



敦煌莫高窟遗址保护

物理环境探索性研究

闫增峰 王江丽 尚瑞华 著
杨学双 毕文蓓 史光超



科学出版社

国家自然科学基金“多场耦合条件下的莫高窟洞窟热湿环境调控理论与技术研究”资助出版课题编号(51378412)

敦煌莫高窟遗址保护物理 环境探索性研究

闫增峰 王江丽 尚瑞华 著
杨学双 毕文蓓 史光超

科学出版社

北京

内 容 简 介

石质洞窟遗址保护物理环境的研究,对于石质洞窟窟内微环境的调节控制和文物的保护有着十分重要的意义。本书针对敦煌莫高窟窟内物理环境的相关问题,主要开展了敦煌莫高窟建筑空间优化、洞窟内微气候测试、壁面材料表面吸放湿过程、洞窟内通风调节与控制、洞窟内光环境、窟区绿化景观微气候调节机理等方面的研究,在石质洞窟物理环境的遗址保护理念、洞窟形制与微气候的关系、洞窟内外空气交换模型、壁画地仗层传热传湿机理、洞窟遗址环境主动式和被动式结合的预防性保护措施等研究内容方面取得了一定的突破,推进了我国石质洞窟遗址保护物理环境的研究工作。

本书可供从事洞窟遗址保护物理环境的科研人员和大专院校建筑技术专业的师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

敦煌莫高窟遗址保护物理环境探索性研究/闫增峰等著. —北京:科学出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-03-060543-6

I. ①敦… II. ①闫… III. ①敦煌石窟-文物保护-物理环境-研究 IV. ①K879. 214

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 029843 号

责任编辑:刘浩旻 韩 鹏 白 丹 / 责任校对:张小霞

责任印制:吴兆东 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 13 3/4 插页: 10

字数: 326 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

敦煌莫高窟因其罕见的佛教文化规模、精湛的艺术表现形式及历经千年仍较为完整的保存现状，闻名中外。然而，近年来莫高窟窟区较为频繁地出现短期急降雨气候，改变了持续干燥的沙漠气候，窟区短期急降雨造成水汽侵入洞窟内，引起洞窟内热湿环境的扰动，从而会导致壁画地仗层内水分迁移和激活盐害。因此，敦煌莫高窟遗址物理环境的预防性保护措施成为文物保护技术一个亟待解决的重要课题。关于石质洞窟微环境方面，敦煌研究院对敦煌莫高窟微环境控制关键技术和智能分隔控制系统进行了相关研究。在此基础上，课题组在敦煌研究院的支持下，开展了“多场耦合条件下的莫高窟洞窟热湿环境调控理论与技术研究”课题，试图通过该课题的研究，在石质洞窟遗址物理环境的保护方面有所突破。本书为该课题研究成果的集中体现。

课题研究伊始，结合敦煌莫高窟遗址保护环境的特点，提出了以下几条石质洞窟遗址保护的基本思路。

1) 主动式和被动式相结合的保护理念

洞窟类遗址有着其自身的特殊性，如敦煌莫高窟，洞窟众多，虽然集中在一个地方，但洞窟的大小和规模不尽相同。如果完全采用主动式的调控措施，不仅设备的投入和使用是一个相对较大的负担，而且难以取得每个洞窟保护的适宜性参数。因此，采用主动式和被动式相结合的保护措施有助于针对不同洞窟的特点采取适宜性措施，高效而又低成本地维持洞窟长久以来相对稳定的微环境，达到较好的保护效果。

2) 现场监测与数值模拟分析相结合的研究方法

敦煌莫高窟作为珍贵的文化遗产，其文物具有十分重要的价值。对窟内环境进行监测，研究窟内环境参数的变动对文物保护的影响，是首先要解决的问题。但是，由于文物的不可再生性，有些监测方法并不能直接使用。这就需要将现场监测和数值模拟分析相结合，通过数值模拟分析，科学性地弥补现场监测的不足，从而对窟内环境参数进行合理预测，为文物保护提供合理的理论方法。

3) 适宜当地气候、地理条件的监测体系

在文物保护中，科学监测是保护的重要手段，其对进一步了解病害发生、揭示病害机理具有重要的意义。而不同石质洞窟由于气候、地理条件不同，需要针对其特点提出合理的监测体系。虽然敦煌莫高窟地处西部干旱地区，但夏季也会出现短期急骤雨气候，监测体系中需要针对该特点提出针对性的监测方案，以深入发掘文物病害与环境因素变量之间的关系，从而采取有效的保护措施。

4) 以预防保护为主，确保遗址保护效果

洞窟类遗址保护是一个复杂的多学科问题，文物保护的特殊性也使得在制定保护方案时，需要根据环境参数的演变和病害的成因，提出预防性保护措施。这就要求在敦煌莫高窟保护物理环境的研究中，要有一定的前瞻性和预测性，在全面调查和正确分析病害成因

的基础上,提出保护方案,确保遗址保护效果。

在充分总结已有研究结果的基础上,根据以上研究理念,采用建筑物理学、材料学和文物保护等相关学科的理论和研究方法,初步解决了敦煌莫高窟保护物理环境的相关问题。主要开展的研究内容有以下几点。

(1) 深入分析敦煌莫高窟窟区及大、中、小型洞窟微气候现状,总结了窟区地形、景观对微气候的影响规律,探索洞窟形制与微气候关系规律。揭示敦煌莫高窟绿洲景观对文物保护的影响作用,探索并模拟验证针对窟前广场微气候环境的窟区绿化景观改造建议,为准确预测遗产环境的室外风、热环境奠定了基础。

(2) 建立敦煌莫高窟内外空气交换理论模型。基于对敦煌莫高窟建筑形制的调研及窟内微气候的模拟分析,结合建筑内外空气交换理论研究,提出窟内外空气交换理论模型,研究了敦煌莫高窟自然通风驱动力。

(3) 确定洞窟机械通风系统送风量的计算方法。现场试验及测试数据显示,该系统有效地抵御了窟外潮湿空气的渗入,对窟内微气候的扰动不及人员走动的影响,最大限度减少对窟内稳定微环境的影响,同时也缩短了 CO_2 浓度达到开放标准的时间。

