

敦煌莫高窟窟区风环境研究

尚瑞华¹, 闫增峰¹, 王旭东^{2,3}, 张正模², 王江丽^{1,4}, 薛平², 高文强²

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 敦煌研究院保护研究所, 甘肃 敦煌 736200;
3. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 4. 河南科技大学建筑工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 通过 PHOENICS 模拟研究莫高窟窟区及窟前林带风环境特征。结论如下: 当各风向风速为最大值时, 莫高窟地形地势削弱东、西向风风速, 值均大于 3 m/s, 西南风除外; 除窟前广场区域外, 窟区绿化降低整个区域风速, 部分风向降低程度大于 1 m/s; 窟前广场背风区域有绿化后风速不降反增, 东北风 4 m/s 时 72 窟窟前风速由 3.52 m/s 增至 4.87 m/s; 窟前风向(0.34)比窟顶风向(0.4)稳定; 风速比与来流风速大小无关, 与有无绿化及风向有关, 东北风无绿化及有绿化时分别为 1.27 和 1.08。

关键词: 莫高窟; 模拟; PHOENICS; 绿洲景观; 窟前林带

中图分类号: P854.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0099-06

Research on wind environment of Mogao Grottoes in Dunhuang

SHANG Ruihua¹, YAN Zengfeng¹, WANG Xudong^{2,3}, ZHANG Zhengmo²,
WANG Jiangli^{1,4}, XUE Ping², GAO Wenqiang²

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055 China;

2. Conservation Institute, Dunhuang Academy, Dunhuang 736200 China;

3. School of Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000 China;

4. School of architecture and engineering, Henan Univ. of Scie. & Tech., Luoyang 471003 China)

Abstract: According to the simulation of Mogao Grottoes by software of PHOENICS, this paper comparatively studies the wind environment of the whole green area of and that in front of the forest belt. The results of simulation comparison are as follows. The block effects to the directions with east and west wind were more than 3 m/s when each direction wind has the maximum wind speed, except the southwest wind. Greening in the whole area reduces the wind speed to about 1 m/s. The velocity of wind in some leeward area increases but not decreases. The wind speed 4 m/s in the northeast direction in front of No. 72 grottoes increases from 3.52 m/s to 4.87 m/s. Wind direction change rate in front of grottoes is lower than the one above grottoes. The former is 0.34, and the latter is 0.40. Wind speed rationever change with the numerical size of velocity, but change whether with greening or wind direction. The of greening and non-greening are 1.27 and 1.08.

Key words: Mogao Grottoes; simulation; PHOENICS; oasis landscape; forest belt in front of caves

基于较高的文物价值, 莫高窟的文物保护工作日趋完善, 视角从对文物本体保护转移到了从遗址环境保护角度进行全方位的考量。这种遗址环境保护考量不再仅局限于对洞窟内部微气候环境的研究, 同时还增加了窟区一定范围内的微气候环境的保护工作。郭青林^[1]认为外部环境引起岩体内部水盐运移, 是导致洞窟壁画产生盐害的诱发因素; 专家学者^[2-13]直接或间接证明窟区的微气候环境与窟内的微气候环境之间有着极强的联动

性; 李红寿等^[14]对莫高窟窟区风场的研究未通过软件模拟验证; 汪万福等^[15]对窟前林带的风洞试验未指出以 96 窟为分界线的南北两侧窟前林带的差异性, 且疏透度概念不能直观反映林带对风的削弱作用^[16]。本文基于上述研究的不足, 通过 PHOENICS 软件多次模拟分析有无绿化的窟区风环境和窟前林带区域的风场环境特征, 以期对莫高窟文物保护工作提供技术性帮助。

收稿日期: 2016-03-20

修改稿日期: 2017-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378412); 国家文物局基金资助课题项目(20110308)

作者简介: 尚瑞华(1986—), 女, 博士研究生, 主要研究土遗址保护、景观设计、绿色建筑设计及建筑节能技术。E-mail: 434459710@qq.com

