我们最终开始写作的是中铁西北科学研究院建院(所)50 周年的特殊纪念日,作为在它的环境里成长的科学技术人员,感激的心情促使我们有责任和义务把中铁西北科学研究院青藏高原冻土研究、青藏铁路建设冻土工程研究的辉煌成就留存下来,因此写出这本书作为院庆的献礼。

一直不想写书,是因为我们对一些问题的认识还在探索、学习之中,写书在某种程度上可能是对某些问题形成定论,而对于冻土的认识我们始终认为都还是在探索,只不过探索路上的一些阶段性结论能够满足工程建设现阶段的需要而已,但是我们在冻土研究和实践的经历上具有的一些特殊性,我们对一些问题的思考和认识也许对读者有一定的借鉴意义。

我们中有曾经被冻土学界的师长们称作是承前启后者,我们感到这是一种责任;我们在青藏铁路建设中曾经被称作科学研究和工程建设之间的桥梁,这是一种义务。也许在别人看来写书是著书立说,可在我们来看是在书写历史——枯燥的数据和抽象的论述实际上跃动着无数前驱辉煌的身影,印记着无数默默无闻奉献者的艰辛。高原多年冻土研究是集体的很强的研究项目,任何的成功和成就都是在无数人奉献的基础上取得的,我们的写作仅仅是某种代言而已。

能够写成这本书,要感谢中铁西北科学研究院有限公司领导们的支持和鼓励,感谢师长们一直以来的教诲,感谢学生和朋友们支持,感谢中铁西北科学研究院 50 年的研究历史提供给我们的大量写作素材。

参与青藏铁路建设工作的经历,给予了我们得天独厚的条件。大量科学研究、工程设计、工程实践、建设管理的第一手资料,同行们在青藏铁路建设过程共同进行的科学实验及工程实践,都为写作提供了大量的基础性数据和宝贵资料,在此也一并感谢。

基于本书读者是具有一定研究和实践经历的科学研究人员和工程技术人员,书中对于冻土和冻土工程的一般基础性知识不再赘述,而侧重于从冻土和冻土工程的环境地质学属性介绍青藏铁路冻土工程的研究方法和研究内容以及工程

实践。

著书立说多是经典性理论和总结,供大家使用 and 接受,但是本书实际上是我们分别在数十年不同阶段从事地质勘察、科学研究、设计咨询、工程施工和建设管理工作中,学习冻土、认识冻土和研究冻土的认知方法的探索和体会,希望能够成为大家的一种参考,如果能够在某些方面具有一定启迪作用,我们就心满意足了。

很抱歉没有沿循以往做法请尊敬的学者或师长为本书作序,是因为我们不想把这次写作当作著书立说,而仅仅把这当作自己的体会,既然是体会,还是平常一些为好。

尽管很努力地在写,在思考,但是仍然很不满意,欢迎批评指正。

写下上面的话和下面的书作为一次汇报,向培养、帮助、给予我们的中铁西北科学研究院有限公司(前铁道部科学研究院西北研究所)50华诞表达真挚的心意。

作 者

2011 年 5 月

目 录

绪论	1
第1章 青藏铁路冻土环境	3
1.1 自然地理地质环境概述	3
1.1.1 气温和降水	3
1.1.2 地形地貌及构造	8
1.1.3 地表性状(植被、雪盖、硬结地表和水土流失)	11
1.1.4 太阳辐射	12
1.1.5 风力风速	14
1.2 冻土区气温	16
1.2.1 气温变化和气温较差	16
1.2.2 气温冻结融化能力	23
1.2.3 气温升高趋势及影响	27
1.3 冻土区地温	31
1.3.1 区域冻土温度特征	31
1.3.2 冻土地温变化趋势	40
1.3.3 地温变化与气温的关联性	46
1.4 多年冻土分布	48
1.4.1 铁路沿线多年冻土分布	48
1.4.2 融区分类和融区分布	50
1.4.3 不良冻土现象	51
1.4.4 多年冻土地温分区	53
1.4.5 多年冻土上限分布	59
1.4.6 多年冻土含冰量特征	60
1.5 冻土环境研究意义	62
第2章 青藏铁路冻土工程次生环境	63
2.1 多年冻土退化和工程活动	63
2.2 冻土工程水热环境变化	65
2.2.1 次生冻土环境	65
2.2.2 冻土区工程活动和热融现象	73
2.2.3 冻土斜坡水热环境	74
2.3 冻土工程影响下多年冻土上限变化	76
2.3.1 土体冻融过程和路基基底多年冻土变化	76

