

# 莫高窟洞窟湿度对不同等级降雨的响应研究

张正模<sup>1,2</sup>, 刘洪丽<sup>1</sup>, 郭青林<sup>1</sup>, 苏伯民<sup>1</sup>

(1. 敦煌研究院 保护研究所, 甘肃 敦煌 736200; 2. 东南大学 建筑学院, 江苏 南京 730020)

**摘要:** 敦煌莫高窟是丝绸之路沿线一处重要的佛教文化遗址, 以精美的壁画和塑像闻名于世界。降雨引起洞窟湿度变化极易导致壁画盐类病害。通过环境监测试验分析不同等级降雨条件下洞窟湿度变化特征及潜在影响, 并提出风险防范措施及建议。研究表明, 不同等级降雨条件下, 洞窟湿度变化均呈现上升-保持-下降三个阶段。前期降雨使湿度快速升高, 后期降雨使湿度缓慢降低, 高湿度保持时间随着降雨等级和降雨次数的增加而增加。降雨天气, 水汽浓度梯度是水汽交换的主要动力。当  $a_{\text{air}} > a_{\text{cave}}$  时, 大气中的湿空气向洞窟内扩散, 洞窟湿度增加。当  $a_{\text{air}} < a_{\text{cave}}$  时, 洞窟内湿空气流向窟外, 洞窟湿度逐渐降低。洞窟湿度大小及相对湿度超过 62% 的持续时间均表现为半封闭洞窟 > 封闭洞窟, 小型洞窟 > 大型洞窟。为了预防洞窟湿度增加激活壁画盐害, 建议当  $a_{\text{air}} = a_{\text{cave}}$  时实施洞窟环境调控, 控制条件为  $RH < 62\%$ 。易损洞窟和连阴雨天气应作为环境监测重点关注对象。研究成果对降雨天气莫高窟壁画劣化风险防范和旅游管理具有重要的科学价值和应用价值。

**关键词:** 莫高窟; 降雨; 湿度; 壁画劣化; 风险防范

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)03-0417-07

## Response of humidity inside caves of Mogao Grottoes to the different grades of rainfall

ZHANG Zhengmo<sup>1,2</sup>, LIU Hongli<sup>1</sup>, GUO Qinglin<sup>1</sup>, SU Bomin<sup>1</sup>

(1. Institute of conservation and research, Dunhuang Academy, Gansu Dunhuang 736200, China;

2. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Dunhuang Mogao Grottoes, an important Buddhist cultural site along the Silk Road, is famous for its exquisite murals and statues. However, the change of humidity caused by rainfall in caves is very easy to cause salt diseases in murals. Through environmental monitoring experiments, the characteristics and potential effects of cave humidity change under different levels of rainfall were analyzed, and the risk prevention measures and suggestions were put forward. The results show that the variation of cave humidity presents three stages of ascending, maintaining and descending under different levels of rainfall. The rainfall in the early period increases the humidity rapidly, and the rainfall in the late period decreases the humidity slowly. The retention time of high humidity increases with the increase of rainfall level and rainfall frequency. During rainfall, the water vapor gradient is the main driving force of water vapor exchange. The wet air in the atmosphere diffuses into the cave when  $a_{\text{air}} > a_{\text{cave}}$ , and the humidity of the cave increases. The wet air inside the cave flows outside when  $a_{\text{air}} < a_{\text{cave}}$ , and the humidity decrease gradually. The order of cave humidity and relative humidity over 62% for the duration is semi-closed cave > closed cave, small cave > large cave. In order to prevent the increase of cave humidity to activate the mural salt damage, it is recommended to implement cave environment control when  $a_{\text{air}} = a_{\text{cave}}$ , and the control condition is  $RH < 62\%$ . The environmental monitoring should focus on the vulnerable caves and the continuously rainy weather. The research results have important scientific and application value for the prevention of risk of murals deterioration and the tourism management in rainy weather.

**Key words:** Mogao Grottoes; rainfall; humidity; mural deterioration; micro-environmental control

收稿日期: 2022-07-24

修回日期: 2023-05-15

基金项目: 甘肃省自然科学基金重点项目资助(22JR5RA798)

