

# 影响莫高窟小气候的环境因子对比分析

李红寿<sup>1,2</sup>, 汪万福<sup>1,2</sup>, 张国彬<sup>1,2</sup>, 邱飞<sup>1,2</sup>, 詹洪涛<sup>1,2</sup>

(古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 甘肃 敦煌 736200; 2. 敦煌研究院保护所, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:**应用不同时空尺度对莫高窟的小气候进行对比分析,发现莫高窟的地形地貌、水系统、植被等环境因子对其小气候有重要影响。莫高窟的小地形结构和水系统对其风速、湿度、太阳辐射等有显著影响。2005年4~12月窟前与窟顶月平均相比,太阳辐射总量降低 411.21 MJ/m<sup>2</sup>,地表温度降低 2.7℃,相对湿度增大 9%,风速降低 3.7 m/s。窟前月较差小于戈壁 0.9℃。但对于气温而言,主要受较大尺度因素的控制,窟前、窟顶、戈壁均处于同一温度层。2004年莫高窟日较差比敦煌小 4.8℃。莫高窟的环境因子使莫高窟周边形成了更为稳定的小气候,非常有利于文物保护,这也是千年莫高窟保存至今的一个重要原因。

**关键词:**小气候;水系统;地形地貌;对比分析

**中图分类号:** P463.21

**文献标识码:** A

莫高窟现存精美绝伦的壁画 4.5 万 m<sup>2</sup>,彩塑 2 000 余身,因具有独一无二的文化、科学研究价值被列入世界文化遗产清单。这些文物绝大多数是由泥质材料建造,非常脆弱,具有不可再生性。气候是文物储存和保护的基础环境,因此开展与莫高窟小气候相关的影响文物储存环境因子的研究,对文物的保护有重要意义。20 世纪 80 年代李实等人在莫高窟开展了以洞窟气象观测为中心的初步研究<sup>[1]</sup>。2006 年汪万福等利用莫高窟和敦煌农区的同步监测资料,对影响敦煌壁画的有害大气成分 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 TSP 进行了质量浓度变化的分析<sup>[2]</sup>。李红寿通过分析莫高窟水分的耗散结构,对水系统对莫高窟气温的影响进行了初步的研究<sup>[3]</sup>。为了更深入研究莫高窟小气候对文物的影响,1988 年敦煌研究院引进全自动气象监测设备,在窟顶建立了 1 座自动化气象观测站;1990 年在崖下 72 窟前新建立了 1 座自动化气象观测站,2002 年在窟顶戈壁区域又新建了 1 座自动化气象站。积累的大量气象资料为莫高窟文物的保护奠定可靠的基础,为小气候的相关研究提供一个良好的数据平台。本文应用同期气象资料进行对比,分析莫高窟的地理地貌、地形结构、水系统、植被等环境因子对莫高窟小气候的影响,研

究了环境因子对莫高窟小气候的风速、温度、湿度、太阳辐射等的影响程度及内在的关联性。

## 1 研究区状况和资料

敦煌位于河西走廊的最西端,介于 92°13'~95°30' E, 39°40'~41°35' N 之间。海拔 1 139 m (敦煌气象站)。该地区气候极为干燥,降雨量稀少,年平均降雨量为 42.2 mm,日照百分率是 71%,年平均日照时数 3 257.9 h。蒸发强烈,多风沙。敦煌绿洲内年平均风速 2.0 m/s,属典型的大陆性干旱气候。

莫高窟坐落于距敦煌 25 km 的敦煌盆地的南缘,远离敦煌绿洲的大漠戈壁深处,地处三危和鸣沙 2 山交接的山前南北走向的河谷中,河谷全长约 7 km,宽 50~300 m。洞窟就开凿于高约 30~40 m 的山前西岸的崖体上,海拔在 1 320~1 380 m 之间。河谷窟前台地上生长有 14 hm<sup>2</sup>较为茂密的林带树木。窟前自动气象站 (海拔 1 338 m) 与崖上窟顶自动气象站 (海拔 1 378 m) 上下斜对,戈壁自动气象站 (海拔 1 367 m) 位于河谷以西 2 km 的戈壁中,距敦煌绿洲 11 km。戈壁气象站的资料可以代表莫高窟窟顶水平戈壁面内较大范围的气象状况。三危山和鸣沙山形成的喇叭形结构、小河谷及河谷中的水