2.3.2 冻土环境和冻土工程影响下多年冻土上限变化	79
2.4 冻土工程次生环境的启示	84
第3章 冻土环境和冻土工程研究方法	86
3.1 工程地质和定位观测研究方法	86
3.1.1 冻土环境的工程地质勘察	87
3.1.2 冻土环境定位观测	92
3.1.3 不同设计阶段冻土工程地质勘察	96
3.2 冻土性质试验室和试验场研究	98
3.3 综合性实体试验工程研究方法	98
3.3.1 风火山试验路基	99
3.3.2 风火山试验路基研究成果	100
3.3.3 综合性实体试验工程研究的启示	116
3.4 验证性运营线路试验工程研究方法	117
3.4.1 验证性试验工程研究目的	117
3.4.2 验证性试验工程设置原则	117
3.4.3 验证性试验工程研究内容	118
3.4.4 试验工程研究成果的示范和指导作用	124
3.5 运营线路病害整治试验工程研究方法	126
3.5.1 运营线路病害整治试验工程选址	126
3.5.2 试验目的和试验设计原则	128
3.5.3 试验观测	130
3.5.4 数据分析原理	131
3.5.5 主要工程措施作用机理试验研究	133
3.5.6 试验研究成果评价和推广	135
3.6 冻土工程长期观测研究方法	136
3.6.1 冻土工程长期观测典型场地设置原则	137
3.6.2 冻土工程长期观测断面布置	137
3.6.3 冻土工程长期观测系统技术要求	138
3.6.4 冻土地温远程监测关键技术	141
3.6.5 冻土区工程长期观测系统控制和数据处理	145
3.6.6 数字路基平台	145
3.7 冻土环境和冻土工程的数值模拟研究	147
第4章 冷却地基思想和青藏铁路冻土工程	153
4.1 青藏铁路冻土工程设计思想	153
4.1.1 国内外冻土工程设计思想	154
4.1.2 冷却地基为主导的设计原则形成	157
4.1.3 冻土分异性变化和动态设计思想	160
4.2 冷却地基型冻土路基结构	162
4.2.1 片石气冷路基结构	162
4.2.2 通风式路基结构	188

4.2.3	热棒路基结构	200
4.2.4	遮挡式路基结构	244
4.3	保温型冻土路基结构	259
4.3.1	保温型路基结构工作原理	259
4.3.2	保温型路基结构应用形式	260
4.3.3	保温型路基结构应用效果	265
4.3.4	保温型路基结构补强措施	277
4.4	冻土区桥梁灌注桩基础	281
4.4.1	冻土区桩基础设计特征	282
4.4.2	冻土区桩基承载力特征	286
4.4.3	灌注桩桩周土体回冻规律	291
4.4.4	灌注桩回冻过程地温场变化	295
4.4.5	灌注桩回冻过程承载力试验	323
4.4.6	“以桥代路”工程措施应用原则	330
4.5	冻土区涵洞地基和基础	330
4.5.1	涵洞冻土环境变化特征	331
4.5.2	涵洞设计和涵洞结构类型	334
4.5.3	青藏铁路冻土区涵洞工程	338
4.6	冻土区的过渡段工程	338
4.6.1	桥路过渡段	338
4.6.2	路基填挖过渡段	342
4.6.3	路基冻融过渡段	344
4.7	冻土区隧道工程特征	345
4.7.1	冻土区隧道冻土环境特征	345
4.7.2	冻土区隧道洞内环境气温变化	346
4.7.3	隧道围岩冻融圈形成及危害	348
4.7.4	青藏铁路冻土区隧道设计特点和工程效果	351
4.7.5	冻土区隧道浅埋段渗水整治	355
4.8	冻土区房屋建筑工程特征	359
第5章	运营期冻土区线路变化和工程病害防治预警	362
5.1	冻土区线路变化和病害防治预警基础	363
5.1.1	冻土区路基工程温度场	363
5.1.2	桥梁工程地温场	363
5.1.3	涵洞工程地温场	364
5.2	青藏铁路运营期冻土区线路变化	364
5.2.1	冻土区路基地温场变化阶段	364
5.2.2	冻土区路基变形发展阶段	368
5.2.3	冻土区线路水热环境变化	372
5.3	青藏铁路运营期线路病害	374
5.3.1	线路病害判断	375

5.3.2	线路病害隐形因素	376
5.3.3	冻土区线路工程病害分类	378
5.4	冻土区线路病害预警防治	390
5.4.1	冻土区线路病害预警防治理论	390
5.4.2	线路病害潜在期控制方法	392
5.4.3	线路病害显现期整治对策	393
5.5	冻土区线路工程养护	395
5.5.1	冻土区线路工程养护内容	395
5.5.2	冻土区线路工程养护方法	396
5.5.3	冻土线路工程变化应急处理	397
第6章	青藏铁路冻土工程施工和建设管理技术	401
6.1	冻土区工程特殊施工技术和施工工艺	401
6.1.1	冻土区路基工程施工技术	401
6.1.2	冻土区桥梁灌注桩施工技术	411
6.1.3	低温环境混凝土施工技术	415
6.1.4	冻土区涵洞施工技术	420
6.1.5	冻土区隧道特殊施工技术	425
6.2	青藏铁路建设管理技术	429
6.2.1	冻土区施工组织设计	430
6.2.2	冻土区建设管理技术	439
6.2.3	青藏铁路冻土工程建设管理启示	445
参考文献		447
冻土环境和冻土工程图片		453
后记		459