1 模拟参数

莫高窟海拔在 1 320~1 380 m 之间;三危山主峰在莫高窟对面,高出莫高窟约 600 m;鸣沙山主峰距莫高窟较远,一般地段比莫高窟相对高度不足百米。本文风环境模拟软件为 PHOENICS,模板选择 FLAIR,湍流模型选择 k-epsilon 双方程;模拟工况以春季 4、5 月为准,风速根据模拟需要进行设定,温度参数设定为 20 ℃,不考虑太阳辐射影响;风速计算点以 96 窟窟顶气象站的位置点为准,72 窟窟前气象数据作为输出数值;模拟中绿化仅包含窟前及生活区绿化,不考虑窟顶绿化;气象数据时间从 2011 年 9 月 01 日开始至 2012 年 8 月 31 日为止,由敦煌研究院提供,分析软件为 ORIGIN 和 EXCEL。

2 模拟方案及结论

2.1 气象数据分析

为对比研究现场测试与参数化模拟之间的差异,模拟前期对原始气象数据进行分析很有必要。图 1、图 2 显示:96 窟窟顶年平均风速为 3.67 m/s,春季 3-5 月平均风速 4.26 m/s,最大风速出现在 2 月,为 15.46 m/s;72 窟窟前年平均风速 0.92 m/s,3-5 月平均风速为 0.94 m/s,最大风速出现在 4 月,为 4.64 m/s;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: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。

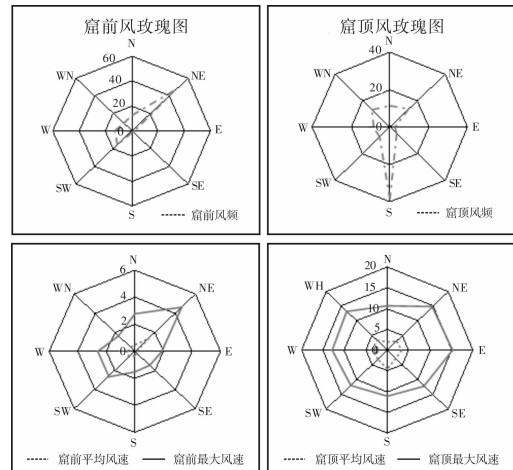


图 1 莫高窟窟前、窟顶风玫瑰图

Fig. 1 Wind rose diagram of Mogao Grottoes

莫高窟东、西向风对文物保护影响较大。为研究窟前、窟顶的风向稳定程度,本文借鉴“有向转角”^[17]概念,以风频所占百分比最大风向为基准,计算风向变化率。其中,风向变化率越大,风向稳定度越差。数据(表 1)显示:窟前风向的变化率为 0.34,窟顶风向变化率为 0.4。窟前风向变化率比窟顶风向变化率小,即窟前风向比窟顶风向稳定。

$$D_w = \sum (P_i \times |\theta'_i| / 180) \quad (1)$$

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; $i=1, \dots, 8$ 。

窟前风速明显小于窟顶风速,且窟前风向比窟顶风向稳定。可见,莫高窟山谷地形及窟区绿化使得窟前广场区域形成了相对稳定的风场环境,有利于对莫高窟文物保护工作。

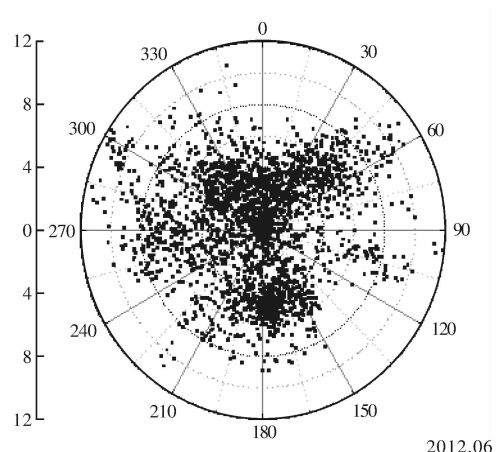
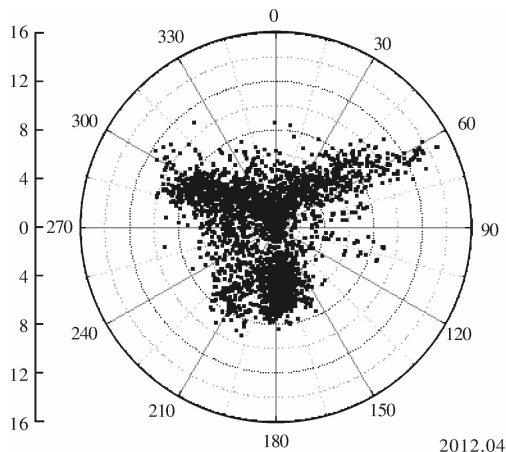