第一作者: 张正模(1982—), 男, 副研究馆员, 主要从事环境监测及文物保护研究。E-mail: jiyicanpian@126.com

石窟寺是印度佛教在中国传播和发展的实物见证。保护石窟文物对我国优秀传统文化的传承与发展至关重要。莫高窟地处丝绸之路咽喉要塞敦煌,保存了4~14世纪时期的洞窟735个,壁画45 000 m<sup>2</sup>,彩塑2 000多尊,是中国乃至世界上现存规模最大、内容最丰富的佛教文化遗址。1987年,敦煌莫高窟被联合国教科文组织列入《世界遗产名录》。因长期受自然环境变化影响,壁画产生了酥碱、疱疹、空鼓和起甲等多种病害<sup>[1-2]</sup>。这些病害的产生主要是由于盐分在水分参与下发生表层积聚作用导致的<sup>[3-4]</sup>。调查研究发现,引起壁画发生盐类病害的水分包括液态水和气态水两种。其中,液态水在渗流过程中带动盐分迁移转化,气态水使盐分发生潮解或水合作用<sup>[5-6]</sup>。

降雨是产生壁画盐类病害的水汽来源<sup>[7-8]</sup>。敦煌莫高窟地处中国西北干旱地区,虽然降雨稀少,但历时短,强度大。石窟处于无人看护状态时,雨水曾经进入到一些洞窟,对文物造成了无法逆转的侵蚀破坏<sup>[9]</sup>。随着崖体加固、门窗安装和防洪坝修筑等保护措施的实施,降雨渗入顶层洞窟和洪水漫入底层洞窟问题基本得到了解决。目前,降雨对莫高窟文物的危害主要为湿空气进入洞窟导致高湿环境和湿度剧烈波动。

环境湿度变化导致壁画盐害发生和发展<sup>[10-11]</sup>。莫高窟壁画地仗层中的主要盐分是NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>[12]</sup>。当相对湿度大于临界值时,NaCl溶解形成盐溶液,当相对湿度小于临界值时,NaCl晶体析出。随着环境湿度波动,NaCl不断重复溶解-结晶变化<sup>[13]</sup>。同理,受环境湿度变化影响,Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>反复发生水合-脱水相变<sup>[14]</sup>。这些盐分的晶体在生长、水化和热膨胀过程中产生压力,导致壁画地仗层破坏<sup>[15]</sup>。为了预防洞窟湿度增加激活壁画盐类病害,本研究通过环境监测试验,分析不同等级降雨条件下洞窟湿度变化特征,并确定最佳环境控制时间条件和重点防范对象。

## 1 环境监测试验

### 1.1 研究对象

敦煌莫高窟自营建开始距今已有1650多年的历史,文物可以较好的保存至今,与其偏远的地理位置,干燥的气候和相对密闭的洞窟环境密不可分。石窟位于中国西北地区河西走廊最西端甘肃省敦煌市东南25 km,周边为沙漠戈壁(图1)。

洞窟群开凿于陡峭的砂砾岩,壁画是在基岩上抹泥-着色-绘画制作而成,彩塑则是在木骨架上束麦草-敷泥-彩绘制作而成。遗址所在区域年均温度11.2℃,年均湿度31%,风速4.1 m/s,多年平均降雨量仅39 mm<sup>[16]</sup>。

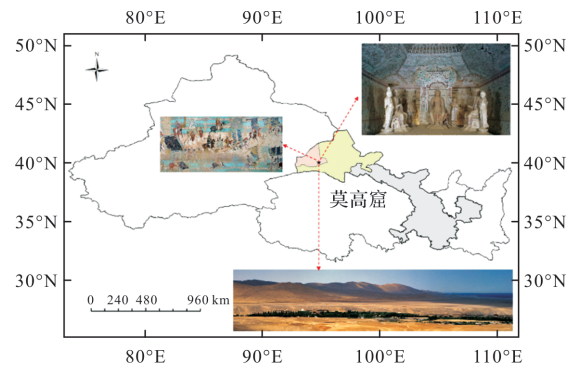


图1 敦煌莫高窟地理位置

Fig. 1 Geographical location of Dunhuang Mogao Grottoes

莫高窟洞窟数量多,单体大小不一,在崖面上呈4层错落分布。为了消除空间位置的影响,选择位于同一层位的71号洞窟(C71),332号洞窟(C332)和16号洞窟(C16)作为代表性研究对象(图2)。这三个洞窟形制相似,均由前室、甬道和主室三部分构成。其中,C71和C332原始洞门因崖面坍塌损毁,在后期保护工程中安装了铝合金门和百叶窗,密封性比较好。C16保存了完整的原始木门和镂空窗户,透气性比较好。根据洞窟小环境与外部大气环境之间的连通程度,C332和C71代表封闭式洞窟,C16代表半封闭式洞窟。按照空间大小,C71,C332和C16分别代表小型、中型和大型洞窟。经测量,3个洞窟的体积依次为66 m<sup>3</sup>,321 m<sup>3</sup>和1 574 m<sup>3</sup>。