绪论

冻土的神秘性是随着青藏铁路的建设进程和青藏铁路的通车运营逐渐揭示在广大民众面前的,而冻土的特殊性则是随着青藏铁路建设全过程中不断进行的科学研究,逐渐为科学技术人员所深刻认知,对于中国的冻土科学研究人员和工程技术人员,这一认知过程是通过几代人、几十年前赴后继的艰辛逐渐深化的。

冻土和冻土工程学科的特殊性,在很长一段时间被广泛强化,从而忽略了冻土和岩土、冻土工程和岩土工程之间的共同性。正确认识事物的个性和共性,区分矛盾的特殊性和普遍性,最终使我们认识到,冻土和各种类型的岩土一样,都是岩土工程领域的研究核心,冻土工程和其他岩土工程一样,研究目的都是保证建筑在各类岩土上面工程的安全。

冻土的特殊性主要是因为冻土的物理性质、化学性质和工程特性都与温度密切相关。常规土类的性质主要受其颗粒的矿物成分、密度和含水量的控制,这些因素一旦确定,土的性质就基本稳定。土的性质多表现为静态特性,冻土则不然,冻土特性除了与上述因素有关外,还受含冰量控制,而含冰量又直接与温度相关,它是随着温度的变化而改变的。气候的季节变化,引起冻土温度的变化,冻土的性质随温度呈现动态变化,因此,冻土的特殊性集中体现为它是一种对温度十分敏感而且性质不稳定的土体。

冻土和其他各类岩土的共同性表现在,它也是以变形和强度的变化来影响工程建筑稳定性的土体,岩土工程的基础研究方法和研究手段同样适用于冻土和冻土工程研究。

冻土研究主要涉及资源、材料、低温环境三类研究内容,在高原多年冻土区修建铁路中,冻土主要是作为一种材料和低温环境来进行研究的。

冻土作为铁路建筑物地基材料,主要研究在不同边界条件(温度、荷载)下,冻土的物理力学性质与建筑物的相互热、力作用以及冻土性质的改良。

将冻土作为铁路建筑的一种环境对待时,主要研究冻土与周围环境(大气和下垫面)的热、质交换及相互作用。

冻土作为建筑地基时,工程建筑区别于非冻土区的特点是:

(1)冻土为四相体系,其中冰的形成与存在,一方面起着土体颗粒的胶结作用,从而使冻土的强度比非冻结土的强度大的多;另一方面,冰是冻土土体的重要组成成分,可以改变土体的工程性质。

(2)地下冰的存在不但改变了土体的工程性质,地下冰作为冻土体的组分,其含量、部位及与土颗粒成分的组合关系,都极度地扮演了独有角色。时而与土颗粒组成高强度的土体,时而又以自身的特点表现出冰的性质,使冻土体成为多变特性的地基土。

(3)冻土体对温度具有特殊的敏感度。随着土体温度状态的变化,冻土体具有不同的工程特性,具有明显的随温度变化的函数关系,且随海拔高度、纬度、地质地理环境变化存在地温带的分布特征。

(4)冻土体具有异常脆弱的特点,地质地理环境的变化,特别是人类的热干扰将使冻土体产生强烈的变化。

(5)冻结与融化使地基土产生冻胀与融沉,随气候变化而周而复始地改变着地基土的工程性质,此两大问题是冻土区独特的工程特性。

(6)冷生冻土现象是冻土区形成区别于非冻土区的特殊不良地质现象,具有明显的随气候与热干扰而变化的特点。

冻土本身是自然地理和地质环境长期作用产生的处于相对平衡状态下的综合地质体,地质环境产生它,地质环境也在改变它,冻土的根本属性在于它的环境属性,即源于环境,受制于环境,最终也得益于环境。

青藏铁路建设冻土工程活动的实质,就是在改变着多年冻土的生存环境,研究冻土、改造冻土和利用冻土的最终结果是要这种生存环境的改变向着有利于冻土生存,有利于建筑物的稳定的方向发展。在这个工程活动的全过程中,环境本身也处在动态变化中,给冻土工程的研究、改造带来更多的不确定性,使这种研究和实践具有不可预见性,这正是冻土工程成为青藏铁路修建的核心技术难题的根源。

