



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

敦煌莫高窟风沙 危害及防治

汪万福 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

敦煌莫高窟风沙危害 及防治

汪万福 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

敦煌莫高窟是世界著名的文化艺术瑰宝,具有重要的保护价值。本书针对莫高窟面临的主要风沙危害问题,以文化遗产保护相关学科理论为基础,系统论述了国内外研究进展,揭示了莫高窟风沙运动规律,研发了防治戈壁地表风沙流新技术,试验成功了滴灌技术生物固沙,明确了水分、根系、沙尘、盐分等对石窟的影响,阐述了防护体系的综合防护效应,具有重要的理论和实践意义。

本书具有显著的区域特色,内容翔实,图文并茂,数据量大,体现了作者及其研究团队在敦煌环境监测、风沙防治、生态修复、沙尘气溶胶,以及游客影响文物等方面的最新研究成果,对同类遗产的保护具有重要的借鉴和示范价值。

本书可供高等院校和科研院所文物保护学、生态学、环境科学、植物学及土壤学等相关领域师生和科研人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

敦煌莫高窟风沙危害及防治/汪万福著. —北京:科学出版社,2018.4

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-056597-6

I. ①敦… II. ①汪… III. ①敦煌石窟—文物保护—防沙—研究
IV. ①K879.21 ②P941.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 036248 号

责任编辑:万 峰 朱海燕 / 责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴 / 封面设计:北京图阅盛世文化传媒有限公司

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 4 月第一次印刷 印张:22 3/4 彩插:6

字数:456 000

定价:189.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱

刘 伟 卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪

万国华 王光谦 吴硕贤 杨宝峰 印遇龙

喻树迅 张文栋 赵 路 赵晓哲 钟登华

周宪梁

作者简介



汪万福（1966～），甘肃甘谷人，博士，敦煌研究院二级研究馆员，中国科学院西北生态环境资源研究院兼职研究员、博士研究生导师，兰州大学生命科学学院兼职教授、博士研究生导师。现任敦煌研究院学术委员会委员、保护研究所副所长，兼任国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心副主任、古代壁画保护国家文物局重点科研基地副主任、中国古迹遗址协会石窟专业委员会副主任、中国文物学会文物保护技术与修复材料专业委员会副主任、中国文物保护技术协会理事、中国地理学会沙漠分会常务理事等职。长期从事干旱区环境与文物保护修复等方面的教学培训、文物科技保护及项目管理工作。近 20 余年来，在古代壁画保护修复、文化遗产的生物退化与防护、敦煌莫高窟区域风沙环境综合治理及文化遗产保护工程管理等领域取得重要成果。先后主持国家自然科学基金等项目 10 项，主持全国重点文物保护单位勘察设计与施工 10 余项，其中 5 项获全国十佳（优秀）文物维修工程奖。发表学术论文 100 余篇，国家专利 10 余项，合作出版专著 6 部，其中两部获全国文化遗产十佳图书奖。获甘肃省科技进步一等奖 1 项（排名第一）、国家文物局文物保护科学和技术创新奖二等奖 2 项（分别排名第一、第二），获 2016 年度甘肃省直文化系统先进工作者、文化部文化产业先进个人、第五届甘肃青年科技奖、全国优秀科技工作者等荣誉称号，入选甘肃省领军人才（二层次）、甘肃省宣传文化系统“四个一批”文化专门技术界人才。

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

序 一

自工业革命以来，人类活动急剧增加，造成极端天气和气候事件在过去几十年频繁发生，如持续干旱和热浪气候，以及突发的风暴和降水等。目前全球变暖引发的一系列环境问题正在并将继续影响人类的生存环境。全球变化背景下生态环境问题突显，所引发的社会问题令人担忧。敦煌莫高窟举世闻名，被称为是一个“活了一千多年的生命”，但在这样复杂多变的气候环境条件下，这个“千年生命”现在也是“疾病缠身”，其主要致病因素包括了各种恶劣气候环境以及人类活动的不断干扰，而频繁发生的风沙危害即是罪魁祸首。

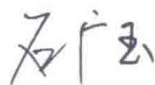
我对敦煌莫高窟遗址保护的较多了解源于 21 世纪初，当时所主持的中国科学院中日合作重点项目在敦煌戈壁与绿洲选点，其中戈壁点选在莫高窟窟顶，并与中国科学院寒区旱区环境与工程研究所和敦煌研究院合作，汪万福博士作为敦煌研究院项目负责人参与其中。在项目实施期间，就风沙对莫高窟珍贵文物的损害、防治现状、初步治理效果，以及未来设想有了更多了解，感受到了一个文化遗产管理单位对区域生态环境治理的重视，对文物本体及其环境景观同时保护的核心理念，以及对文物古迹实施预防性保护极端重要性的理解。

