



· 文化遗产数字化保护 ·

## 基于时间序列分析的龙门石窟奉先寺微环境的实时监测与评估

刘逸堃<sup>1</sup>,高东亮<sup>2</sup>,马朝龙<sup>2</sup>,范子龙<sup>2</sup>,李心坚<sup>2</sup>,彭进业<sup>3</sup>

(1. 北京大学 考古文博学院, 北京 100871; 2. 龙门石窟研究院, 河南 洛阳 471023;  
3. 西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127)

**摘要:** 龙门石窟奉先寺石刻的保存状况与其所处的微环境特征息息相关。利用无线传感器网络对奉先寺窟前各环境因素进行了实时监测和数据收集,结合时间序列分析方法对保存环境进行了评估。研究表明,奉先寺的空间结构同时起到了贮存水汽和保温的作用,最终使得窟前相对湿度水平与窟外相仿;窟前未能有效地起到缓解湿热环境短期波动的作用,说明内外空气交换频繁;窟前石刻因其所处方位的不同,其保存状况有差异,西壁卢舍那大佛更易出现表面污染物沉积,北壁碑刻更易产生表面结露的现象,而西、北壁同时面临更高的温差应力风化的风险;奉先寺的空间结构降低了窟前风速,对减缓风力风化起到一定作用;窟前 CO<sub>2</sub> 浓度变化主要受植被夜间蒸腾作用的影响,而游客参观行为的影响较小。该研究实现了对奉先寺环境信息的深入挖掘,为其未来的预防性保护工作提供了科学依据。

**关键词:** 奉先寺;微环境;实时监测;时间序列分析

**中图分类号:** K854.3

**DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2021-05-009 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Monitoring and assessment of the microclimate of Fengxian Temple in Longmen Grottoes based on time series analysis

LIU Yikun<sup>1</sup>, GAO Dongliang<sup>2</sup>, MA Chaolong<sup>2</sup>, FAN Zilong<sup>2</sup>, LI Xinjian<sup>2</sup>, PENG Jinye<sup>3</sup>

(1. School of Archaeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Longmen Grottoes Academy, Luoyang 471023, China;

3. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** The safety of the Longmen Grottoes Fengxian Temple is highly correlated with its ambient microclimate. A wireless sensor network was used to monitor and collect data in real time on various environmental factors in front of Fengxian Temple, and the preservation conditions were evaluated through time series analysis. Analysis shows that the structure of the Fengxian Temple serves both to store water vapor and to retain heat, making the relative humidity level in front of the temple similar to the outside. The short-term fluctuations of the thermal-humidity environment are not effectively relieved, indicating that the air exchange between

**收稿日期:** 2021-09-06

**基金项目:** 龙门石窟世界文化遗产监测预警体系建设项目(文物保函【2012】1210号);西安市智能感知与文化传承重点实验室资助项目(2019219614SYS011CG033);陕西省科技计划重点项目(2021ZDLGY15-06)

**第一作者:** 刘逸堃,男,陕西西安人,博士生,从事文物保护技术研究, E-mail: 409947614@qq.com.

inside and outside is frequent. Because of the different orientation of the stone carvings, their preservation condition varies: The Locana Buddha is more prone to contaminant deposits, the north wall monument is more prone to condensation and they both face a high risk of weathering caused by thermal stress. The structure of the Fengxian Temple reduces the wind speed, contributing to mitigating the weathering caused by wind. CO<sub>2</sub> concentration is mainly influenced by the transpiration of plants at night, with less influence from visitors. This study digs the in-depth environmental information of Fengxian Temple and provides a scientific basis for its further preventive conservation.

**Key words:** Fengxian Temple; microclimate; real-time monitoring; time series analysis

奉先寺地处洛阳龙门西山南段,是龙门石窟最负盛名的佛龕之一。龕内雕刻有 9 尊形态各异的造像,堪称我国石刻群像雕塑的代表<sup>[1]</sup>。五十年来,在文物保护工作者的不懈努力下,奉先寺造像和岩体得到了及时的加固保护,使其避免了大面积坍塌与崩落<sup>[2]</sup>。然而,奉先寺仍遭受着诸如渗水、物理化学风化等病害的困扰<sup>[3-4]</sup>,使得其艺术价值不断遭受破坏。目前,已有诸多学者在奉先寺的病害机理<sup>[4-6]</sup>,以及保护方法研究<sup>[7-8]</sup>层面做出了杰出的贡献,石窟的预防性保护工作也已逐步得到重视和开展<sup>[9]</sup>。针对奉先寺保存环境的分析与评估工作,还有待进一步研究。

由于奉先寺岩体独特的性质结构,使得窟前形成了有别于窟外的微环境,该环境特征与窟内石刻的保存情况密切相关。然而,对于这样的环境在奉先寺石刻保存中扮演怎样的角色,是否起到了隔绝外界侵扰的作用,还暂不知晓。

无线传感器网络是文化遗产监测和风险预警工作的重要技术手段<sup>[10]</sup>,用于收集有关遗产保存环境因素的大量历史信息。而时间序列分析是对此类信息进行数据发掘的最有效方式<sup>[11]</sup>。因此,为了全面了解奉先寺窟前的微环境特征,挖掘该环境与窟外的差异与联系,并评估奉先寺石刻的保存情况,本研究借助龙门石窟监测预警体系,对奉先寺窟前的环境因素进行了为期 1 年的实时监测,并借助时间序列分析方法对监测数据进行分析,为奉先寺未来的保护工作提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

奉先寺为自东向西开凿,宽约 36 m、深约 40 m<sup>[1]</sup>。窟前区域为内凹的矩形露天区域,顶部、东面与窟外环境连结,西、南和北壁为围岩,如图 1,2 所示。本研究选择监测的内容包括窟前与窟外的

温度、相对湿度和降雨量;西壁卢舍那大佛造像、北壁碑刻以及南壁力士造像(简称佛像、碑刻和力士)的表面温度;风向、风速和 CO<sub>2</sub> 浓度。



图 1 奉先寺实景

Fig. 1 Fengxian Temple

### 1.2 监测布点

本研究基于无线传感器网络对奉先寺窟前环境即石刻本体进行无损监测,数据实时传输并收集至龙门石窟监测中心保存。所收集数据的时间跨度为 2017 年 1 月 1 日—12 月 31 日。各传感器及气象站的位置、监测内容、采样间隔、精度以及最终数据的获取总量如图 2、表 1 所示。