(4) 首次系统地测试了地仗层材料的热物理性能参数,理论研究揭示了地仗层的传热传湿机理,并通过数值计算定量分析传热传湿过程,为机械送风系统对地仗层内热湿传递及病害形成研究提供了理论基础。

(5) 研究了敦煌莫高窟洞窟的建筑形制、洞窟前室对遗址赋存环境的保护作用及 55 窟的殿堂前室复原设计。从敦煌莫高窟光环境设计相关理论、窟内自然采光设计和人工照明辅助设计 3 个方面对洞窟内的光环境适宜性理论和设计原则进行分析,确定了适宜的光环境设计目标。

通过以上研究完成了敦煌莫高窟建筑空间优化、洞窟内微气候测试、壁面材料表面吸放湿过程、洞窟内通风调节与控制、洞窟内光环境、窟区绿化景观微气候调节机理等方面的研究,在石质洞窟物理环境的遗址保护理念、洞窟形制与微气候的关系、洞窟内外空气交换模型、壁画地仗层传热传湿机理、洞窟遗址环境主动式和被动式结合的预防性保护措施等研究内容方面取得了一定的突破,推进了我国石质洞窟遗址保护物理环境的研究工作。通过课题的实施,培养和锻炼了一支高学历遗址保护研究团队,提高了我国遗址保护物理环境方面的研发能力和水平。

闫增峰

西安建筑科技大学建筑学院

2018 年 11 月

目 录

前言	
第1章 概述	1
1.1 莫高窟介绍	1
1.2 莫高窟气候环境	3
1.3 莫高窟文物病害	14
1.4 小结	16
第2章 莫高窟建筑空间研究	17
2.1 莫高窟洞窟建筑形制研究	17
2.2 莫高窟洞窟前室对遗址赋存环境的保护作用	22
2.3 莫高窟 55 窟窟前殿堂建筑复原设计研究	34
2.4 小结	40
第3章 莫高窟窟区及窟内微气候测试研究	42
3.1 莫高窟窟区环境及窟门形式	42
3.2 测试洞窟介绍	47
3.3 莫高窟窟区风环境实测研究	48
3.4 洞窟内热、湿环境实测研究	55
3.5 洞窟内风环境实测研究	66
3.6 小结	73
第4章 莫高窟壁画材料层表面吸放湿过程研究	74
4.1 莫高窟壁面构造与材料	74
4.2 地仗层试样材料热湿物理性能参数测试研究	76
4.3 壁画表面吸放湿过程研究	92
4.4 窟内风速对壁画表面吸放湿的影响	96
4.5 小结	98
第5章 莫高窟洞窟通风调节与控制研究	99
5.1 莫高窟洞窟自然通风驱动力研究	99
5.2 莫高窟洞窟通风调节与控制系统压力	103
5.3 莫高窟洞窟通风调节与控制系统设计风量	106
5.4 莫高窟洞窟机械通风系统数值模拟	109
5.5 莫高窟洞窟通风调节与控制系统实现及现场试验	112
5.6 小结	129

第6章 莫高窟洞窟光环境研究	130
6.1 莫高窟洞窟光环境现场实测	130
6.2 洞窟光环境模拟研究	147
6.3 莫高窟洞窟光环境设计	153
6.4 小结	158
第7章 莫高窟绿化景观微气候调节研究	159
7.1 莫高窟绿洲景观信息模型研究	159
7.2 莫高窟绿化影响窟区风环境研究	162
7.3 莫高窟绿化影响窟区温度	176
7.4 莫高窟绿化用水对洞窟壁画的影响	186
7.5 莫高窟绿化景观改造及预测	190
7.6 小结	204
第8章 结论与展望	205
8.1 结论	205
8.2 展望	206
参考文献	207
后记	213
彩图	

第1章 概述

1.1 莫高窟介绍

敦煌莫高窟（Mogao Grottoes）俗称千佛洞，是世界上现存规模最大、内容最丰富的佛教艺术圣地，被誉为20世纪最有价值的文化遗址发现。莫高窟自开凿以来已有1600多年的历史，从公元4世纪到14世纪，南北朝至宋元11个朝代从未间断，形成了古埃及、古希腊、古罗马早期、犍陀罗、巴米扬、龟兹艺术和中原汉民族文化的交汇融合，是多种艺术特色在佛教石窟壁画、彩塑及建筑中的集中体现。

莫高窟规模宏大，壁画、塑像和建筑等在一定程度上反映了当时的政治、经济、文化水平，具有极高的文物价值。1961年莫高窟由国务院公布为首批国家重点文物保护单位，1987年由联合国教育、科学及文化组织委员会批准列入世界文化遗产名单（樊锦诗，2008）。

莫高窟不仅是灿烂的艺术宝库，还是丰富的文化、科技宝库，蕴藏了许多珍贵的研究资料。多种形制的石窟类型、木构窟檐，特别是4万多平方米各种题材的壁画和2000多身彩塑，内容丰富、博大精深，对研究我国美术史、宗教、音乐舞蹈史、服饰、少数民族文字、古代科技等提供了丰富的、形象的资料（张艳杰，2009）。

1.1.1 莫高窟区位

敦煌市隶属于甘肃省酒泉市，位于河西走廊的最西端，地处甘肃、青海、新疆三省（自治区）的交汇处，也是“丝绸之路”的节点城市。“丝绸之路”是指由张骞出使西域开辟的以古长安（今西安）为起点，途经甘肃河西走廊、新疆，到中亚、西亚，并连接地中海各国的陆上通道。在航海技术尚不发达的很长一段时期，“丝绸之路”是连接东西方文化的唯一陆路交通。“丝绸之路”自中原腹地洛阳/长安西去，在敦煌分为向北沿哈密、向中沿吐鲁番、向南沿世界第二大沙漠塔克拉玛干南面的线路。敦煌成为“丝绸之路”的分岔点及交会点，是其咽喉之地。