图 2 莫高窟窟顶风向极点图

Fig. 2 Wind direction point diagram of Mogao Grottoes on the top of caves

表 1 莫高窟窟前、窟顶风频表
Tab. 1 Wind frequency distribution of Mogao Grottoes

		北风 N	东北 NE	东风 E	东南 SE	南风 S	西南 SW	西风 W	西北 WN	D_w
窟顶	θ'_i	±180	−135	−90	−45	0	45	90	135	0.40
窟顶	$P_i/\%$	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
窟前	$P_i/\%$	12.53	46.47	2.38	0.42	0.96	15.09	13.14	9.02	

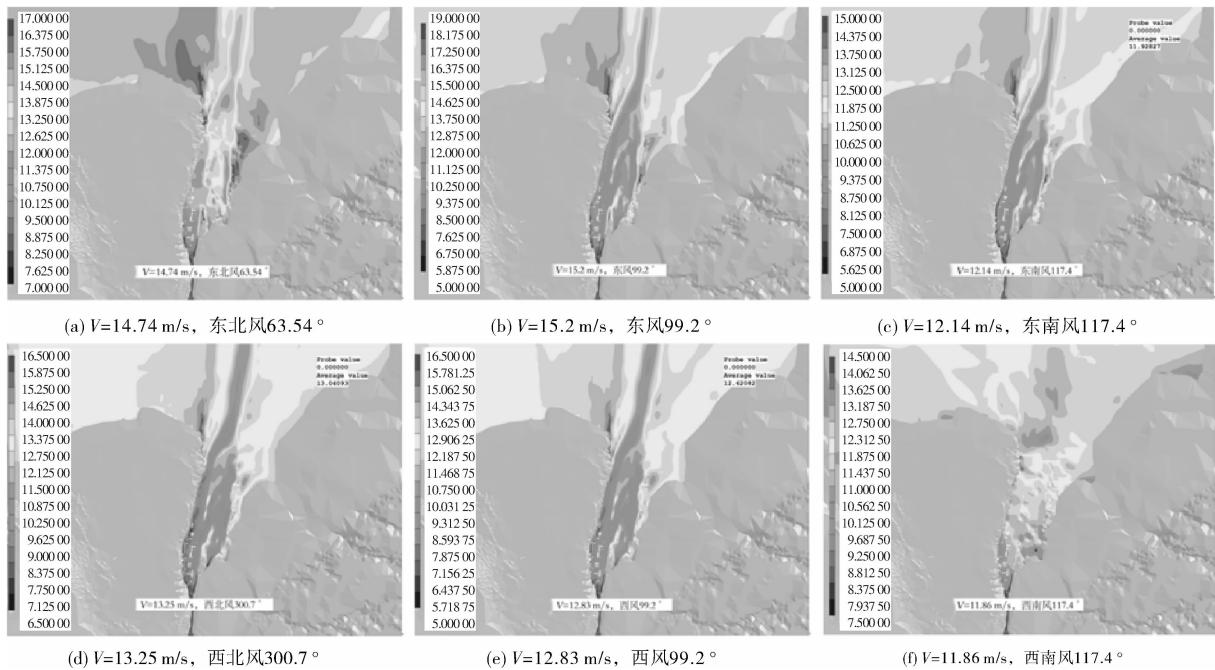


图 3 莫高窟东向风(a、b、c)、西向风(d、e、f)地形模拟
Fig. 3 Direction of east(a、b、c) and west (d、e、f)terrain simulation in Mogao Grottoes area

2.2 地形、地势对窟区风环境的影响

为研究地形地势对风场环境的影响,本轮模拟中莫高窟模型无绿化元素(图 3)。模拟范围 10 500 m×12 600 m 共计约 13 000 hm²。以各个风向的最大风速数据作为大尺度风环境的输入值,进行多次模拟,重点研究东、西向风对莫高窟风环境的影响。

模拟显示:72 窟窟前的风速分别为北风 8.87 m/s、东北风 11.54 m/s、东风 10.25 m/s、东南风 7.5 m/s、南风 9.13 m/s、西南风 10.13 m/s、西风 8.21 m/s 和西北风 9.04 m/s。相较于均有所降低。对比研究发现:莫高窟 72 窟窟前风速均小于 96 窟窟顶风速;地形地势对东风、东南风、西风、西北风和东北风的阻滞作用均大于 3 m/s,对南风、北风和西南风的阻滞作用在 1.5 m/s 到 2 m/s 之间。可见,三危山与鸣沙山共同作用,对东、西向风(除西南风外)均有明显削弱作用,利于莫高窟文物保护工作顺利进行。