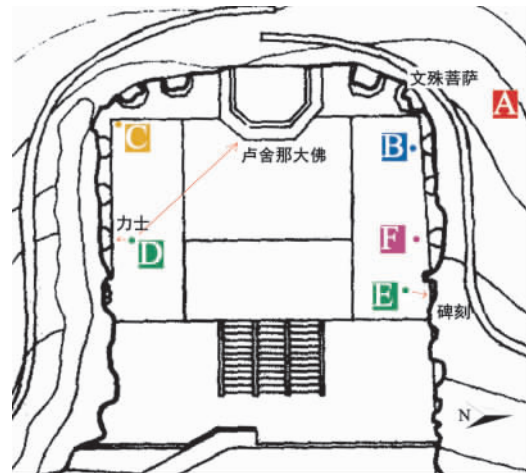


图 2 奉先寺俯视图<sup>[2]</sup>及监测点的位置

Fig. 2 Top view of Fengxian Temple and the location of sensors

表 1 监测项目及参数  
Tab. 1 Monitoring items and parameters

监测内容	监测点位置	采样精度	采样间隔/min	获取数据总量
环境温度	A、B	0.1℃	30	17 520
环境相对湿度	A、B	0.1%	30	17 520
表面温度	D、E	0.1℃	30	17 520
降雨量	A	0.1 mm	60	8 760
风向	A、C	窟前 1°/窟外 36°	30	17 520
风速	A、C	0.1 m/s	30	17 520
CO <sub>2</sub> 浓度	F	1 ppm	10	52 560

其中,窟外环境数据均来自万佛洞顶的气象站 A;窟前环境的温湿度数据来自文殊菩萨造像东侧的气象站 B;窟前的风向和风速监测站(见图 3A)布置于奉先寺西南角 C; D、E 处为西壁卢舍

那大佛、南壁力士及北壁碑刻的表面温度监测点,通过红外热成像监测仪进行远程无损监测(见图 3B);窟前 CO<sub>2</sub> 浓度监测设备(见图 3C)位于北壁碑刻的西侧 F。

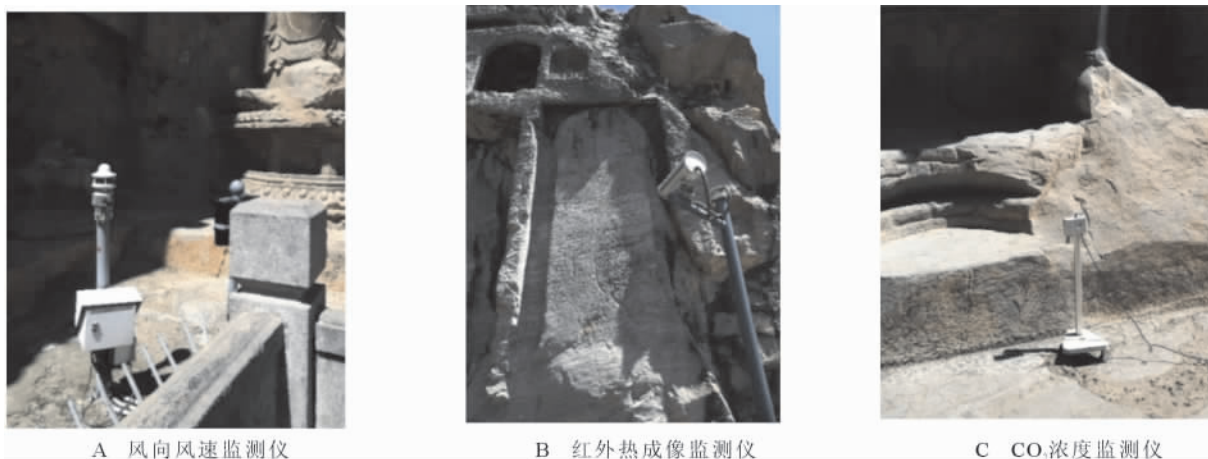


图 3 部分监测设备的布设  
Fig. 3 Layout of the monitoring sensors

### 1.3 时间序列分析

无线传感器网络所收集的信息均为时间序列数据。本研究利用各种时间序列分析方法,选用 MATLAB 语言作为分析工具,对数据信息进行深入处理。本文涉及的内容包括了对数据的趋势分量进行分解和去除,数据的频域分析以及统计分析等。

## 2 结果分析

### 2.1 窟前与窟外的湿热环境监测

2.1.1 总体特征 图 4,5 概括了 2017 年全年奉先寺窟前和窟外湿热环境的大体情况。本文选择混合比(mixing ratio, 单位: g/kg)来表征空气中水汽的含量,由温度与相对湿度的监测数据换算

得出;图中每个散点为气象站的 1 次采样数据,以不同颜色区分季节。

窟外的湿热环境全年变化较大,且四季差异分明(见图 4)。冬季寒冷干燥,温度集中分布于 -3℃ ~ 15℃,水汽含量集中在 5 g/kg 以下;夏季则明显高温,处在 20℃ ~ 40℃,水汽含量为 10 ~ 25 g/kg。相对湿度方面,全年具有较大的变化范围,秋、冬、春季均分布于 10% ~ 100% 之间,夏季则分布于 30% ~ 100%,并且数据更多集中在高湿区域。

与窟外相比,窟前的湿热环境具有更高的温度和水汽含量。冬季温度处于 1℃ ~ 20℃ 之间,较窟外高大约 4℃,显著降低了岩体发生冻融循环的风险;夏季温度为 25℃ ~ 40℃,水汽含量高达 10 ~ 35 g/kg。相对湿度方面,窟前与窟外的分

布区域相似,秋季有较多时刻湿度集中在 30% 以上(窟外则低于 30%)。通过观察秋季的相对湿度曲线发现(见图 6),当日间窟外湿度下降时,窟前的湿度降至 30%~40% 后便不再下降,并长时间保持在这一水平。这一变化特征可能与奉先寺渗水带来的持续水分补给有关,具体原因有待进一步研究。在 90%~100% 相对湿度之间有大量数据聚集,是因为降雨带来了湿度的大幅上升(见图 7),并在降雨结束后仍会持续较长的时间(由于万佛洞气象站在降雨期间有异常,导致图 4 中部分高湿度数据缺失)。