敦煌东南有党河南山，属于祁连山；西南有阿尔金山。它们在南面形成了一道平均海拔高达4000m的屏障。北部的马鬃山区系天山余脉，平均海拔2000m左右。中间为狭长的西高东低的倾斜带，南接南疆盆地东沿，东连瓜州县，平均海拔在1200m以下，是典型的狭管地带。莫高窟坐落于敦煌市东南的鸣沙山东麓、大泉河西岸，东向三危山。北距敦煌市25km，东距嘉峪关市400km（图1.1）。遗址中心坐标点：北纬40°02′14.2″，东经94°48′14.7″；海拔1320~1380m（郭青林，2009）。

敦煌的区位特色使其成为人类文化交流的圣地。华夏文明、古印度文明、古希腊文

明、美索不达米亚文明等世界四大古典文明都曾在敦煌相汇相融（李并成，2006）。

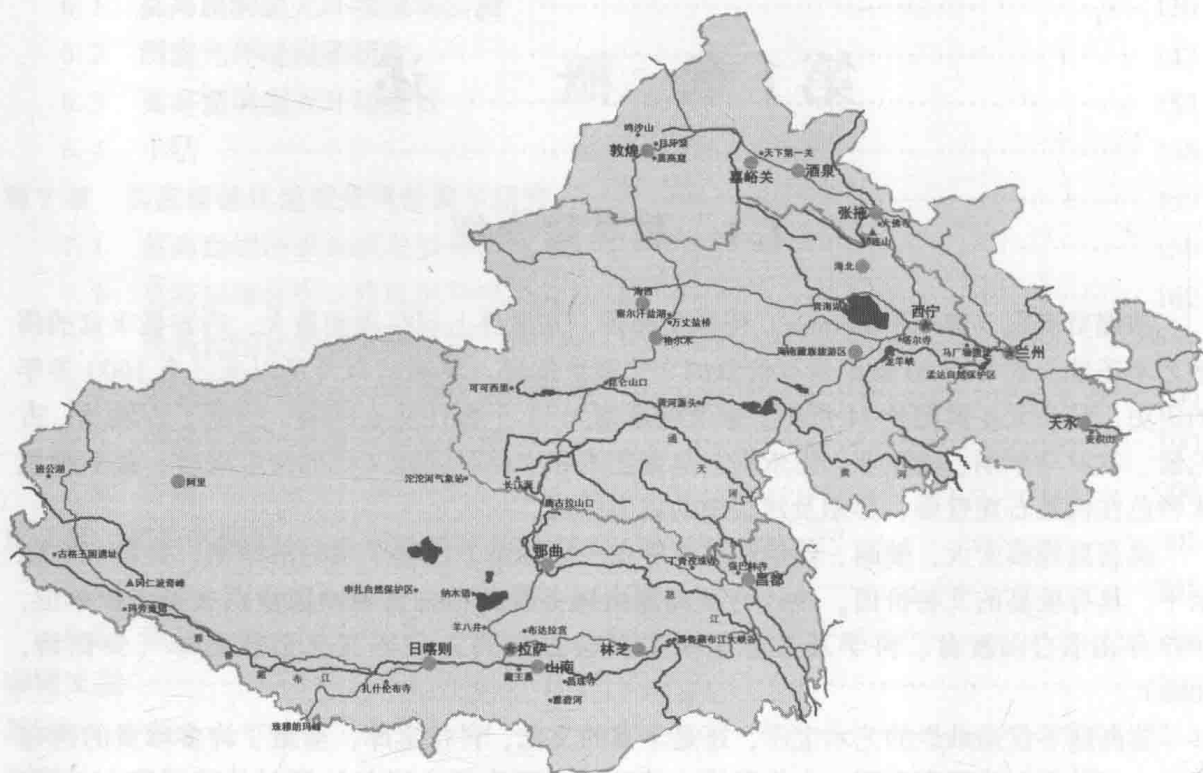


图 1.1 甘肃省敦煌市的地理位置图

图片来源：敦煌研究院

1.1.2 莫高窟地形地质特点

敦煌境内地势四周高中间低，所以其又有盆地之称。莫高窟地处敦煌盆地的南边缘，距敦煌市区 25km，远离敦煌绿洲（彩图 1）。东面是三危山，西面是鸣沙山，三危山和鸣沙山形成了一个喇叭形。东边的三危山是从瓜州至敦煌绵延 140 余千米的一系列直线型断层隆起的断块山，主峰海拔 1947m，高出莫高窟 600m，一般地段相对高 300 ~ 500m。西边的鸣沙山是一片沙漠区，海拔 1100 ~ 1500m，鸣沙山相对高度不足百米。三危山和鸣沙山交接处有大泉河水自南向北流淌，由于大泉河水的长期冲刷和地质变迁，在酒泉组的胶结岩上形成了北偏东约 15° 南北走向的河谷，全长约 7km，宽 50 ~ 300m。莫高窟就开凿于大泉河西岸的崖面上，位于偏南地段，崖面高 30 ~ 40m。窟前谷地呈柳叶形，叶柄朝北，长 1600m，园林绿地面积为 14hm²。东岸偏北的新区是敦煌研究院的办公生活区，有园林绿地 14.4hm²。莫高窟的海拔在 1320 ~ 1380m。以上就是莫高窟的地形结构特点。

莫高窟崖面主要为砂砾岩，崖体比较坚固，三危山主要为石质岩层。莫高窟在地质上属于第四系酒泉砾岩，并伴有砂岩，不具有整体岩石的硬度，以松散的陆相砾岩为主；同时，卵石、砾岩及砂岩的硬度、大小、密度不一。

敦煌附近酒泉冰碛层在河西走廊的祁连山北麓和嘉峪关市区一带均有大量出露。该砾石层中砾石多为岩石碎屑,岩性变化较大,砾石无分选性,大小岩屑与沙土混杂在一起,磨圆度中等,可见大型的交错层理,胶结物多为泥质、钙质和硅质。由于这种胶结和半胶结的砾石层较易挖掘和具有较好的稳定性,所以千余年来成为莫高窟的主要洞窟层。由于敦煌地处内陆干旱盆地,是风积作用的主要场所,在风的搬运作用下形成沙漠。在这气象万千的瀚海沙洲里,在不同地形条件、不同风向条件下所形成的各类型的风积波纹、沙丘、纵向沙垄、新月形沙丘链、风成交错层理等比比皆是,是研究风积作用的理想地区。

