

基于红外热成像技术的石窟壁面凝结水形成规律研究

马 策, 蒋小伟, 闫宏彬, 周鹏宇, 任建光, 樊 尧, 范 潇, 万 力

A study of the formation pattern of condensation water in grottoes based on the infrared thermal imaging technology

MA Ce, JIANG Xiaowei, YAN Hongbin, ZHOU Pengyu, REN Jianguang, FAN Yao, FAN Xiao, and WAN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于扫描电镜图像和微观渗流模型的云冈石窟砂岩风化特征分析

Investigating weathering features of sandstones in the Yungang Grottoes based on SEM images and micro-scale flow model

汪军, 徐金明, 龚明权, 王亚磊 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 122-130

频域反射分析法测定土壤含水率标定试验研究

An experimental study of calibration of soil moisture content by using the frequency domain reflectometry

董翰川, 庞丽丽, 史云 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 55-55

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47

基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126-136

基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 李凌婧, 任开, 刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135-146

基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究

An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique

何攀, 许强, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达, 赵宽耀 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 142-149



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011006

马策, 蒋小伟, 闫宏彬, 等. 基于红外热成像技术的石窟壁面凝结水形成规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 30-36.
MA Ce, JIANG Xiaowei, YAN Hongbin, *et al.* A study of the formation pattern of condensation water in grottoes based on the infrared thermal imaging technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 30-36.

基于红外热成像技术的石窟壁面凝结水形成规律研究

马 策¹, 蒋小伟¹, 闫宏彬², 周鹏宇¹, 任建光², 樊 尧², 范 潇², 万 力¹

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 云冈研究院, 山西大同 037034)

摘要: 凝结水会加剧石质文物的风化, 以往确定凝结水量的实验设备布置复杂、监测范围有限, 并且无法实时反映凝结状态, 从而制约了对凝结水形成过程的认识以及对石质文物凝结水的有效防治。文章利用红外热成像技术开展凝结水形成规律研究, 实现了对石窟壁面凝结水的大范围无损连续观测, 并利用微波水分测试技术进行验证。针对一次降雨事件, 对云冈石窟第 19 窟壁面进行了连续 100 h 的红外热成像监测, 揭示了降雨前和降雨期间的壁面温度昼夜变化规律, 通过对比空气露点温度识别出 2 个具备凝结水形成条件的时期: 降温前凝结期, 从降雨前 16 h 开始到降雨期间气温发生骤降为止; 降温后凝结期, 从气温骤降开始到降雨结束后 12 h。同时, 利用微波水分仪进行了连续 56 h 的浅表层岩石含水率动态监测, 发现尽管壁面上无法用肉眼直接观察到凝结水, 但岩石内部含水率增大, 表明岩石内部已经优先凝结。降雨过程中气温在 1 h 内从 18.5℃ 骤降到 15.6℃ 引起大气中的水汽凝结, 导致露点温度下降, 使得壁面不再具备凝结水形成条件。该研究对石质文物的凝结水防治具有重要的指导意义。

关键词: 凝结水; 红外热成像; 微波水分仪; 岩石含水率; 云冈石窟

中图分类号: P462.3⁺2; P641.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0030-07

A study of the formation pattern of condensation water in grottoes based on the infrared thermal imaging technology

MA Ce¹, JIANG Xiaowei¹, YAN Hongbin², ZHOU Pengyu¹, REN Jianguang²,
FAN Yao², FAN Xiao², WAN Li¹

(1. School of Water Resource and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Yungang Research Institute, Datong, Shanxi 037034, China)

Abstract: Condensation water can accelerate weathering of stone relics. Previous methods for detecting condensation water in grottoes have some shortcomings, such as the complex equipment layout and limited monitoring range, and are unable to reflect the real-time condensation state, which restrict the effective prevention and control of condensation water in grottoes. In this paper, the infrared thermal imaging technology, which can be used to obtain continuous and large-scale observation of temperature on the wall of grottoes, and the microwave moisture measurement technology, which can be used to obtain rock moisture inside the wall, are both used to