源自环境地质学理论的思路,冻土和冻土工程主要研究由于冻土工程活动引起的冻土环境的变化,以及这种变化所造成的影响。其目的是为了改造、利用和保护冻土环境以达到冻土工程稳定的目的。这种研究以其研究领域的广泛性、研究内容和方法的综合性、预测性和利用冻土环境的能动性而区别于传统的工程研究。回顾青藏铁路冻土工程及与之有关的研究,基本可以认为所有研究都是在查明冻土环境地质作用的基础上,探索冻土工程与冻土环境的相互作用,从定性分析到定量评价,由静态认识到动态观测,着重研究冻土环境的演化和它的发展趋势,提出合理的防治措施,为冻土工程设计提供科学依据。

作者从环境工程地质学理论角度分析,冻土是冻土工程存在的一种环境,冻土工程是冻土和自然环境进行能量交换和能量平衡的一种介质体,冻土工程结构上的特殊性使其传递能量、转换能量的效率和效果受控于自然环境。青藏铁路的冻土工程研究和建设实践究其本质讲,就是研究冻土环境、冻土工程环境、冻土和冻土工程受环境影响的过程及过程的控制,最终影响冻土工程的效果。

冻土环境和冻土工程之间还是一种依附和互动关系,冻土工程有时在强化冻土环境的作用,有时在弱化冻土环境的作用。冻土工程措施选取得当,冻土环境对冻土退化的作用被弱化,反之则被强化。这也是冻土区冷却型工程结构和保温型工程结构的区别所在。

冻土和冻土工程问题的环境属性决定了它的研究思路是把二者放在环境变化的背景下进行研究,冻土问题的复杂性和分异性决定了它的研究方法是以实体工程试验观测研究和冻土环境定位观测研究为主,理论的研究和预测都必须建立在冻土环境长期观测数据和冻土工程实体试验数据基础之上。

青藏铁路冻土区工程建设前后几十年的研究、勘察设计、工程施工和建设管理实践就是遵循这样的研究思路和研究方法取得了成功和进步。

第 1 章 | 青藏铁路冻土环境

环境工程地质学理论认为,任何研究主体的周围条件和状态都可以认为是其存在的环境。冻土本质上也是冻土工程的一种环境,而冻土和冻土工程对于自然环境来说,也可以是一个综合主体。因此,自然环境成为这个主体,同时也是冻土存在和发育的原生环境和原生动力。

冻土,是历史自然地质环境长期作用形成的综合地质体,这种历史自然地质环境主要指区域气候条件、地质构造、地表水、地下水、岩性、地貌、植被、雪盖等形成的综合自然地理地质环境,环境条件的动态变化使冻土处于一种动态变化和局地动态平衡状态。

冻土变化主要受环境气候条件控制,同时对环境气候条件的变化进程产生反馈,这种反馈的直接响应就是冻土层地温升高,活动层厚度增大,地下冰融化,多年冻土厚度变薄,与大气之间的水热交换状况随之发生深刻的变化,从而对寒区气候、水文水资源、生态和环境演变产生重大影响,使冻土工程依赖的环境条件发生复杂的不确定性变化,这些最终对冻土工程的稳定性和可靠性产生重大影响。

冻土环境问题包括冻土周围的自然环境,还包括冻土本身两个大的层次。冻土周围自然环境分为以下几个层面:影响冻土发育的能量来源因素,导致冻土发育差异性的局部因素;冻土本身包括的温度环境、活动层(即季节融化层)范围、水分变化等。

1.1 自然地理地质环境概述

青藏铁路穿越青藏高原中低纬度地区,地势高耸,平均海拔在 4000m 以上,线路中部地区海拔高程均在 4500m 以上。冻土地区 $-3.0 \sim -7.0^{\circ}\text{C}$ 的年平均气温,为多年冻土的发育提供了必要的环境温度条件。

青藏铁路在地质构造上,自北向南穿越东西走向的主要构造区(带)有:昆仑山褶皱带、可可西里—巴颜额拉山褶皱带、青南—三江—羌塘构造区、藏北构造区、喜马拉雅褶皱带。其间还可以细分为 15 个主要地貌单元。不同的地质构造和地形地貌以及区域气候条件成为多年冻土差异存在的重要环境因素。

在不同地质构造单元和地形地貌单元,水文地质条件、岩性、地表性状导致了冻土在环境气候条件下发生变化的分异性。

1.1.1 气温和降水

环境气温是冻土存在的能量条件,青藏铁路沿线气温受到纬度和海拔高度的影响。在经度和海拔相同的情况下,气温随纬度的增加而降低;在相同的经度和纬度下,气温随海拔的升高而降低。冻土区气温随着海拔的升高,气温逐渐降低,呈现明显的垂直地带性。观测和研究

