

“十三五”国家重点图书出版规划项目



上海出版基金项目
Shanghai Publishing Fund

丝绸之路经济带——沙漠地区风积沙路基研究与应用

风积沙路基公路设计、施工与防沙

李志农 陈 杰 王 翠 等 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书对沙漠地区公路修筑技术所开展的科研成果和工程实践经验进行了较为全面的总结。全书共6章,内容包括国内外沙漠公路发展概况,中国沙漠分布特征及工程特性,公路选线原则及技术要点,路基、路面、防沙等方面的设计及施工技术,最后结合实际工程对沙漠公路修筑技术的工程应用进行了系统总结。

本书可供从事公路设计与施工的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风积沙路基公路设计、施工与防沙 / 李志农等编著.

—上海:上海科学技术出版社,2018.1

(丝绸之路经济带:沙漠地区风积沙路基研究与应用)

ISBN 978-7-5478-3794-8

I. ①风… II. ①李… III. ①沙漠带—公路路基—路基工程—设计 ②沙漠带—公路路基—路基工程—道路施工 ③沙漠带—公路路基—路基工程—防沙 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 275162 号

风积沙路基公路设计、施工与防沙

李志农 陈 杰 王 翠 等 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71号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 889×1194 1/16 印张 20.25 插页 4

字数 500 千字

2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-3794-8/U·51

定价:150.00 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

2013年9月,国家主席习近平出访中亚提出共建“丝绸之路经济带”的重大倡议得到了国际社会的高度关注。为了落实“一带一路”倡议,加强与相关国家互联互通,促进边疆地区的繁荣与发展,包括新疆在内的我国广大西部地区基础设施建设得到了国家的高度重视,公路、铁路运输快速发展,骨架网络建设取得了系列成果。

然而新疆地区地质情况复杂,气候环境变化大,多沙漠,风积沙分布广泛,高品质筑路材料匮乏。外运筑路材料运距远、造价高,为解决种种矛盾,如何就地取材,趋利避害,同时又能够经济、优质地做好工程建设,使得采用风积沙填筑路基的研究显得尤为必要。

目前系统介绍利用风积沙作为填料填筑高速公路路基工程的出版物较少,本丛书以近年来多项沙漠地区风积沙路基工程研究和实践为基础,从风积沙路基材料性能、设计参数、施工方法和检测手段等方面首次对沙漠地区高速公路风积沙路基工程进行了全面、系统的总结,尤其在风积沙长期使用性能、风积沙易溶盐含量快速测定方法等关键技术的研究和应用方面填补了国内空白。丛书的出版为推广应用风积沙填筑公路路基提供了重要的参考资料。

丛书分为《风积沙公路路基性能研究》《风积沙路基公路设计、施工与防沙》以及《风积沙路基公路建设关键技术与应用》三分册。新疆维吾尔自治区交通运输厅原总工李志农同志担纲主编了前两分册,李志农同志是交通运输部专家委员会成员,先后主持和参与了沙漠地区风积沙利用系列课题研究以及多条沙漠地区高速公路的建设管理工作,在风积沙和盐渍土研究与运用方面有较高的造诣。第三分册的主编过震文同志以援疆干部的身份主持了穿越沙漠边缘区和农灌区的S215线三莎高速公路建设项目,他和他的团队在建设期间攻克了一系列在盐渍土和软弱土地质条件下大体量采用风积沙填筑路基修筑高速公路的技术难题。

丛书既有先进技术的推广应用,又有施工经验的科学总结,对指导西部沙漠地区公路建设具有较大的意义,也为“丝绸之路经济带”推进重大基础设施建设提供了重要技术依据。

郑健龙

2016年12月

近年来,随着我国经济及社会事业的快速发展,沙漠地区公路建设也取得了长足的进步,建设里程迅速增加。与此同时,围绕沙漠公路建设技术的研究和工程实践也取得了丰硕成果。本书是作者及其合作者近30年来从事沙漠地区公路建设技术研究、工程实践的成果及经验总结。其中,参与课题研究的有彭世古、金昌宁、雷加强、徐新文、唐勇、李生字、刘利华、艾力·斯木吐拉、宁江波、楚虹、陈忠达、窦明健、刘照斌、谢海巍、韩树峰、张永华等,本书亦凝聚了他们的心血和智慧。同时在撰写本书过程中,也充分借鉴了其他学者和工程技术人员的研究成果与实践经验。

全书共分为6章。第1章风积沙分布及其工程特性。主要对我国沙漠的地理分布、气候特点以及主要自然特征进行了综述。介绍我国沙漠的类型及区划。还对风积沙的物理化学性质、公路工程地质特征和风沙流运动规律及对公路的危害进行了分析。

第2章选线原则与路线布局。阐述了沙漠公路设计新理念和指导思想,重点介绍了不同沙漠地区的公路选线原则、技术标准的确定和参数选用要点。

第3章沙漠地区公路路基设计。这是本书的重点之一。比较详细地介绍了沙漠地区公路路基设计主要特点,以及路基合理填土高度和断面形式、不良地质处理、包边土设计等技术要求。

第4章风积沙路基公路施工技术。这也是本书的重点内容。主要介绍了沙漠地区公路路基施工的一般原则、路基填筑和开挖技术。

第5章沙漠公路路基防沙技术。这是本书的重点内容。系统介绍了公路工程防沙、植物防沙技术试验研究情况,以及防沙设计、施工的技术要求。

第6章推广示范工程及其实施效果评价。较详细地介绍了沙漠公路修筑技术研究成果在新疆阿拉尔至和田沙漠公路建设中的推广应用情况。

本书突出工程应用。由于新疆、内蒙古等省区是我国沙漠分布较多的区域,相应地开展沙漠地区公路修筑技术研究和工程实践也较丰富,因此书中介绍的最新研究成果与工程实例大多参考了在这些地区的研究成果和实践经验。本书由李志农、陈杰、王翠、陈晓光、刘涛、贾聿卿、陈建壮、包卫星、张建镐、祝解等执笔,全书由李志农、陈杰、王翠统稿。此外,过震文、杨玉泉、何昌轩等同志为本书的审阅、润色和编辑出版给予了大力支持,在此表示衷心的感谢。特别要感谢郑健龙院士为本书出版提供的帮助,并亲自为本丛书作序。