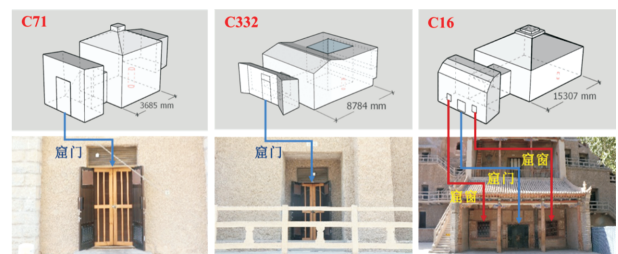


图2 代表性洞窟

Fig. 2 Representative caves

### 1.2 监测方案设计

洞窟是一种由岩体和门窗组成的特殊围护结构,内部环境变化受外部环境的影响。环境监测对象包括洞窟外部大气环境和洞窟内部小环境两部分。其中,大气环境监测点位于崖体顶部平台,

监测内容主要为降雨和空气温湿度,监测设备为美国 Campbell Scientific 公司生产的全自动气象站。洞窟小环境监测点位于洞窟内部,监测内容主要为相对湿度和温度;监测设备为美国 ONSET 公司生产的 U23-001 型温湿度记录仪,温度测量范围为  $-40 \sim 70^{\circ}\text{C}$ ,测量精度为  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度测量范围为  $0 \sim 100\% \text{ RH}$ ,测量精度为  $\pm 2.5\%$ ,数据采集间隔为  $1 \text{ min}$ 。

### 1.3 分析方法

#### (1) 降雨特征

降雨特征采用降雨量和降雨历时表示。界定降雨量  $\geq 0.1 \text{ mm}$  的降雨为有效降雨,降雨间隔小于  $6 \text{ h}$  的降雨过程为单场降雨。降雨等级按照不同时段降雨量进行划分(GB/T 28592—2012)。根据  $12 \text{ h}$  降雨量划分标准,小雨、中雨、大雨和暴雨范围分别为  $0.1 \sim 4.9 \text{ mm}$ 、 $5 \sim 14.9 \text{ mm}$ 、 $15 \sim 29.9 \text{ mm}$  和  $30 \sim 69.9 \text{ mm}$ 。根据  $24 \text{ h}$  降雨量划分标准,小雨、中雨、大雨和暴雨范围分别为  $0.1 \sim 9.9 \text{ mm}$ 、 $10 \sim 24.9 \text{ mm}$ 、 $30 \sim 49.9 \text{ mm}$  和  $50 \sim 99.9 \text{ mm}$ 。

#### (2) 湿度特征

湿度特征采用相对湿度(RH)和绝对湿度( $a$ )2个参数表示。其中,相对湿度是判定盐分是否发生潮解的重要指标。绝对湿度用来反映降雨引起洞窟环境水汽含量的变化,数值根据温度和相对湿度监测数据换算<sup>[17-18]</sup>。

绝对湿度计算公式为

$$a = A \frac{e}{T} \quad (1)$$

式中: $a$  为绝对湿度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $e$  为实际水汽压,  $\text{hPa}$ ;  $A$  为常数,取值  $217$ ;  $T$  为热力学温度,  $\text{K}$ 。

实际水汽压  $e$  利用相对湿度推算,公式为

$$\text{RH} \approx \frac{e}{E_s} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\text{RH}$  为相对湿度,%;  $e$  和  $E$  为分别为湿空气的实际水汽压和饱和水汽压,  $\text{hPa}$ 。

饱和水汽压  $E_s$  利用马格努斯(Magnus)半经验公式计算,公式为

$$E_s = E_0 \cdot 10^{\frac{a_1}{b_1 + t}} \quad (3)$$

式中, $E_s$  为温度  $t$  时的饱和水汽压,  $\text{hPa}$ ;  $E_0$  为温度  $0^{\circ}\text{C}$  时的饱和水汽压,通常取值为  $6.11 \text{ hPa}$ ;  $a_1$  和  $b_1$  为常数,水面条件下取值分别为  $7.4$  和  $237.3$ <sup>[19]</sup>;  $t$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 环境监测结果及分析

敦煌莫高窟局地的降雨主要集中在高温季节。小雨发生时,大气环境中的水汽大部分在短时间内蒸发散失,仅有少部分湿空气扩散进入洞窟。因此,本项研究重点关注中雨、大雨和暴雨天气洞窟湿度变化。通过对莫高窟大气降水和典型洞窟环境监测资料的分析整理,筛选典型降雨天气环境监测数据,分析洞窟相对湿度是否会超过壁画地杖层中的易溶盐潮解临界值,并确定最佳环境控制节点。