证明,海拔每升高 100m,年平均气温下降 0.5℃左右。表 1-1 列出了青藏铁路沿线多年冻土区代表性地段的多年平均气温观测数值。

青藏铁路沿线多年冻土区各地段多年平均气温表 表 1-1

地 点	纬 度	海拔高程(m)	年平均气温(℃)	备 注
西大滩	35°44′	4350 ~ 4500	-2.0 ~ -3.5	实测
昆仑山	35°40′	4800 ~ 5000	-3.5 以下	实测
楚玛尔河	35°20′	4480 ~ 4500	-6.2	实测
五道梁	34°15′	4610	-6.5	实测
北麓河	34°27′	4620	-6.6	实测
沱沱河	34°20′	4700 ~ 5100	-4.4	实测
风火山	33°50′	4500 ~ 4700	-6.6	实测
通天河	33°30′	4800	-4.4	实测
布曲河谷地	33°10′	4800	-4.1	实测
温泉兵站	33°10′	4890	-4.7	温泉融区
唐古拉山	32°57′	4900 ~ 5300	-6.4	估算
安多谷地	32°10′	4780 以下	-3.5	安多融区

注:资料摘自《青藏公路沿线多年冻土的温度和厚度》(李树德,1982)。

1) 气温

青藏铁路沿线多年冻土区地处大陆内部,远离海洋,除唐古拉山以南部分地区受海洋性气候影响和北部柴达木内陆干旱气候影响外,绝大部分高原腹地具有独特的冰缘干旱气候特征,且随海拔并高而呈现明显的气候垂直分带性。区内寒冷干旱,气候多变,四季不明,空气稀薄,气压低,一年内冻结期长达 7 ~ 8 个月(每年 9 月至次年 4、5 月)。蒸发量远大于降雨量,高山地区降水以雪、霰、冰雹为主,广阔的高平原上则以降雨为主,60% ~ 90% 的降水在正温季节,冬季少雪,除个别的高山地区外,雪盖一般均不稳定且厚度小。风向以西北、西风为主,大风(≥8 级)多集中于 10 月至次年 4 月间。

据高原上各气象站资料,沿线年平均气温为 -2 ~ -6.9℃,7 月份气温最高,平均为 6.5 ~ 8.1℃,1 月份(有时 12 月份)气温最低,平均为 -14.5 ~ -17.4℃,年平均气温较差为 15 ~ 26℃,极端较差不超过 50℃。年内日平均较差为 10 ~ 19℃,极端日较差为 35℃。与我国东北多年冻土区相比,本区具有年较差小,日较差大的特点。

沿线大气透明度良好,云量少,太阳直射强,总辐射量大,日照时数较多,一般为 2600 ~ 3000h/a。高原上海拔 5000m 以下地区辐射平衡年总量介于 60 ~ 80kal/cm² · a,成为全国辐射量最大的地区,而且各月总量均为正值。由于高原风大,每年感热通量占辐射平衡总量 60% ~ 80%,潜热通量占 20% ~ 30%,这两项消耗了地表热量的绝大部分。海拔 5000m 以下地表所获辐射量的绝大多数(98.8%)通过湍流交换以感热或潜热的形式向大气逸散,用于土壤增温和冻土融化的热量仅占 1.2%,使得高原上近地面气温并没有显著升高,而地下土层处于低温状态。

沿线跨越了三个较大的自然气候区,即昆仑山以北干旱气候区、昆仑山至唐古拉山间的高原干旱气候区和唐古拉山以南高原亚干旱气候区。

干旱气候区(昆仑山以北地区),以格尔木的气候特征为代表;高原干旱气候区,自昆仑山区逐渐进入青藏高原腹地,海拔升为 4500m 以上,气温逐渐降低,降雨量逐渐增加,蒸发量逐

渐减少,气压降低为 560~580mb,相对湿度增加到 49%~52%,年平均风速为 3.9~4.1m/s;唐古拉山以南高原干旱气候区气候特征略向温暖湿润方向转变,气压为 587~652mb,相对湿度增加到 54%,年平均风速为 2.0~4.1m/s,总的来看,具有高寒半干旱一半湿润的气候特征。但由于沿线地域辽阔,高差悬殊,高原上的山区与高平原相比仍有明显差异。

昆仑山、可可西里、风火山、唐古拉山等山区,年平均气温在 -6°C 以下,10 月至次年 5 月份长达 8 个月的时间为负温月份,降水量多集中在 6~9 月份,年蒸发量大于 1300mm,风速大,风向多变。