三危山、鸣沙山及莫高窟的凹形崖面共同作

用降低窟区内部风速。三危山形成的天然屏障,对阻挡东风和东南风效果较好;莫高窟位于鸣沙山山麓,坐西向东的朝向也有效降低了风力较强的西向风带动窟顶沙粒落入洞窟的潜在危害;莫高窟的崖体表面呈凹形曲面,不仅对风有阻挡和抬升作用,同时对风也有反射作用,使得窟前风速明显降低且分布均匀。

2.3 绿洲景观对窟区风环境的影响

绿化能够改变近地表风场结构,使其周围的气流重新分布。为分析绿化对窟区风环境影响,本轮分别对窟区无绿化地形及有绿化地形进行风环境模拟。模拟范围 4 400 m×6 000 m 共计约 2 640 hm²,风向 45°,风速 4 m/s。为比较风速比^[18]与来流风速关系,需结合上轮东北风最大风速模拟结论。

$$R_i = \frac{V_i}{V_0} \tag{2}$$

式中: R_i 为 i 点位置风速比; V_i 为 i 点位置 1.5 m 行人高度处的平均风速, m/s; V_0 为 i 点位置 1.5 m 行人高度处未受干扰来流的平均风速, m/s。

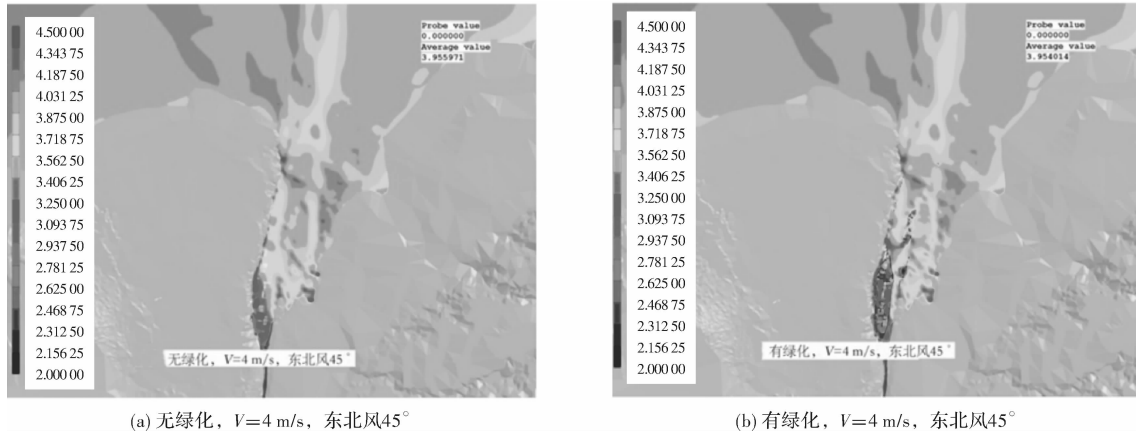
(a) 无绿化, $V=4$ m/s, 东北风 45° (b) 有绿化, $V=4$ m/s, 东北风 45°

图 4 莫高窟地形地势(左)和绿化(右)风场模拟

Fig. 4 Terrain simulation without trees (left) and with trees (right) in Mogao Grottoes area