沙漠公路工程是一个正在发展的工程领域,无论是基础理论、设计方法还是工程技术,均有待进一步深入研究和实践,加之作者水平有限,书中一定会存在不足甚至谬误之处,敬请批评指正。

作 者

2017年10月

第1章 风积沙分布及其工程特性	1
1.1 沙漠公路发展概述	1
1.2 沙漠的分布特征和区划	2
1.2.1 沙漠的地理分布特点	2
1.2.2 沙漠气候的特点	4
1.2.3 主要沙漠的自然特征	6
1.2.4 沙漠的区划	9
1.3 沙漠沙的理化性质	16
1.3.1 风积沙的粒度成分	16
1.3.2 风积沙的化学成分和可溶盐	17
1.3.3 我国沙漠沙的水分状况	20
1.4 风积沙公路工程地质特征	22
1.4.1 风积沙的颗粒分析	22
1.4.2 风积沙的压实特性	23
1.4.3 风积沙的强度特性	28
1.4.4 风积沙的压缩特性	32
1.4.5 不同级配风积沙的物理、力学性质试验	34
1.5 风沙流运动特征及对公路的危害	44
1.5.1 风沙运动基本规律	44
1.5.2 公路沙害类型	49
1.5.3 公路沙埋危害的成因分析	50
第2章 选线原则与路线布局	53
2.1 沙漠公路设计新理念和指导思想	53
2.2 沙漠地区技术标准的确定和选用	55
2.2.1 技术标准的确定	55
2.2.2 技术标准的选用	56
2.2.3 技术指标的掌握	56
2.2.4 路线总体方案布设要求	57

2.3	不同沙漠地区选线原则分析论证	57
2.3.1	流动沙漠地段的公路选线原则论证	58
2.3.2	固定沙漠和沙地地带的公路选线原则论证	61
2.3.3	半固定沙丘地段的公路选线原则论证	62
2.4	各种风沙地貌及地形区的选线要点	63
2.4.1	平坦沙地区选线	63
2.4.2	高大沙山区选线	63
2.4.3	高大复合型纵向沙垄或高大复合型沙丘之间谷地(低地)区选线	64
2.4.4	固定或半固定沙地及植被带选线	64
2.5	路线平面布局	64
2.5.1	沙漠公路线形参数确定的依据	64
2.5.2	影响交通安全的道路线形因素	66
2.5.3	路线线形和地形、风沙运动、防沙体系的适应关系	68
2.5.4	线形和沙漠地貌配合要注意的问题	70
2.5.5	线形和沙漠景观配合要注意的问题	71
2.6	沙漠公路适宜线形及线性参数值确定	71
2.6.1	调查、试验、分析情况简介	72
2.6.2	圆曲线半径指标参数	75
2.6.3	最大直线长度	80
2.6.4	纵坡和坡长	82
2.6.5	竖曲线半径和最小长度	89
2.6.6	横断面边坡	92
2.6.7	其他指标	102
第3章	沙漠地区公路路基设计	104
3.1	路基设计的基本原则	104
3.2	沙漠地区路基合理填土高度分析	104
3.2.1	沙埋与路基填土高度统计分析	104
3.2.2	风洞试验结果分析	106
3.2.3	路基稳定性与路基高度关系分析	108
3.2.4	沙漠公路经济性分析	111
3.2.5	交通事故分析	116
3.2.6	沙漠地区公路路基合理填土高度的综合分析	117
3.3	沙漠地区公路路基合理断面形式	124
3.3.1	西部三类沙漠地区公路路基使用状况调查	124
3.3.2	室内风洞试验分析	131
3.3.3	依托工程观测与分析	145
3.3.4	沙漠地区公路路基横断面形式的经济合理性分析	152
3.3.5	沙漠地区公路路基合理横断面形式推荐	158

3.4	不良地质的处理	168
3.5	路基包边土设计	169
第4章 风积沙路基公路施工技术		170
4.1	风积沙路基填筑试验段施工工艺	170
4.1.1	试验段施工方案	170
4.1.2	风积沙路基施工方案	171
4.2	路基填筑(砾石土)试验段施工工艺	174
4.2.1	试验段施工方案	174
4.2.2	施工方法	175
4.3	路面底基层施工工艺	176
4.3.1	试验段施工方案	176
4.3.2	天然砂砾底基层施工工艺	177
4.4	路面基层施工工艺	178
4.5	沥青下面层施工工艺	181
4.5.1	施工前的准备工作	181
4.5.2	施工方法和施工工艺	182
4.6	沥青上面层施工工艺	184
4.6.1	施工前的准备工作	184
4.6.2	施工方法和施工工艺	185
第5章 沙漠公路路基防沙技术		189
5.1	工程防沙体系维护技术	189
5.1.1	工程防沙体系的结构与类型	190
5.1.2	工程防沙体系的作用与破损形式	191
5.1.3	工程防护体系破损及其后果	199
5.1.4	工程防沙体系的维护	206
5.2	植物防沙体系维护技术	219
5.2.1	植物防沙体系维护应遵循的基本原则	219
5.2.2	防沙体系更新改造途径和建设方向	221
5.2.3	植物防沙体系维护技术研究	221
5.3	公路沙害处理技术	239
5.3.1	公路沙害形式	239
5.3.2	路面积沙对行车的影响	239
5.3.3	公路清沙试验	239
5.3.4	二次积沙的防止与输沙断面的构建	240
5.3.5	清沙工作程序	242
5.3.6	清沙与沙害治理综合效益对比	242
5.3.7	清沙工作的注意事项	242