青藏高原腹地高平原区,年平均气温为 $-4\sim-6^{\circ}\text{C}$,历年的 10 月至次年 4 月为负温月份,而各月的平均最低气温在 -10°C 以下。年降雨量在 300mm 左右。历年 9 月份至次年 5 月份多西风,6~8 月份多偏北风。最大风速达 30~31m/s,多出现在 11 月至次年 3 月份。

唐古拉山以南的安多谷地,地势虽然很高,海拔在 4700m 以上,但总的气候特征略向温暖湿润方向转变。年平均气温为 -2.9°C ,负温月份为 10 月至次年的 4 月。年降雨量为 428.4mm,多集中在 6~9 月份,其中 7、8、9 三个月的降水量占全年总降水量的 80% 左右,年蒸发量为 1782.9mm,年平均风速为 4.3m/s。

青藏铁路经过的高原地区的年平均气温大部分在 0°C 以下,最低可达 -7.5°C ,而多年冻土地区的年平均气温则多在 -2°C 以下。一年中 6~9 月份的平均气温为正值,10 月至次年 5 月气温为负值。七月份平均气温最高,约为 $5.0\sim6.0^{\circ}\text{C}$,1 月份平均气温最低,约为 $-16.0\sim-20.0^{\circ}\text{C}$ 之间。一天当中白天气温增温快,而日落后气温逐渐降低,日温变化幅度大。晴天最高气温出现在 15~16 时,16 时后开始降低,最低气温值出现在凌晨 2 时左右。即便是平均气温为正值的月份出现负温的天数也很多,因此高原有“长冬无夏”之说。

2) 降水

水的传热特性使之成为冻土层以及冻土工程散热的重要影响因素。大气降水时间影响冻土工程结构的散热性能发挥,降水量最终影响季节融化层中水分状况,也将影响冻土工程散热效率。青藏铁路沿线冬季降雪少,且由于风力风速的原因鲜有积雪,因此,对冻土工程散热影响有限。但是冻结季节的降雪对多年冻土的形成有抑制作用,融化季节的降雪对多年冻土的形成有促进作用。降水形成的地表径流和渗流,对多年冻土层形成热侵蚀,导致在某些地段逐渐形成渗透融区。

青藏铁路沿线多年冻土地区,位于中低纬度带的欧亚大陆腹地,大陆性气候特征极为明显。与同纬度的其他地区比较,由于海拔高,高空受西风环流的影响,湿润的海洋气流难以到达该区。同时,由于喜马拉雅山的阻挡,孟加拉湾的暖湿季风也难以深入该区,形成了干旱、寒冷的气候。大部分年降水量在 250~400mm 之间,南部边缘地区可达 500mm。

降水主要集中在暖季的 6~9 月份,占全年降水的 80% 以上,降水主要以冰雹和雪等固态降水为主,全年固态降水天数是降雨的两倍。有时一天数次,受局部环境因素影响,降水差异性很大,这表现在降水范围不大,降水区域不连续的地区,且经常出现忽而雷雨大作,冰雹倾泻,忽而阳光普照的现象。冻土区冬季气候虽然严寒,但降水极少,加之风的作用,冬季基本不积雪,这和高纬度寒区形成明显的差别。在东北大小兴安岭地区降雪积雪主要集中在最寒冷的冬季,而高原多年冻土区的降雪主要集中在暖季,此时气温逐渐回升,太阳辐射强烈,蒸发量大,降雪很快就融化蒸发,雪盖薄,积雪时间短暂。

冻土区年蒸发量在 1000~1500mm 之间,降水量与蒸发量比值大约为 1:5 左右,最大蒸发月集中在 6~9 月份,占全年的 1/2 左右。

青藏铁路沿线冻土区典型地段五道梁、风火山、沱沱河降水量见表 1-2 和表 1-3,青藏铁路沿线主要气象站降水量特征值见表 1-4。

五道梁、沱沱河年降水量表 (mm) 表 1-2

地 区	年 份									
	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
五道梁	215.2	287	295.3	294.4	240.0	299.4	308.5	244.2	231.6	260.5
沱沱河	350.5	278.7	325.3	224.9	321.9	245.8	318.9	260.6	209.6	241.3
地 区	年 份									
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
五道梁	288.3	279.3	206	314.6	255.4	282.3	316.7	186.1	209.0	229.9
沱沱河	331.5	246.3	250.9	389.1	300.2	261.3	291.6	250.7	180.5	269.1

风火山年降水量表 (mm) 表 1-3

年份	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
降水量	304.1	382.2	385.8	299.4	207.8	370.9	256.7	311.1
年份	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
降水量	372.6	477.6	289.6	291.2	370.6	382.0	229.9	280.6