收稿日期: 2008 - 04 - 01; 改回日期: 2008 - 05 - 05

基金项目: 敦煌研究院院级课题 (200701) 资助

作者简介: 李红寿 (1970 - ), 男, 甘肃秦安人, 馆员, 主要从事干旱区环境和文物保护等方面的研究。E-mail: dhhs69@163.com

系统和较为茂密的林带树木控制着莫高窟小气候的变化特征。

窟前、窟顶和戈壁区自动气象站每 10 ~ 15 min 采集 1 组气温、湿度、太阳辐射、地表温度、风速、风向等数据。本文选取无天气过程、具有一定代表性的 2005 年 6 月 1 日的窟前、窟顶和戈壁的同步资料 (每 0.5 h 采集 1 次) 进行对比;并应用 2005 年 4 ~ 12 月的窟前、窟顶、戈壁的气象资料进行同期相关对比。另外通过 2004 年莫高窟与敦煌温度日较差的对比,分析差异形成的主要原因。

## 2 小气候的对比分析

### 2.1 太阳辐射

图 1 中太阳辐射窟顶与戈壁非常接近,即使在午后受到少量云的影响,它们的辐射强度都远大于窟前。当日太阳辐射总量窟顶是 32.17 MJ/m<sup>2</sup>,戈壁是 30.91 MJ/m<sup>2</sup>,窟前是 13.90 MJ/m<sup>2</sup>。窟前早晨受到东边林带阴影的影响较强,下午受到西边崖体遮挡,受到的辐射量明显要少。月辐射总量 (图 2) 也表现出窟顶略高于戈壁,但远大于窟前。4 ~ 12 月的平均月辐射总量窟顶是 611.34 MJ/m<sup>2</sup>,戈壁 584.15 MJ/m<sup>2</sup>,窟前 200.13 MJ/m<sup>2</sup>。由图 1 和图 2 可见:窟顶和戈壁太阳辐射较为接近,它们间差异的形成可能主要与窟区白杨林带的银白色对光线有一定的反射作用和戈壁的黑灰色对光线有较强的吸收能力有关;窟前由于崖体和窟前林带林木的阻挡,日照时间短,辐射总量明显要小。

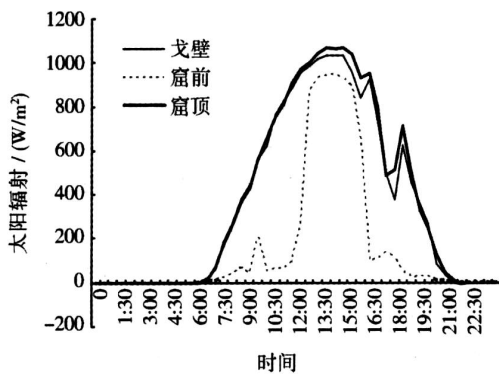


图 1 2005 年 6 月 1 日窟前、窟顶、戈壁太阳辐射的日对比

Fig 1 The daily solar radiation contrast in the front and on the roof of Mogao Grottoes and Gobi on June 1, 2005

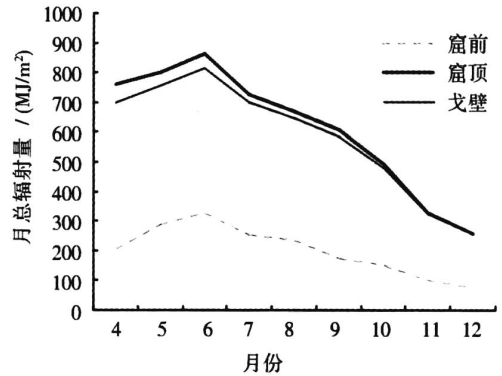


图 2 2005 年 4 ~ 12 月窟前、窟顶、戈壁太阳辐射总量对比  
Fig 2 The total monthly solar radiation contrast in the front and on the roof of Mogao Grottoes and Gobi from April to December of 2005