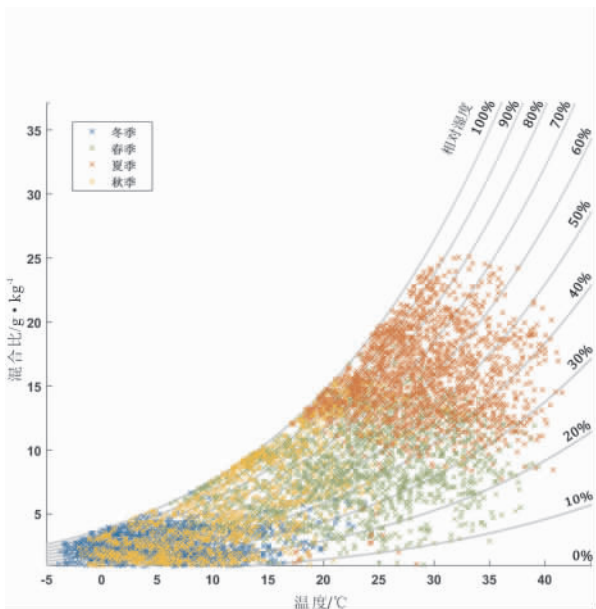


图 4 窟外湿热环境概况

Fig. 4 Thermal-humidity environment outside the temple

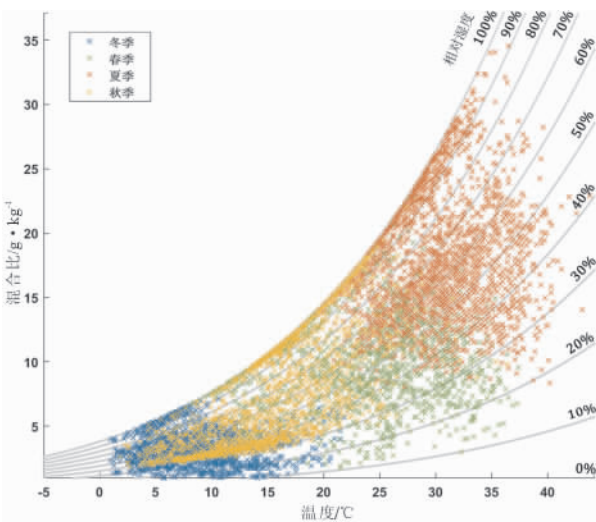


图 5 窟前湿热环境概况

Fig. 5 Thermal-humidity environment in front of the temple  
为详细观察奉先寺窟前与窟外湿热环境差异

的时间特征,将窟前与窟外各时刻的温度、湿度和混合比分别作差并绘图,如图 8 所示。

由图 8A 可知,窟前温度整体上高于窟外。其中,秋冬季的温度差多处于 1℃~6℃,几乎很少有窟前温度低于窟外的现象出现;而春夏季温差的分布较宽,且有大约 1/5 的时间窟前温度低于窟外。图 8B 中,窟前混合比整体上高于窟外。其中,冬季的混合比差最小,且分布较窄(0~2 g/kg),即窟前水汽含量略高于窟外;夏季最大(-4~10 g/kg),窟前水汽含量显著高于窟外。图 8C 中,窟前湿度整体略低于窟外,波动范围更多地围绕在 0% 上下,湿度的差异不断交替。

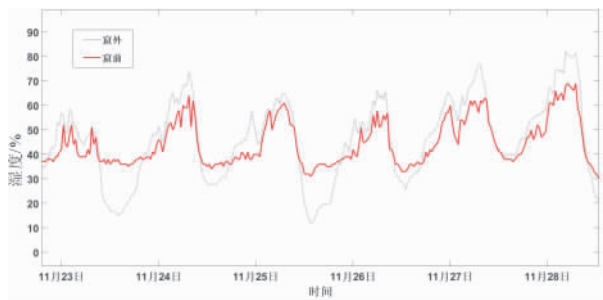


图 6 秋季窟外与窟前的湿度变化

Fig. 6 The variation of relative humidity in autumn

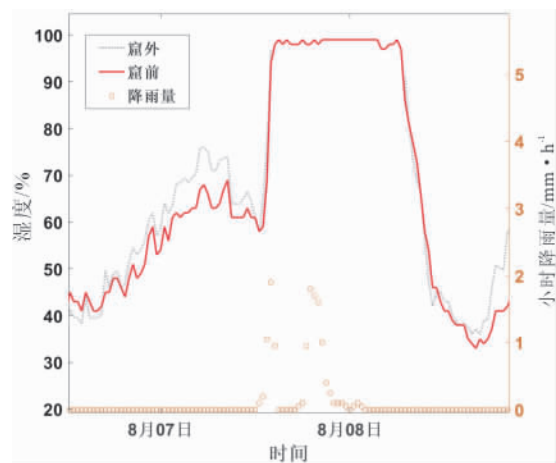


图 7 降雨时窟外与窟前的湿度变化

Fig. 7 The variation in relative humidity during rainfall

综上可推断,奉先寺岩体的空间结构对水汽起到了一定程度的保存作用,使得降雨和渗水等形式带来的水分补给更长久地停留在窟前区域内,从而导致全年大部分时间窟前的水汽含量高于窟外;同时,该结构也起到了保温的作用,使得窟前的环境温度高于窟外,部分抵消了相对湿度的上升,最终,窟前和窟外的相对湿度水平相近。

2. 1. 2 湿热波动 通过分别计算窟前与窟外温

湿度在短时间内的极差,再绘制直方图对其进行统计,以评估窟前与窟外环境各自短期波动情况。为防止监测数据的日波动和季节趋势对其小时波动产生干扰,先对数据进行高通滤波,使其仅留下

小时波动的信息后再进行分析(见图 9)。选择日温湿度差 ( $\Delta T_d, \Delta RH_d$ ) 和小时温湿度差 ( $\Delta T_h, \Delta RH_h$ ) 作为 2 个评价短期波动的时间宽度。