### 2.1 典型降雨事件

根据 1989—2018 年大气环境监测结果,莫高窟窟区分别于 2015 年 6 月 18 日,2011 年 6 月 15 日和 2016 年 8 月 17 日发生过一场中雨、大雨和暴雨事件。3 次典型降雨过程的降雨量依次为  $10.4 \text{ mm}$ 、 $40.1 \text{ mm}$  和  $32 \text{ mm}$ ,降雨历时依次为  $550 \text{ min}$ 、 $1545 \text{ min}$  和  $590 \text{ min}$ 。其中,大雨结束后相继发生 2 场降雨量分别为  $4.8 \text{ mm}$  和  $1.0 \text{ mm}$ ,降雨历时分别为  $240 \text{ min}$  和  $60 \text{ min}$  的小雨和微雨。暴雨发生前,出现过一场降雨量为  $0.3 \text{ mm}$ ,降雨历时为  $40 \text{ min}$  的小雨,暴雨发生后,又相继发生了 2 场降雨量分别为  $8.6 \text{ mm}$  和  $3.5 \text{ mm}$ ,降雨历时分别为  $80 \text{ min}$  和  $620 \text{ min}$  的中雨和小雨。

### 2.2 不同等级降雨天气洞窟湿度变化

降雨使大气中的水汽浓度增加,受洞窟门窗对水汽扩散的阻隔影响,洞窟内绝对湿度增加起始时间明显滞后于大气环境,绝对湿度增加幅度也显著小于大气环境。中雨,大雨和暴雨天气,大气绝对湿度( $a_{\text{air}}$ )自降雨前 2 天左右开始增加,最大值分别为  $10.99 \text{ g}/\text{m}^3$ 、 $15.34 \text{ g}/\text{m}^3$  和  $18.67 \text{ g}/\text{m}^3$ ,超过洞窟绝对湿度( $a_{\text{cave}}$ )的持续时间分别约  $61 \text{ h}$ 、 $164 \text{ h}$  和  $186 \text{ h}$ 。随着大气环境中的湿空气不断扩散进入洞窟,洞窟绝对湿度逐渐升高。中雨天气,C71、C332 和 C16 绝对湿度最大值分别为  $11.03 \text{ g}/\text{m}^3$ 、 $7.54 \text{ g}/\text{m}^3$  和  $9.31 \text{ g}/\text{m}^3$ (图 3)。大雨天气,C71、C332 和 C16 绝对湿度最大值分别为  $13.36 \text{ g}/\text{m}^3$ 、 $8.59 \text{ g}/\text{m}^3$  和  $10.20 \text{ g}/\text{m}^3$ (图 4)。暴雨天气,C71、C332 和 C16 绝对湿度的最大值分别为  $15.31 \text{ g}/\text{m}^3$ 、 $13.14 \text{ g}/\text{m}^3$  和  $15.21 \text{ g}/\text{m}^3$ (图 5)。

洞窟相对湿度随着水汽交换呈现明显的波动。中雨天气,C71、C332 和 C16 相对湿度最大值分别为  $65.59\%$ 、 $55.02\%$  和  $65.07\%$ 。其中,C332 相对湿度并未超过  $62\%$ ,C71 和 C16 相对湿度超

过62%的持续时间分别约为6.5 h和26 h(图6). 大雨天气, C71、C332和C16相对湿度的最大值分别为73.54%, 64.61%和69.47%. 高湿度期间, C71、C332和C16相对湿度均超过62%, 持续时间

依次约为90 h, 80 h和120.5 h(图7). 暴雨天气, C71、C332和C16相对湿度的最大值分别为71.81%, 71.51%和81.23%, 三者超过62%的持续时间依次约为264 h、245.6 h和271.7 h(图8).