### 2.2 地表温度

图 3 中地表温度日平均窟前是 23.7℃,窟顶是 31.0℃,戈壁是 30.6℃;图 4 中 4 ~ 12 月平均地表温度窟前是 16.4℃,窟顶是 19.1℃,戈壁是 18.7℃。窟前温度较低,日变化和年变化幅度都较小。主要原因是:1)与太阳辐射量有密切的联系,崖体和林木遮光使窟前地表得到的太阳辐射量较小;2)窟前土壤水分含量较高,与窟顶戈壁的砾石比较热容量较大,水分对热量的迟滞作用使土壤温度较砾石更稳定,夜间较高。另外窟前土壤的水分蒸发对白天温度的升高有一定的抑制作用,因此窟前地表温度的日变化幅度较小。图 4 中,窟前地表温度随太阳辐射的降低与窟顶、戈壁的差距也相应减小,在立冬以后窟前反而略高。这主要是水系统和地形结构综合保温的结果。窟前冬季土壤水分除了热容量的吸热平衡作用外,凝结放热也起到一定作用。

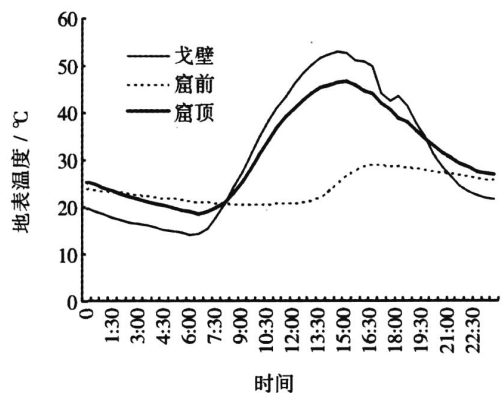


图 3 2005 年 6 月 1 日窟前、窟顶、戈壁地表温度的对比

Fig 3 The daily surface temperature comparison in the front and on the roof of Mogao Grottoes and Gobi on June 1, 2005

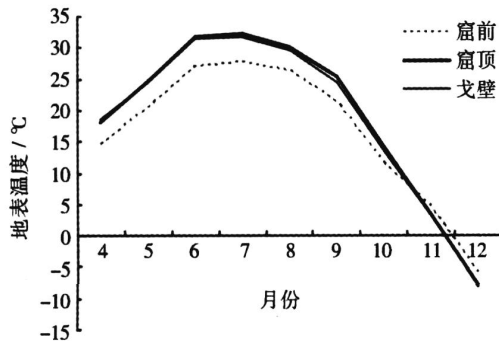


图 4 2005年 4~12月窟前、窟顶、戈壁  
地表温度的对比

Fig 4 The monthly mean surface temperature comparison  
in the front, on the roof of Mogao Grottoes and Gobi  
from April to December of 2005

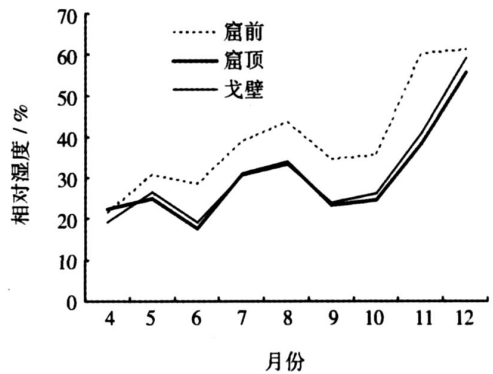


图 6 2005年 4~12月窟前、窟顶、戈壁相对湿度的月对比  
Fig 6 Comparison of the monthly mean relative  
humidity in the front, on the roof of Mogao Grottoes  
and Gobi from April to December of 2005