5.3.8	清沙机械组合与配套问题探讨	243
5.4	新技术、新材料在公路防沙体系维护中的应用	243
5.4.1	化学固化剂在沙障修复中的应用	244
5.4.2	土工编织袋在沙障修复中的应用	245
5.4.3	土工方格沙障在防沙体系修复中的应用	245
第6章	推广示范工程及其实效评价	246
6.1	沙漠公路修筑研究成果在阿和沙漠公路建设中的推广应用	246
6.1.1	阿和沙漠公路自然区划	246
6.1.2	3S技术的勘察设计	250
6.1.3	路线设计	251
6.1.4	路基设计	255
6.1.5	路面结构设计	258
6.1.6	路基施工	264
6.1.7	路面施工	268
6.1.8	公路防沙	270
6.2	示范主体工程实施效果评价	276
6.2.1	勘察设计示范应用评价	276
6.2.2	风积沙工程特性应用研究	278
6.2.3	示范主体工程评价分析	286
6.2.4	路面使用性能综合评价研究	297
6.3	防沙体系应用研究及示范效应评价	300
6.3.1	防沙体系效应评价	300
6.3.2	防沙体系示范效果评价	306
6.3.3	防沙体系的维护	308
6.3.4	防沙体系的改进措施	309
	参考文献	311



第 1 章 风积沙分布及其工程特性

1.1 沙漠公路发展概述

我国沙漠和沙漠化土地总面积 157 万 km^2 , 占国土面积的 16%, 有着严酷的气候环境和特殊的地质条件, 主要分布在北纬 $35^\circ \sim 50^\circ$ 之间, 绵亘新疆、甘肃、宁夏、青海、陕西、内蒙古、辽宁、吉林和黑龙江等省区, 其中面积在上万平方公里以上的沙漠就有十多个。新疆土地面积 166 万 km^2 , 其中沙漠面积 43.04 万 km^2 , 占新疆土地面积的 1/4, 世界第二大流动沙漠塔克拉玛干沙漠就位于新疆的南部, 其面积达到 33.76 万 km^2 。由于风沙危害, 交通线被压埋损毁的现象时有发生, 造成的损失难以估量, 西部干旱沙漠地区交通十分不便利, 国民生产总值低, 经济落后, 人民生活水平普遍较低。但沙漠地区却有着丰富的自然资源和旅游资源, 因此开发和治理沙漠地区对发展我国国民经济和改善当地人民生活水平具有重要的战略意义, 沙漠地区将是我国 21 世纪经济建设的重点开发区。然而沙漠地区自然环境恶劣, 尤其是沙漠腹地, 缺乏基本生存条件, 一切生活、生产、建设的补给均需从沙漠之外运输, 而沙漠地区交通十分不便, 常规车辆根本无法通行, 这给沙漠地区的开发、治理、建设造成极大障碍。作为交通设施的公路特别是高等级公路, 已经摆在了优先发展的重要位置。

随着塔里木地区油气勘探深入发展, 沙漠道路建设迫在眉睫, 由此新疆交通部门联合了中科院、中油总公司和新疆的 16 个单位 38 名专家开展研讨, 确定了攻关主要关键技术。1991 年 4 月, 国家有关部门同意将“塔里木沙漠石油公路工程技术研究”列为“八五”国家重点科技攻关项目“塔里木盆地油气资源研究”的子课题。沙漠石油公路攻关项目共有 7 个三级课题、28 项内容、18 项关键技术。7 个课题分别为沙漠公路选线技术研究、沙漠公路防沙治沙综合研究、沙漠公路路基稳定及路面结构的研究、沙漠公路施工与养护技术研究、沙漠公路沿线水文地质及工程地质研究、塔里木河桥水文分析及工程地质研究、沙漠公路环境影响综合评价研究。通过一系列的技术攻关, 1995 年 10 月 4 日, 522 km 沙漠公路——塔里木沙漠公路全线贯穿, 正式通车; 世界上第一条最长的贯穿流动沙漠公路诞生。同时塔里木沙漠公路“八五”国家重点攻关项目获“1995 年十项重大科技成就”荣誉称号。2001 年交通部开展沙漠地区公路建设成套技术研究, 该项目共分为 13 个子课题, 集中了国内 30 多个科研设计和工程单位共 200 多名科研人员进行了为期 5 年的科学研究, 使我国在沙漠地区筑路技术水平实现了突破, 在我国沙漠地区公路路线设计、路基路面设计与施工、防沙工程设计与施工、公路养护、环境保护等方面都取得了重大的突破, 该项目获得 2006 年度国家科技进步二等奖。

在此基础上, 交通运输部委托新疆交通科学研究院编写了《沙漠地区公路设计与施工指南》

(JTG/TD31),该指南涉及沙漠地区公路勘察、设计、施工及质量检测等内容,填补了我国沙漠地区公路建设设计与施工标准领域的空白,促进了沙漠公路的建设,使沙漠地区公路从勘察、设计到施工的技术和质量水平均得到大幅提高。

为使沙漠公路修筑成果更加系统、充实和完善,便于指导沙漠地区公路设计、施工和养护,尽快推广使用,2005年,交通部西部交通建设科技项目管理中心设专项研究课题“沙漠公路修筑技术推广及应用示范”并委托新疆交通厅完成。项目依托新疆第二条沙漠公路——阿拉尔—和田沙漠公路(以下简称阿和沙漠公路)。2005年6月1日,阿和沙漠公路正式开工建设,道路全长424 km,穿越塔克拉玛干沙漠,它是自治区规划的第二条穿越流动沙漠的公路。该项目包括沙漠公路修筑技术研究成果的推广应用,阿和沙漠公路重点示范工程的实施及评价,沙漠公路环保、安全、景观等相关重点领域的专项研究和沙漠公路修筑技术研究成果应用效果的评测四个方面。项目着力于科研成果转化,在推广适合规模生产的共性技术、关键技术的同时,开展重点领域的专项补充研究,深化和完善成果。从而达到深入推广应用《沙漠地区公路建设成套技术研究》成果的目的。