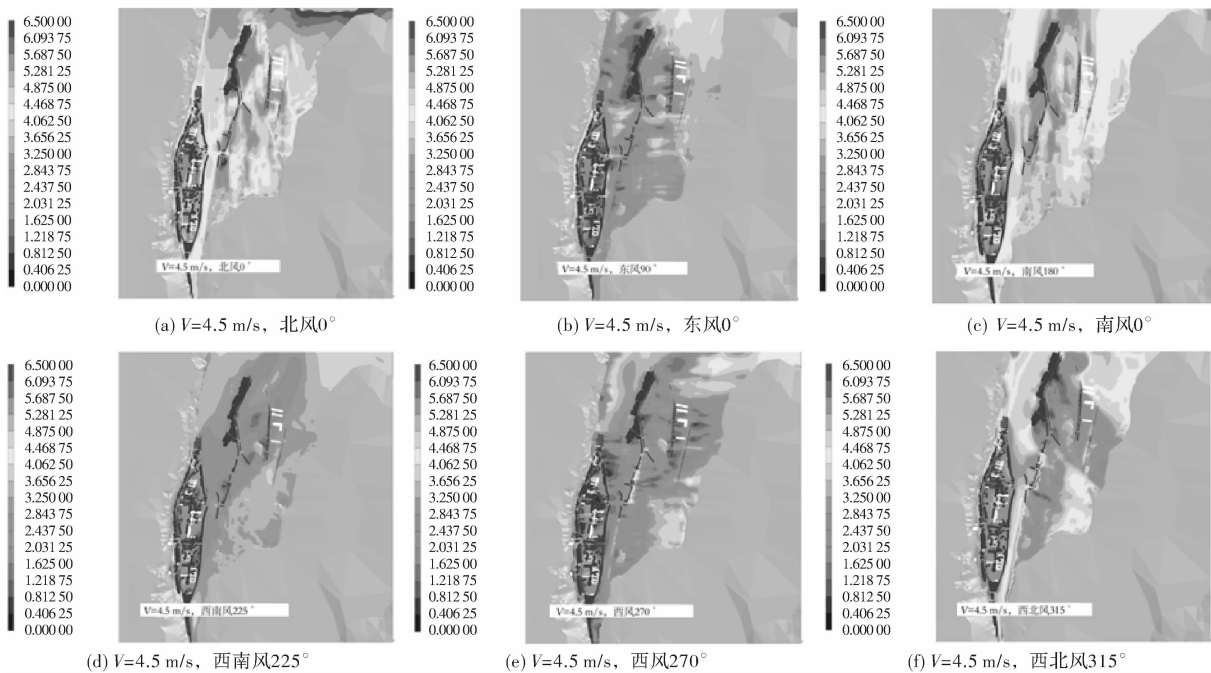
(a) $V=4.5$ m/s, 北风 0° (b) $V=4.5$ m/s, 东风 90° (c) $V=4.5$ m/s, 南风 180° (d) $V=4.5$ m/s, 西南风 225° (e) $V=4.5$ m/s, 西风 270° (f) $V=4.5$ m/s, 西北风 315°

图 5 莫高窟各风向风速模拟

Fig. 5 Wind speed simulation for each direction in Mogao Grottoes area

模拟(图 4)显示:除窟前广场区域外,有绿化地形相较于无绿化地形风速明显减弱,且风场分布更为均匀;窟前广场区域,72 窟在无绿化时风速为 3.52 m/s,有绿化时风速为 4.87 m/s。其中:整个区域的风速降低,与窟区绿化的阻风和导风作用密切相关;部分区域风速不降反增,则是由于该区域与迎风面形成了较大压差,多出现于背风区域; R_i 在 4 m/s 和 14.74 m/s 时均为 1.27,即在风速较小的情况下,风速比与来流风速的大小关系不大。

2.4 窟前林带区域风环境研究

为研究窟前林带区域的风场环境并同时保有莫高窟地形,模拟截取 $2\,300\text{ m} \times 1\,600\text{ m}$ 共计约 368 hm^2 。为便于比较各风向对窟前区域风速的影响,本轮模拟的各风向风速均设置为 4.5 m/s;为

比较 R_i 与风速大小之间的关系,增加了东北风 1.5 m/s 的风速模拟。

模拟显示:4.5 m/s(图 5)时,72 窟窟前区域风速北风 3.42 m/s,东北风 4.87 m/s,东风 4.26 m/s,东南风 3.65 m/s,南风 3.25 m/s,西南风 2.84 m/s,西风 2.43 m/s,西北风 4.09 m/s;东北风 1.5 m/s(图 6)时,72 窟窟前风速为 1.62 m/s。对比研究发现:各风向风速模拟中,莫高窟的绿洲景观对西风、西南风、南风和北风的削弱作用较强,均大于 1 m/s,东南风、西北风和东风次之;部分背风区域风速不降反增,而东北风风速模拟中甚至出现了大于周边环境的强风风速;1.5 m/s 和 4.5 m/s 时,东北风均为 1.08,结合上轮无绿化分析可知,风速比与有无绿化及风向有关。