为解决敦煌莫高窟的风沙灾害问题，敦煌研究院联合国内外多个机构的专家和学者，付出了长达 70 余年的艰辛努力。汪万福博士作为其中代表之一，完成的《敦煌莫高窟风沙危害及防治》一书，就是针对莫高窟风沙尘问题的研究汇总和成果集成。全书回顾总结了莫高窟生态环境综合治理发展历程，以长期探索与实践成果为基础，所提出的“以固为主，固、阻、输、导相结合”的风沙防治原则及其项目的实施，有效缓解了风沙对敦煌莫高窟文物的损害，取得了令人鼓舞和卓有成效的防治效果。希望他们能够继续扎根西北，不断书写敦煌石窟遗址保护之华章。

敦煌莫高窟风沙危害及防治实践，是世界遗产地预防性保护的一个典型范例，《敦煌莫高窟风沙危害及防治》一书的出版，将为类似文化遗产的保护和生态环境建设提供重要借鉴。

是为序。

中国科学院院士



2017 年 6 月 28 日于北京

序 二

在人类发展的历史长河中，中华民族是一个伟大而富有创造力的优秀民族，在 5000 余年的文明化进程中，创造了种类繁多、内容丰富、数量极大的珍贵文化遗产。始建于前秦建元二年（公元 366 年）的敦煌莫高窟，就是其中的一颗灿烂明珠。它经过近 10 个朝代的连续营建，保存了公元 4~14 世纪的壁画 $4.5 \times 10^4 \text{m}^2$ ，彩塑 2000 余身，还有藏经洞发现的 5 万余件文献及各种文物，其中有上千件绢画、刺绣和大量书法作品。这些珍贵遗产是丝绸之路上中国古代多民族文化及欧亚文化汇集和交融的结晶，是历史与社会发展的见证，也是研究我国古代历史、政治、经济、文化、宗教与科技的重要实物资料，莫高窟因此被誉为“东方艺术宝库”和“墙壁上的博物馆”，1961 年被国务院公布为第一批全国重点文物保护单位，1987 年作为中国首批申报的世界遗产，因符合世界文化遗产公约的全部六条遴选标准被联合国教科文组织列入“世界文化遗产”名录。

莫高窟是中华人民共和国成立以来较早设立文物保护管理机构的单位之一，因此莫高窟的保护工作起步较早。1951 年，文化部委托清华大学、北京大学等单位专家，对莫高窟保存现状进行勘察，制定初步保护规划。1961 年，文化部会同中国科学院等单位，组成专家组对敦煌文物保护的现状和存在问题进行现场考察后，明确指出崖体稳定性、强烈的崖面风蚀及风沙危害是敦煌文物保护工作这一时期的主要任务，必须引起高度重视。后来针对石窟岩体坍塌、结构失稳等问题，在中央政府的支持下，于 1963~1965 年运用支、顶、挡、刷等方法采用混凝土及块石砌体对危岩体进行了加固处理，消除了危岩体进一步坍塌的严重险情，大大提高了洞窟岩体的稳定性及抗震能力。先后清理了上百个洞窟积沙，也在治沙专家指导下开展了防沙治沙试验工作，但收效甚微。风沙对莫高窟的危害到 20 世纪 80 年代还十分严重。据敦煌研究院统计，那时每年还要从窟区清运 3000~4000 m^3 积沙，拉沙所用农用拖拉机的震动对石窟的影响远超过飞机起降的影响。窟区及栈道积沙、露天壁画及周围遗址风蚀，以及风沙尘对窟内壁画、彩塑的严重磨蚀仍然是长期困扰莫高窟保护面临的严重问题。1988 年在联合国教科文组织的牵线搭桥下，国家文物局与美国盖蒂基金会合作保护中国文化遗产，选择了敦煌莫高窟、云冈石窟为试验点。当时中美联合专家组对莫高窟实地考察后认为，莫高窟风沙环境的综合治理是目前工作的重点。首先在窟顶建立全自动气象站，