科学技术是第一生产力,在以知识、创新为基础的知识经济时代,谁掌握了科学技术,谁就掌握了经济发展的命脉。科学技术的掌握和应用,要靠科学研究与技术开发,只有把科研成果和先进技术转化为生产力并广泛应用,才能推动国民经济的发展。本书就前期开展的科学研究和工程实践经验,总结编写沙漠地区公路风积沙路基设计与施工关键技术,指导沙漠地区公路修筑技术的应用和工程实践。

1.2 沙漠的分布特征和区划

1.2.1 沙漠的地理分布特点

我国是世界上沙漠分布最多的国家之一。沙漠广袤千里,呈一条弧形沙漠带绵亘于我国的西北、华北北部和东北西部。这一弧形沙漠带,南北宽600 km,东西长达4 000 km,面积有80多万 km^2 (钟德才,1998)。

我国的沙漠,在分布上具有以下特点:

1) 沙漠多深居内陆盆地和高原

我国沙漠约有80%的面积分布在乌鞘岭和贺兰山以西的大陆腹地,而且绝大部分在内陆巨大盆地中,如塔里木盆地中的塔克拉玛干沙漠、准噶尔盆地中的古尔班通古特沙漠,柴达木盆地中的沙漠等。另一部分分布在海拔1 000 m以上的内陆高原上,如海拔1 200~1 800 m的阿拉善高原上的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,海拔1 200~1 500 m的鄂尔多斯高原上的库布齐沙漠和毛乌素沙地等。

2) 沙漠横跨多个自然地带

我国沙漠西起新疆喀什噶尔,东迄东北平原西部,横跨经度50多度,分属四个不同的自然地带。贺兰山(约东经106°)以西的西部沙漠地区,蒸发量大大超过降雨量,干燥度在4.0以上,属温带干旱荒漠地带,其中塔克拉玛干沙漠为暖温带干旱荒漠,柴达木盆地的沙漠为高寒干旱荒漠。我国大部分沙漠都分布在这一地带,沙漠面积约占全国沙漠总面积的80%。贺兰山与温都尔庙—鄂托克一定边一线之间的我国中部沙漠地区,主要包括库布齐沙漠和毛乌素沙地的西部,干燥度在2.0~4.0之间,属温带半干旱荒漠地带。这一地带比较窄,沙漠面积小,仅占全国沙漠总面积的3%。温都尔庙—鄂托

克一定边一线以东的我国东部沙漠的大部分,包括毛乌素沙地、浑善达克(小腾格里)沙地、科尔沁沙地等,干燥度在1.5~2.0之间,属温带半干旱干草原地带,其沙地面积占全国沙漠总面积的15%左右。科尔沁沙地的东部和松嫩等地区的沙地,干燥度小于1.5,属于温带半湿润的草原地带,在我国沙漠中所占的面积最小,还不到1%。

3) 新疆沙漠分布最广,塔克拉玛干沙漠最大

从各省(区、市)沙漠分布的面积来说,新疆分布最广,占全国沙漠(沙地)总面积的一半以上,其次是内蒙古、甘肃和青海等(表1-1)。我国沙漠中面积在0.6万km²以上的主要沙漠和沙地有14个(表1-2),其中以塔克拉玛干沙漠为最大,包括周围零星的沙丘在内,面积共达33.76万km²,占全国沙漠总面积的45.1%,它是我国沙漠中流动沙丘分布最广的沙漠,其流动沙丘面积占我国沙漠中流动沙丘总面积的65%。古尔班通古特沙漠是我国第二大沙漠,面积有5.11万km²,占全国沙漠总面积的6.3%,也是我国最大的固定、半固定沙漠。巴丹吉林沙漠是我国第三大沙漠,面积为5.05万km²,占全国沙漠总面积的6.2%,也是我国沙丘最高大的一个沙漠。

表1-1 我国各省(区)的沙漠(沙地)分布面积

序 号	省(区)名称	沙漠面积(km ²)
1	新疆维吾尔自治区	438 100
2	内蒙古自治区	227 900
3	甘肃省	30 530
4	青海省	19 390
5	陕西省	12 110
6	吉林省	11 340
7	宁夏回族自治区	8 030
8	黑龙江省	5 510
9	辽宁省	620

表1-2 中国主要沙漠(沙地)的地理位置和面积

沙 漠 名 称	地 理 位 置	面积(万 km ²)
塔克拉玛干沙漠	新疆塔里木盆地	33.76
古尔班通古特沙漠	新疆准噶尔盆地	5.11
库木塔格沙漠	新疆东部、甘肃西部;罗布泊低地南部和阿尔金山北部	2.197
柴达木盆地沙漠	青海柴达木盆地	1.494 (不包括风蚀地)
巴丹吉林沙漠	内蒙古阿拉善高原西部	5.05
河西走廊沙漠	甘肃河西走廊	1.974
腾格里沙漠	内蒙古阿拉善高原东南部	4.232
乌兰布和沙漠	内蒙古阿拉善高原东北部,黄河河套平原西南部	1.075
库布齐沙漠	内蒙古鄂尔多斯高原北部,黄河河套平原以南	1.731

(续表)

沙漠名称	地理位置	面积(万 km ²)
毛乌素沙地	内蒙古鄂尔多斯高原中南部和陕西北部	3.894
浑善达克沙地 (小腾格里沙漠)	内蒙古高原东部的锡林郭勒盟南部和赤峰市西北部	2.922
科尔沁沙地	东北平原西部的西辽河下游	5.044
呼伦贝尔沙地	内蒙古东北部的呼伦贝尔高原	0.641
嫩江沙地	东北平原西北部嫩江下游	0.601