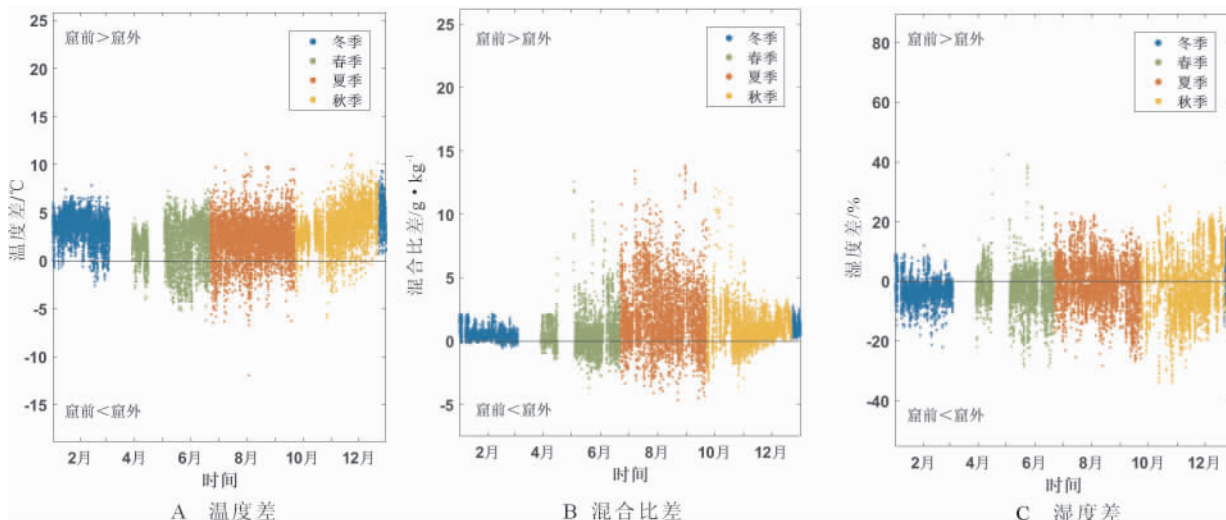


图 8 全年窟前与窟外温度、湿度、混合比之差

Fig. 8 Difference of temperature, relative humidity and mixing ratio between the front and the outside of the temple

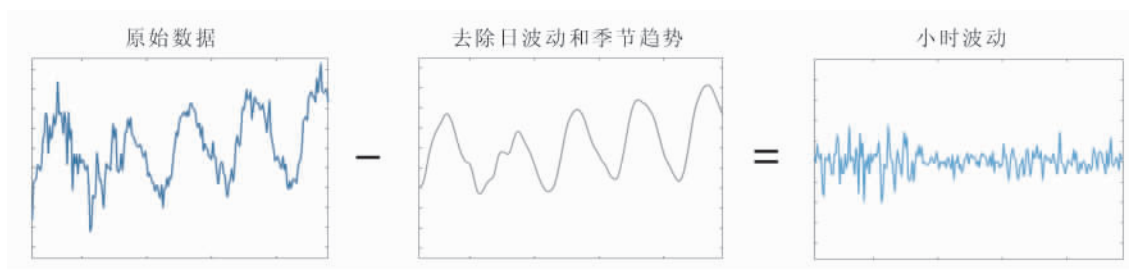


图 9 数据去趋势过程示意

Fig. 9 The process of de-trending data

可以看出,窟前与窟外的温湿度具有相似的日波动(见图 10A, B)。其中,窟外的日温度差均值为  $10.2^{\circ}\text{C}$  (窟前为  $9.7^{\circ}\text{C}$ ),有 161 天的日温度差集中在  $8^{\circ}\text{C} \sim 14^{\circ}\text{C}$  之间(窟前为 184 天),说明窟外温度的日波动稍高于窟前;窟外的日湿度差均值为 45% (窟前为 40%),有 212 天的日湿度差集中在  $30\% \sim 60\%$  之间(窟前为 174 天),可以看出,窟外湿度的日波动同样稍高于窟前。

窟外的小时温度差与窟前则有很大差异(见图 10C, D): 窟外 70% 时间的小时温度差小于  $0.5^{\circ}\text{C}$ ,且小于  $0.25^{\circ}\text{C}$  的就占总时间约 50%,超过  $1.5^{\circ}\text{C}$  的温度差仅占 2%;然而,窟前的小时温度差分布较散,小于  $0.5^{\circ}\text{C}$  的仅占 31%,超过  $1.5^{\circ}\text{C}$  的多达 24%。小时湿度差方面,窟前与窟外则非常相似,主要集中在  $\Delta RH_h = 2\%$  以下,超过  $\Delta RH_h = 10\%$  的湿度差仅占 1%。

综上所述,奉先寺窟前的空间结构未能起到减缓日湿热波动的作用,可能是由于窟前与窟外连通的程度依然很高,空气交换迅速,使得窟前湿热波动同窟外一样十分明显。窟前温度在全年均出现了比窟外更剧烈的小时波动,通过频域分析发现,窟外温度小于 5 小时周期(大于  $0.56 \times 10^{-4}\text{Hz}$ ) 的振幅逐步下降,而窟内直至  $2.5 \times 10^{-4}\text{Hz}$  (约 1 小时周期) 仍有较大振幅(见图 11),其具体成因有待进一步调查研究。

## 2.2 石刻本体的表面温度监测

2.2.1 表面温度的变化特征 图 12, 13 分别展示了奉先寺 3 处石刻典型的表面温度变化曲线。秋冬季时,佛像与碑刻较力士而言,整体的表面温度更高,并且在 7:00 之后升温速率更快,分别于 11:30、13:30 达到当日极大值,而力士表面温度上升相对迟缓,温度极大值也最低。春夏季时,佛