1.2 莫高窟气候环境

敦煌属于温带大陆性气候中的沙漠气候,一年四季气候多变:冬季干冷且持续时间较长;春季冷暖变化较大;夏季炎热,降水多且集中;秋季快速转凉且日渐寒冷。全年日照时数为 2962.5h,日照率为 73%,年平均气温达到 10.6℃,历年绝对最高气温为 40.6℃,绝对最低气温达到 -21.5℃,最大日较差为 28.3℃,历年平均地温为 12.4℃,每年 10 月底开始结冰,翌年 3 月下旬解冻。敦煌降水稀少,且时空分布不均,水旱灾会交替出现。敦煌平均年降水量为 23.2mm,且降水多集中在 6~9 月;多年蒸发量为 4347.9mm,平均相对湿度为 32.2%,干燥指数 $K=32$;正常年份,敦煌地区常处于大面积干旱缺水的状态,但小范围局地暴雨又使洪水经常泛滥。该区风大沙多,荒漠化吞噬绿洲状况严重,仅以河西地区为例,1950~2000 年以来共发生过 6 次特大沙尘暴。莫高窟距敦煌市中心 25km,其大气候变化基本与敦煌市相符。为常年精准监测窟区局地气候变化,莫高窟设立了 3 个固定气象站,分别位于 72 窟窟前位置、96 窟窟顶位置和窟顶砾石铺沙位置,其中前两个气象站的位置如图 1.2 所示。为了解莫高窟窟区局地气候环境的变化规律,选择 72 窟窟前和 96 窟窟顶气象数据进行对比分析,气象数据均由敦煌研究院提供(图 1.3)。受气象数据的限制,挑选 2011 年 9 月~2012 年 8 月连续 12 个月的气象数据作为研究莫高窟窟前和窟顶全年气象参数规律的依据,分析软件为 Excel 和 Origin。



图 1.2 莫高窟气象站点分布图



(a) 72窟窟前气象站 (b) 96窟窟顶气象站 (c) 窟顶砾石铺沙气象站

图 1.3 莫高窟气象站图

1.2.1 风环境

1. 风速分析

气象数据显示，96 窟窟顶年平均风速为 3.67m/s，春季 3~5 月平均风速为 4.26m/s，最大风速出现在 2 月，为 15.46m/s，大于 6.99m/s 的风速占全年风速的 4.86%；72 窟窟前年平均风速为 0.92m/s，3~5 月平均风速为 0.94m/s，最大风速出现在 4 月，为 4.64m/s（图 1.4 和图 1.5）（尚瑞华等，2014）。窟前风速明显小于窟顶风速，可见莫高窟的山谷地形及窟区绿化对风速的影响效果显著。