对风速、风向、太阳辐射、降水量、蒸发量、地温等基本气象要素进行监测，为防沙设计提供第一手资料。随后在窟顶戈壁区建立起“A”形尼龙网防沙栅栏，阻挡流沙直接进入窟区。同时针对窟顶及崖面的沙害，开展了化学固沙的室内与现场试验，成功地筛选出无机化学固沙材料。1992年又在鸣沙山前缘引进以色列滴灌技术，选择当地乡土沙生植物梭梭等进行植物固沙试验并获得成功。这些跨学科而富有开创性的研究工作均为莫高窟遗址风沙综合治理以及科学保护创造了条件。敦煌研究院在国家及相关组织的大力支持下，目前已经形成一个以固为主的综合防护体系，使进入窟区的积沙减少了85%以上，文物环境得到明显改善，完成的“敦煌莫高窟风沙灾害预防性保护体系构建与示范”荣获“十二五”文物保护科学与技术创新奖二等奖。

敦煌研究院与美国盖蒂基金会、盖蒂保护所长达30年的友好合作是我国文化遗址领域成功的合作典范，值得借鉴和推广。概括起来，主要表现在：一是合作的双方都在文物保护方面有成功的建树和良好声誉，项目负责人都是经验丰富、责任心强、有创新精神的领导者，参加项目的人员也都是长期在一线，能独立思考、勤奋工作、有责任心的高素质年轻人，双方能在一个平台上交流与对话。二是在选择合作的内容上，能够有明确目标，选择保护中亟待解决或久未解决的难题，具有一定的挑战性，如风沙灾害控制、壁画酥碱病害治理、游客承载量研究等。三是注意加强国际合作的管理，在共同工作时间，提出明确任务，做到全面安排，及时检查、沟通、协调，通过聘请第三方中外专家对项目进行全面评估，及时总结经验教训。四是不断引进世界先进的保护技术和方法，不断更新保护理念，如合作的内容从具体项目到《敦煌莫高窟总体规划（2005~2025）》制定，再到《中国文物古迹保护准则》的制定与修订，以及游客管理等。五是把人才培养始终放在优先位置。项目一开始，敦煌研究院就在甘肃甚至全国寻找相关专业的技术人员，特别是先后调入一批年富力强的中青年专业技术人员，不仅将他们送到国外学习、进修，而且特别重视在国际合作的实践中培养、历练他们，极大地提高了研究人员的素质，多数当时的项目组成员已成为活跃在文物保护一线的专家学者，不仅推动敦煌文物事业的飞跃发展，而且对促进我国文物保护事业的良性循环具有重要现实意义。

《敦煌莫高窟风沙危害及防治》一书是汪万福博士在对70年来莫高窟风沙防治研究工作的归纳、凝练和实践经验的全面梳理与总结的基础上，尤其是融合了作者及其研究团队近20年来在遗址监测、风沙防治、生态修复、沙尘气溶胶影响及游客对石窟的影响扰动等方面的创新研究成果。由于他具备刻苦钻研和不畏艰难的精神，使得他的研究成果丰硕，获奖连连，已成为我国中青年一代优秀的文物保护专家。这本著作代表了他在文物生态环境保护方面的学术水平。

该书的积极意义在于从莫高窟面临风沙的严重病害出发,采用风洞模拟实验,结合现场观测等技术,建立起一个以固为主,阻、输、导相结合的综合风沙灾害的预防性保护体系,从而解决了风沙长期困扰莫高窟壁画、彩塑的病害,并对莫高窟的生态环境保护具有重大的现实意义。

近年来,随着认识的不断深化和保护理念的不断更新,文物保护的内涵与外延都发生了巨大变化。文物保护已经成为社会科学、自然科学和工程技术等科学技术领域相互渗透融合的交叉学科。同时,“十三五”时期,国家明确指出文物保护要实现由注重抢救性保护向抢救性与预防性保护并重转变,由注重文物本体保护向文物本体与周边环境、文化生态的整体保护转变,通过“两个转变”确保文物安全。这就需要我们进一步加强文物的日常保养维护,明确监测目的,树立以文物安全的保存环境为主的保护理念,完善世界文化遗产管理动态信息和监测预警体系建设,通过对遗产地文物与环境的有效监测和控制干预,最大限度地防止文物的损坏,最终实现文化遗产及其赋存生态环境的长久保护与合理利用。