2.3 相对湿度

图 5中窟前相对湿度明显高于窟顶和戈壁,窟前的平均相对湿度是 31%,窟顶 20%,戈壁 22%,窟前比窟顶、戈壁分别高出 11%、9%;图 6中 4~12月窟前平均相对湿度 39%,窟顶 30%,戈壁 31%,窟前比窟顶、戈壁分别高出 9%、8%。窟前湿度远大于窟顶和戈壁,说明莫高窟的水系统对相对湿度有重要影响。相对湿度在垂直方向上受地表湿度的影响,表现为窟前 >戈壁 >窟顶。窟顶在 10~12月平均小于戈壁 2.5%,这与冬季降雪(11、12月的降水量分别是 0.25 mm、4.06 mm)后靠近表层的湿度较大有关,而窟顶湿度受窟区相对距下垫面较高的干燥气流的影响,湿度较低。

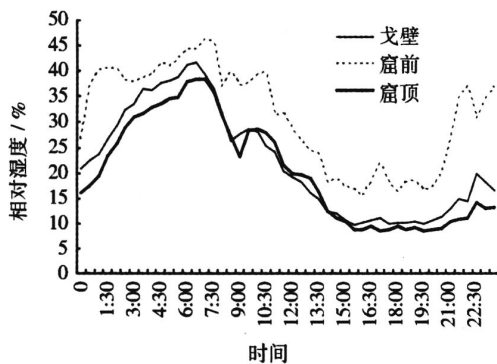


图 5 2005年 6月 1日窟前、窟顶、戈壁相对湿度的日对比  
Fig 5 Comparison of the daily relative humidity in the front,  
on the roof of Mogao Grottoes and Gobi on June 1, 2005

2.4 风速

图 7中窟顶和戈壁风速明显高于窟前,窟顶平均风速是 4.1 m/s,戈壁区 3.7 m/s,窟前 0.3 m/s;图 8中 4~12月窟顶平均风速 4.3 m/s,戈壁区 4.1 m/s,窟前 0.6 m/s。莫高窟小尺度地形结构即小河谷崖体结构与园林树木的综合作用对风速的减弱有很强作用。尤其是莫高窟河谷崖面的南北走向对西风具有很好的“躲藏”效果。图 8中在 11、12月窟顶和戈壁风速逐渐降低的情况下,窟前风速反而增高。说明树木对风速确有一定的影响,夏天枝繁叶茂,防风作用强,冬季较弱。但莫高窟的地形结构对风速有决定性影响,树木对风速的影响是次要的。由于窟顶崖体的顶角对风的阻拦作用,窟顶风速大于戈壁(图 8),上部崖面承受着较强的风蚀作用。

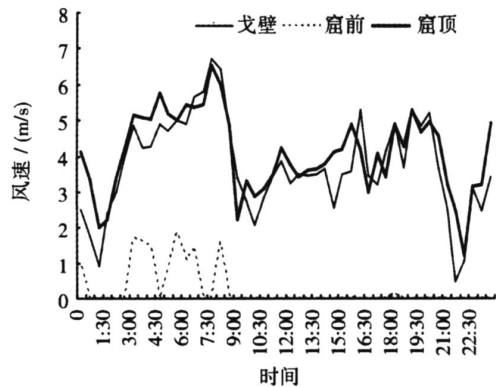


图 7 2005年 6月 1日窟前、窟顶、戈壁风速的日对比  
Fig 7 Comparison of daily wind speed in the front, on  
the roof of Mogao Grottoes and Gobi on June 1, 2005

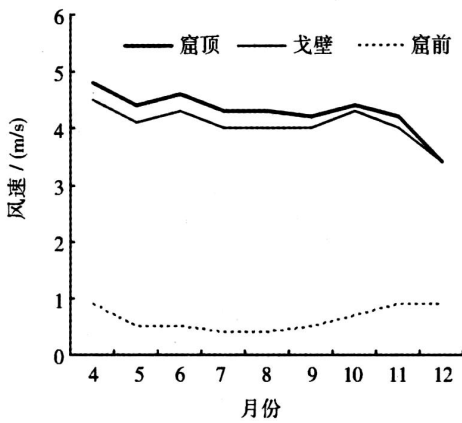


图 8 2005年 4~12月窟前、窟顶、戈壁风速的月对比  
 Fig 8 Comparison of monthly mean wind speed in the front, on the roof of Mogao Grottoes and Gobi from April to December of 2005