收稿日期: 2021-11-03; 修订日期: 2021-12-01

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1520500); 山西省文物局文物保护科技项目(208141400237)

第一作者: 马策(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事包气带水汽运移方面研究工作。E-mail: mc@cugb.edu.cn

通讯作者: 蒋小伟(1982-), 男, 教授, 主要从事水文地质学的教学与科研工作。E-mail: jxw@cugb.edu.cn

study the formation mechanism of condensation water. During the occurrence of a rainfall event, a wall in cave 19 of the Yungang Grottoes was monitored by the infrared thermal imaging for 100 hours. This set of data reveals the diurnal variation pattern of temperature before and during the rainfall event, and two periods beneficial for the formation of condensation water were identified by comparing with the air dew point temperature. The two periods are the condensation period before cooling which starts from 16 hours before rainfall to a sudden drop of temperature during rainfall and the condensation period after cooling which starts from the sudden drop of temperature to 12 hours after the end of rainfall. At the same time, the dynamic monitoring of the shallow rock moisture content for 56 hours was carried out with a microwave moisture meter. Although condensation water cannot be directly observed on the wall, the microwave moisture meter shows that water content in the rock increases, indicating that water has been preferentially condensed inside the rock. It is also found that the sudden drop of air temperature (from 18.5 °C to 15.6 °C in 1 hour) during the process of rainfall causes the condensation of water vapor in atmosphere, which causes a significant decline in the dew point temperature, and the condition of condensation water formation is not fulfilled. This phenomenon is of important guiding significance for the prevention and control of condensation water.

Keywords: condensation water; infrared imaging; micro-wave moisture meter; rock moisture; Yungang Grottoes

岩石风化是自然界的普遍现象^[1-4]。含水岩石在干湿交替、冻融循环、酸性气体溶蚀、生物生长等物理、化学和生物作用下发生风化破坏^[5-10], 进而增大孔隙度和渗透系数^[11-13]。凝结水是加速石质文物风化的一种常见水分来源^[14-16], 不仅存在于石质文物壁面, 还存在于石质文物浅表层的孔隙中^[17-19]。由于岩石内部凝结水具有不易直接观测的特点, 限制了研究人员对凝结水形成规律的认识。曹文炳等^[20]研发了测量凝结水量的实验装置, 通过隔离石窟部分壁面并抽取壁面上的水分, 从而确定观测时段内凝结水总量。该装置被认为是目前定量确定凝结水量最准确的方式^[21], 在多个石窟得到了应用^[20, 22]。然而, 该装置布置复杂, 不方便获得凝结水量随时间的变化, 较难用于分析石窟壁面凝结水的形成规律。

红外热成像作为一种适合于大面积观察的无损检测方法, 已经被一些研究者应用于定性分析石质文物水分分布及来源^[23-25]。Lerma 等^[26]利用红外热成像技术探测了比利时 Arenberg 城堡前门的水分分布, 方云等^[27]利用红外热成像技术探测了龙门石窟奉先寺崖壁渗水情况, 吴育华等^[28]利用红外热成像技术观测广西花山岩画渗水情况, 苏美亮等^[29]使用红外热成像技术观测了冬季和春季凝结水在大足石刻千手观音像的分布规律。由于凝结水的形成与降雨事件前后的大气湿度变化密切相关, 开展降雨事件前后的温度连续监测是揭示凝结水形成规律的关键。

本文以云冈石窟 19 窟为例, 针对 2020 年 8 月

1 次典型降雨事件, 采用红外热成像技术开展了降雨前后连续 100 h 的壁面温度动态监测, 由于红外热成像不能直接拍摄到壁面上的凝结水, 无法了解凝结水在壁面形成后向岩壁内部渗透的情况, 本研究同时利用微波水分仪进行了降雨前后连续 56 h 的浅表层岩石含水率动态监测。通过对比壁温与露点温度的差异以及分析浅表层岩石含水率变化规律, 识别了石窟壁面凝结水的形成规律。