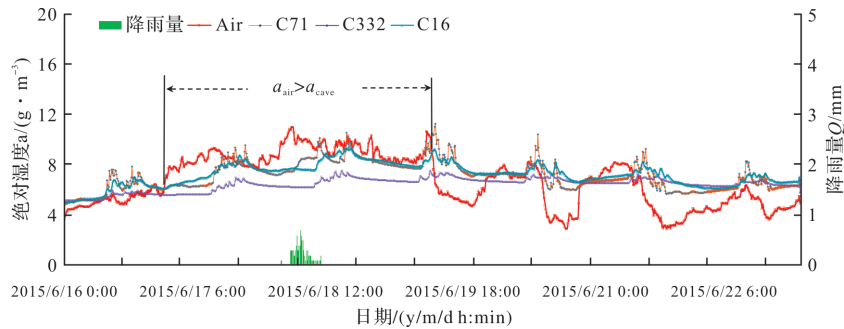


图3 中雨天气绝对湿度变化

Fig. 3 Change of absolute humidity during moderate rainfall

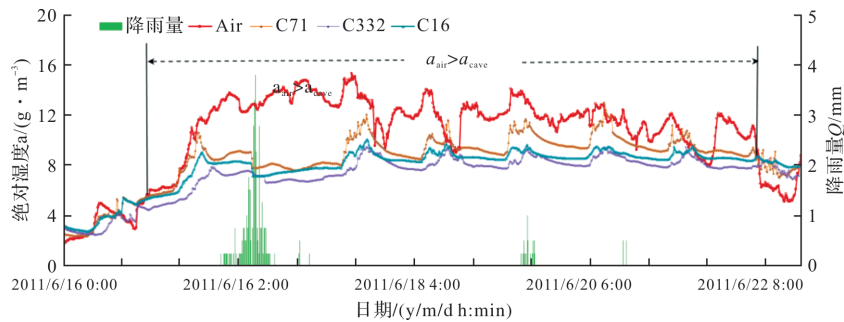


图4 大雨天气绝对湿度变化

Fig. 4 Change of absolute humidity during heavy rainfall

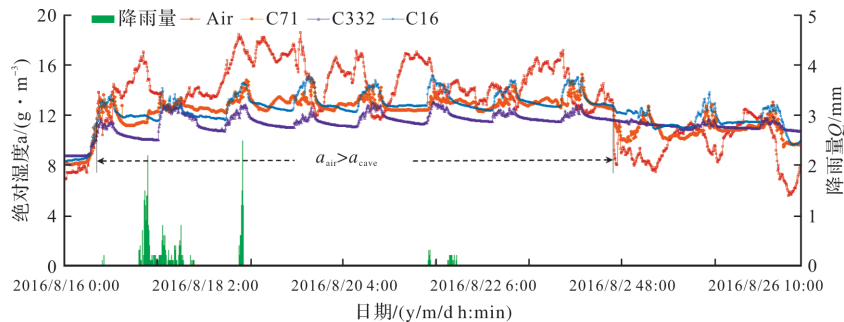


图5 暴雨天气绝对湿度变化

Fig. 5 Change of absolute humidity during rainstorm

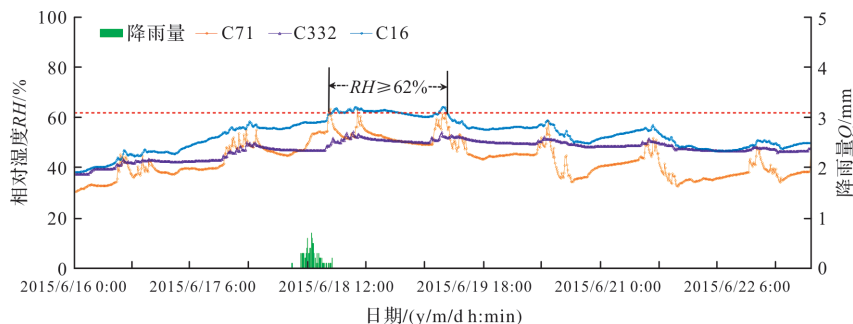


图6 中雨天气相对湿度变化

Fig. 6 Change of relative humidity during moderate rainfall

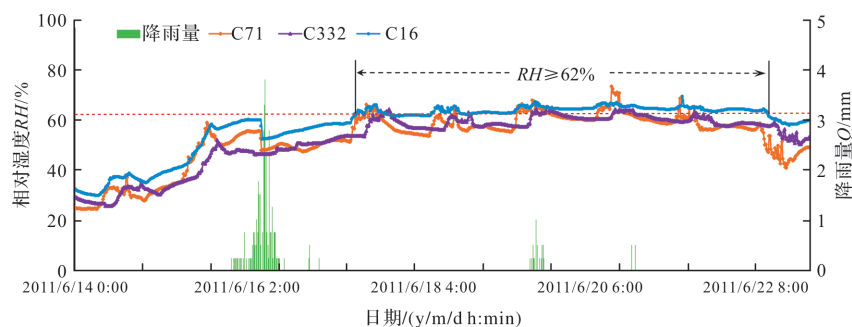


图7 大雨天气相对湿度变化

Fig. 7 Change of relative humidity during heavy rainfall

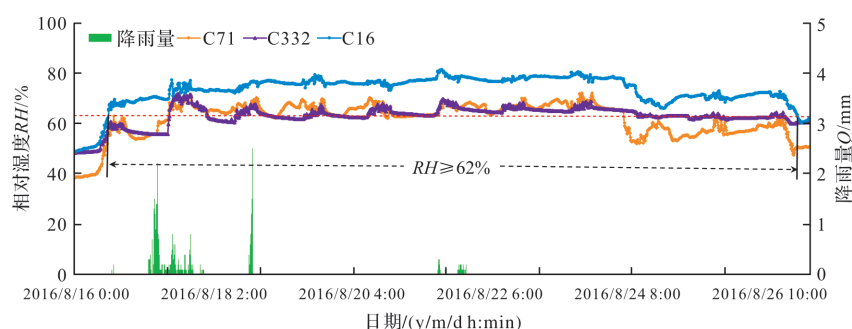


图8 暴雨天气相对湿度变化

Fig. 8 Change of relative humidity during rainstorm

不同等级降雨条件下, 洞窟绝对湿度和相对湿度的变化趋势基本一致, 总体呈现上升-保持-下降三个阶段. 中雨发生前1天左右时, 洞窟湿度开始增加, 降雨结束后2天左右时, 湿度逐渐降低, 并随着昼夜交替出现周期性变化. 大雨天气, 洞窟湿度增加的起始时间与中雨基本相同, 但由于存在2场后期降雨, 高湿度持续时间增加, 直至最后一场后期降雨结束后3天左右时, 湿度逐渐降低. 暴雨历时短, 强度大, 降雨过程伴随1场前期降雨和2场后期降雨. 在前期降雨和暴雨的叠加效应下, 洞窟湿度迅速增加至高湿度状态, 最后一场后期降雨结束后5天左右时, 湿度才开始缓慢降低.

洞窟湿度及高湿度持续时间随降雨等级和降雨次数的增加而增加. 降雨等级越大, 大气中的水汽含量越高, 在高水汽浓度梯度作用下, 扩散进入洞窟内的水汽越多, 洞窟湿度增加的幅度越大. 前期降雨使洞窟湿度在短期内迅速升高, 后期降雨使洞窟湿度下降缓慢. 可见, 降雨过程中, 降雨次数越多, 洞窟高湿度状态的持续时间越长.