青藏铁路沿线主要气象站降水量特征值 (mm) 表 1-4

站 名	统计年限	年平均降水量	最大值	出现时间	最小值	出现时间
格尔木	1956—2002	40.2	98.7	1967	11.4	1965
五道梁	1959—2002	271.0	407.0	1989	136.3	1984
风火山	1976—2005	310.2	477.6	1989	191.7	2001
沱沱河	1959—2000	272.4	459.4	1985	162.7	1994
安 多	1966—2002	426.8	595.6	1971	289.3	1972
那 曲	1955—2002	422.5	590.4	1980	291.1	1973

3) 水文地质环境

多年冻土的水文地质条件,是由区内的气候特征、地形及地貌条件、地层岩性及地质构造特征等多种自然因素综合作用所形成的。

(1) 高耸的昆仑山、唐古拉山将青藏铁路冻土区分割成三个大的地下水汇集流域区,各区的水文地质条件由于地层、岩性、构造特征、地形地貌条件的不同,其差异性较为明显。

昆仑山以北属格尔木河谷地下水流域区,水文地质环境受纬向构造体系控制,呈东西展布的山体与谷地相间,山区基岩裂隙发育,谷地内又被松散沙砾石充填,地下水径流强烈,矿化度低,水质好。

昆仑山至唐古拉山之间,属长江源头高平原地下水流域区,一系列低山与断陷盆地相间,构成了波状起伏的高平原,二叠系含煤地层发育,地下水补给贫乏,径流迟缓,矿化度较高,水质较差,对圪工多具硫酸盐侵蚀性。

唐古拉山以南属扎加藏布地下水流域区,水文地质环境受“歹”字形构造体系控制,呈一

系列阶梯状山脉,主要含水岩系为中侏罗纪的碎屑岩和碳酸岩,地下水径流强烈,水质较好。

(2)自昆仑山北麓西大滩至安多间广泛分布的片状多年冻土,把沿线分割成几个不同的水文地质单元。多年冻土区内的水文地质条件,又具有它本身的特殊性。

冻土区具有一定厚度的多年冻土,形成一个较完整的统一的隔水层,出现了冻结层上水、冻结层下水、融区水等几种特殊的地下水类型,并且都有各自的分布特征和富集规律。

青藏铁路冻土区地下水的主要补给来源为大气降水、融雪水、冰川消融水。地表水在多年冻土区汇集成溪流,在径流过程中补给多年冻土区的层上水以及非多年冻土区的地下水。而多年冻土层下水,由于冻结层的存在,不可能直接获得地表水的补给,主要通过河湖融区及冰川底部融区接受层上水或地表水补给,故其补给量较少。冻结层下水,主要通过融区排泄,径流缓慢。冻结层下水的天然露头在寒季形成冰锥或冻胀丘。

(3)不同的构造体系,严格控制了区域水文地质条件,由于强烈的构造活动,形成了隆起的山地、断陷谷地及盆地。在基岩山区褶皱裂隙的组合部位往往形成良好的蓄水构造。一般水质较好。新生代早期断陷盆地内,冰水沉积砂砾石覆盖较薄,地下水主要赋存于新生代早期湖相含盐地层内,水质较差。在断陷谷地内,地下水主要赋存于新生代晚期巨厚的冰水沉积砂砾石层中,水量丰富,水质较好。

4)地下水分类

在多年冻土区,由于多年冻土层的存在,使地下水的埋藏条件和分布规律更加复杂化。冻土地区的地下水可分为:冻结层上水、冻结层下水和融区水几种特殊的地下水类型。

(1)冻结层上水,是高原多年冻土区分布较为广泛的一种地下水类型,它的水位不稳定,相态不固定,埋藏条件也随季节而改变,其含水层厚度受冻土上限的控制,水量大小也随季节而变。青藏铁路冻土区多年冻土上限埋深一般为2~4m,含水层厚度较小,一般仅1~2m左右,由于径流及垂向蒸发的影响,其分布受微地形控制较为明显,在地势较高处则基本疏干,不能形成统一的含水层。每年4月初地表开始解冻,随着土中冰体的融化,这一含水层便在活动层中逐渐形成,9月底或10月初融化深度达到极限,含水层厚度也最大。10月初地面开始冻结,随冻结深度逐渐加深,直至次年1月土层完全冻结并与多年冻土衔接起来而结束。总之冻结层上水基本为潜水类型,含水层薄且不稳定,其埋藏和分布状况主要决定于季节融化层的分布特征和多年冻土融化底板的形状。

(2)冻土层下水,是多年冻土区内地下水的一种主要的赋存形式。这种类型的地下水相态稳定,一年四季都处于液态。除西大滩地区多年冻土的边缘地带不具承压性外,一般都具有承压性,且有些地方可以流出地表。多年冻土层为其承压顶板,多年冻土层的厚薄直接改变着冻结层下水的径流状态和赋存规律。冻结层下水的补给条件困难,径流条件也较差,水质好坏相差悬殊,水量贫富极不均匀。根据含水介质的不同,主要有孔隙水、孔隙裂隙水、裂隙水、岩溶水等四类。