1 研究区位置与研究方法

1.1 研究区位置

云冈石窟是我国规模最大的古代石窟群之一, 2001 年被联合国教科文组织列为世界遗产。云冈石窟位于山西省大同市, 地处大陆性半干旱气候区, 降雨集中于夏季 7—9 月, 因此夏季也是云冈石窟水害多发时节。云冈石窟第 19 窟为著名的“昙曜五窟”之一, 其西北角低处可见小范围的苔藓, 见图 1(a)。该窟不存在积水, 且地下水水位低于地面 10 多米, 可以排除毛细上升作用对苔藓生长需水分的贡献, 初步判断苔藓生长所需水分来源为凝结水。因此, 本文选择第 19 窟北壁西侧开展红外热成像监测和浅表层岩石含水率监测。

1.2 监测方案

2020 年 8 月 23 日 7—24 时, 云冈石窟发生了累计降雨量为 16.36 mm 的降雨事件。根据天气预报, 2020 年 8 月 20 日 15 时—24 日 18 时利用红外热成像仪开

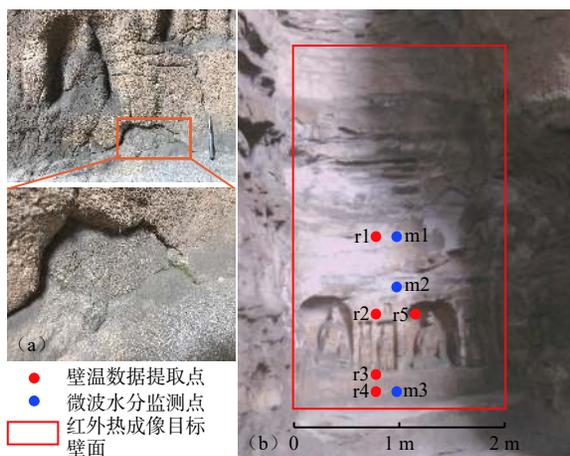


图 1 (a) 19 窟西北角底部的苔藓分布和 (b) 19 窟北壁西侧监测点布置

Fig. 1 Distribution of moss in the bottom of the northwest corner in cave 19 (a) and monitoring points on the west side of the north wall in cave 19 (b)

展了总时长为 100 h 的壁温监测; 2020 年 8 月 22 日 10 时—24 日 18 时利用微波水分仪开展了总时长为 56 h 的岩石含水率监测。日间(7—20 时)观测频率为每小时 1 次, 夜间(22 时至次日 6 时)观测频率为每 2 小时 1 次。

本文研究使用 FLIR T1050SC 高清高性能手持式红外热成像仪, 分辨率为 1 024×768。本次监测的目标壁面范围宽约 2 m、高约 4 m, 见图 1(b)。微波水分仪利用电介质法测量岩石含水率。本文研究采用德国生产的 HF SENSOR MOIST 350B, 具有多个可用于监测距离壁面不同深度含水率的探头。本次监测使用探头的探测深度分别约为 3, 7, 11 cm。为了对比不同位置处的含水率差异, 本文选取自上而下 m1、m2 和 m3 三个监测位置, 距离地面高度分别为 200, 120, 20 cm, 见图 1(b)。

1.3 露点温度计算

空气温度、湿度是控制凝结水形成的重要气象条件。大气温度、相对湿度以及降雨量数据来自云冈石窟的气象站。19 窟未开展空气温度、湿度监测, 由于 16 窟与 19 窟结构相似, 因此用第 16 窟的空气温度、湿度监测数据确定洞窟内空气的露点温度。

