

武当山华阳岩和隐仙岩热湿环境特征及其 病害关联性研究

张悦, 王陈高男, 王炎松

(武汉大学 城市设计学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 建筑遗产的保存状况与其赋存环境紧密相关。以武当山华阳岩和隐仙岩为研究对象, 通过现场病害勘察、环境监测以及 CFD 模拟技术, 在明确病害现状的基础上, 揭示了两岩庙的热湿环境特征及其与病害发生之间的关联。结果表明, 剥落病害是两岩庙最主要的病害类型。华阳岩病害程度更高, 分布呈现显著的空间差异。通过对两岩庙环境监测数据分析, 发现两岩庙热湿环境差异集中体现在相对湿度上, 华阳岩日均相对湿度及高湿度天数均显著高于隐仙岩。进一步对华阳岩内部空间进行 CFD 湿度场模拟, 表明华阳岩内部高湿度区域集中在石殿西侧, 与剥落病害严重区域高度吻合。华阳岩不利的湿度环境以及岩穴内部的不均匀的湿度分布共同说明, 武当山岩庙湿度环境与病害发生之间存在关联, 高湿度是导致病害发生的重要因素。进而通过湿度与温度、光照、降雨及风的相关性探讨, 推测低风速与高湿度的形成密切相关。有助于探析赋存环境与建筑遗产保存之间的关联机制, 同时能够为武当山岩庙建筑预防性保护方法提供科学支撑。

关键词: 武当山岩庙; 病害分布; 热湿环境; 关联性; 预防性保护

中图分类号: TU251; TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)06-0808-11

Study on thermal-humidity environment characteristics and disease relevance of Huayang rock and Yinxian rock in Wudang mountains

ZHANG Yue, WANG Chengaonan, WANG Yansong

(School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The preservation status of architectural heritage is closely related to its environment. Taking Huayang Rock and Yinxian Rock in Wudang Mountain as the research objects, this paper, on the basis of clarifying the current status of the diseases, reveals the thermal and humid environment characteristics of the two rock temples and their correlation with the occurrence of diseases through on-site disease investigation. The results indicate that: the spalling disease is the main disease type of two rock temples. The disease degree of Huayang Rock is higher, and the distribution shows significant spatial difference. The difference between the thermal-humidity environment of the two rock temples is mainly reflected in the relative humidity, and the average daily relative humidity and high humidity days of Huayang Rock are significantly higher than those of Yinxian Rock. Further CFD humidity field simulation of the inner space of Huayang Rock shows that the high humidity area in Huayang Rock is concentrated in the west side of the stone hall, which is highly consistent with the area with serious spalling disease. The unfavorable humidity environment of Huayang Rock and the uneven humidity distribution in the cavern indicate that there is a significant correlation between the humidity environment and the occurrence of diseases in Wudang Mountain Rock Temple, and high humidity is an important factor leading to the occurrence of diseases. Through the discussion of the correlation between humidity and temperature, light, rainfall and wind, it is speculated that low wind speed is closely related to the formation of high humidity. This study is helpful to explore the correlation mechanism between the occurrence environment and the preservation of architectural heritage, and can provide scientific support for the preventive protection method of rock temple buildings in Wudang mountain.

Key words: Wudang mountain rock temple; disease distribution; thermal and humid environment; relevance; preventive protection

收稿日期: 2023-08-25

修回日期: 2024-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(52278042)

第一作者: 张悦(1999—), 女, 硕士生, 主要从事建筑遗产保护方面的研究。E-mail: 2017301530017@whu.edu.cn

通信作者: 王炎松(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事建筑遗产保护方面的研究。E-mail: 00011853@whu.edu.cn

武当山古建筑群, 地处中国湖北省丹江口市境内, 现存古建筑 53 处, 建筑遗址 9 处, 是中国保存最完整、规模最大、等级最高的道教古建筑群, 1994 年被列入世界文化遗产名录^[1]。其中, 武当山岩庙是武当山古建筑群重要的组成部分, 多位于悬崖或山腰之间, 由半开放的岩穴空间和其中的砖石殿组成。由于岩庙建筑半暴露于野外环境中, 又位于典型的南方高温高湿气候区, 在长期不适宜的赋存环境的影响下, 建筑遗产本体的形态容易产生渐变, 继而发生病害, 破坏其完整性, 不利于建筑遗产续存。截至 2021 年, 我国的 42 项世界文化遗产(含双遗产)中有 30 余项涉及野外建筑遗产。北方恶劣环境下如敦煌莫高窟、龙门石窟、麦积山石窟佛等已开展了类似的探索, 但在南方高温高湿气候下, 因其赋存环境恶劣、地形复杂险峻、难到达、现代维护设施难覆盖, 且病害作用机制复杂, 目前被迫处于消极保护和濒危的状态。