是为序。

中国文化遗产研究院

黄炎忠

丁酉年春于北京

前 言

敦煌，位于河西走廊最西端，是“丝绸之路”上的贸易、文化和军事重镇，也是世界上历史悠久、地域广阔、影响深远而自成体系的中国、印度、希腊、伊斯兰四种文化体系汇流的地区之一，地理位置极为重要。一般意义上的丝绸之路指“陆上丝绸之路”，是西汉时期由张骞出使西域开辟，全长 7000 余千米，以西汉的首都长安（今西安）或东汉的首都洛阳为东起点，跨越陇山山脉，穿过河西走廊至敦煌，经玉门关和阳关，抵达新疆，沿绿洲和帕米尔高原通向中亚、西亚和北非，最终抵达非洲和欧洲。这条路西运的货物中以丝绸制品影响最大，因此当德国地理学家费迪南·冯·李希霍芬（Ferdinand von Richthofen）在 1877 年出版的《中国》一书中将之命名为“丝绸之路”后，即被广泛接受。它不仅促进了欧亚大陆不同国家、不同文明之间在商贸、宗教、文化以及民族等方面的交流与融合，为人类社会的共同发展和繁荣做出了卓越贡献，而且为丝绸之路沿线留下了众多的历史遗址遗迹等珍贵文化遗产。

文化遗产不仅见证了历史的兴盛，而且凝结了古代劳动人民的智慧。丝绸之路文化遗产所具有的深厚历史底蕴和杰出文化价值已得到了国际社会的广泛认同，随着其沿线文化遗产保护、研究、管理和展示、弘扬工作的日益国际化和多元化，深入推动相关领域的国际交流与合作，不仅对丝绸之路文化遗产的保护与发展具有重要意义，亦将有助于为其他人类文化遗产的有效保护提供借鉴，从而为人类文明的发展和进步做出应有贡献。我国境内丝绸之路沿线分布有大量的文化遗产，主要包括陕西、河南、甘肃、青海、宁夏和新疆等省（自治区）的众多遗址，如汉长安城未央宫遗址、新疆吐鲁番地区的高昌故城等，而距离甘肃省敦煌市沙洲镇东南 25km 的莫高窟因其符合联合国《保护世界文化和自然遗产公约》的全部六项标准于 1987 年在我国首批被列入“世界文化遗产名录”。

莫高窟是古丝绸之路上一颗璀璨的明珠，被誉为“墙壁上的博物馆”。藏经洞遗产的发现又是 20 世纪最重要的文化遗产发现之一。然而，由于莫高窟地处我国八大沙漠之一的库姆塔格沙漠东南缘和鸣沙山东麓，该区风力强劲，沙源丰富，气候干燥，以积沙、风蚀、粉尘及沙丘移动为主的风沙灾害是其保存长期面临的主要环境问题，可以说自从乐僔和尚开凿第一个洞窟之时，风沙就一直是威胁洞窟安全保存的主要因素之一。据《推沙扫窟重饰功德记》记载，戊申年（公元 948

年)冬天,安某和家人在莫高窟巡查洞窟时,第129窟由于长时间无人管理,窟内积沙很厚,因此“推沙扫窟”成了首要任务,然后再重新补绘。这应该是古代洞窟清沙与重修相结合的典型案例。中华人民共和国成立以后,才真正有组织、有计划地开展莫高窟风沙防治工作。20世纪50年代,周恩来总理曾就敦煌文物的保护亲自作过批示,莫高窟的风沙防治工作从此顺利开展。后来,文化部会同中国科学院等单位,组成专家组对敦煌文物保护的现状和存在问题进行现场考察后,明确指出崖体稳定性、强烈的崖面风蚀及风沙危害是敦煌文物保护工作这一时期的主要任务,必须引起高度重视。在制定《1956~1966年敦煌艺术研究所全面工作规划草案》时,把防沙、清沙工作列入石窟保护和修缮重点工程项目中。1961年,在中国科学院治沙队指导下编制出《莫高窟治沙规划》,并在窟顶设置以工程措施为主的多种防治试验。