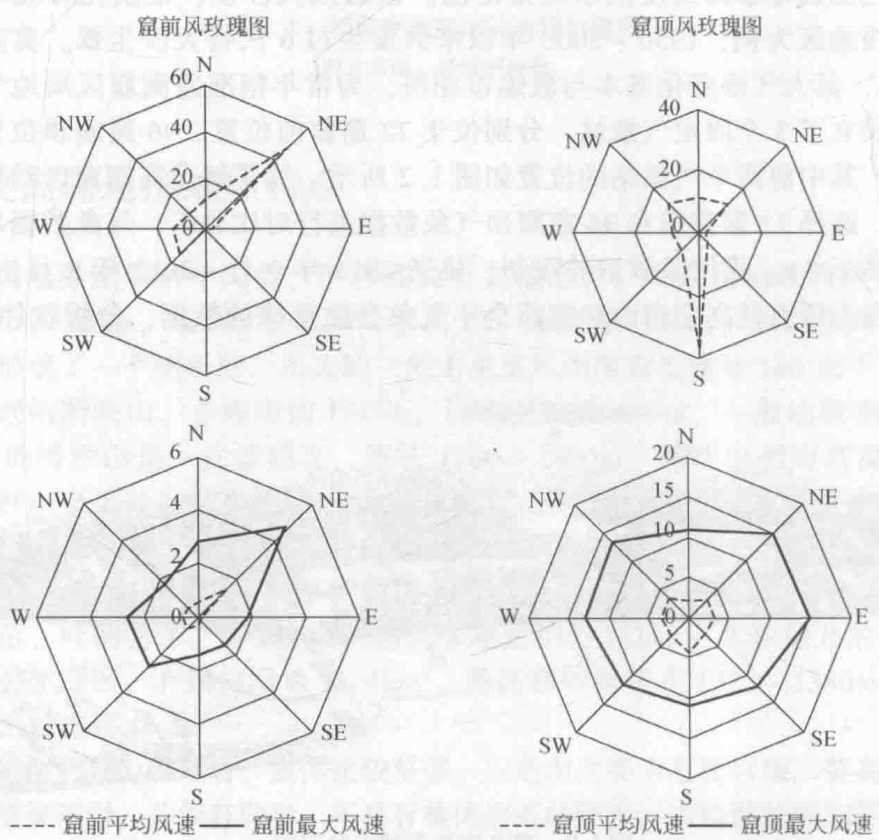


图 1.4 莫高窟窟前、窟顶风玫瑰图

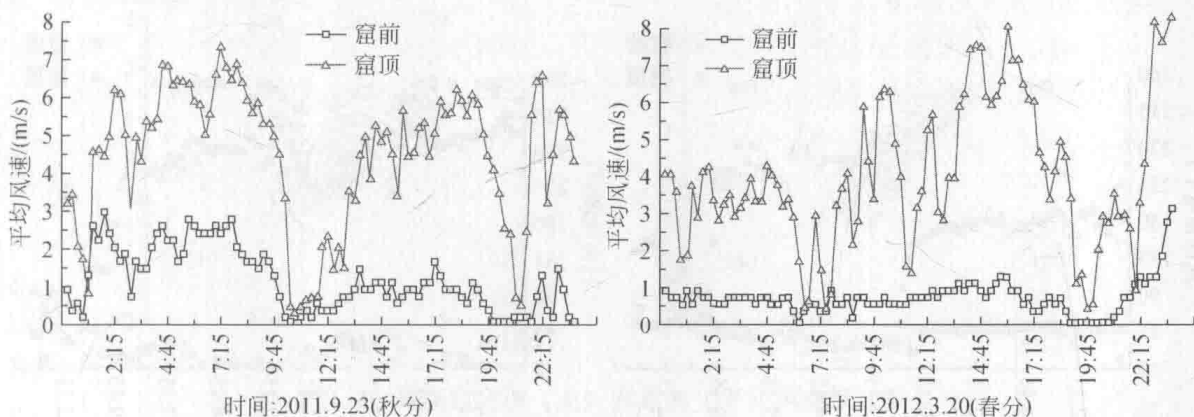


图 1.5 莫高窟窟顶、窟前风速对比图

2. 风向分析

莫高窟风场环境的形成可从 3 个尺度由大到小逐一分析：大尺度地形，如青藏高原、祁连山等；中尺度地形，如三危山、鸣沙山等；小尺度地形，如莫高窟沙漠、戈壁、绿化等不同下垫面。上述 3 种尺度地形均能够产生一定的热动力作用，进而影响莫高窟的风场环境。

受天山和祁连山的影响，以及受塔里木盆地东部缺口形成的“东灌”气流的影响，青藏高原附近冬、夏两季形成的环流形势使得莫高窟东、西向风有季节性变化特征：冬季以西向风为主，受主体环流西风带及大型天气过程的影响，具有明显的突发性；夏季以东向风为主，常与降水过程相联系。

莫高窟南风风频极高，但风速较弱，这与地方性的局地环流有很大关系。来自祁连山的南向山风经过长距离的戈壁运行来到莫高窟，并受三危山和鸣沙山的遮挡作用，风力削弱明显。

为便于研究莫高窟风向的变化规律，研究借鉴“风矢量”概念，风速值为测量值 (m/s)，风向值为正北方向线顺时针旋转到矢线间的夹角 (°)，矢线长度与风速大小成正比。按照极坐标方式，将各个风向量分解成东西向分量和南北向分量：东西向分量中，西向为负，东向为正；南北向分量中，南向为负，北向为正。数据分析软件为 Excel 和 Origin。计算公式如下：

$$V_{EW} = |\vec{V}_t| \times \sin\theta_t \quad (1.1)$$

$$V_{SN} = |\vec{V}_t| \times \cos\theta_t \quad (1.2)$$

式中， V_{EW} 为风速的东西向分量，m/s； V_{SN} 为风速的南北向分量，m/s； $|\vec{V}_t|$ 为 t 时刻的风矢量值，m/s； θ_t 为 t 时刻的风向角度值； t 为时刻。

1) 正风向日变化规律

莫高窟特殊的地理位置及山谷地形决定了其为典型的多风向地区。在分析全年气象数据日变化规律时发现 (图 1.6)：南北向风中，夜间南风，日间北风，南风持续时间多从 20:00 到次日 10:00 前后；东西向风中，白天以东风为主、以西风为辅，夜间西风。

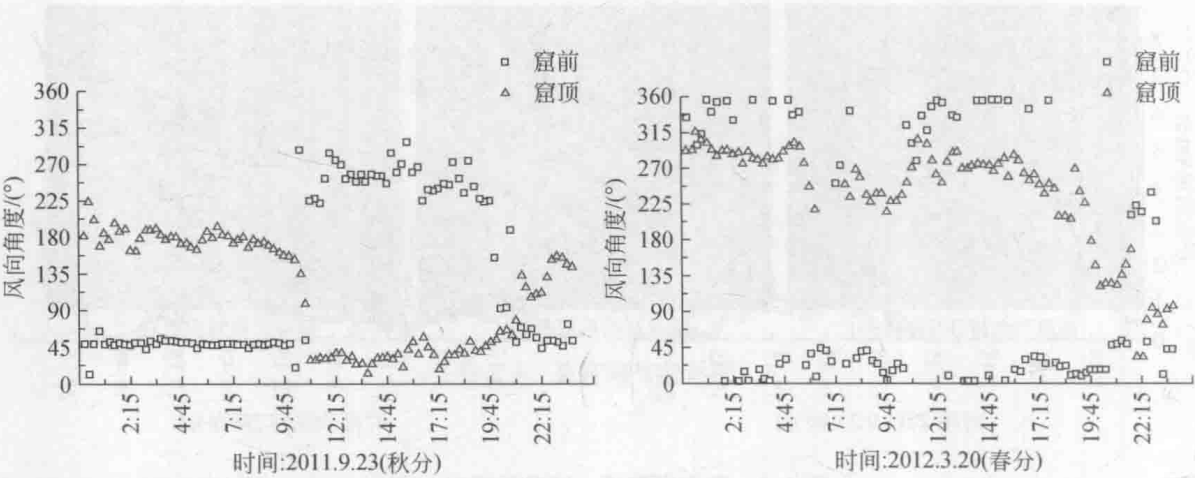
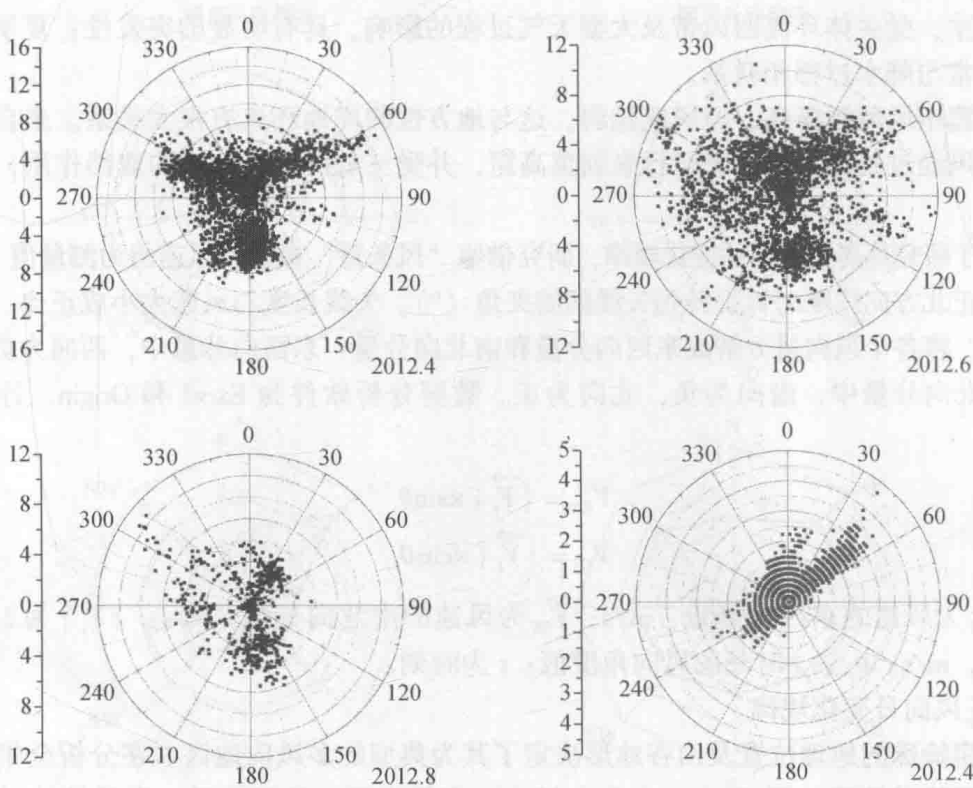