赋存环境主要由热、湿、风、光、等属性复杂的物理环境因素共同组成^[2], 国内外专家学者的研究指出热湿要素与温差应力^[3]、水化膨胀、干湿交替循环^[4]、盐析^[5]、生物繁殖^[6]等直接相关, 是造成建筑遗产病害的重要原因^[7]; 陈海玲等^[8]对莫高窟第 465 窟的环境监测发现了热压及湿度差驱动温湿度波动这一重要特征; 贺东鹏等^[9]对麦积山石窟的赋存环境研究表明长期的高相对湿度(RH)是导致病害的重要诱因; 孟圆悦、闫增峰等^[10]指出太阳辐射特征导致热湿环境差异并与龙门石窟病害分布高度关联。热湿环境是一个具有空间特征的多物理场、动态发展的时空概念, 为进行人工干预以及预防性保护, 除现场环境监测外, 数值模拟也是行之有效的研究手段^[11], 孟庆龙等^[12]通过 CFD 模拟速度场与温度场并进行实验验证, 明确了模拟结果的可信度; 黄翔等^[13]利用实测数据配合 CFD 模拟实现对房间气流组织的优化; 张春庭等^[14]将 CFD 仿真用于莫高窟微环境控制方式的实验, 同时避免了对文物本体的损害。对于武当山岩庙建筑的相关研究还局限于建筑群空间营造和建筑单体营造技艺上, 对其热湿环境的研究较为空缺, 针对不同岩庙内部空间环境差异性的分析尤其缺乏。因此针对赋存环境建立综合性、实时动态的研究体系进而评估其热湿环境特征对岩庙保护具有重要意义。

目前武当山保留有主体砖石殿建筑的岩庙尚存 20 余座, 本文选取武当山岩庙中的华阳岩

和隐仙岩作为研究对象。通过病害现状勘察比较两岩庙病害程度的差异; 通过环境监测对两岩庙的温度、相对湿度、光照和风向风速进行持续监测数据分析; 进一步利用 CFD 温湿度场模拟, 验证热湿环境与病害程度的关联性。本研究有助于探明赋存环境影响下武当山岩庙建筑的病害机理, 同时为预防性保护策略提供理论依据。



1 材料与方法

1.1 研究对象

本次选取的研究对象为隐仙岩与华阳岩, 两岩均位于五龙宫附近, 是明代建成的砖石混合结构石殿, 其中主体建筑的须弥座材质均为绿泥石片岩, 且两岩所在经纬度相似, 海拔、朝向、岩洞尺寸均有所不同, 见表 1。华阳岩面朝西南, 洞高 3.5 m, 宽 7.4 m, 深 5.1 m, 洞口东侧有元代记事碑三、明代石碑一座, 岩洞内有砖石殿一座, 面阔进深各一间; 隐仙岩坐西朝东, 洞高 11.5 m, 宽 23.7 m, 深 12.8 m, 岩洞靠外有一座焚帛炉, 岩内现存五座砖石殿, 形成以正殿为中心的“品”字形布局^[15]。

表 1 华阳岩与隐仙岩情况对比

Tab. 1 Comparison between huayang Rock and Yinxian Rock

监测对象	华阳岩	隐仙岩
摄影测量图片		
经纬度	东经 111.003 7°, 北纬 32.455 4°	东经 111.003 8°, 北纬 32.464 7°
海拔	647.8 m	604.5 m

1.2 病害现状勘察

根据《馆藏砖石文物病害与图示》(GB/T 30688—2014)开展武当山华阳岩、隐仙岩病害调查^[16], 标识病害分布范围, 并利用 CAD2018 统计病害面积。

1.3 热湿环境监测

本研究基于无线传感器网络对武当山隐仙岩和华阳岩和进行无损监测, 监测内容包括洞前温度、相对湿度、降雨量、日照强度、风速, 数据实时传输并收集至综合观测云平台数据中心保存。各传感器的监测内容及采样精度如表 2 所示。

表2 监测项目和参数

Tab. 2 Monitoring items and parameters

监测内容	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	降雨量/mm	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	光照度/lx
采样精度	0.1	0.10	0.1	0.1	0.1

收集的监测数据时间跨度为2022年11月21日—2023年2月28日,气象站整合了各个传感器的工作电路,设置统一采样间隔为10 min,共获取14 400组数据。各传感器及气象站的位置如图1所示。

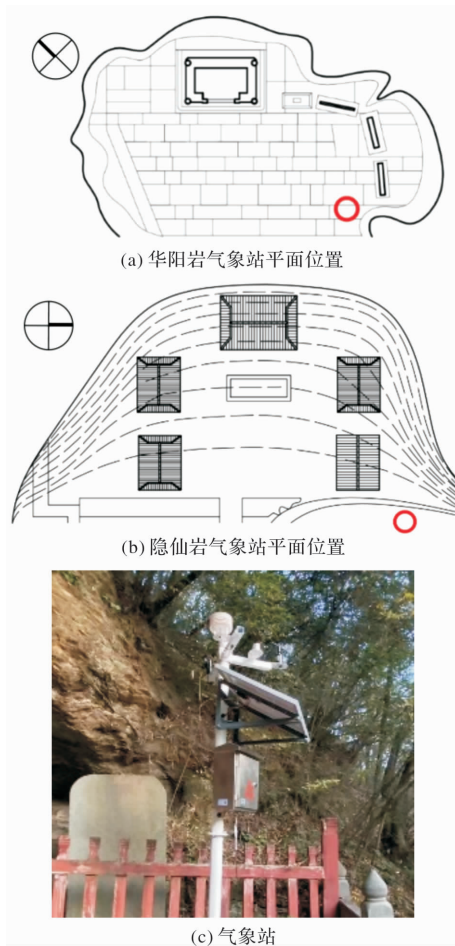


图1 气象站布设位置

Fig. 1 Location of weather stations

因岩庙所在山体尚未铺设电网线路,本研究采用的气象站供电方式为太阳能光伏板+蓄电池供电,断供时最多可以工作7 d,受冬季阴雨天气影响,两座岩庙的气象站均存在断线离线情况,为进行有效对比,本文对实测数据进行了筛选,获取了两岩同步对比的区间。