像与力士的表面温度则整体高于碑刻,且自 7:00 起温度急速上升,而碑刻升温的时间点有近 1 小时的延迟,14:30 左右,3 处石刻温度接近,分别达

到了当日最大温度(佛像 21.0℃ > 力士 20.4℃ > 碑刻 19.9℃)。

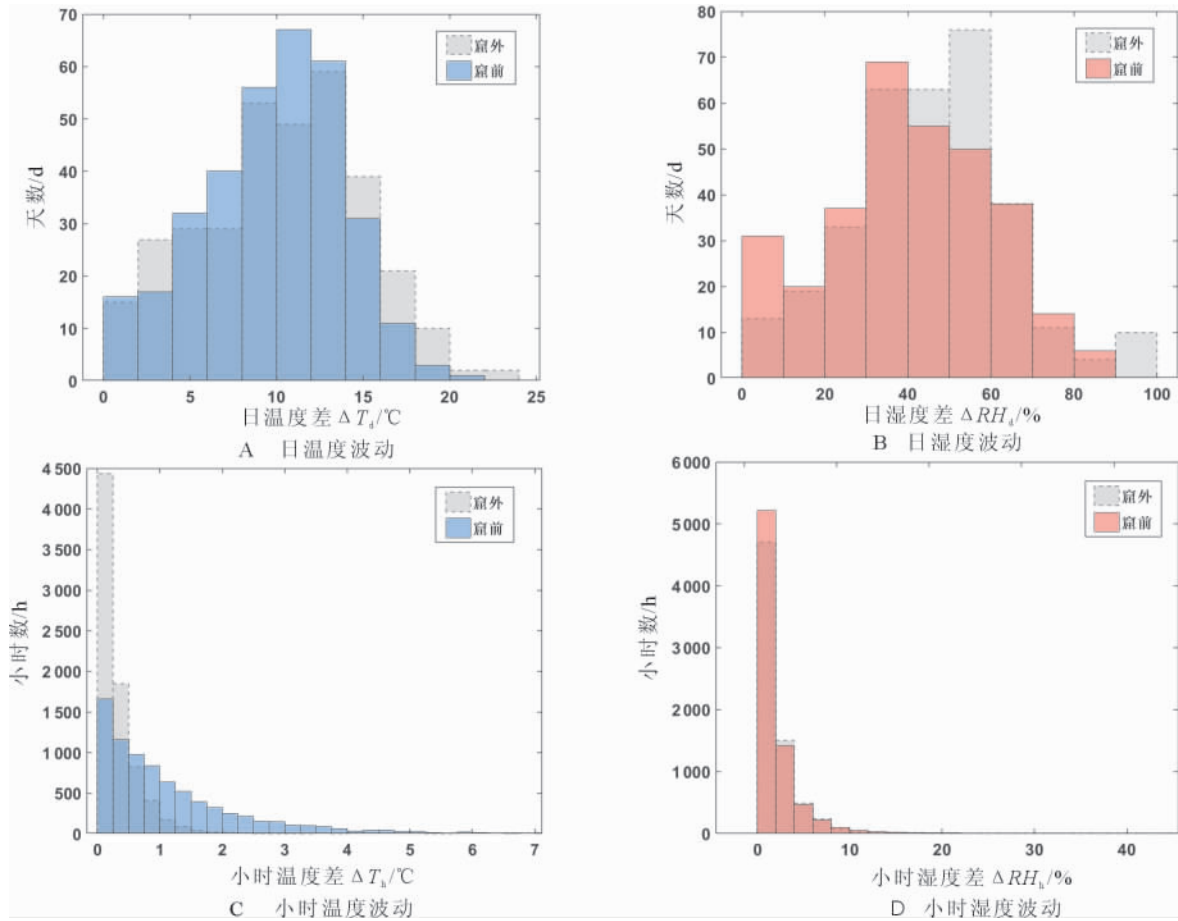


图 10 窟前与窟外湿热波动直方图

Fig. 10 Histogram of thermal-humidity fluctuation

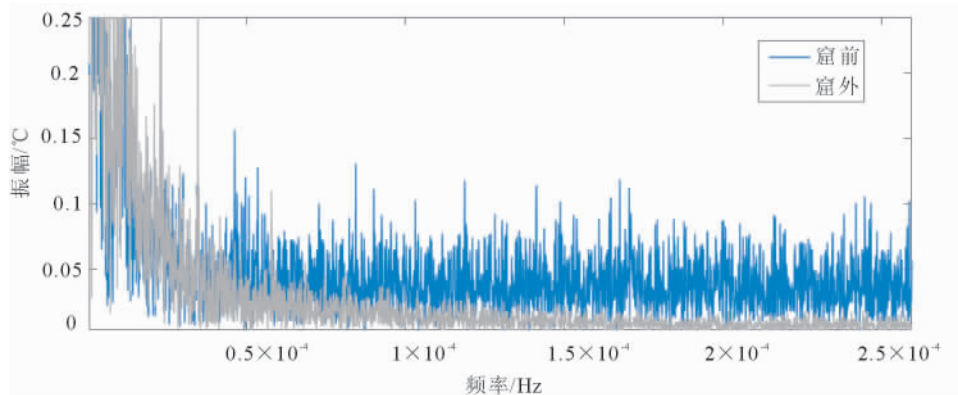


图 11 窟前与窟外温度的频域分析

Fig. 11 Spectrum analysis of temperature

由此可以推断,3 处石刻的表面温度受到了太阳光照射方位变化的影响,展现出季节性差异。由于奉先寺地处北纬 34°,且自东向西开凿,因此,从日出至正午前,太阳直接照射西壁的佛像,

使得佛像的太阳辐射热通量全年保持在较高水平,表面温度较高。对于南壁和北壁,秋冬季时,太阳日出方向为东偏南,并持续在偏南方向运行,使得北壁碑刻被持续照射,故温度很高,南壁力士

没有阳光直射,温度较低;春夏季时,太阳日出方向为东偏北,运行至正午之前为东偏南,使得南壁力士率先受到阳光照射而升温,当太阳逐渐开始照射北壁后,碑刻才开始升温,并最终于午时温度接近力士。午后,太阳运行至西侧,石窟各处表面温度随即下降(见图 14)。

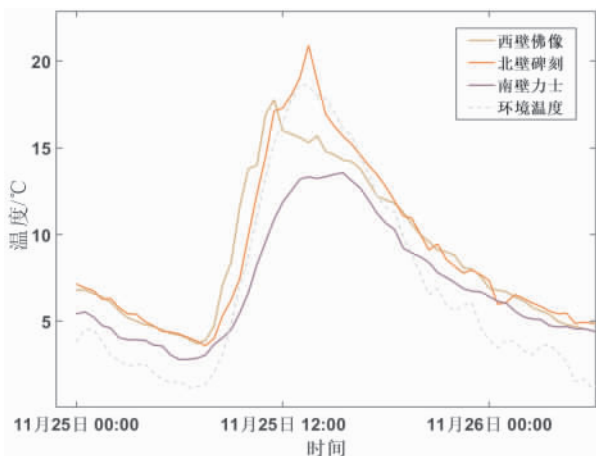


图 12 秋冬季石刻表面温度曲线(11月25日)

Fig. 12 Surface temperature of stone carvings in autumn and winter( November 25)

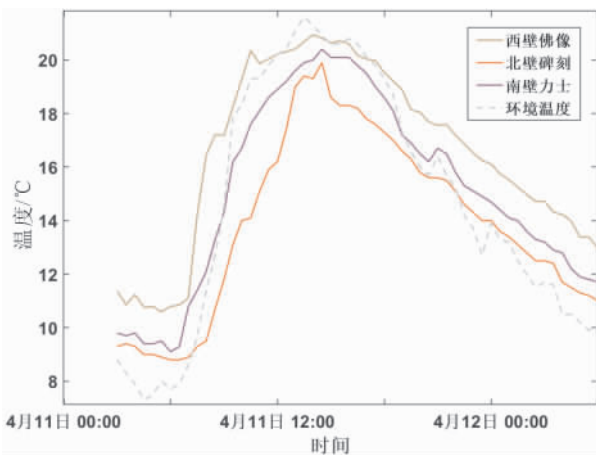


图 13 春夏季石刻表面温度曲线(4月11日)