1.2.2 沙漠气候的特点

我国沙漠地区深居内陆,远离海洋,且周围有高山高原阻隔,因而具有典型的大陆性气候的特点:夏季高温、酷热、干燥,冬天干冷,春季风沙多、温差大。

1) 干燥少雨,降水不稳定

干燥少雨是沙漠气候最主要的特征。我国是季风气候,降水主要受夏季风的影响,水汽来源于太平洋和印度洋。所以,我国沙漠地区降水量的空间分布基本趋势是从东向西递减,且愈向内陆,减少愈加迅速。东部沙区盛夏可受到夏季风(东南季风)的一些影响,雨水稍多,年降水量有 200~400 mm;西部地区年降水量大部分在 200 mm 以下。降水最少的是南疆塔克拉玛干沙漠、东疆、青海柴达木盆地西北部和内蒙古西部的巴丹吉林沙漠,年降水量都在 50 mm 以下,甚至不足 25 mm,是我国降水最稀少的地方。例如,南疆塔克拉玛干沙漠东部的若羌,1954—1970 年的 17 年,平均降水量每年只有 5.6 mm,其中 1957 年才 3.9 mm。东疆吐鲁番盆地的托克逊,1961—1970 年年平均降水量只有 3.9 mm,为全国现有降水的最小记录;1968 年这里只下过两次雨,总计才 0.5 mm。

我国沙漠地区的降水不仅少,而且很不稳定,即年变率大。降水的多年平均变率,在东部沙区为 25%~40%,西部多在 40%以上,甚至超过 50%。极端年变率差别更大。例如,塔克拉玛干沙漠南部的民丰安迪尔,1966 年降雨量只有 5.0 mm,而 1971 年却达 42.5 mm,相差近 10 倍。降水的季节分配也极不均匀,主要集中在夏季 6—8 月;而夏季又往往是集中在少数几天内,有时一两天里的降雨竟相当于半年的雨量。降雨高度集中,就使得连续无降雨的干旱期很长。全年最长连续无降水日数,有时可达 7 个月至 10 个月之久,主要出现在秋末至第二年夏初这一段时间;尤其是春旱特别严重。

沙漠地区降水十分稀少,而蒸发却极为强烈。以多年平均蒸发量而论,一般在 2 500~3 000 mm,有的地区高达 4 000 mm,超过降水量的十几倍甚至上百倍。从蒸发量与降水量的比值所反映的干燥度来说,我国东部沙区一般在 1.5~4.0;而西部都大于 4.0,其中东疆和南疆塔克拉玛干沙漠地区在 16.0 以上,甚至可高达 60,成为亚洲的干旱中心。

2) 日照强烈,冷热剧变

我国沙漠地区干燥少雨,云量少,晴天多,日照充足,热量丰富。全年日照时数在 2 500~3 000 h;夏季每天日照在 14 h 以上,冬季也有 9 h 之多。无霜期一般在 150~260 d。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温,除呼伦贝尔等一小部分沙地外,一般都在 3 000~5 000 $^{\circ}\text{C}$ (表 1-3)。太阳年总辐射量大部分在 586~712 kJ/cm²,青海柴达木盆地可达 837 kJ/cm² 左右,是全国总辐射量的最高中心之一。

表 1-3 我国沙漠地区主要台站气温等热量要素统计(1961—1970 年)

沙漠地区	站名	1月平均气温(℃)	7月平均气温(℃)	年较差(℃)	极端最高气温(℃)	极端最低气温(℃)	日照时数(h)	≥10℃积温(℃)	无霜期天数(d)
科尔沁沙地	通辽	-14.5	23.6	38.1	37.9	-30.0	3 110.8	3 158.7	153
毛乌素沙地	乌兰镇	-11.4	21.8	33.2	36.5	-31.4	3 154.7	2 830.2	152
	榆林	-9.9	23.1	33.1	37.6	-27.6	2 986.5	3 192.9	152
乌兰布和沙漠	吉兰泰	-10.7	25.3	36.0	38.6	-29.4	3 321.8	3 578.3	249
腾格里沙漠	民勤	-10.1	23.2	33.3	38.1	-27.0	3 001.0	3 147.9	180
巴丹吉林沙漠	拐子湖	-12.6	26.6	39.2	40.7	-32.4	3 248.7	3 680.7	231
新疆东部戈壁和沙漠	伊吾淖毛湖	-12.2	28.2	40.4	42.8	-29.1	3 353.1	4 182.1	259
	吐鲁番	-8.5	32.8	41.3	47.5	-20.5	3 070.1	5 437.2	267
准噶尔盆地沙漠和戈壁	克拉玛依	-17.1	27.6	44.7	42.9	-35.9	2 763.4	3 992.8	128
塔克拉玛干沙漠	阿克苏阿拉尔	-9.2	25.0	34.2	39.6	-28.4	3 032.0	4 102.3	214
	民丰安迪尔	-9.5	25.5	35.0	41.5	-28.9	2 890.9	4 008.2	209
	若羌	-8.4	27.0	35.4	43.6	-24.8	3 035.9	4 268.9	244

冷热剧变,气温变化大。平均年温差一般在 30~40℃;准噶尔盆地古尔班通古特沙漠西缘的车排子,1956 年曾达到 55℃,为全国之冠。绝对年温差常可达 50~60℃以上。塔克拉玛干沙漠南部的安迪尔,1967 年曾达到过 67.2℃。冬季,在蒙古—西伯利亚冷高压控制之下,天气多晴寒而干燥,地面辐射冷却因之加强,致使 1 月份平均气温多在-10℃以下,极端最低气温可超过-30℃,使这里成为全国最冷的地区之一。而在夏季则由于大陆的强烈增温,深居内陆的沙漠地区又成为炎热的中心。7 月平均最高气温在 34℃以上,极端最高气温超过 40℃。如塔克拉玛干沙漠东部的若羌,最高气温为 43.6℃,南缘的和田有过 46.5℃的高温记录。而吐鲁番曾三次出现 47.5℃ 的最高记录。