1.4 CFD温湿度场模拟

本研究通过FLUENT软件模拟岩洞内部空间温湿度的分布情况,为了同时模拟温度场和

湿度场的分布,结合2022年11月-2023年2月环境监测数据设置岩洞内初始温湿度等边界条件,选择标准 $k-e$ 方程湍流模型及组分运输模型进行温湿度的数值模拟^[17],运用高效的控制方程离散方法Simple算法求解^[18],设置迭代次数5 000次,将数值计算模型不停迭代直至计算完成。

2 结果和分析

2.1 华阳岩、隐仙岩病害现状

武当山华阳岩与隐仙岩存在不同程度的损害,病害类型具有一致性,均以石殿须弥座剥落为主,但两岩庙的剥落病害的面积和程度差异显著。华阳岩石殿须弥座的剥落病害范围更大,剥落面积在 $1\sim 2\text{ m}^2$ 之间,剥落程度更深,剥落层厚度多为 $1\sim 2\text{ cm}$,并因此产生了大量剥离建筑本体的区域,严重破坏了华阳岩的完整性和真实性(图2(c)、(d))。隐仙岩的剥落病害整体呈现局部化、轻微化特征,剥落区域以点状分布,剥落面积多在 $0\sim 1\text{ m}^2$ 之间,剥落层厚度多为 $0\sim 0.5\text{ cm}$,对岩庙的整体风貌影响较小(图2(f)、(g))。



图2 岩庙病害现状照片

Fig. 2 Photograph of the disease status of the rock temples

剥落病害破坏了石材表面完整性,加剧了石材的劣化作用,鉴于其严重危害,进一步对比发现,病害严重的华阳岩须弥座西侧和南侧的剥落程度也存在明显差异(图3)。华阳岩西侧背光面石制须弥座剥落面积为 0.28 m^2 ,占西侧须弥座面积的20.7%,剥落程度自岩壁相接处向外递减,靠近岩壁区域严重粉化,剥落深度最深可达2 cm,表面破坏严重;南侧向阳面剥落面积为 0.06 m^2 ,占南侧须弥座的3.3%,剥落层不到1 cm,粉化状况不明显,表面基本完整。

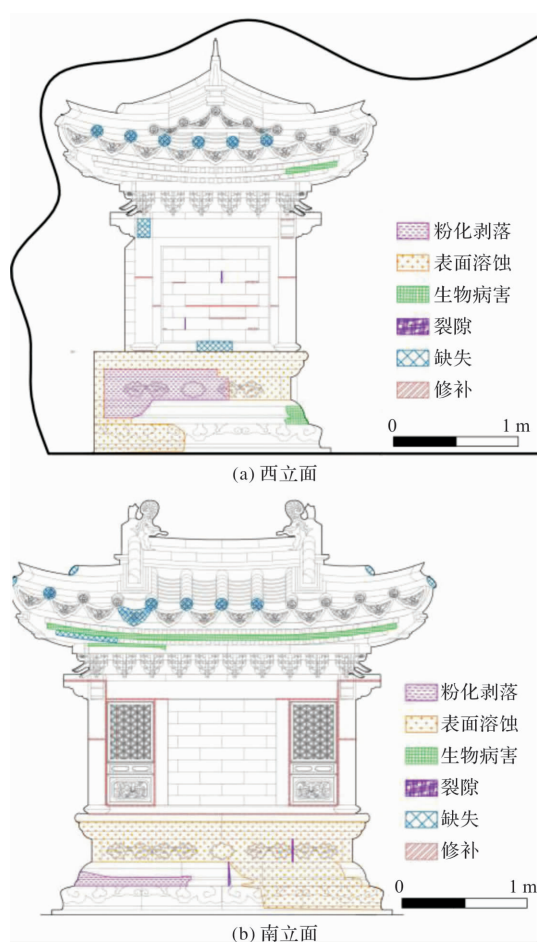


图3 华阳岩病害分布

Fig. 3 Disease distribution of Huayang rock

病害现状勘察表明华阳岩与隐仙岩石殿病害程度明显不同,集中体现在剥落病害上。华阳岩较隐仙岩石殿剥落面积更大,程度更深;华阳岩石殿存在病害分布的空间差异,须弥座靠近岩壁区域病害最为严重,自岩壁侧向外病害程度递减。