露点温度由水汽压决定。水汽压和露点温度的计算公式^[30]为:

$$u_v = u_{v,sat} \cdot RH = 0.611 \exp\left(17.27 \frac{T - 273.2}{T - 36}\right) \cdot RH \quad (1)$$

$$T_d = \frac{36 \ln u_v - 4.700}{\ln u_v - 16.78} \quad (2)$$

式中: $u_{v,sat}$ ——空气温度 T 对应的饱和水汽压/kPa;

u_v ——空气温度 T 对应的实际水汽压/kPa;

RH ——相对湿度;

T_d ——露点温度/K。

2 结果和讨论

2.1 基于热红外成像的壁面温度空间分布规律

本次研究利用热红外成像技术共获得了 80 幅壁面温度分布图, 图 2 给出了降雨前后 8 个典型时刻的壁温分布图像。可以看出, 不管是降雨前还是降雨后, 壁面低处的温度普遍低于壁面高处, 佛龕凹陷处的温度也明显偏低, 这是由于夏季山体内部温度较低, 低处、凹陷处受山体内部温度的控制更显著。r1 至 r4 四个位置距地面高度分别为 200, 100, 40, 20 cm, 从低处到高处, 温度逐渐增大, 位于壁面最高处的 r1 温度最高, 见图 3(a)。r5 位于佛龕凹陷处, 尽管高度与 r2 一致, 但温度与低处的 r3 接近。

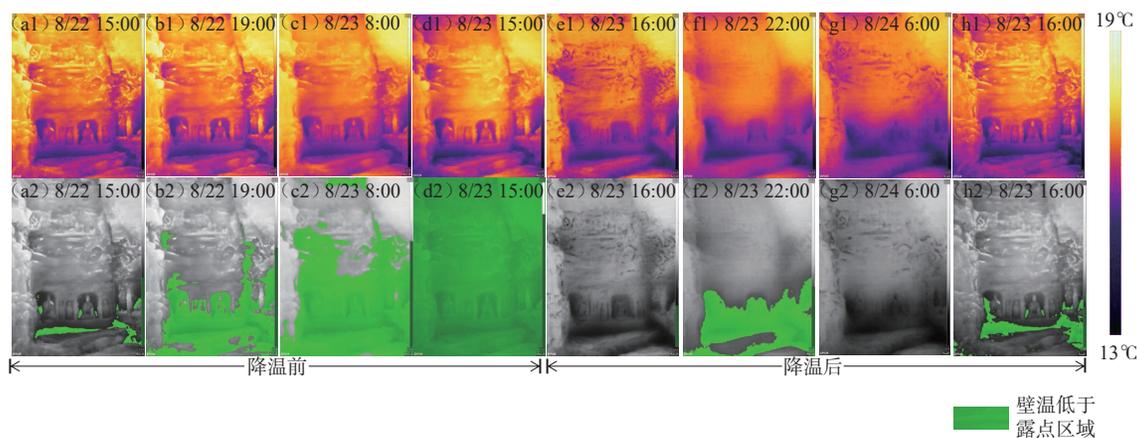


图 2 (a1-h1) 8 个典型时刻温度分布和 (a2-h2) 对应时刻的具备凝结水形成条件的分布范围

Fig. 2 Distributions of temperature (a1-h1) and zone with possible condensation water (a2-h2) at eight typical times

在降雨前,4个位置处的温度昼夜变化规律也基本一致,但是8月23日的降雨事件明显改变了正常的昼夜变化规律。降雨前,气温和壁温的昼夜尺度动态均可以用余弦函数拟合,见图3(b)。壁温的动态明显滞后于气温,气温16时最高,6时最低,壁面温度每天17-18时最高,7-8时最低,壁温的波动幅度也明显小于气温的波动幅度,气温最高约为21℃,但r4处白天最高温仅约为16℃。8月22日22时起,尽管降雨尚未发生,但气温已经偏离降雨前日波动,保持在偏高的温度,导致壁面温度偏高。8月23日15时,受气温显著下降控制,壁温也发生同步下降。降雨结束6h后,即8月24日6时,气温和壁温均恢复降雨前的日动态规律。