### 2.3 不同类型洞窟湿度变化

相同降雨条件下, 洞窟湿度变化与洞窟开放程度和体积息息相关. 根据洞窟湿度监测结果, 不同等级降雨条件下, 洞窟绝对湿度变化特征为  $C71 > C16 > C332$ , 相对湿度大小和超过盐分潮解

临界值(62%)的持续时间变化特征为  $C16 > C71 > C332$ .

洞窟与外界大气环境的连通性越好, 扩散进入洞窟的水汽总量越多. C16与C332和C71相比, 门窗的透气性比较好, 水汽输送量最大. 但是, 由于C16体积远远大于C71, 导致单位体积空气中的水汽含量变小, C16绝对湿度略小于C71. C71与C332门的大小和形制相同, 水汽扩散通量基本相同. C71体积小于C332, 单位体积空气中的水汽含量大, 因此, C71绝对湿度大于C332. 由此推断, 洞窟体积相同时, 绝对湿度大小表现为开放洞窟>半封闭洞窟>封闭洞窟; 洞窟开放程度相同时, 绝对湿度大小表现为小型洞窟>中型洞窟>大型洞窟.

洞窟相对湿度受温度和绝对湿度共同影响. 温度相同时, 相对湿度大小与绝对湿度成正比, 水汽含量相同时, 相对湿度大小与温度成反比. 莫高窟温度监测结果表明, 降雨发生前2天, 洞窟日平均温度表现为  $C16 < C71$ ,  $C332 < C71$ . 降雨期间, 大气温度明显降低, 但是, 不同类型洞窟内温度与降雨前2天相比, 差值小于 $2^{\circ}\text{C}$ . C16与C71相比, C16体积比较大, 洞室延伸至围岩深部, 温度远低于C71. 虽然C16绝对湿度略微小于C71, 但在温度的反向主导作用下, 相对湿度表现为  $C16 > C71$ . 同理, C71与C332相比, C71温度



和绝对湿度均大于 C332, 在绝对湿度的正向主导作用下, 相对湿度表现为  $C71 > C332$ 。可见, 降雨天气, 洞窟相对湿度增加主要是由绝对湿度增加引起的。不同开放程度和不同体积洞窟相对湿度变化特征与绝对湿度相同。

### 3 降雨天气壁画劣化风险防范措施及建议

壁画是莫高窟的主要文物, 降雨导致洞窟湿度在短期内大幅增加并不断波动, 极易引起盐类病害的发生和发展<sup>[20]</sup>。降雨天气, 为了防止洞窟湿度变化激活壁画盐类病害, 制定风险防范措施至关重要。