2.2 华阳岩、隐仙岩热湿环境监测数据分析

通过分析两座岩庙热湿环境的整体特征发现,两座岩庙的温湿度均存在时间尺度上的周期性波动,并且在监测的四个月内,华阳岩的相对湿度(RH)均高于隐仙岩。本文以绝对湿度(单位 g/m^3)来说明空气中水汽含量,由温度与相对湿度的实

测数据换算得出;图中每个散点为气象站的一次采样数据,以不同颜色区分月份。两岩热湿环境月变化都比较大,且差异分明(图4)。11月-2月两岩温度集中分布在 $-5\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$,水汽含量集中在 $10\text{ g}/\text{m}^3$ 以下,相对湿度则具有较大的变化范围。比较来看,11月相较12月至1月存在温度更高、湿度更大的显著特征,温度集中在 $10\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$,水汽含量偏高,其中华阳岩在90%~100%的相对湿度区间内均有大量数据聚集,相对湿度水平显著高于隐仙岩。

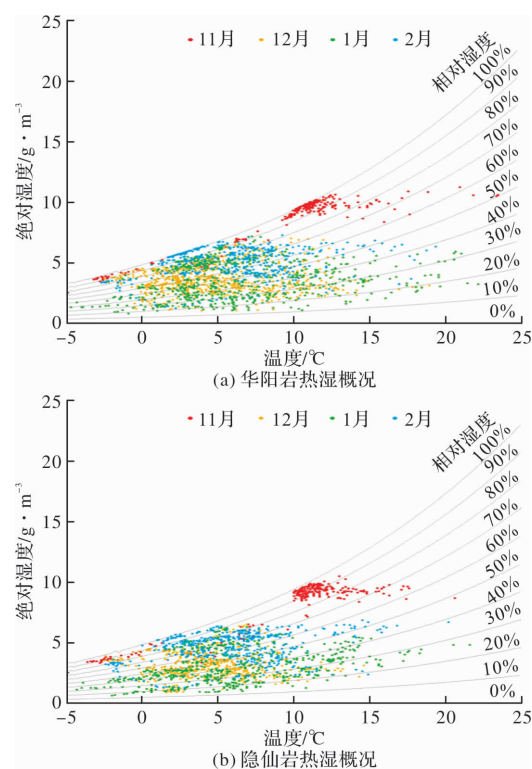


图4 岩庙热湿环境概况

Fig. 4 Thermal-humidity environment of the rock temples

2.2.1 温度

华阳岩与隐仙岩温度在不同月份相差较大,并且有明显的时间变化特征。两岩在每个月温度波动范围分别为11月 $-3.0\sim 22.2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-3.4\sim 17.4\text{ }^\circ\text{C}$;12月 $-0.3\sim 13.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-0.3\sim 11.5\text{ }^\circ\text{C}$;1月 $-6.4\sim 17.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-6.4\sim 13.7\text{ }^\circ\text{C}$;2月 $1.5\sim 16.7\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.8\sim 16.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。同时期两岩测得的温度差距不大,但11月-1月两岩温度逐步下降,月均值差值在 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,2月温度开始回升。通过观察温度曲线峰值可以发现,华阳岩在8~12点存在温度的显著上升,出现了远高于隐仙岩的当日最高温度,极大值出现的时间滞后,相同区间内隐仙岩温度则相对平缓,没有出现剧烈波动;而在0~8点华阳岩则会出现略低于隐仙岩的当日最低温度,见图5。由此导致华阳岩比隐仙岩形成了更强烈的温度波动。