图 1.6 莫高窟窟顶、窟前风向对比图

2) 正风向月变化规律

风向月变化规律可通过风向极点图来判断。莫高窟窟顶 4 月、6 月西向风明显增多，风频比为 37.92% 和 37.12%，6 月、8 月东向风明显增多，风频比为 32.81% 和 36.33%。

对比分析发现（图 1.7），莫高窟为多风和多风向地区且强风多出现在春季；南向风频率高，强度弱，且稳定持久；东、西向风风速大，出现频率低，季节性变化大；南向风风频大于西向风和东向风；窟前风速明显小于窟顶风速。



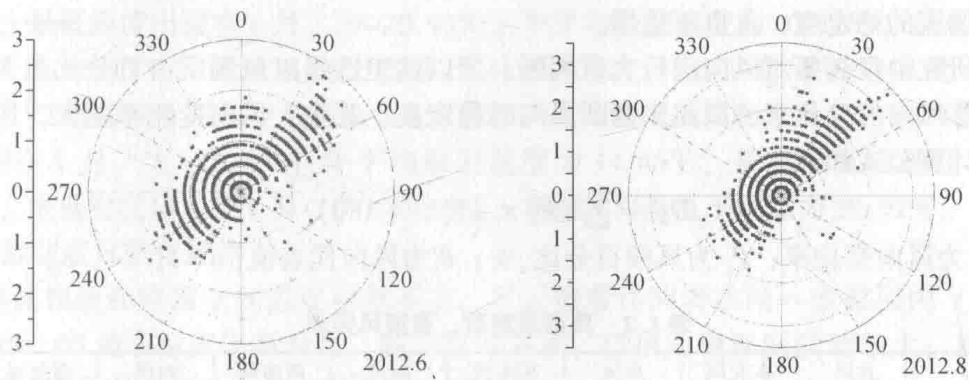


图 1.7 莫高窟窟顶（上）和窟前（下）风向极点图

莫高窟窟前区域南风出现频率急剧下降，东北风出现频率大幅增加。莫高窟窟顶全年出现南风的频率远高于窟前出现南风的频率（图 1.4）。窟前南风的最主要原因是三危山与鸣沙山比莫高窟窟前下垫面高出许多，形成一道天然屏障，使得大地形环境中的南风难以侵入到窟前微气候环境中，南风出现频率急剧下降。而东北风频率大幅增加则是由于 72 窟窟前气象站所处的崖体与窟前林带形成了北偏东一定角度的通道朝向，而莫高窟窟前气流被窟前崖体表面及窟前林带阻挡与引导，所以东北风出现频率会大幅增加。

3) 窟前风向与窟顶风向的关系研究

莫高窟为多风向风场环境。为研究窟顶风向与窟前风向的变化规律，这里提取窟顶中同向风出现时间超过 2h 的气象数据进行研究。研究发现：在全年气象数据中，同向风持续出现时间超过 2h 的频次从高到低依次为南风、东北风、西北风、北风、西风、西南风、东南风和东风；窟顶为北风、东北风和东风时，窟前风向有明显的季节性规律，且北风和东北风时的规律基本相同；窟顶为其余风向时，窟前风向无明显规律（表 1.1）。

表 1.1 窟顶、窟前风向关系

窟顶风向	同向风>2h 出现的频次	窟前风向
北风	81	7 月中旬至 11 月中旬以西风、西南风为主；11 月中旬至次年 7 月中旬以东北风为主
东北风	119	7 月中旬至 11 月中旬以西风、西南风为主；11 月中旬至次年 7 月中旬以东北风为主
东风	16	7 月中旬至次年 3 月中旬以东北风为主；3 月中旬至 7 月中旬以西南风为主
东南风	25	风向无明显规律
南风	276	9 月中旬至 11 月中旬以东北风为主；其余时间风向无明显规律
西南风	45	风向无明显规律
西风	66	风向无明显规律
西北风	119	11 月中旬至次年 3 月中旬以东北风为主；其余时间风向无明显规律

4) 风向稳定度研究

对于风向稳定度的研究：张丽等（2008）采用“有向转角”概念，能够反映风向的方向性和旋转角度，但由于其研究的风向以逐日变化为单元，而莫高窟每天的风向变化均不稳定，所以并不适用；汪万福（2006）对莫高窟风的稳定性进行了研究，但由于其侧重点为风沙防护，是将每场风的 15min 平均风速连续大于 5m/s 的最大风速与平均风速的比

值作为每场风的稳定度，这也不适用。

由于研究中仅需要对风向进行大致判断，所以这里选择以风频所占百分比最大风向为基准，计算风向的变化率，以此来判断风向的稳定度。其中，风向变化率越大，风向稳定度越差。计算公式如下：

$$D_w = \sum (P_i \times |\theta'_i| \div 180)$$
 (1.3)