Fig. 13 Surface temperature of stone carvings in spring and summer ( April 11)

2.2.2 表面-环境温度差与表面沉积 当石刻表面与其相邻的气体边界层达到一定的温度差异时,会导致热不平衡状态并形成空气湍流,导致空气中灰尘等污染物撞击石刻并发生表面沉积<sup>[12]</sup>,最终破坏石刻表面的美观和安全。同时,这种沉积的速率与温差的大小成正比关系<sup>[13-44]</sup>。本小节通过逐时计算石刻表面与环境的温度差,间接实现对沉积的观测和评估。

图 15 中,佛像表面与环境的温度差整体略高于力士和碑刻。全年超过 37% 的时间,佛像的温

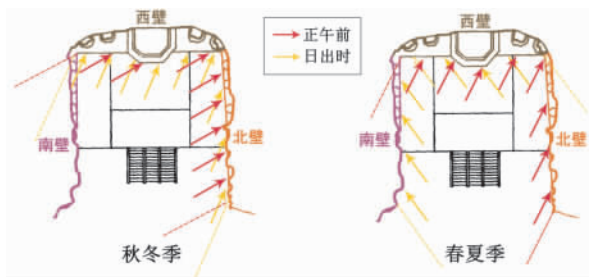


图 14 奉先寺太阳光照射方位的季节差异

Fig. 14 Seasonal difference in the orientation of solar radiation in Fengxian Temple

度差达到了 3°C 以上,同等水平下力士与碑刻占 20%、26%;佛像超过 6°C 的温差仍有 5%,而力士与碑刻均不足 2%;力士与碑刻的温度差主要集中在 2°C 以下(分别占 63%、57%)。因此,佛像面临更大的表面沉积风险。

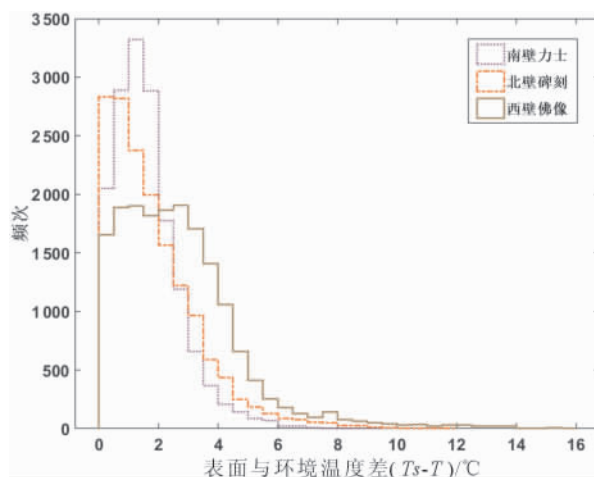


图 15 石刻表面与窟前环境温度差直方图

Fig. 15 Histogram of the difference of temperature between the stone carvings surface and environment

2.2.3 表面温度波动与温差应力 当岩体表面温度变化剧烈时,易形成表面和内部之间周期变化的温度梯度,引起岩体内部的温差应力和应变,长此以往,会危害岩体的稳定性<sup>[15]</sup>。本小节通过计算和统计石刻表面温度的日波动幅度,对潜在的由温差应力引起的风化进行观测和评估。

图 16 中,佛像和碑刻的日波动幅度相似,并整体高于力士。佛像有 185 天表面温度的日波动达到 1°C 以上(碑刻为 145 天),大于 20°C 的日波动,佛像和碑刻仍分别有 22 天和 6 天;而力士表面温度的日波动主要集中在 5°C ~ 10°C (共 220 天),大于 1°C 的日波动仅有 4 天,且最大日波动不超过 15°C。

由于 3 处石刻方位的原因,全年佛像和碑刻

接收到的总太阳辐射通量高于力士,可以认为,太阳辐射是石刻表面温度波动的主要来源。接收辐射通量更高的佛像和碑刻,其温差应力变化更剧烈。

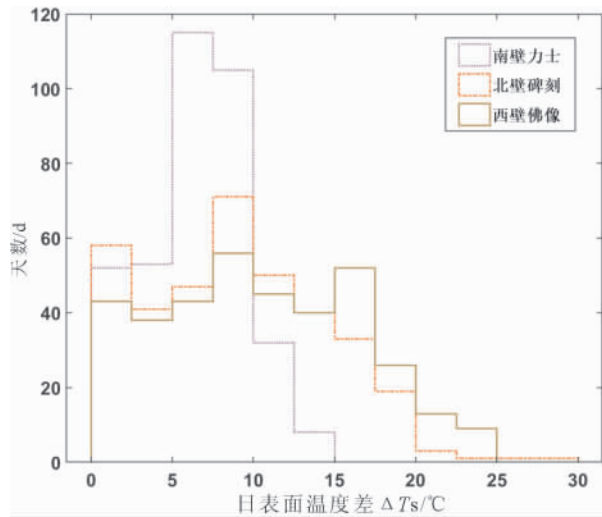


图 16 石刻表面温度日波动直方图

Fig. 16 Histogram of daily fluctuation of the stone carvings surface temperature

2.2.4 露点温度差与结露 当石刻表面温度接近或低于其临近空气的露点温度时,易发生水汽凝结。图 17 为 3 处石刻表面温度与窟前环境露点温度之差的曲线。可以看出,与佛像和力士相比,碑刻结露的风险最大。自凌晨至日出之前,碑刻表面温度下降最明显,且降雨期间湿度整体上涨,露点温度也随之上升,最终导致碑刻温度降至露点之下。统计得出,全年碑刻共计约 140 小时存在结露风险。

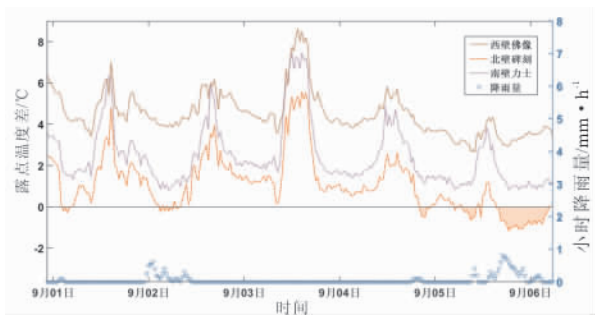


图 17 石刻表面温度与露点温度的差值曲线

Fig. 17 The difference between the temperature of stone carvings surface and dew point