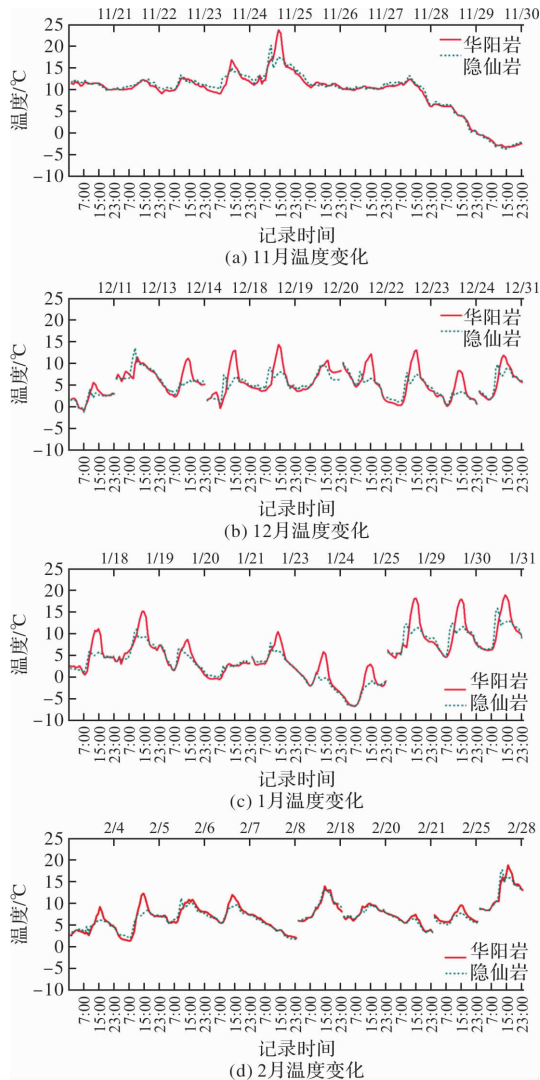


图5 温度变化曲线

Fig. 5 Temperature of the rock temples

2.2.2 相对湿度

两岩的日平均相对湿度水平有着明显的月度差异,见图6,其中两岩在11月的平均相对湿度最高,分别为92.11%、88.56%;两岩在1月的平均相对湿度最低,分别为38.72%、37.23%。11月两岩平均相对湿度水平超过60%的天数占比为100%。在监测全周期内,华阳岩平均相对湿度高于隐仙岩的天数占比为88.9%,较隐仙岩相对湿度水平更高。

为进一步分析相对湿度的差异性特征,选取当月相对湿度最高的11月27日、12月22日、1月21日、2月8日的逐时数据进行对比分析。如图7所示,两岩庙11月27日与2月8日的相对湿度水平整体都在60%之上,特别是华阳岩11月27日相对湿度水平逼近100%。此外,两岩庙相对湿度自0点起逐渐上升,至6点左右到达第一个峰值,此后逐渐下降,至13点降至低谷值,此后继续上升。可以发现,17点至次日6点是相对湿度

上升期,且会更多地达到60%以上。

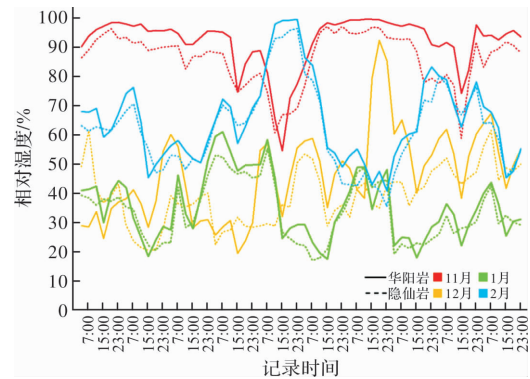


图6 相对湿度变化特征

Fig. 6 Relative humidity of the rock temples

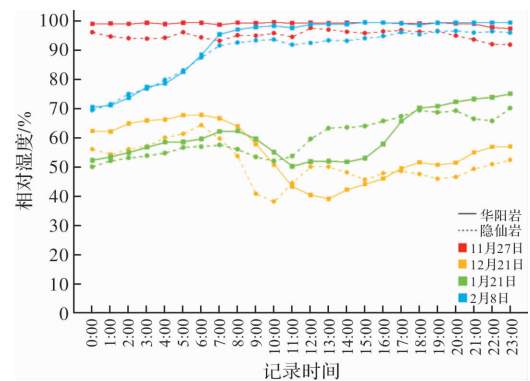


图7 相对湿度最高日变化特征

Fig. 7 Maximum daily variation of relative humidity

为了进一步探究两岩庙湿度变化特征,引入降雨量与相对湿度的综合分析(图8),监测数据显示,11月两岩庙降雨量最多,2月次之。

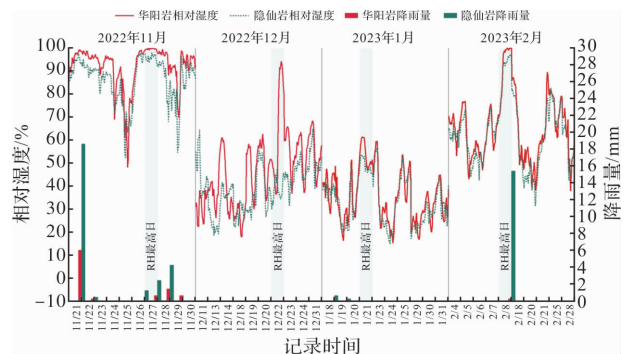


图8 相对湿度与降雨量变化

Fig. 8 Changes of humidity and rainfall

同期华阳岩总降雨量达9.0 mm,其中11月降雨量为8.8 mm;而隐仙岩总量达43.0 mm,其中11月和2月降雨总量分别为26.8 mm、15.4 mm。当日日均相对湿度最高的11月27日与2月8日相对湿度与降雨量存在正相关,但相对湿度更高的华阳岩降雨总量却远小于隐仙岩,两岩庙整体相对湿度与总降雨量呈反比关系。

从总体来看,华阳岩相对湿度明显高于隐仙

岩, 华阳岩相对湿度超过 60% 的时间占比更多, 维持在高湿度的时段更长。

2.2.3 光照

两岩的光照度随时间规律性波动且波幅较大(图 9), 两岩测得光照度的时间均落在 6 点-18 点区间内, 呈明显的周期变化, 但华阳岩的光照度峰值远高于隐仙岩。华阳岩日平均光照度波动在 92~7 892 lx, 隐仙岩日平均光照度波动在 130~5 870 lx。