式中， D_w 为风向变化率； P_i 为风频百分比，%； θ'_i 为风向代表值； $i=1, \dots, 8$ 。

表 1.2 莫高窟窟前、窟顶风频表

项目		北风	东北风	东风	东南风	南风	西南风	西风	西北风	D_w
窟顶	θ'_i	± 180	-135	-90	-45	0	45	90	135	0.40
	$P_i/\%$	11.39	13.70	2.74	4.64	38.39	7.47	8.41	13.25	
窟前	θ'_i	-45	0	45	90	135	± 180	-135	-90	0.34
	$P_i/\%$	12.53	46.47	2.38	0.42	0.96	15.09	13.14	9.02	

数据（表 1.2）显示：窟前风向的变化率为 0.34，窟顶风向的变化率为 0.4。

对比研究发现：莫高窟东、西向风对莫高窟文物保护的影响较大；窟前风速明显小于窟顶风速，且窟前风向比窟顶风向稳定，这是有利于莫高窟文物保护工作的。

3. 莫高窟风环境特征

莫高窟地处甘肃省西部，是一个多风地区，年平均风速约为 4m/s，而且是一个多风向地区（杨善龙，2009）。由图 1.8 可以看出，该地区以南风为主，约占全年的 30%。总体来看，莫高窟窟区冬季风速比夏季风速要大，而窟区的降水量正好与风速成反比，即夏季降水量大时窟区风速较小，冬季降水量小时窟区风速较大，这样减少了夏季风携带水蒸气进入洞窟内的危险。

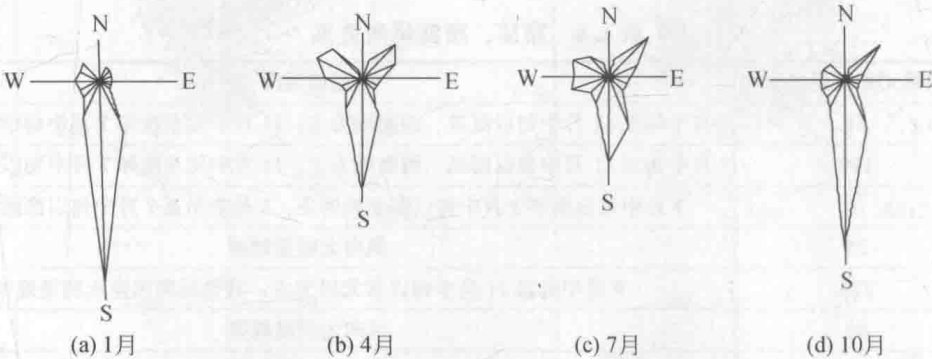


图 1.8 莫高窟风向季节变化
图片来源：敦煌研究院

1.2.2 温湿度

1. 温湿度分析

气象数据显示：96 窟窟顶年平均空气温度为 11.53℃，最高温度出现在 8 月，为

36.39℃，最低温度出现在1月，为-20.93℃；年平均地表温度为20.12℃，最高温度出现在7月，为60.17℃，最低温度出现在1月，为-22.41℃，窟顶相对湿度平均值为26.38%。72窟窟前年平均空气温度为13.13℃，最高温度出现在8月，为38.12℃，最低温度出现在1月，为-20.4℃；年平均地表温度为14.45℃，最高温度出现在6月，为47.91℃，最低温度出现在1月，为-20.14℃，窟前相对湿度平均值为29.92%。

1) 温湿度日变化规律

莫高窟窟前和窟顶空气温度相差不大，可近似看作两者在同一变温层内（图 1.9）；8：30～19：00 地表温度逐渐升高，高于空气温度，窟顶地表温度波动最大；夏、秋季，窟前、窟顶地表温度波动比冬、春季波动幅度大。