### 2.3 其他环境因素的监测

2.3.1 风向与风速 图 18,19 统计了窟前与窟外的风向和风速。可以看出,窟前与窟外的风向有明显的差异:全年窟外的风向以西风为主

(36%),其次为东南风(11%),其余各风向较为平均;而窟内风向主要以东北风和东风为主(22%、21%),其次为东南风和北风(11%、10%)。

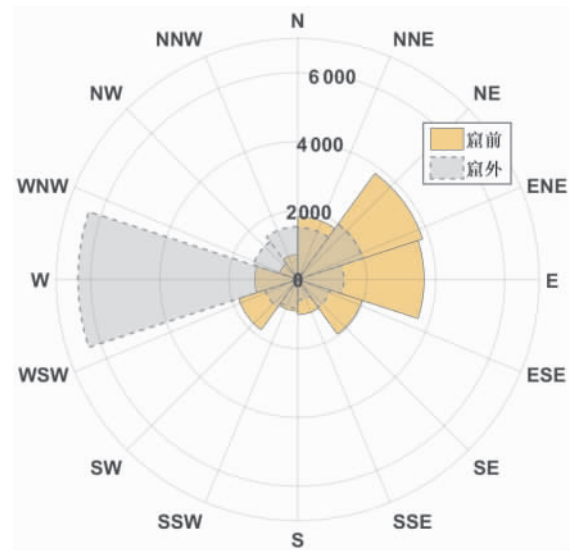


图 18 窟前与窟外的风向玫瑰图

Fig. 18 Rosemap of wind direction

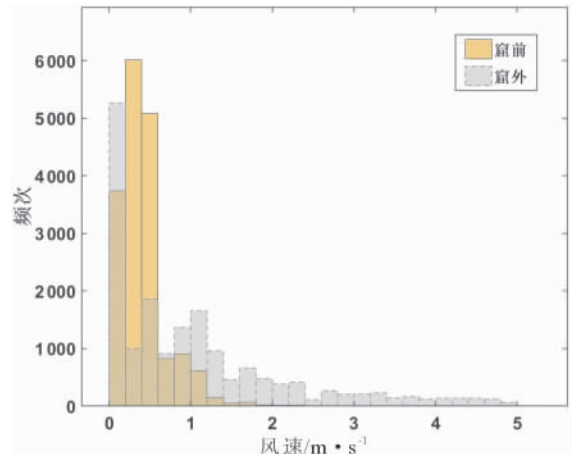


图 19 窟前与窟外的风速直方图

Fig. 19 Histogram of wind speed

窟前的风速总体上明显小于窟外。窟外大于 1 m/s 风速的占总时间 40%,而窟内同等水平的风速仅占 5%;窟外有约 8% 时间风速达到了 3 ~ 5 m/s,而窟内风速均在 2 m/s 以下。可以认为,奉先寺窟前结构使其形成了不同于窟外的风场,起到了削弱风力的作用,降低了窟前石刻风化的风险。

2.3.2 窟前 CO<sub>2</sub> 浓度 图 20,21 的箱型图展示了窟前 CO<sub>2</sub> 浓度在不同季节的日变化,每个箱体代表全年同一时刻 CO<sub>2</sub> 浓度监测数据的统计分布。秋冬季 CO<sub>2</sub> 浓度整体较低,且日变化幅度较



小,50%的时间浓度都集中在  $800 \sim 1\,000 \times 10^{-6}$ 。  
 8:00~12:00 间浓度的中位数最高,达到了  $969 \times 10^{-6}$ ,20:00 时中位数达到最低点  $918 \times 10^{-6}$ 。春夏季  $\text{CO}_2$  浓度整体偏高,且存在显著的日夜差异。夜间至日出前,浓度集中在  $1\,900 \sim 2\,500 \times 10^{-6}$ ,中位数于 6:00 达到最高点  $2\,326 \times 10^{-6}$ ,而日出后浓度逐渐降低,14:00 时中位数降至  $2\,035 \times 10^{-6}$ ,整体集中在  $1\,700 \sim 2\,300 \times 10^{-6}$ 。

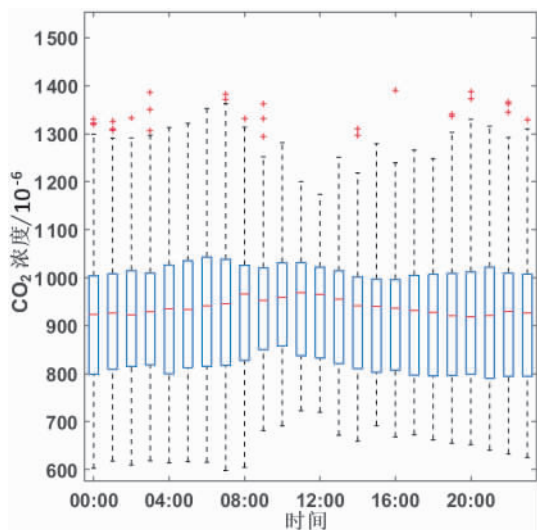


图 20 秋冬季窟前  $\text{CO}_2$  浓度日变化箱型图

Fig. 20 Box plot of the daily variation of the  $\text{CO}_2$  concentration in autumn and winter

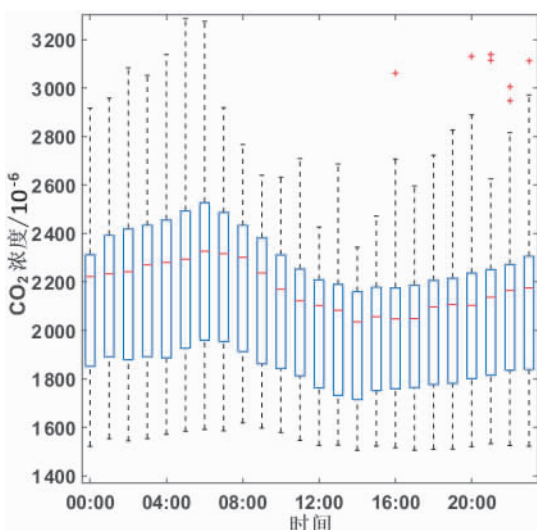


图 21 春夏季窟前  $\text{CO}_2$  浓度日变化箱型图

Fig. 21 Box plot of the daily variation of the  $\text{CO}_2$  concentration in spring and summer

可以看出,秋冬季时,由于石窟景区大部分植被停止生长,蒸腾作用微弱,因此,对窟前  $\text{CO}_2$  浓度影响很小。而景区全年对游客开放,开放时间

内窟前的  $\text{CO}_2$  浓度有小幅上升,并随人流的减少而降低。春夏季时,植被生长茂盛,蒸腾作用占  $\text{CO}_2$  浓度变化的主导地位,此时游客活动的影响不再显著。