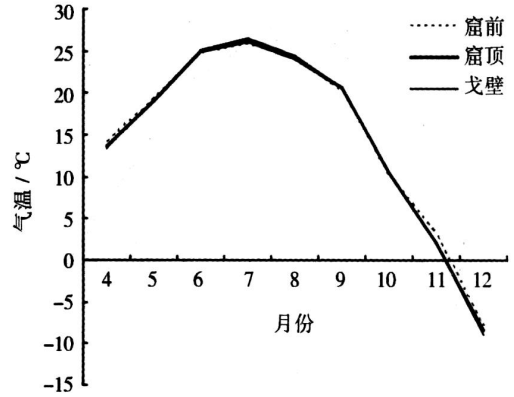


图 10 2005年 4~12月窟前、窟顶、戈壁气温的月对比  
 Fig 10 Comparison of monthly mean temperature in the front, on the roof of Mogao Grottoes and Gobi from April to December of 2005

2.5 气温

2.5.1 窟前、窟顶、戈壁温度

在图 9 的温度变化中,窟前、窟顶、戈壁之间存在一定的差异,但平均温度窟前是 23.8,窟顶 23.5,戈壁 23.7,3地气温非常接近。图 10 中 4~12月平均气温窟前 14.8,窟顶 14.7,戈壁 14.8,3地气温也高度一致。说明窟前、窟顶与窟顶的戈壁这 3点完全处于同一气温层内,是一个整体。气温受莫高窟小地形的影响较小,与较大尺度上的地形地貌有关。

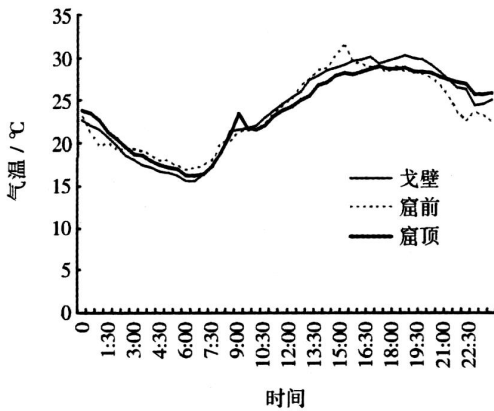


图 9 2005年 6月 1日窟前、窟顶、戈壁气温的日对比  
 Fig 9 Comparison of daily temperature in the front, on the roof of Mogao Grottoes and Gobi on June 1, 2005

2.5.2 温较差

图 11 中,2005年 4~12月戈壁月温较差 26.5;窟前月温较差 25.6。窟前月温较差较戈壁小 0.9,窟前和戈壁月温较差差异较小,说明温度变化范围受莫高窟小地形的影响较小,窟前与戈壁同处于一体。图 12 中,2004 年日平均最高温度窟前是 17.3,窟顶 16.5,敦煌 18.9;日平均最低温度窟前是 6.3,窟顶 5.5,敦煌 3.1。莫高窟窟前温度日较差是 11.0,窟顶 11.0,敦煌 15.8。莫高窟日温度变化范围小,气温更稳定。2004 年莫高窟窟前日较差小于敦煌绿洲 4.8,小的温差非常有利于文物的保护。

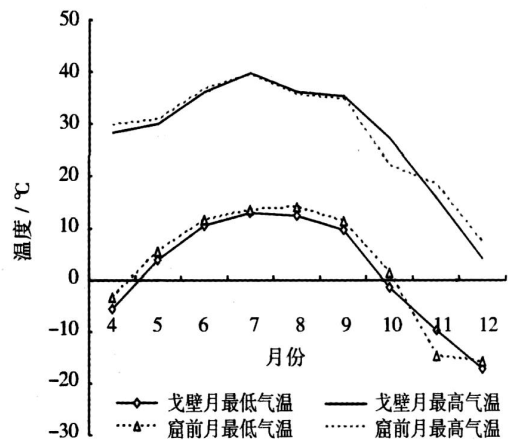


图 11 2005年 4~12月窟前、戈壁月极值气温的对比  
 Fig 11 Comparison of monthly maximum and minimum temperature in the front of Mogao Grottoes and Gobi from April to December of 2005