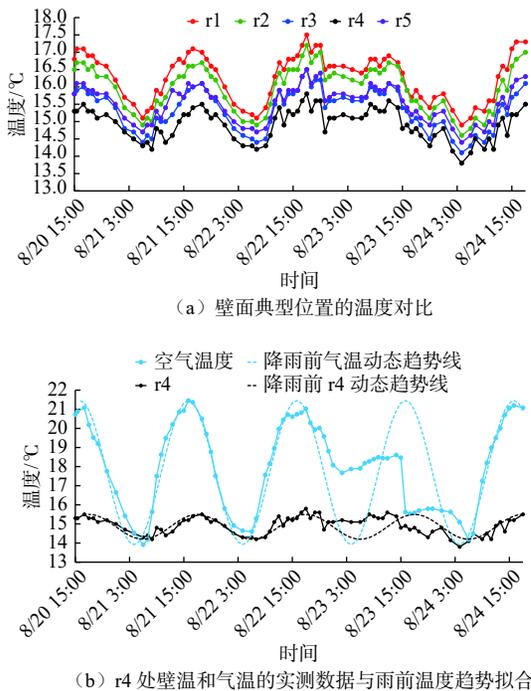


图3 (a) 壁面典型位置的温度对比和 r4 处壁温和 (b) 气温的实测数据与雨前温度趋势拟合

Fig. 3 Comparison of temperature at typical wall positions (a) and air temperature comparing with temperature pattern before rain at r4 (b)

2.2 凝结水形成与降雨事件的对应关系

通过对比壁温和露点温度,可以识别具备凝结水形成条件的范围,见图2。从8月22日15时—23日15时,24h之内具备凝结水形成条件的范围逐渐增大;8月23日16时气温骤降后,24h内仅有部分区域在部分时刻具备凝结水形成条件。可见,8月23日16时的气温骤降是控制凝结水分布范围的重要事件。

2.2.1 降温前凝结期

降温前凝结期8月22日15时(对应降雨前16h)—23日15时,共持续24h。8月22日15时,r4处壁温开始低于露点温度,具备水汽凝结条件,而在此之前,该处壁温普遍高于露点温度。从8月22日15时—23日7时,虽然尚未开始下雨,大气中的水汽浓度已经在不断升高。随着水汽含量增大,露点温度逐渐升高,露点温度先大于低处壁温,后逐渐超过更高处的壁温,凝结范围逐渐向高处扩展,见图2。因此,尽管这个阶段的壁温比前几日偏高,但水汽浓度增大引起露点温度显著升高,从而使得壁面具备凝结水形成条件的范围不断扩大。

8月23日7时降雨开始后,洞窟内水汽浓度的增大速度明显大于降雨发生前,露点温度也以更快速度增加(图4),因此凝结水形成范围快速增大,见图2(c2)。在8月23日15时降雨量达到最大时,水汽浓度也达到最高点,对应露点温度的最高点,此时的露点温度高于整个壁面的温度,因此整个监测壁面都具备凝结水形成条件,见图2。该阶段的空气湿度由降雨直接控制,持续降雨使洞窟内绝对湿度增大,从而使露点温度升高,有利于凝结发生,此阶段具备凝结水形成条件的范围最大,是最主要的凝结阶段。

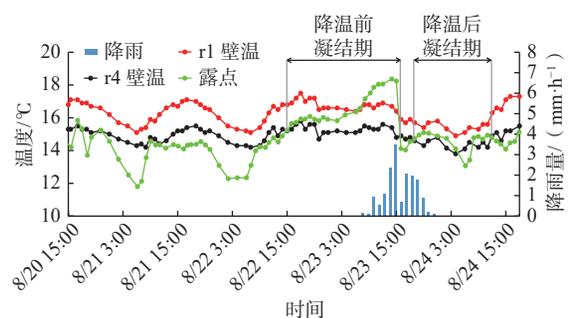


图4 壁温和露点对比以及凝结时期划分图

Fig. 4 Comparison of wall temperature with dew point and condensation period division