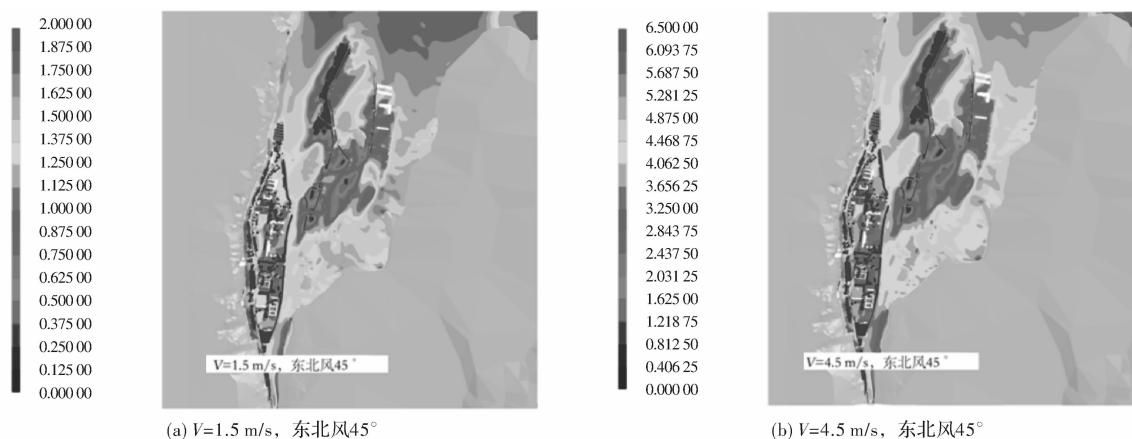
(a) $V=1.5$ m/s, 东北风 45° (b) $V=4.5$ m/s, 东北风 45°

图6 莫高窟东北风风速模拟

Fig. 6 Wind speed simulation for northeast in Mogao Grottoes area

3 结论与展望

3.1 结论

本文根据侧重点不同逐步缩小模拟范围,依次对地形地势、窟区有无绿化及窟前林带进行风环境模拟。研究证明:三危山、鸣沙山与莫高窟凹形崖面共同作用削弱东、西向风风速,西南风除外;窟区绿化降低整个区域风速,部分背风区域风速不降反增。结论如下:

(1)各风向为最大风速时,模拟窟区风场环境:莫高窟的地形地势对东、西向风的阻滞作用均大于 3 m/s,对西南风为 1.73 m/s;窟前风向(0.34)比窟顶风向(0.4)稳定,利于文物保护。

(2)风向 45° 、风速 4 m/s 时,模拟比较有无绿化时的窟区风场分布:除窟前广场区域外,整个窟区有绿化地形风速明显低于无绿化地形风速;窟前广场区域中,72 窟无绿化风速 3.52 m/s 低于有绿化时风速 4.87 m/s,风速不降反增。

(3)各风向为 4.5 m/s,增加东北风 1.5 m/s 风速:莫高窟的绿洲景观对西风、西南风、南风 and 北风的削弱作用较强,均大于 1 m/s;风速比与来流风速大小无关,与有无绿化及风向有关,东北风无绿化及有绿化时分别为 1.27 和 1.08。

3.2 展望

模拟不仅有助于了解莫高窟风环境现状,更便于发现窟区绿化存在的问题,指导景观改造,同时还可通过对改造景观的重新模拟,用来验证改造方案是否解决问题。如:在窟前林带东北风模拟中 72 窟及以南的窟前风速均高于初始风速,证明该区绿化种植过密;生活区风场环境变化较大,与该区无序、过密的绿化种植有关。如何调整这些地方的种植设计,改造方案是否合理,需

要详细推敲与验证,这也是我们后期工作的主要内容。

参考文献 References

- [1] 郭青林. 敦煌莫高窟壁画病害水盐来源研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
GUO Qinglin. Origin of water and salts responsible for wall paintings disease at Dunhuang Mogao Grottoes [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [2] 王江丽, 闫增峰, 王旭东, 等. 敦煌莫高窟洞窟自然通风实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 712-716.
WANG Jiangli, YAN Zengfeng, WANG Xudong, et al. Research and test on natural ventilation of the Mogao Grottoes in Dunhuang[J]. Xi'an University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(5): 712-716.
- [3] 王江丽, 闫增峰, 王旭东, 等. 莫高窟洞窟自然通风测试研究[J]. 敦煌研究, 2015(8): 30-35.
WANG Jiangli, YAN Zengfeng, WANG Xudong, et al. Research and test on natural ventilation of the Mogao Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2015(8): 30-35.
- [4] 王江丽, 闫增峰. 强降雨天气下的莫高窟洞窟环境调控方案初步研究[J]. 建筑与文化, 2014, (3): 62-65.
WANG Jiangli, YAN Zengfeng. The environmental control equipment system of the Mogao Caves under heavy rainfall[J]. Architecture and Culture, 2014(3): 62-65.
- [5] 尚瑞华, 闫增峰, 王江丽. 敦煌莫高窟区景观微气候调节技术研究[J]. 云南建筑, 2014(11): 296-299.
SHANG Ruihua, YAN Zengfeng, WANG Jiangli. Research on landscape micro-climate regulation technology of Mogao Grottoes in Dunhuang[J]. Yunnan Architecture, 2014(11): 296-299.
- [6] 李哲伟. 莫高窟洞窟前室对窟内热湿环境调控机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
LI Zhewei. Study on the atria regulatory mechanism of thermal and moisture environment in the Mogao Grot-