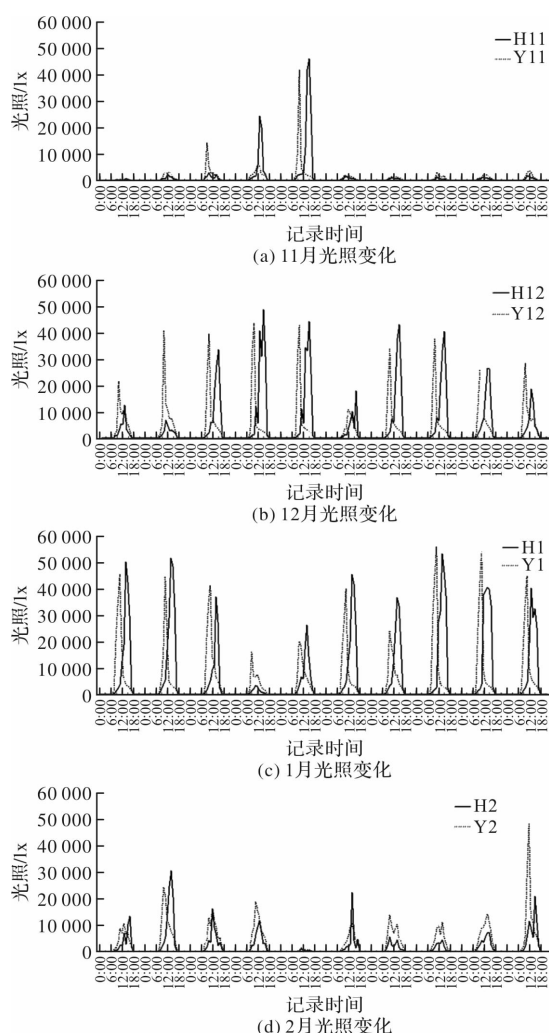


图 9 光照度变化特征

Fig. 9 Illuminance of the rock temples

两岩庙出现光照度峰值的时间有差异, 隐仙岩出现当日峰值的时间在 10~12 点左右, 华阳岩则在 13~15 点左右, 落后隐仙岩约 3 个小时, 由此造成华阳岩光照在峰值之后快速衰退, 且午后 13~15 点的太阳辐射强度在一天之中更高, 导致其接收太阳辐射量更大并且具有滞后性。

2.2.4 风

两岩的盛行风向有明显的差异(图 10), 华阳岩盛行西风(44%), 其次是西北风(22%)、西南风(19%)。隐仙岩则盛行东风(29%)和东南风(23%), 其次是东北风(18%)和北风(15%)。

华阳岩整体风速远小于隐仙岩(图 11), 静风概率高达 97%, 且风速集中在低风速段(0~0.5 m/s), 监测周期内风速超过 0.5 m/s 的时间仅为 1.2%, 最高风速不超过 2 m/s。隐仙岩静风概率在 63%, 有 15% 的时间风速超过 0.5 m/s, 最高风速超过 3.5 m/s。

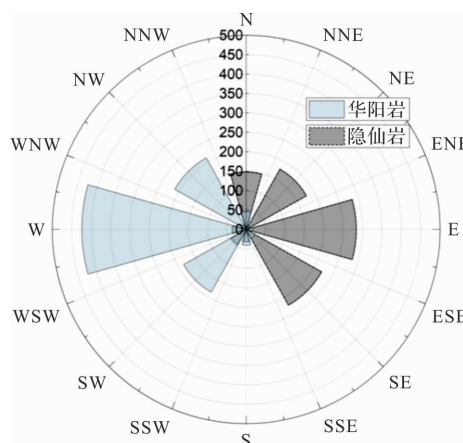


图 10 华阳岩与隐仙岩风向玫瑰图

Fig. 10 Rosemap of wind direction

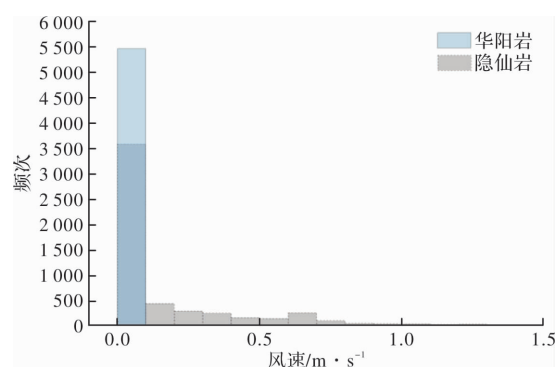


图 11 华阳岩与隐仙岩风速直方图

Fig. 11 Histogram of wind speed

监测结果表明两岩庙的热湿环境明显不同。两岩庙温度变化趋势相同但华阳岩温度波动幅度更大, 形成较大的气温日较差。华阳岩相对湿度则远高于隐仙岩高, 维持在高相对湿度的时间段更长, 但两岩庙的在整体相对湿度与降雨量呈负相关。光照度的监测数据则说明华阳岩接受较强烈光照的时间晚于隐仙岩, 使得华阳岩光照峰值出现时间滞后。此外两岩庙的风环境也存在差异, 华阳岩静风率高, 整体风速偏低。监测的热湿环境指标中, 两岩庙的相对湿度呈现更为显著的差异, 并且剥落更严重的花阳岩在监测全周期内, 平均 RH 值高达 60% 以上。