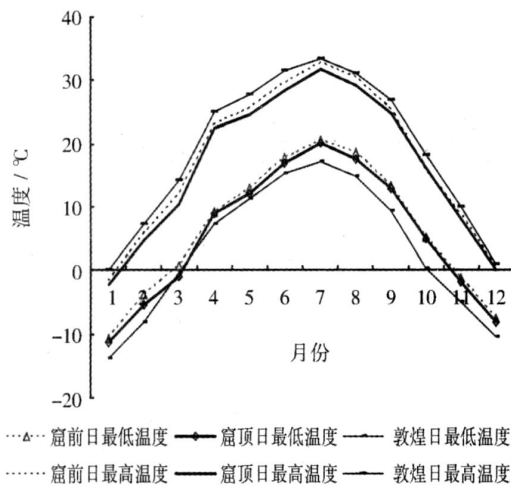


图 12 2004 年窟前、窟顶与敦煌气温日较差的对比

Fig 12 Comparison of mean temperature daily range in the front and on the roof of Mogao Grottoes and Dunhuang in 2004

通过平均温度和温度较差对比分析,可以得出这样的结论:窟前、窟顶、戈壁处于同一温度变化层内,莫高窟的小地形河谷结构对温度的影响相对较小,在日较差小于敦煌绿洲 4.8 的构成中:莫高窟日最低温度高于敦煌 3.2,日最高温度低于敦煌 1.6。而窟前日最低温度只高于窟顶 0.8,窟顶高于敦煌 2.4,说明莫高窟日较差差异主要受日最低温度的影响,并由此可以推断:窟前、窟顶、戈壁的气温主要受较大尺度上环境因素的控制,三危山和鸣沙山形成的喇叭形结构可能对莫高窟夜间温度存在重要影响,或在敦煌盆地内夜间可能存在逆温层。莫高窟海拔高于敦煌 200 m,可能正好处于此逆温层内。

因此,在形成莫高窟日较差较小的原因中,夜间受较大尺度上地理环境因子的影响最大,达 2.4,远大于小地形结构、水系统和植被等的夜间保温效应的影响(0.8);而白天在窟区、戈壁这一较大范围内升温较高时,温度梯度形成谷风,谷风使这一区域的热量流出,并使潜藏的海拔降温效应<sup>[4]</sup>得以体现,另外水分的吸热、风力等引发的水系统蒸散对高

温有一定抑制作用。它们的共同作用使窟前日最高温度低于敦煌 1.6。因而,莫高窟环境因子的共同作用使莫高窟的日较差更小,温度更稳定。

### 3 小 结

通过气象资料的对比分析,发现莫高窟地形地貌、植被、小地形结构、水系统等环境因子对莫高窟小气候的温度、湿度、风速、太阳辐射等有重要影响。莫高窟小气候变化在不同的时空尺度上与环境因子之间存在明显的关联性。

(1)莫高窟的小地形使窟前风力、太阳辐射和地表温度显著减小,水系统使相对湿度明显增加。2005 年 4~12 月莫高窟窟前与窟顶月平均相比,窟前太阳辐射总量降低了 411.21 MJ/m<sup>2</sup>,地表温度降低了 2.7,相对湿度增高了 9%,风速降低了 3.7 m/s。温度月较差窟前较戈壁小 0.9。风速、湿度、太阳辐射的变化界面应处于崖顶层面以下至树冠层以上之间约十余 m 的空间区域内。较小的风速、光照和地温变化非常有利于文物的保存。