因此,降雨前及降雨期间空气湿度增大是凝结水形成的根本控制因素。

2.2.2 降温后凝结期

8月23日16时,气温骤降,水汽在空气中迅速凝结,露点温度随之迅速下降并低于壁面温度,壁面不具备凝结水形成条件,见图2。由于降雨还在继续发生,洞窟中的水汽浓度逐渐回升,露点温度随之上升。在壁温和水汽浓度的共同控制下,又出现2次小规模凝结期,累计凝结时间为14h。

第一次为 8 月 23 日 18 时至次日 4 时,露点温度回升至 20 cm 处的壁温,具备凝结水形成条件,见图 2。随后夜间气温下降,导致露点温度下降,壁面不发生凝结,见图 2。8 月 24 日 8—12 时,随着大气绝对湿度升高,壁面低处小范围内再次具备凝结条件,见图 2。12 时以后,受太阳辐射控制,大气湿度减小,不再具备凝结水形成条件。

2.3 岩石含水率对降雨事件的响应

红外热成像技术可以用于直观分析壁面出现凝结水的范围。然而,本次监测期间,肉眼没有直接观察到壁面存在凝结水。微波水分仪获得的岩壁浅表层含水率数据表明,8 月 22 日 21 时开始,m1、m2 和 m3 处的表层普遍出现含水率升高现象(图 5),基本支持了红外热成像方法揭示的凝结水形成规律。但是,微波水分的抬升时间明显比壁面开始具备凝结水形成条件的时间偏晚,成因还有待分析。

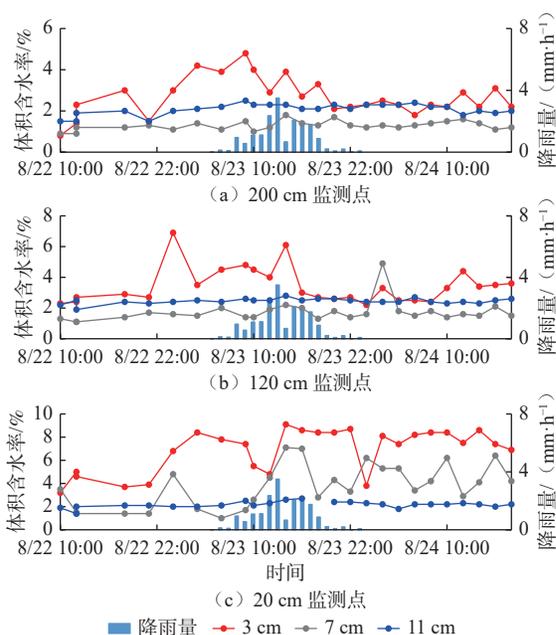


图 5 利用微波水分仪获得的壁面浅表层含水率随时间变化规律
Fig. 5 Temporal variations of water content inside the wall face obtained with a microwave moisture meter

距地面不同高度的监测表明,20 cm 处监测点对降雨事件的响应显著大于高处,这也符合基于热红外成像获得的低处更容易具备凝结水形成条件的认识。不同深度的含水率响应存在明显差异,岩壁浅部(3 cm)对凝结的响应明显,而深部(11 cm)含水率较为稳定,可能指示凝结水形成于壁面浅表层并向内部渗透的现象。这种特征与山体渗水、毛细上升等来源的水分传递过程完全不同。

3 结论

本研究利用红外热成像技术和微波水分测量技术,结合露点温度计算,成功识别了一次完整的降雨事件过程中凝结水的形成和消失过程,得到如下结论:

(1)降雨前和降雨期间的大气绝对湿度增大,洞窟内空气露点温度上升,从而壁面发生凝结。该阶段是凝结水形成最显著阶段,在石质文物凝结水防治过程中应予以重视。

(2)降雨期间天然条件引起的气温骤降使壁面不再具备凝结水形成条件,表明降低空气温度可以阻止壁面凝结水的形成,该现象对石质文物凝结水治理具有重要的启示。

参考文献 (References) :