2.3 基于 CFD 华阳岩内部空间湿度场模拟

由于华阳岩病害更为严重且病害空间分布差异显著, 因此重点对华阳岩进行热湿模拟以探究热湿环境与其病害空间分布之间的关联性。

华阳岩岩洞实际模型较为复杂,不便进行 CFD 模拟计算,因此本文在实际结构的基础上对岩洞内部空间进行了适度的简化,将岩穴四周的曲线进行了简化,其他区域完全按照岩庙建筑的实际尺寸来建模.另外由于华阳岩岩洞内竖向空间的温湿度分布也存在差别,考虑到石殿须弥座部位的病害较为典型,因此选择须弥座高度 0.8 m 处的截平面,见图 12.进行模拟,并据此建模.本文运用 ICEM 软件来划分网格,采用局部加密的方式,适当减少网格数量,见图 12,在保证精确度的前提下减小运算量^[18].模拟选择每月相对湿度最高日的实测数据和主导风向西风作为输入参数,如表 3 所示.分别对 11 月-2 月的华阳岩内部空间模拟湿空气吹出和热空气吹入.

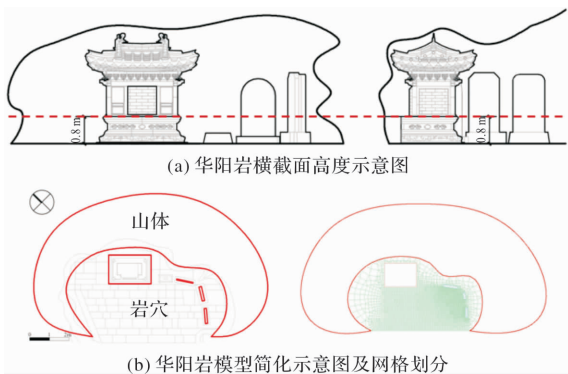


图 12 二维简化模型网格划分

Fig. 12 2D reduced model meshing

表 3 边界条件设置

Tab. 3 Boundary condition setting

参数设定	11 月	12 月	1 月	2 月
风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.1	0.5	0.3	0.1
温度 / $^{\circ}\text{C}$	11	6.2	7.4	4.4
相对湿度 /%	99	50	50	99
绝对湿度 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	9.9	3.7	4.0	6.4

模拟结果表明,华阳岩内部空间热湿分布存在显著差异,在洞外西风作用下,受岩穴开口形状的影响,华阳岩石殿西侧湿空气不易排出洞外,湿空气在输送过程中不断堆积,使得石殿西侧形成显著的低温高湿区.以湿度模拟云图为例,与华阳岩病害现状关联来看,如图 13 所示,高湿度区域集中在 A-西侧,对应石殿西侧须弥座的大面积剥落病害;B-南侧的湿度相对较低,对应石殿须弥座部位病害明显较轻.

模拟华阳岩风速云图、温度云图和湿度云图如图 14 所示.从速度分布云图来看,华阳岩现状风速较低、整体风速均小于 0.5 m/s ,洞口处风速稍大,岩洞内部几乎没有空气流动,东侧石碑处形成小涡旋.从温度分布云图来看,华阳岩内部空间温度分布有显著差异,石殿西侧较南侧升温不显著,形成低温区.从湿度分布云图来看,华阳岩内部空间湿度分布差异明显,石殿西侧湿度水平显著高于南侧,水汽在石殿西侧形成明显的堆积.模拟结果显示华阳岩石殿高湿度区域与须弥座严重剥落区域高度吻合.