沙漠里夏季白天虽然气温很高,但是相对湿度低,大都低于 30%,有的地方甚至多次出现“零”的记录。高温低湿,热而不闷。此外,日温差变化极为显著,一般在 10~20℃,最大可达 40℃以上;特别是沙漠地表的温度变化尤为剧烈,夏季午间可达 60~80℃,夜间又可降到 10℃以下。

3) 风大沙多

我国沙漠地区不仅风力较大,而且频繁。根据一天四次观测统计,大部分沙漠地区的起沙风每年可达 300 次以上,差不多每天都可以遇到。

我国沙漠地区在风速的地域分布上具有北大南小的特点,强风区出现于中哈和中蒙国界附近,尤其是一些山隘、峡谷风口地带,风力特大,形成特大风区。如甘肃的安西,全年平均有 80 d(最多年份达 105 d)出现超过 8 级(风速≥17.2 m/s)的大风。北疆准噶尔盆地西部的准噶尔门,全年有 165 d 出现大风,最大风速超过 40 m/s;东疆的克尔碱全年≥8 级的大风天数有 183 d,≥10 级的大风天数有 100 d,≥12 级的有 20 d,瞬间极大风速为 45.5 m/s。弱风区则位于较闭塞的盆地(或低地)和不同风系的交会处。如宁夏平原、河西走廊的东段和塔里木盆地中部等地。至于风速的年变化,我国沙漠地区一般以春季和初夏风速最大。

沙漠地区风力较大,加上地表大部分为疏松的沙物质,易受风力吹扬造成风沙弥漫。风沙日一般在 20~100 d,特别是在植被稀疏的流沙地区更是频繁。塔克拉玛干沙漠南部,风沙日常占全年的1/3。如且末最多可达 145 d;在腾格里沙漠边缘的民勤,1959 年风沙日达 148 d,占全年日数的 41%,其中 3—6 月风沙日高达全月的一半以上,持续时间最长可达 17~48 h,一般在 10 h 以上。

1.2.3 主要沙漠的自然特征

我国沙漠自西而东分布在不同的自然地带,由于所处的自然条件不同,各个沙漠的特征出现明显的地域分异。以沙丘的植被固定程度为例,西部(贺兰山以西)干旱荒漠地带,除准噶尔盆地降雨稍多,植被较好,沙漠中大部分为固定和半固定沙丘外,其余沙漠都以流动沙丘占绝对优势;而内蒙古东部和东北平原西部干草原地带的沙地,则以固定和半固定沙丘为主,流动沙丘只零星分布在沙漠边缘植被破坏的地方。也就是说,自西向东流沙逐渐减少,固定、半固定沙丘逐渐增多,从表 1-4 的统计数字中可以清楚地看出这个分布规律。

表 1-4 不同自然地带流沙及固定、半固定沙丘的分布

自然地带	沙漠名称	各种沙丘所占面积百分比	
		流动沙丘	固定及半固定沙丘
西部荒漠地带	塔克拉玛干沙漠	85	15
中部半荒漠地带	毛乌素沙地	64	36
东部干草原地带	科尔沁沙地	10	90

1) 塔里木盆地的沙漠

新疆南部的塔里木盆地是我国最大的内陆盆地,这里气候极端干燥,年降雨量大部分在 50 mm 以下,干燥度在 16~64。盆地的中央则为著名的塔克拉玛干沙漠,其显著的自然特色有:

(1) 流动沙丘占绝对优势。在塔克拉玛干沙漠本部,流动沙丘占 85%,只有在沙漠边缘和深入沙漠中的河流沿岸分布有以红柳沙堆为主的固定、半固定灌丛沙堆。

(2) 沙丘高大,形态复杂。沙漠内部以裸露的巨大沙丘为主,一般高度在 100~150 m,也有 200~300 m;其中高度在 50 m 以上的沙丘,占全沙漠流动沙丘总面积的 80%。沙丘形态极为复杂,除常见的新月形沙丘、沙丘链和沙垄外,还分布有特殊的复合型沙丘链、复合型纵向沙垄、金字塔沙丘和穹状沙丘等。

(3) 塔克拉玛干沙漠虽以流动沙丘为主,但是,在深入沙漠内部的河流沿岸,沙漠边缘的洪积、冲积扇前缘地带,由于间歇性洪水的补给和地下水的溢出,水分条件较好,生长着茂密的天然胡杨林和红柳灌丛,成为沙漠中的“天然绿洲”。

2) 准噶尔盆地的沙漠

北疆准噶尔盆地的中央为古尔班通古特沙漠,这里虽然也属于干旱荒漠地带,但是由于盆地周围的山地封闭不很严密,特别是西部和西北部有许多山口,较为湿润的西风可以从这里长驱而入。因此,这里降水较多,年降雨量可达 70~150 mm,冬季并有积雪,稳定积雪日数一般在 100~160 d,最大积雪深度多在 20 cm 以上,所以沙漠内部植物生长较好,沙丘上广泛分布着以白梭梭、梭梭、蒿属、蛇麻黄和多种一年生植物为主的小乔木沙质荒漠植被。植被覆盖度在固定沙丘上可达 40%~50%,半

固定沙丘上也在15%~25%之间。

沙漠内部的沙丘形态主要是近于南北走向的固定、半固定沙垄和树枝状沙垄,一般高度为10~50 m,延伸长度可达十余公里。在沙漠的西南部还分布有固定和半固定的沙垄与蜂窝状沙丘。流动沙丘主要在沙漠东北部的阿克库木和沙漠东南部霍景涅里辛沙带的最东端,多属新月形沙丘和沙丘链。

3) 柴达木盆地的沙漠

柴达木盆地是青藏高原东北部的一个巨大内陆盆地,位于青海省的西北部。盆地海拔2 500~3 000 m,是我国沙漠分布最高的地区。干旱程度由东向西增大,东部年降水量在50~170 mm,干燥度2.1~9.0;西部年降雨量仅10~25 mm,干燥度在9.0~20.0。盆地中呈现出风蚀地、沙丘、戈壁、盐湖及盐土平原相互交错分布的景观。