- [1] TURKINGTON A V, PARADISE T R. Sandstone weathering: A century of research and innovation[J]. *Geomorphology*, 2005, 67(1/2): 229 – 253.
- [2] WELLS T, HANCOCK G, FRYER J. Weathering rates of sandstone in a semi-arid environment (Hunter Valley, Australia) [J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(5): 1047 – 1057.
- [3] PARADISE T R. Petra revisited: An examination of sandstone weathering research in Petra, Jordan [J]. *Special Paper 390: Stone Decay in the Architectural Environment*, 2005, 390: 39 – 49.
- [4] 卢良兆. 岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 2017. [LU Zhaoliang. *Petrology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [5] 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 Shaojun, FANG Yun, SUN Bing, et al. Influence of water permeation and analysis of treatment for the Longmen grottoes [J]. *Geoscience*, 2005, 19(3): 475 – 478. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 董佩, 王旭升, 万力, 等. 云冈石窟覆盖层特征及其对石窟渗水的影响 [J]. *科技导报*, 2013, 31(10): 62 – 66. [DONG Pei, WANG Xusheng, WAN Li, et al. Characteristics of the overlying sediments in Yungang grottoes and its impact on surface water infiltration [J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(10): 62 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘强. 石质文物保护 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [LIU Qiang. *Protection of stone cultural relics* [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [8] WEI J P, ZHU B L. Study on the sandstone weathering