- toes[D]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2014.
- [7] 张正模, 刘洪丽, 郭青林, 等. 突发性强降雨对莫高窟洞窟微环境影响分析[J]. 敦煌研究, 2013(1): 120-124.
ZHANG Zhengmo, LIU Hongli, GUO Qinglin, et al. Analysis of the impact of sudden heavy rainfall on the micro-environment of the caves at Mogao[J]. Dunhuang Research, 2013(1): 120-124.
- [8] 李最雄. 敦煌石窟的保护现状和面临的任务[J]. 敦煌研究, 2000, 63(1): 10-23.
LI Zuixiong. The status quo and facing task for protection of Dunhuang Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2000, 63(1):10-23.
- [9] 张伟民. 金字塔沙丘形成发育的动力学过程研究:以敦煌莫高窟为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
ZHANG Weimin. Dynamics process research on the pyramid dune: case study on Mogao Grottoes in Dunhuang[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Sciences Academy, 2005.
- [10] 汪万福, 王涛, 李最雄, 等. 敦煌莫高窟崖顶灌木林带防风固沙效应[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2492-2500.
WANG Wanfu, WANG Tao, LI Zuixiong, et al. The effects of blown sand on the shrub belt over the top of the Mogao Grottoes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2492-2500.
- [11] SHANG Ruihua, YAN Zengfeng, WANG Xudong, et al. Research on the Wind Environment of the Landscape Forest Belts in Front of Dunhuang Mogao Grottoes [J]. Gummi, Fasern, Kunststoffe, 2016(17): 752-760.
- [12] WANG Jiangli, YAN Zengfeng, WANG Xudong, et al. Experimental research on mechanical ventilation system for Cave 328 in Mogao Grottoes, Dunhuang, China [J]. Energy and Buildings, 2016(9): 692-696.
- [13] DE Gids W and PHAFF H. Ventilation rates and energy consumption due to open windows-a brief overview of research in the Netherlands[J]. Air Infiltration Rev., 1982, 4(1): 4-5.
- [14] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 等. 地形地貌对莫高窟区域微环境的影响[J]. 敦煌研究, 2008(3): 98-102.
LI Hongshou, WANG Wanfu, ZHANG Guobin, et al. The influence of landform to micro-environment on Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2008(3): 98-102.
- [15] 汪万福, 安黎哲, 冯虎元, 等. 敦煌莫高窟前林带防护效应的风洞实验[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 383-390.
WANG Wanfu, AN Lizhe, FENG Huyuan, et al. Wind tunnel experiment for protective effect of front belt of Mogao Grottoes in Dunhuang[J]. Chinese Desert, 2009, 29(3):383-390.
- [16] 任昱, 王志刚, 杨东慧. 林带冬季相疏透度与透风系数的换算[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 83-88.
REN Yu, WANG Zhigang, YANG Donghui. Conversion of porosity and permeability of shelter belts with winter facies [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(11): 83-88.
- [17] 张丽, 李建平. 风向变化特征在季风模拟评估中的应用[J]. 大气科学, 2008, 32(1):53-66.
ZHANG Li, LI Jianping. The application of the variation characteristics of wind direction in evaluating monsoon simulation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(1): 53-66.
- [18] 陈仰金. 大型高层住区规划建设中的问题及对策研究:以济南市为例[D]. 山东: 山东建筑大学, 2010.
CHEN Yangjin. The study of the question and countermeasure about the great high-rise residential districts-a case study of Jinan[D]. Shandong: Shandong Architecture University, 2010.

(编辑 桂智刚)