### 3 结论与讨论

通过对奉先寺窟前各环境因素的监测和分析,得出的主要结论如下:

1) 奉先寺的空间结构对窟前微环境同时起到了保温和保持水汽的作用。降雨和渗水为奉先寺输送的水汽在窟前积聚,导致水汽含量的上升,但该结构也同时使得窟前的温度更高。最终二者抵消,削弱了由此带来的相对湿度的提升。因此,窟内并没有因为更高的水汽含量而更加潮湿。如果对窟前水汽的来源进行有效的削减或阻拦,则可以使得窟前处于一个比窟外更干燥的状态,更有利于石刻的保存。

2) 奉先寺的空间结构未能有效地削弱湿热环境的短期波动。这说明窟前与窟外连通紧密,空气交换仍比较频繁,使得二者湿热环境的短期变化趋势相似。窟前温度的高频小时波动的成因有待进一步研究。

3) 西壁卢舍那大佛和北壁碑刻存在显著的温差应力日波动。这是因为太阳运行的季节规律使得西壁和北壁在上午接收到比南壁更多的太阳辐射,导致表面温度上升,而午后又急剧下降,致使温度的日波动剧烈,最终面临温差应力风化的风险。

4) 西壁卢舍那大佛本体与环境的温度差异整体上高于北壁碑刻和南壁力士,使其面临更高的表面污染物沉积的风险。实际上,除表面与气体边界层的温度差之外,石刻表面的粗糙度,空气中污染物颗粒的直径,以及表面潮湿与否都会影响沉积的速率<sup>[12]</sup>。由于西壁的渗水现象也很严重,使得部分岩体表面长期处于潮湿状态,这增加了岩体表面对环境污染物的吸附能力,使得其表面沉积并泛黑的现象十分普遍。实际情况下,西壁和南壁的表面沉积现象较北壁更为严峻。

5) 北壁碑刻在降雨期间的清晨存在结露,而西壁和南壁未见此现象。这是因为北壁清晨的表面温度较西壁和南壁更低,同时,降雨又提高了露点温度,导致碑刻的表面温度低于露点,进而产生了凝结。

6) 奉先寺的空间结构改变了窟前风向的统计特征,降低了风速,实现了对风力风化的削弱。如果未来可以增加监测设备的数量,则可以实现对窟前风场更全面的了解。

7) 奉先寺 CO<sub>2</sub> 浓度的主要影响因素是周围植被在夜间的蒸腾作用,游客的参观次之。秋冬季植被稀少时,游客活动的影响才可观察到。

## 参考文献:

- [1] 裴学胜. 龙门奉先寺卢舍那大佛的造像考证 [D]. 北京: 北京大学, 2009.
- [2] 刘景龙. 龙门石窟保护 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [3] 方云, 张俊建, 严绍军, 等. 龙门石窟奉先寺病害调查研究 [J]. 石窟寺研究, 2012: 356-362.  
FANG Y, ZHANG J J, YAN S J, et al. Investigation of Fengxian Temple in Longmen Grottoes [J]. Studies of the Cave Temples, 2012: 356-362.
- [4] 方云, 喻媛, 严绍军, 等. 龙门石窟奉先寺渗水机理研究 [J]. 石窟寺研究, 2014: 402-409.  
FANG Y, YU Y, YAN S J, et al. Research on the mechanism of water seepage disease of Fengxiansi cave in Longmen Grottoes [J]. Studies of the Cave Temples, 2014: 402-409.
- [5] 马朝龙, 方云, 李建厚, 等. 龙门石窟万佛洞至奉先寺北段渗漏水成因分析及综合防治措施研究 [J]. 敦煌研究, 2007(5): 36-38, 117.  
MA C L, FANG Y, LI J H, et al. Analysis of the causes of water seepage in the northern section of the Longmen Grottoes from the Wanfo Cave to the Fengxian Temple and study of prevention and control measures [J]. Dunhuang Research, 2007(5): 36-38, 117.
- [6] 严绍军, 方云, 孙兵, 等. 渗水对龙门石窟的影响及治理分析 [J]. 现代地质, 2005, 19(3): 475-478.  
YAN S J, FANG Y, SUN B, et al. Influence of water permeation and analysis of treatment for the Longmen Grottoes [J]. Geoscience, 2005, 19(3): 475-478.
- [7] 方云, 张俊建, 夏国正, 等. 红外热成像在龙门石窟奉先寺渗水探测中的应用 [J]. 现代地质, 2013, 27(3): 750-754.  
FANG Y, ZHANG J J, XIA G Z, et al. Application of infrared thermal imaging on seepage probing of Fengxian Temple in Longmen Grottoes [J]. Geoscience, 2013, 27(3): 750-754.
- [8] 方云, 翟国林, 乔梁. 探地雷达探测技术在奉先寺保护工程中的应用 [J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 815-819.  
FANG Y, ZHAI G L, QIAO L. The application of ground penetrating radar technology to the protection engineering of Fengxian temple [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 815-819.
- [9] 陈建平. 龙门石窟预防性保护的探讨 [J]. 中国文化遗产, 2019, 4(1): 75-81.  
CHEN J P. Discussion on the preventive conservation of the Longmen Grottoes [J]. China Cultural Heritage, 2019, 4(1): 75-81.
- [10] 邓宏. 无线传感网络技术在文化遗产保护领域的应用 [J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(3): 60-65.  
DENG H. The application of WSN technology in heritage conservation [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2011, 23(3): 60-65.
- [11] 张善文, 雷英杰, 冯有前. MATLAB 在时间序列分析中的应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 1-12.
- [12] SCHLICHTING B H, KESTIN T. Boundary-layer theory [J]. Fluid Mechanics, 1990, 20(1): 48-89.
- [13] CAMUFFO D. Wall temperature and the soiling of murals [J]. Museum Management and Curatorship, 1991, 10(4): 373-383.
- [14] HICKS B B. Wet and dry surface deposition of air pollutants and their modeling [J]. Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments, 1983: 183-196.
- [15] 孙博, 周仲华, 张虎元, 等. 温度在夯土建筑遗址风化中的作用 [J]. 敦煌研究, 2009, 4(6): 66-70.  
SUN B, ZHOU Z H, ZHANG H Y, et al. The effect of temperature in the weathering of rammed earthen sites [J]. Dunhuang Research, 2009, 4(6): 66-70.

(编辑 张欢)