- sensitivity caused by the changes of temperature and humidity[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 243/249: 645 – 649.
- [9] CHEN J, BLUME H P, BEYER L. Weathering of rocks induced by lichen colonization— A review[J]. *Catena*, 2000, 39(2): 121 – 146.
- [10] COOMBES M A, NAYLOR L A, VILES H A, et al. Bioprotection and disturbance: Seaweed, microclimatic stability and conditions for mechanical weathering in the intertidal zone[J]. *Geomorphology*, 2013, 202: 4 – 14.
- [11] 汪军,徐金明,龚明权,等.基于扫描电镜图像和微观渗流模型的云冈石窟砂岩风化特征分析[J].水文地质工程地质, 2021, 48(6): 122 – 130. [WANG Jun, XU Jinming, GONG Mingquan, et al. Investigating weathering features of sandstones in the Yungang Grottoes based on SEM images and micro-scale flow model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 122 – 130. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 翁履谦,杨海峰,王逢睿,等.云冈石窟砂岩微观风化特征研究[J].材料导报:纳米与新材料专辑, 2011, A(2): 425 – 428. [WENG Lvqian, YANG Haifeng, WANG Fengrui, et al. Research on characterization of sandstone weathering of Yungang grottoes[J]. *Materials Reports*, 2011, A(2): 425 – 428. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 黄继忠,郑伊,张悦,等.云冈石窟砂岩水汽扩散特性研究[J].西北大学学报:自然科学版, 2021, 51(3): 370 – 378. [HUANG Jizhong, ZHENG Yi, ZHANG Yue, et al. The water vapor diffusion characteristics of sandstone in Yungang Grottoes[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(3): 370 – 378. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘硕,白雪亮,张彬,等.桂海碑林摩崖石刻水害成因分析及防治对策[J].水文地质工程地质, 2020, 47(2): 126 – 133. [LIU Shuo, BAI Xueliang, ZHANG Bin, et al. Cause analysis and control measures of water damages in Guihai's stone inscription[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 126 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张红梅,马国栋,速宝玉.大同云岗石窟文物渗水病害防治方案探讨[J].水文地质工程地质, 2004, 31(5): 64 – 67. [ZHANG Hongmei, MA Guodong, SU Baoyu. A discussion of the treatment of water-seepage disease of the stone carvings in the Yungang Grotto near Datong[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(5): 64 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 朱华,杨刚亮,方云,等.龙门石窟潜溪寺凝结水病害形成机理及防治对策研究[J].中原文物, 2008(4): 109 – 112. [ZHU Hua, YANG Gangliang, FANG Yun, et al. Research on formation mechanism and prevention countermeasures for condensation water disease on Qianxi Temple of Longmen Grottoes[J]. *Cultural Relics of Central China*, 2008(4): 109 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 万力,曹文炳,王旭升,等.云冈石窟水汽转化特征的初步研究[J].工程勘察, 2012, 40(11): 6 – 11. [WAN Li, CAO Wenbing, WANG Xusheng, et al. Preliminary investigation on water-vapor transfer in Yungang Grottoes[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012, 40(11): 6 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [18] WYRWAL J, MARYNOWICZ A. Vapour condensation and moisture accumulation in porous building wall[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(3): 313 – 318.
- [19] TULLER M, OR D, DUDLEY L M. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configurations in angular pores[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(7): 1949 – 1964.
- [20] 曹文炳,万力,曾亦键,等.云冈石窟洞窟内凝结水形成机制与防治研究[C]//2005年云冈国际学术研讨会论文集(保护卷),2005. [CAO Wenbing, WAN Li, ZENG Yijian, et al. Study on the formation mechanism and prevention of water condensation in Yungang Grottoes[C]//The 2005 Yungang International Symposium Proceedings (Protection Volume), 2005. (in Chinese)]
- [21] 安程.石窟环境监测模拟及整体分析研究[M].北京:科学出版社, 2019. [AN Cheng. Monitoring, simulation and overall analysis of grotto environment[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)]
- [22] 方云,黄璇,王晓东,等.龙门石窟潜溪寺凝结水定量测试研究[J].现代地质, 2011, 25(6): 1214 – 1218. [FANG Yun, HUANG Xuan, WANG Xiaodong, et al. Quantification research on condensation water on Qianxi temple of Longmen Grottoes[J]. *Geoscience*, 2011, 25(6): 1214 – 1218. (in Chinese with English abstract)]
- [23] MARTÍNEZ-GARRIDO M I, FORT R, GÓMEZ-HERAS M, et al. A comprehensive study for moisture control in cultural heritage using non-destructive techniques[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 155: 36 – 52.
- [24] GRINZATO E, BISON P G, MARINETTI S. Monitoring of ancient buildings by the thermal method[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2002, 3(1): 21 – 29.
- [25] 张悦,黄继忠.红外技术在文物科学保护中的应用

- [J]. *自然杂志*, 2021, 43(3): 217 – 224. [ZHANG Yue, HUANG Jizhong. Application of infrared technique for scientific conservation of cultural relics[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2021, 43(3): 217 – 224. (in Chinese with English abstract)]
- [26] LERMA J L, CABRELLES M, PORTALÉS C. Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5): 2190 – 2197.
- [27] 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 Yun, ZHANG Junjian, XIA Guozheng, et al. Application of infrared thermal imaging on seepage probing of Fengxian temple in Longmen grottoes[J]. *Geoscience*, 2013, 27(3): 750 – 754. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 吴育华, 刘善军. 岩画渗水病害的红外热成像检测研究[J]. *工程勘察*, 2010, 38(5): 31 – 35. [WU Yuhua, LIU Shanjun. Infrared imaging detection on water-permeation of rock paintings[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, 38(5): 31 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 苏美亮, 方云, 周伟强, 等. 千手观音凝结水的红外热成像检测技术[J]. *物探与化探*, 2013, 37(2): 295 – 300. [SU Meiliang, FANG Yun, ZHOU Weiqiang, et al. Infrared imaging detection on avalokitesvara condensation water[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(2): 295 – 300. (in Chinese with English abstract)]
- [30] LU N, LIKOS W J. *Unsaturated soil mechanics* [M]. New Jersey: Wiley, 2004.

编辑: 张若琳