降雨监测是为判别壁画劣化风险提供科学依据。莫高窟所在区域强降雨过程一般包括多场降雨, 前期降雨和后期降雨的存在, 增加了洞窟高湿度持续时间。因此, 降雨监测方案中应重点关注降雨等级高的连阴雨天气。

洞窟环境控制是降低壁画劣化风险的重要手段。已有研究发现, 20℃条件下, 当相对湿度为 67% 时, 莫高窟壁画地仗层中的盐分发生潮解。夏天, 洞窟内部空气温度低于墙壁表面温度, 考虑到温度对相对湿度的影响, 判定壁画盐害发生的临界相对湿度为 62%<sup>[21]</sup>。降雨天气, 洞窟湿度增加主要是由水汽扩散导致的。洞窟内外水汽浓度梯度是气体交换的主要动力<sup>[22]</sup>。当  $a_{\text{air}} > a_{\text{cave}}$  时, 大气中的湿空气向窟内扩散, 洞窟绝对湿度逐渐增大。反之, 当  $a_{\text{air}} < a_{\text{cave}}$  时, 窟内湿空气流向窟外, 洞窟绝对湿度逐渐降低。降雨前后洞窟温度基本保持不变, 洞窟相对湿度增加主要是由绝对湿度增加引起的。为了预防相对湿度超过盐分潮解临界值, 建议当  $a_{\text{air}} = a_{\text{cave}}$  时实施洞窟环境调控, 控制条件为  $RH < 62\%$ 。

壁画劣化风险防范应特别关注易损洞窟。降雨条件相同时, 洞窟体积越小, 与外界连通程度越大且相对湿度增加的幅度和超过易溶盐潮解的持续时间越长, 壁画劣化的风险也越大。莫高窟洞窟数量众多, 单体大小、形制和开放程度各异, 在无法对所有洞窟实施环境调控措施的情况下, 可选择具有上述特征的易损洞窟作为典型监测对象, 以便了解环境调控效果并及时调整环境调控方案。

### 4 结论

(1) 不同等级降雨条件下, 洞窟湿度变化趋势均呈现上升-保持-下降三个阶段。前期降雨使洞窟

湿度快速增加, 后期降雨使湿度缓慢降低, 高湿度持续时间随着降雨量和降雨次数的增加而增加;

(2) 降雨天气, 洞窟湿度增加主要是由水汽扩散导致的。不同开放程度和不同体积洞窟相对湿度变化特征与绝对湿度相同。开放程度相同时, 绝对湿度大小表现为小型洞窟 > 中型洞窟 > 大型洞窟。体积相同时, 湿度大小表现为开放洞窟 > 半封闭洞窟 > 封闭洞窟;

(3) 洞窟湿度大幅增加和不断波动容易激活壁画盐类病害。壁画劣化风险防范可以从降雨监测和洞窟环境控制两面入手。其中, 降雨等级高的连阴雨天气和易损洞窟应作为重点关注对象。建议洞窟环境调控起始时间为  $a_{\text{air}} = a_{\text{cave}}$ , 控制条件为  $RH < 62\%$ 。

### 参考文献 References

- [1] AKANE Mikayama, SHUICHI Hokoi, DAISUKE Ogura, et al. Effects of drifting sand particles on deterioration of mural paintings on the east wall of cave 285 in Mogao caves, Dunhuang[J]. Energy Procedia, 2015, 78: 1311-1316.
- [2] SU Bomin, ZHANG Huabing, ZHANG Binjian, et al. A scientific investigation of five polymeric materials used in the conservation of murals in Dunhuang Mogao Grottoes[J]. Journal of Cultural Heritage, 2018, 31: 105-111.
- [3] LI Hongshou, WANG Wanfu, ZHAN Hongtao, et al. The effects of atmospheric moisture on the mural paintings of the Mogao Grottoes[J]. Studies in Conservation, 2017, 62(4): 229-239.
- [4] 张明泉, 张虎元, 曾正中, 等. 敦煌莫高窟保护中的主要环境问题分析[J]. 干旱区资源与环境, 1997(1): 35-39.  
ZHANG Mingquan, ZHANG Huyuan, ZENG Zhengzhong, et al. Analyses of the main environment problems in preservation of Mogao Grottoes, Dunhuang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1997(1): 35-39.
- [5] LIU H, WANG X, GUO Q. Field testing study on the rainfall thresholds and prone areas of sandstone slope erosion at Mogao Grottoes, Dunhuang[J]. Environ Monit Assess 2019, 191: 755.
- [6] LI H, WANG W, ZHAN H, et al. Water in the Mogao Grottoes, China: Where it comes from and how it is driven. [J]. Arid Land, 2015, 7: 37-45.
- [7] LIU H, WANG X, GUO Q, et al. Experimental investigation on the correlation between rainfall infiltration and the deterioration of wall paintings at Mogao