可见,自然环境保护特别是风沙环境的综合治理一直是莫高窟文化遗产保护的主要任务,也是敦煌学研究的核心内容之一。1988年,国家文物局与美国盖蒂基金会合作,将世界文化遗产敦煌莫高窟作为合作对象之一,并在充分调查论证后将莫高窟风沙环境综合治理研究作为主要合作研究内容,首次在窟顶建立全自动气象监测站,开展化学固沙试验,在戈壁区设置“A”形尼龙网栅栏,引进以色列滴灌技术进行植物固沙试验,取得明显的防风固沙效应。莫高窟风沙综合防治研究工作至此步入科学研究的新阶段。作者于1992年因敦煌研究院与美国盖蒂基金会合作研究项目“敦煌莫高窟生物固沙”从敦煌市林业局调入敦煌研究院保护研究所,从此开始了自己的文化遗产保护研究之路。在前人研究工作的基础上,受中国博士后科学基金、国家自然科学基金、国家基础研究发展规划(“973”)等多个课题(项目)的资助,项目团队经过20余年的潜心研究,厘清了莫高窟地区风沙运动规律和沙源供给;研发了人工砾石铺压防治戈壁风沙流新技术;引进滴灌技术进行生物固沙试验获得成功;明确了工程治沙、植物防护及化学固沙的防治效应;探讨了莫高窟水资源状况及窟前树木根系对石窟保护的影响;应用高通量测序等技术手段,揭示了洞窟内外大气颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中的微生物群落结构、质量浓度、易溶盐含量、化学元素、碳组分等特征及其影响因素;构建了一个以固为主,固、阻、输、导相结合的风沙灾害综合防护体系,使进入窟区的积沙量减少了85%以上。项目的逐步实施,从根本上解决了窟区及栈道的积沙危害,有效地减轻了风沙尘对石窟围岩及窟内壁画、彩塑的损害程度,改善了窟区旅游生态环境,为世界文化遗产地敦煌莫高窟的可持续发展提供了重要保障。

《敦煌莫高窟风沙危害及防治》一书是在作者博士学位论文《敦煌莫高窟风沙危害与防治研究》和博士后研究报告《敦煌莫高窟空气微生物群落结构特征及其影响机理》的基础上,融合了作者及其研究团队近年来在遗址监测、风沙防

治、生态修复、沙尘气溶胶,以及游客活动影响等方面的最新研究成果。全书共分 11 章。第 1 章绪论中系统论述了国内外研究进展,对历次防沙试验工程进行了评述,介绍了主要研究内容;第 2 章介绍了自然地理环境特征;第 3~5 章对莫高窟风沙危害类型、程度及形成机理,窟顶金字塔沙丘运移规律以及沙尘气溶胶特征及影响因素进行了重点探讨;第 6 章阐述了莫高窟风沙危害综合防护体系设计的指导思想、原则及总体布局;第 7~10 章,主要介绍了工程治沙、植物防护和化学固沙的原理、工程设计和材料筛选,以及防护效应监测及其分析,从防护林生理生态特性角度研究了其对极端干旱环境的适应特性,其中植物防护是核心内容;第 11 章对防护体系的综合防护效应进行了阐述,构建了莫高窟预防性保护体系。针对莫高窟所处的特殊地理环境,建立一个风沙危害综合防护体系,其意义不仅是对我国流沙固定及风沙防治工程水平的综合显示,更为重要的是表明我国政府对世界文化遗产的保护、根治沙害和改善西部地区生态环境的决心。

更让人欣慰的是随着文化遗产保护理论的不完善和日益丰富,在重视文物本体保护的前提下,人们越来越意识到保护文物赋存环境的极端重要性。“十三五”时期,国家明确指出文物保护要实现“两个转变”:由注重抢救性保护向抢救性与预防性保护并重转变,由注重文物本体保护向文物本体与周边环境、文化生态的整体保护转变,确保文物安全。敦煌莫高窟风沙危害与防治,正是基于对莫高窟遗址本体与生态环境的综合保护,是文化遗产预防性保护的典型案例,研究成果对广泛分布于丝绸之路沿线的文物古迹及重要经济设施的保护具有重要的示范价值,对我国即将实施的“一带一路”文化遗产长廊建设工程具有一定的借鉴意义,为推动丝绸之路沿线国家和地区的文化遗产保护工作的交流和协作提供了参考依据,为提高文化遗产保护和管理水平,以及文化旅游产业发展质量提升提供了理论指导。希望本书的出版能够为我国乃至其他国家世界文化遗产的保护、研究、弘扬和旅游可持续发展提供技术支撑。