(2)窟前、窟顶、戈壁区域的气温主要受较大尺度环境因素的控制,莫高窟的河谷小地形结构对气温的影响相对较小,窟前、窟顶、戈壁处于同一气温层内。大尺度环境因子的综合作用使莫高窟 2004 年日平均最低温度较敦煌增高了 2.4,是莫高窟日较差小于敦煌 4.8 的主要原因。

莫高窟的各环境因子的共同作用使莫高窟形成了更为稳定的小气候,稳定的小气候是莫高窟千年文物能够保存至今的一个重要原因。

#### 参考资料:

- [1] 李实,张拥军,三浦定俊,等.敦煌莫高窟的气象观察[J].敦煌研究,1990(1):109-123.
- [2] 汪万福,王涛,沈志宝,等.敦煌莫高窟区大气环境成分的监测分析[J].高原气象,2006,25(1):164-168.
- [3] 李红寿.用耗散结构理论对莫高窟园林用气的分析[J].生态学报,2006,26(10):3454-3462.
- [4] 北京农业大学.农业气象[M].北京:农业出版社,1987.

(下转第 35 页)

## Dry Intrusion Analysis of a Strong Dust Storm in Hexi Corridor

WANG Fucun<sup>1,2</sup>, SHAO Liang<sup>3</sup>, GUO Liangcai<sup>4</sup>, FU Youzhi<sup>2</sup>, ZHANG Yue<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China; 2. Zhangye Meteorological Bureau of Gansu Province, Zhangye 734000, China;  
3. Lanzhou Meteorological Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730020, China;  
4. Jiuquan Meteorological Bureau of Gansu Province, Jiuquan 735000, China;  
5. Gaotai Meteorological Station of Gansu Province, Gaotai 734300, China)

**Abstract:** By using the reanalysis data of NCEP ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), the dry intrusion characteristic of a strong dust storm process occurred in the Hexi Corridor from April 9 to 10, 2006 was analyzed. The results show that the high potential vorticity, dry air from the upper level of troposphere extended downwards and southwards, which increased the vertical component of the vorticity on the steep iso-entropy plane and promoted the rapid development of the low level cyclone, resulted in a low level jet and the intensive convergence in the boundary layer.

**Key words:** strong dust storm; dry intrusion; potential vorticity; low level jet; convergence

(上接第 29 页)

## Contrast Analysis of Environment Factors Influencing Microclimate of Mogao Grottoes

LI Hongshou<sup>1,2</sup>, WANG Wanfu<sup>1,2</sup>, ZHANG Guobin<sup>1,2</sup>, QU Fei<sup>1,2</sup>, ZHAN Hongtao<sup>1,2</sup>

(1. The Conservation Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China; 2. Key Scientific Research Base of Conservation for Ancient Mural State Administration for Cultural Heritage, Dunhuang 736200, China)

**Abstract:** Based on the meteorological observations, the microclimate of Mogao Grottoes was analyzed from different temporal and spatial scales. Results show that the environment factors such as land form, water system and vegetation have some important influence on the microclimate there. The small landform structure of Mogao Grottoes and its water system have obvious influence on the wind speed, humidity, temperature and solar radiation. Comparing the monthly mean values of meteorological factors in the front and on the roof of Mogao Grottoes from April to December of 2005, the solar radiation, surface temperature and wind speed decreased  $411.21 \text{ MJ/m}^2$ ,  $2.7^\circ\text{C}$  and  $3.7 \text{ m/s}$ , respectively, and the relative humidity increased 9%, the monthly mean temperature range in the front of Mogao Grottoes was  $0.9^\circ\text{C}$  less than that of Gobi. But for air temperature, it was chiefly controlled by large scale factors. The air temperature daily range of Mogao Grottoes was  $4.8^\circ\text{C}$  less than that of Dunhuang in 2004. It's discovered that the environment elements of Mogao Grottoes formed more stable microclimate, and the stable microclimate was highly advantageous to the Mogao Grottoes cultural relic preservation. It was the main reason why Mogao Grottoes had been standing there for thousands years.

**Key words:** microclimate; water system; landform structure; contrast analysis