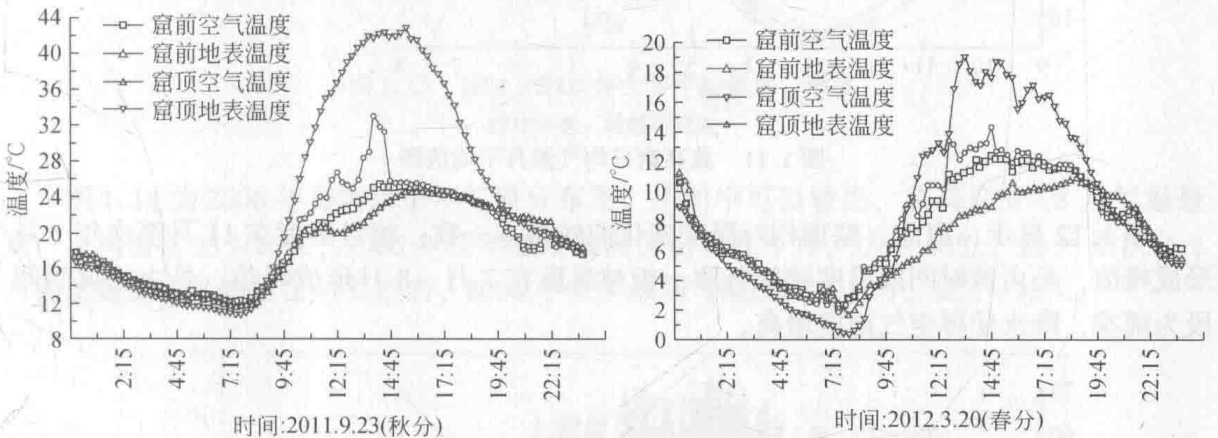


图 1.9 莫高窟窟前、窟顶温度对比图

图 1.10 显示：相对湿度变化规律与空气温度相反；除 12：00～2：00 两者相对湿度基本相同以外，其余时间窟顶相对湿度略低于窟前相对湿度。

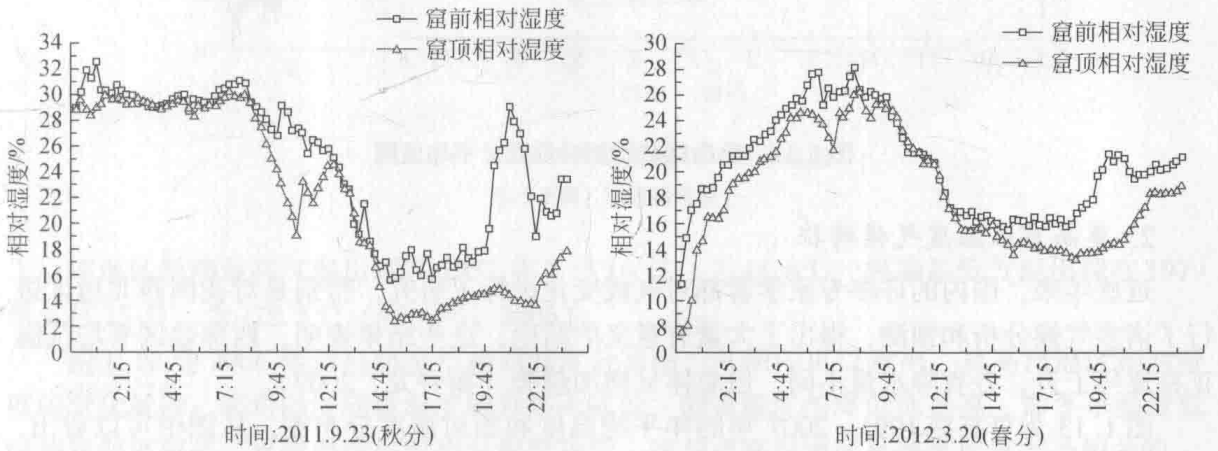


图 1.10 莫高窟窟前、窟顶相对湿度对比图

2) 温湿度月变化规律

图 1.11 显示：窟前、窟顶温度差异较小，可近似认为其处于同一变温层内；莫高窟

区日均最高气温与敦煌最高气温相似,日均最低气温差异较大;莫高窟窟前平均气温高于敦煌市区 0.84°C ,考虑海拔的降温作用 2.07°C ,窟前小区域的实际综合增温效应年平均可达 2.91°C ,山谷地形的增温作用是主要因素(李红寿等,2008a)。

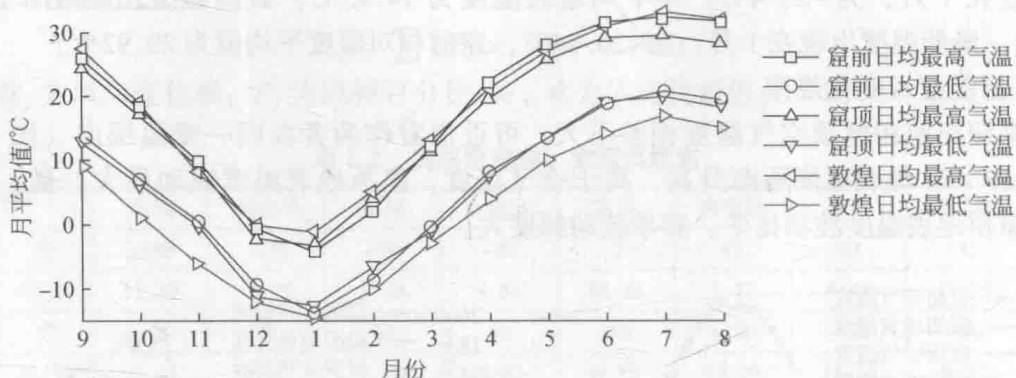


图 1.11 莫高窟日均气温月平均值图

图 1.12 显示:窟前、窟顶相对湿度变化曲线基本一致;相对湿度在 11 月至次年 1 月形成峰值,是由该时间段温度较低所致;相对湿度在 7 月、8 月形成峰值,是由于该时间段为雨季,降水使得空气湿度增高。

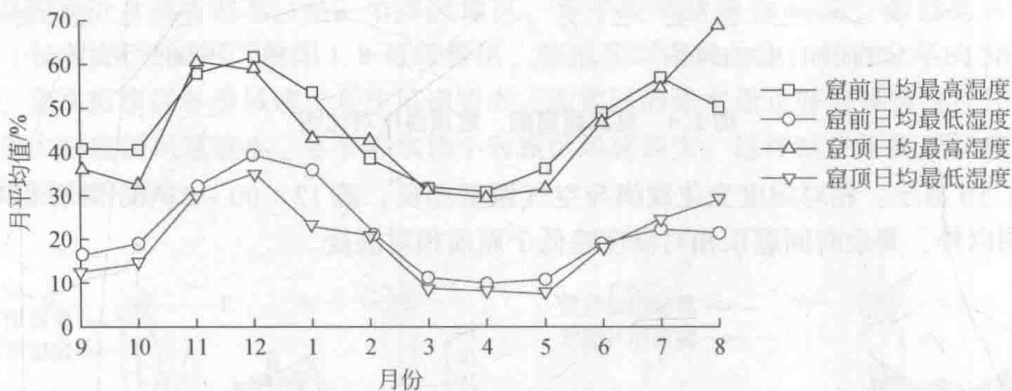


图 1.12 莫高窟日均相对湿度月平均值图

2. 莫高窟温湿度气候特征

近些年来,国内的许多专家学者都对气候变化进行了研究,特别是对我国西北地区进行了诸多气候分析和预测,得出了大量有意义的结论,这些结果表明,西部地区平均气温正在逐年上升,各省降水量不同,但总体呈增加趋势(杨善龙,2009)。

图 1.13 为莫高窟 1991~2007 年的年平均温度和相对湿度分布图,从图中可以看出,在测试记录的 17 年时间内,莫高窟的温度变化相对稳定,基本在 15°C 上下浮动,整体略有温度上升的趋势。但是,1991~2007 年全年平均相对湿度变化较为复杂,1991~1996 年呈下降趋势,从 1996 年开始,总体呈现上升趋势。温度变化的相对稳定对于洞窟内壁画的保存是有利的,但是湿度的不稳定变化则不利于洞窟内壁画的保护。