作者

2017 年 3 月

目 录

《博士后文库》序言

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外风沙研究进展	1
1.1.1 治沙措施	1
1.1.2 大气颗粒物	3
1.2 莫高窟历次防沙治沙工程评述	7
1.3 研究内容	10
参考文献	12
第 2 章 自然地理环境	16
2.1 地质地貌背景	16
2.1.1 地理位置	16
2.1.2 地质背景	16
2.1.3 地貌特征	19
2.2 气候水文特征	20
2.2.1 气候特征	20
2.2.2 水资源	23
2.3 土壤植被特征	26
2.3.1 土壤	26
2.3.2 植被	27
参考文献	27
第 3 章 风沙危害及形成	29
3.1 风沙危害类型	29
3.1.1 积沙危害	29
3.1.2 风蚀危害	29
3.1.3 粉尘危害	35

3.2	风沙危害成因	38
3.2.1	环流背景	38
3.2.2	风况分析	38
3.2.3	输沙势计算与风沙流向	47
3.3	戈壁地表风沙流结构	48
3.3.1	实验设计	48
3.3.2	结果与分析	51
3.4	戈壁地表风蚀起沙量	57
3.4.1	风蚀起沙的物理机制及计算方案	58
3.4.2	观测资料及参数的确定	60
3.4.3	结果与分析	61
	参考文献	64
第4章	窟顶金字塔沙丘运移规律	68
4.1	立体摄影监测	69
4.1.1	沙丘运动监测	69
4.1.2	金字塔沙丘运动规律	74
4.1.3	小结	77
4.2	GPS 监测	77
4.2.1	数学基础、技术路线和方法	77
4.2.2	历年监测数据采集	89
4.2.3	观测数据统计分析	94
4.2.4	监测数据综合分析	120
	参考文献	123
第5章	莫高窟沙尘气溶胶	125
5.1	大气颗粒物	125
5.1.1	研究材料与方法	125
5.1.2	结果分析与讨论	130
5.2	窟区大气环境成分	163
5.2.1	实验布设及研究方法	163
5.2.2	结果与分析	164
5.2.3	讨论	167
5.3	洞窟空气交换速率	168
5.3.1	实验设计与方法	168
5.3.2	结果分析与讨论	171

5.3.3 小结	174
参考文献	175
第 6 章 综合防护体系设计	180
6.1 指导思想与原则	180
6.1.1 指导思想	180
6.1.2 防治原则	181
6.2 总体布局	183
参考文献	187
第 7 章 尼龙网与半隐蔽式方格沙障	188
7.1 尼龙网栅栏	188
7.1.1 现场实验	188
7.1.2 风洞实验	194
7.1.3 讨论	196
7.1.4 结论	197
7.2 半隐蔽式沙障	198
7.2.1 材料与沙障设置	198
7.2.2 观测结果	200
7.2.3 讨论	203
7.3 麦草方格沙障研究	206
7.3.1 对砂粒起动临界摩擦速度的影响	206
7.3.2 固沙效应评价	211
7.3.3 草方格的规格	212
7.3.4 结论	213
参考文献	214
第 8 章 砾石铺压防护技术	215
8.1 砾石铺压蚀积平衡	216
8.1.1 风洞模拟实验	216
8.1.2 野外观测	220
8.1.3 结论	222
8.2 砾石铺压蚀积过程	223
8.2.1 砾石铺压方法	223
8.2.2 实验方法	224
8.2.3 结果与分析	227
8.3 砾石铺压技术的应用	233

参考文献	236
第9章 植物防护与化学固沙	238
9.1 滴灌工程设计	239
9.1.1 设计内容及原则	239
9.1.2 窟顶、窟前滴灌工程设计	240
9.2 植物种的选择	250
9.2.1 研究区概况	250
9.2.2 供试材料	251
9.2.3 试验布置及林带设计	253
9.2.4 植苗季节与定植技术	254
9.2.5 辅助设施	254
9.2.6 结果与分析	254
9.2.7 小结	261
9.3 窟顶灌木林带防风固沙效应	262
9.3.1 现场实验	262
9.3.2 风洞实验	274
9.4 窟前林带防护效应	279
9.4.1 实验设计与方法	279
9.4.2 结果与讨论	282
9.4.3 小结	287
9.5 免灌条件下荒漠植被恢复	288
9.6 化学与植物固沙试验	289
9.6.1 材料与方法	289
9.6.2 对沙层含水量的影响	290
9.6.3 对土壤浅层温度的影响	290
9.6.4 结论	291
参考文献	293
第10章 防护林生理生态适应性	294
10.1 灌木林带光合荧光特征	294
10.1.1 材料与方法	294
10.1.2 结果与分析	295
10.1.3 小结	298
10.2 窟区树木蒸腾耗水量的估算	300
10.2.1 实验方法	300