- Grottoes[J]. China. Bull Eng Geol Environ 2020, 79: 1199-1207.
- [8] 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.
- [9] 樊锦诗, 彭金章, 王旭东. 敦煌莫高窟北区洞窟及崖面崩塌原因探讨[J]. 敦煌研究, 2004(3): 74-82.  
FAN Jinshi, PENG Jinzhang, WANG Xudong. Discussion on the reason of collapse of caves and cliff in the north region of Mogao Grottoes, Dunhuang[J]. Dunhuang Research, 2004(3): 74-82.
- [10] 姜啸, 张虎元, 严耿升, 等. 湿度对盐溶液在壁画地仗中的毛细迁移影响研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 459-465.  
JIANG Xiao, ZHANG Huyuan, YAN Gengsheng, et al. Research on effects of humidity on capillary migration of salt solutions in mural plaster[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 459-465.
- [11] ZHANG H Y, YAN G S, WANG X D. Laboratory test on moisture adsorption-desorption of wall paintings at Mogao Grottoes, China[J]. J. Zhejiang Univ. Sci. A 2012, 13: 208-218.
- [12] 靳治良, 陈港泉, 钱玲, 等. 基于莫高窟成盐元素关系探究壁画盐害作用机理[J]. 化学研究与应用, 2009, 21(4): 450-454.  
JIN Zhiliang, CHEN Gangquan, QIAN Ling, et al. Study on the mechanism of salt damages on the mural paintings of Mogao Grottoes[J]. Chemical Research and Application, 2009, 21(4): 450-454.
- [13] 胡红岩, 陈港泉, 钱玲, 等. NaCl 盐的结晶形态及在莫高窟壁画疱疹病害中的作用[J]. 自然杂志, 2016, 38(1): 39-44.  
HU Hongyan, CHEN Gangquan, QIAN Ling, et al. NaCl crystal and its roles on the blister damage at the wall-painting of Mogao Grottoes[J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(1): 39-44.
- [14] 靳治良, 刘端端, 张永科, 等. 盐分在文物本体中的迁移及毁损机理[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(5): 102-116.  
JIN Zhiliang, LIU Duanduan, ZHANG Yongke, et al. Salt migrations and damage mechanism in cultural heritage objects[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(5): 102-116.
- [15] ZHANG H Y, YAN G S, WANG X D. Laboratory test on moisture adsorption-desorption of wall paintings at Mogao Grottoes, China[J]. J. Zhejiang Univ. Sci. A 2012, 13: 208-218.
- [16] 刘洪丽, 王旭东, 张明泉, 等. 敦煌莫高窟降雨分布及入渗特征研究[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(2): 32-37.  
LIU Hongli, WANG Xudong, ZHANG Mingquan, et al. Research on the characteristics of rainfall distribution and infiltration in Dunhuang Mogao Grottoes[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2016, 28(2): 32-37.
- [17] 王名才. 大气科学常用公式[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 2-382.  
WANG Mingcai. Common formulas in atmospheric science [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 2-382.
- [18] 谢付莹, 王喜全, 王自发. 海河流域平原地区绝对湿度变化趋势和跃升现象[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 23-30.  
XIE Fuying, WANG Xiquan, WANG Zifa. Variation trend and zooming increase of absolute humidity in the flatland of the Haihe river basin[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(1): 23-30.
- [19] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 129-130.  
China Meteorological Administration. Norms for surface meteorological observation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 129-130.
- [20] 刘洪丽, 王旭东, 张明泉, 等. 莫高窟壁画劣化与降雨入渗关系的试验研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 661-666.  
LIU Hongli, WANG Xudong, ZHANG Mingquan, et al. Correlations between precipitation and propagation of mural degeneration in Mogao Grottoes, Dunhuang[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2019, 55(5): 661-666.
- [21] MARTHA Demas, NEVILLE Agnew, FAN Jinshi. Strategies for sustainable tourism at the Mogao Grottoes of Dunhuang, China[J]. Springer Briefsin Archaeology, 2015: 61-65.
- [22] 黄昆. 固体物理学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1966: 82.  
HUANG Kun. Solid state physics[M]. Beijing: People's Education Press, 1966: 82.

(编辑 吴海西 沈 波)