孔隙水主要赋存于西大滩、温泉、扎加藏布断陷谷地下部砂砾层孔隙中及楚玛尔河、沱沱河、通天河等高平原及盆地中半成岩粉细砂岩孔隙中。孔隙裂隙水主要赋存于可可西里、风火山及其间高平原与盆地下部的泥岩、砂岩、砾岩孔隙裂隙中。裂隙水主要赋存于昆仑山、唐古拉山构造裂隙中。岩溶水主要赋存于楚玛尔河高平原、沱沱河盆地及唐古拉山山麓泥灰岩及碳酸盐岩岩溶裂隙、孔隙中。

(3)由于融区的成因类型复杂,融区水可以发育在任何地貌位置和构造单元上,并包含了通常条件下的各种地下水的类型。有些融区(如河流融区),一个融区就可以跨越山区、盆地、

平原等数个地貌单元和构造单元,可以穿过多种岩层的分布区,可以包含着各种地下水的类型。考虑融区地下水的分布特征、埋藏条件以及水力性质,融区水可分为片状、带状、点状三类。片状融区水主要赋存于一些大型湖泊底部;带状融区水主要赋存于楚玛尔河、北麓河、沱沱河、布曲等较大河流的河床下部及河谷两侧,呈带状发育;点状融区水主要赋存于断裂带的交汇处、温泉出露点和岩溶发育地区。

5) 地下水补给、径流、排泄条件

区内地下水的补给、径流、排泄是受区内的地质、构造、地貌、气候等自然条件的综合作用所制约的。

区内地下水的补给来源主要为大气降水,由于海拔高,跨越了不同纬度,降水量随海拔高度的增加而增大,纬度越低也略有增加的趋势。本区气候严寒,大气降水多以冰雪的形式而得以保存,当暖季融化后,成为地表水及地下水的主要补给来源。位于本区南北两侧的昆仑山及唐古山为本区地表水流域及地下水流域的分水岭,因此,本区地下水可分成三个大的自然汇流区域。

(1) 昆仑山以北地区(DK957+766~DK983+800)是。此区是受纬向构造体系控制的山脉与谷地相间地形,地势由南向北急速变低。在山区,地下水接受融雪水及大气降水以及冰川底部融化水的补给,聚流于断裂带,并向谷地汇集,再沿着谷地顺地势由南而北流动。在径流过程中,往往发生地表水及地下水的相互转换。该区地下水补给充沛,径流强烈,排泄条件较好。

(2) 昆仑山至唐古拉山之间(DK983+800~DK1419+600)。此区为一系列的低山与断陷盆地及高平原相间地形。唐古拉山北麓至雁石坪一带的高山区,降水量充沛,山体上升强烈,山势由南而北迅速变低。此带山区主要受“歹”字形构造体系控制,地表水文网及地下水文网主要呈北西向展布。山区冻结层上水,接受大气降水及融雪水补给后,并向溪流汇集注入布曲,而山区冻结层下水主要为现代冰川底部冰川融水以及少量的山间湖塘水补给,沿着北西向地下水文网向谷地汇集。在温泉谷地两侧山区地下水则汇集于谷地,而温泉一带至雁石坪布曲两侧山区地下水则通过布曲融区补给河水。此段地下水补给充沛,径流通畅,排泄条件良好。

盆地之间低矮的山区,山体小,降水量也相对减少,冻结层上水接受大气降水的补给,顺地形向低地汇集,构成山间湖塘,然后通过融区补给冻结层下水或向山间溪流汇集,或以山前沼泽形式补给盆地冻结层上水。山区冻结层下基岩裂隙及孔隙裂隙水,则通过融区获得层上水及大气降水的补给,局部通过北西向断裂带获得邻区冻结层下水侧渗补给,补给来源贫乏,排泄条件差。

(3) 唐古拉南麓至安多间(DK1419+600~DK1513+753)。这一带大气降水充沛,地形高差大,地表水及地下水文网受构造带的控制,冻结层上水接受大气降水补给,冻结层下水主要接受扎加藏布曲上游一带湖塘水的补给,此区冻结层上水及层下水径流通畅,排泄条件良好,水质较好。

1.1.2 地形地貌及构造

宏观地质构造板块之间的碰撞、挤压作用,形成了青藏高原山地与断陷盆地相间分布的特殊地貌特征。昆仑山至唐古拉山之间的多年冻土区海拔在4400m以上,宏观上属高准平原地貌。除昆仑山北坡地势较险外,其余山系多呈拱形起伏,山顶浑圆,相对高差不大,一般均小于300m。