风蚀地貌发育广泛,面积有2万多 km²,占盆地内沙漠面积的67%。主要分布在盆地西北部,东起马海、南八仙一带,西达茫崖地区,北至冷湖、俄博梁之间的范围内。

沙丘分布比较零散,并多与戈壁交错分布于山前洪积平原上,其中比较集中的是在盆地西南部祁曼塔格山、沙松乌拉山北麓等地,形成一条大致呈西北—东南向的断续分布的沙带。北部花海子和东部铁圭等地也有小面积的分布。沙丘多为流动的新月形沙丘、沙丘链和沙垄,一般高5~10 m;高大的(20~50 m)复合型沙丘链也有分布,但面积很小。固定、半固定的灌丛沙堆,则散布在洪积平原前缘潜水位较高的地带。

4) 阿拉善地区的沙漠

阿拉善地区的沙漠,包括河西走廊以北、中蒙边境以南、弱水(额济纳河)以东、贺兰山以西的广大地区。它是我国沙漠分布较多的一个地区。这里气候干旱,年降雨量在50~150 mm,甚至在50 mm以下,干燥度为4~12,属于干旱荒漠地带。区内地势大致自南向北倾斜,呈高原形式,但其间仍有不少起伏山岭,把高原分隔成若干个宽广的盆地,一些大沙漠就位于这些盆地内。

(1) 巴丹吉林沙漠。位于弱水东岸的古鲁乃湖以东,宋乃山和雅布赖山以西,拐子湖以南,北大山以北。沙漠在自然地带上处于阿拉善荒漠的中心,气候十分干旱,其主要特征是:① 以流动沙丘为主,占整个沙漠面积的83%;只有西部沙漠边缘古鲁乃湖地区及北部拐子湖、东部库乃头庙等地有半固定沙丘分布。② 高大沙山密集分布,其面积占沙漠面积的61%,主要集中在沙漠的中部,一般高200~300 m,最高可达420 m。沙丘形态主要是复合型沙丘链(沙山),其次是金字塔状沙山。在高大沙山区的周围是沙丘链,高度也不小,一般有25~50 m;只有在沙漠边缘才有低矮的沙丘链及灌丛沙堆分布。③ 高大沙山之间的丘间低地,分布有许多内陆小湖,当地称为“海子”。这些湖泊(海子)的面积一般小于1 km²,其中面积最大的为1.5 km²,最大深度达6.2 m。

巴丹吉林沙漠除了沙漠中部的高大沙山之间有湖泊分布外,在西部和北部的沙漠边缘分布有面积较大的湖盆,如北部的拐子湖、西部的古鲁乃湖。在这些湖盆周围,水分条件较好,生长有成片的梭梭林,成为巴丹吉林沙漠边缘地区主要的天然植被。

(2) 腾格里沙漠。位于阿拉善地区的东南部,介于贺兰山和雅布赖山之间。腾格里沙漠的内部,沙丘、湖盆草滩、山地浅丘及平原等交错分布;其中沙丘面积占71%,沙丘中又有7%属于固定、半固定沙丘。流动沙丘以格状沙丘为主,一般高10~20 m;也有一些复合型沙丘链,主要分布在沙漠的东北部,高度为50~100 m;沙丘链则分布在沙漠的边缘地区。腾格里沙漠内的湖盆,大小不等共有422个,其与巴丹吉林沙漠中的“海子”不同,大部分为无积水或积水很少的草湖。

(3) 乌兰布和沙漠。位于阿拉善的东北部,介于狼山和黄河之间。沙漠已处于荒漠地带的边缘,流动沙丘面积显著减少,仅占沙漠面积的 39%;半固定沙丘占 31%,固定沙丘占 30%。流动沙丘主要分布在沙漠的东南部,一般高度为 5~20 m;在南缘有高 50~80 m 的。沙漠西部为古湖积平原,分布有盐湖(吉兰泰盐池等)。湖盆周围分布着生长有梭梭、高 1~3 m 的半固定沙垄和高 1 m 左右的白茨灌丛沙堆。沙漠北部是古黄河冲积平原,零散分布着一些低矮的沙丘链与灌丛沙堆;沙丘之间有大面积土质平地。

5) 鄂尔多斯地区的沙漠和沙地

黄河河套以南、长城以北的鄂尔多斯地区,在自然地带上处于温带荒漠和干草原的过渡地段,西部干燥度为 2.0~2.8,东部减为 1.6~2.0。

(1) 库布齐沙漠。位于鄂尔多斯高原北部的黄河阶地上。除东部有一小部分位于干草原带外,绝大部分为半荒漠地带。沙漠的东部有发源于高原上的几条季节性的河流自南向北穿过,使沙漠显得比较零散;沙漠的西部没有河流切穿,比较完整。库布齐沙漠中流动沙丘占绝对优势,占整个沙漠面积的 80%,以沙丘链和格状沙丘为主,一般高度为 10~15 m,少数也可达 50 m。沙漠北部的黄河河谷平原上,还分布有一些零星低矮(3 m 以下)的新月形沙丘和沙丘链。固定、半固定的灌丛沙堆仅分布在沙漠边缘,尤以南部边缘最多,高度不大,多在 5 m 以下。

(2) 毛乌素沙地。位于鄂尔多斯高原的中南部。行政区划上包括长城以北的陕西北部、内蒙古鄂尔多斯市南部;在自然地带上,西部为半荒漠地带,东部为干草原地带。这里年降雨量较多,西北部 250 mm 左右,东南部更可达 400~440 mm,因而地表水和地下水都比较丰富,有几条较大的河流(如无定河等)纵贯该沙地的东南部流入黄河。沙漠内部还分布有众多的湖泊。地下水也相当丰富,丘间低地一般埋深 1~3 m,个别仅 0.5 m,水质良好。

水分条件较优越,植物生长良好,特别是一些湖盆滩地和河谷地带,生长有旺盛的沼泽性灌丛——柳湾林。它由蒙古柳、沙柳和酸刺三种主要灌木组成,成为毛乌素沙地中的特殊景色。沙丘上也普遍生长油蒿等植物。所以,毛乌素沙地的固定、半固定沙丘(当地称为“巴拉”)的面积较大。沙丘的形态主要是梁窝状沙丘和抛物线形沙丘。流动沙丘在沙地的东南部较多,与固定、半固定沙丘往往交错分布,大多是新月形沙丘链,高度为 5~10 m,也有高 10~20 m 的。

6) 内蒙古高原东部和东北平原西部的沙地

这个地区的沙地分布在东经 113°以东的内蒙古东部和黑龙江、辽宁、吉林的西部,在自然地带上属于干草原,年降雨量为 250~500 mm,干燥度仅 1.2~2.0。植物生长良好,除草本和灌木外,还有乔木生长,沙地上绝大部分为固定、半固定沙丘,流沙只作小面积的斑点状分布。

内蒙古东部和辽宁西部的浑善达克沙地(小腾格里沙漠),以固定、半固定的沙垄和梁窝状沙丘等占绝对优势,它们占整个沙漠面积的 98%;流动的新月形沙丘和沙丘链,仅占 2%。但在分布上,沙地的西部以半固定沙丘为主,零星散布着一些流动沙丘;而在东部,以固定沙丘为主,植被覆盖度在阳坡一般为 30%~40%、阴坡可达 60%~70%,一些乔灌木都生长在阴坡上,如榆树、山丁子、欧李、山樱桃和绣线菊等,甚至还有云杉和油松。西部和东部的各种沙丘之间,都有宽广的丘间低地,群众称之为“塔拉”,那里植物生长繁茂,并有不少湖泊,成为当地主要的牧场。

科尔沁沙地位于内蒙古东部和吉林、辽宁的西部,主要分布在西辽河下游的冲积平原上。这里不仅降水较多,而且有西辽河的干支流如西拉木伦河、教来河、老哈河等流经沙区,是我国沙漠中水分条件最好的地区。当地称沙丘为“坨子地”、称丘间低地为“甸子地”,两者所占的相对面积为 3:1。沙坨子大部分是固定和半固定的沙垄和梁窝状沙丘,它们占全部坨子地面积的 90%;流动的新月形沙丘仅

占10%。在地域分布上,总的说来,自西向东,沙丘逐渐由流动沙丘为主转变为以半固定和固定沙丘为主。大致在少冷河以西,主要是流动沙丘;少冷河与老哈河之间,两者比例大致相等;教来河至余粮堡、瓦房一线之间,则变为以半固定沙丘为主;余粮堡、瓦房一线以东,几乎都是固定、半固定沙丘,流沙只有小面积的零星散布。

此外,黑龙江西部大兴安岭以西的呼伦贝尔沙地,沙丘大多分布在一些河流沿岸及其下游冲积、湖积平原上,都是固定、半固定的梁窝状沙丘。植被覆盖度一般在30%以上,个别可达50%左右;以榆、樟子松、黄柳、蒿属植物和丛生禾草等为主。沙丘高度在5~15 m,丘间普遍有广阔的低平地。

1.2.4 沙漠的区划

我国地域辽阔,沙漠分布较广,不仅存在着南北纬向地带差异,而且存在着很大的东西水平差异,同时沙漠之间在成因、形态及自然条件上也存在很大的差异,这些差异性造成沙漠公路建设在不同区域的多样性,对沙漠公路建设中诸多设计参数、技术指标以及养护和沙害治理技术的选取有很大的影响。为了区分不同沙漠区域公路建设条件的差异性,在沙漠公路的设计、施工和养护中能采用适当的技术措施和合理参数,保证路线、路基和路面设计以及防沙养护措施等的合理性,必须研究沙漠公路建设的自然特点,建立区分不同自然条件的沙漠公路自然区划,达到对沙漠公路建设规划、设计、施工、养护起指导和宏观控制作用的目的。

在对国内13个典型沙漠(沙地)进行了调查,遍及内蒙古、新疆、陕西、宁夏、黑龙江等省区,调查项目涉及沙漠(沙地)的地理特点、自然特征、气候、植被及风积沙的特性等的基础上,对区划方法进行了研究,为区划指标和区划方案的确定奠定了基础。

1.2.4.1 区划原则

区划原则是指导划区的根本。根据沙漠和沙漠公路的特点,提出沙漠地区公路区划应遵循的原则是:

(1) 综合性因素与主导因素相结合的原则。综合性原则是指在区划工作中,要综合考虑多种对公路建设影响较大、与公路建设有密切关系的自然环境和气候条件;在此基础上结合对沙漠公路建设有显著影响和便于进行区划的主导因素进行区划,以体现沙漠公路区划的特点。本区划的主导因素突出表现在降水和温度等方面。

(2) 相似性与差异性相结合的原则。辨别综合自然条件的分布,找出对沙漠公路建设相关且影响类似的各种自然条件,区分区域的差异,保证在同一区域中具有筑路相似性。与此同时,为使公路建设使用方便,尽量不将区划分得过于零碎或区域过大。

在上述两个原则指导下,从沙漠公路的建设要求出发划出每一区,以满足沙漠公路设计、施工、养护等方面的需要,达到实用的目的。

1.2.4.2 指标的选定

沙漠地区自然条件对公路工程的影响主要有以下几个方面:①公路选线的合理性;②路基路面的稳定性;③施工的材料及条件;④公路防沙;⑤环境保护;⑥公路养护。

在调研分析的基础上,经过分析论证,归纳出在沙漠地区与公路建设中关系密切的自然环境和气象要素有沙漠地貌类型(沙丘高度)、温度(气温和地温)、植被覆盖状况(沙丘流动程度)、水分状态、风力风向(沙丘运动方向)、风积沙组成和粒径等。影响公路建设和养护的自然因素见表1-5。