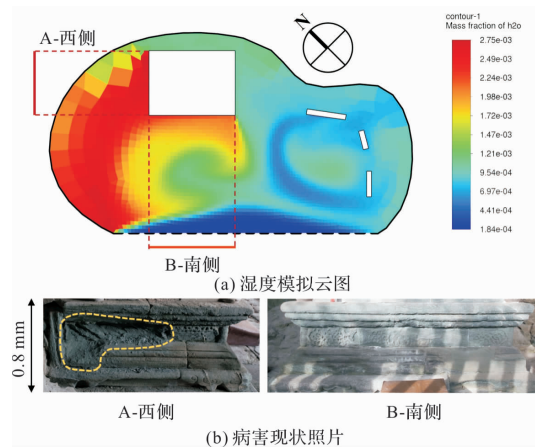


图 13 湿度模拟与病害关联性分析

Fig. 13 Humidity simulation and disease correlation

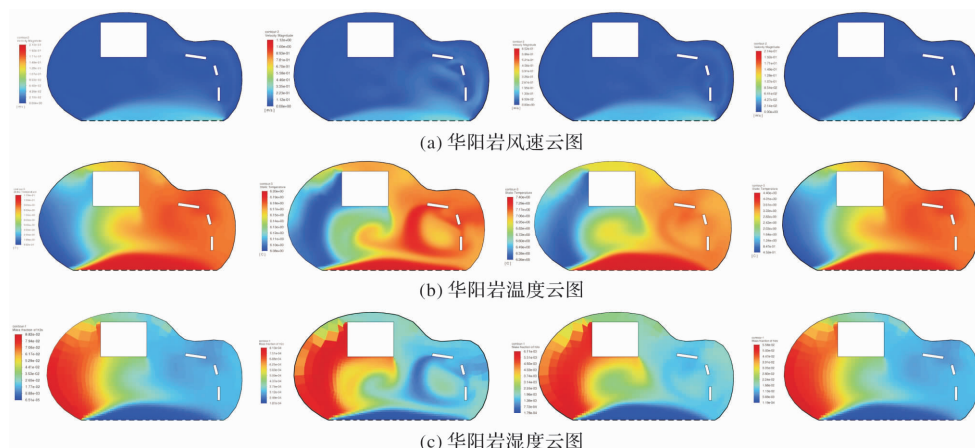


图 14 CFD 模拟云图

Fig. 14 CFD simulation cloud plot

3 讨论

已有研究证明热湿环境是导致石质文物病害的关键因素之一^[19],湿度环境是石质文物关键致害因素。一方面在石材与水的接触反应下导致产生剥落、盐害、溶蚀、水锈结壳等病害^[20],另一方面湿度为微生物繁殖提供有利条件导致微生物病害^[21]。莫高窟的相关研究表明相对湿度变化引起可溶盐结晶变化,使得石质文物产生盐害^[22],相对湿度62%是激活盐害的临界值^[23],相对湿度在临界值以上的时间越长,病害发展越快^[24];麦积山石窟通过环境监测和病害关联分析指出相对湿度与壁画表面细菌丰度成正相关,高湿度是引起洞窟深处壁画微生物病害的根本原因^[25];云冈石窟的研究发现高湿度导致的空气凝结水加速了水岩相互作用和盐结晶应力对砂岩的侵蚀作用,导致风化裂隙的形成^[26]。本文通过对武当山岩庙的物理环境监测数据与病害勘察现状分布的相关分析,进一步验证了湿度的致害作用,在岩庙所处的半包围的岩穴空间中,湿度环境与石质建筑病害的发生发展与存在明显的关联性。

经病害勘测发现,剥落是武当山华阳岩与隐仙岩最为严重且普遍的病害类型。华阳岩与隐仙岩主体建筑作为同时期的建筑遗存^[15],表现出了明显的病害程度和空间分布差异。通过两座岩庙保存状况的对比,发现华阳岩石殿须弥座的剥落已经导致浮雕图案模糊和局部肢解,纹样几乎无法辨认。隐仙岩主殿须弥座未见明显的剥离,图案模糊但可以识别,基本风貌保存完好。从空间分布上看,华阳岩石殿须弥座靠近岩壁区域剥落最为严重,自岩壁侧向外剥落程度递减。已有研究证明,武当山岩庙剥落病害是水-岩相互作用的结果^[27]。石殿须弥座采用的绿泥石片岩质地柔软、强度较低,极易沿片理面劣化。绿泥石片岩中所含的伊利石、斜绿石、蛭石等粘土矿物水化膨胀^[28],白云母、钠长石、石英等可溶性矿物溶解是导致石材剥落病害的重要原因^[29]。不同矿物亲水性和吸附能力的不同产生了不均匀的膨胀,破坏了石材内部结构,最终导致颗粒剥落。另外石材中的可溶性矿物发生溶解,促进了裂缝和空隙的产生,进一步导致了表面剥落。可见水是华阳岩与隐仙岩石殿剥落病害的重要影响因素,明确水的来源对改善岩庙赋存环境,延缓进一步的劣化具有重要意义。

岩庙属于典型的半包围石窟寺类建筑,已有

研究证明石窟水分来源主要有三个途径,即降水入渗、地下水毛细管上升和大气凝结^[30-31]。其中,湿空气在石材表面的凝结作用是水分的关键来源^[32]。通过实测数据分析发现,两岩庙湿度差异明显。相对湿度监测结果显示,11月-2月华阳岩RH显著高于隐仙岩,RH高于90%的天数达到24 d,隐仙岩为15 d;华阳岩平均RH高于隐仙岩的天数超过80 d。与隐仙岩相比,华阳岩整体相对湿度偏高,维持在高湿度的时间更长,长期处于高湿度下的石材表面更易出现水汽凝结,为水-岩相互作用提供了介质,加速了表面剥落受损处侵蚀过程。可以发现,湿度环境差异与病害差异存在显著关联,是引起武当山岩庙剥落病害关键环境因素之一。

另一方面,湿度环境与温度、光照、降雨、风环境之间存在相互作用。大量研究表明,降雨事件跟空气湿度紧密相关^[33-34],一方面短期强降雨显著引起相对湿度的升高,另一方面总降雨量与整体相对湿度一般呈正相关。我们的研究得到了类似结论,华阳岩11月27日、2月8日降雨及相对湿度的升高验证了降雨对短期内相对湿度的影响(图8)。然而,监测结果显示两岩庙整体相对湿度水平与总降雨量却成反比,隐仙岩总降雨量更大但整体相对湿度却低于华阳岩。由于两岩庙均为半包围空间下的石窟寺类建筑,上方岩壁与植物的遮蔽使得降雨的直接影响较小,两岩庙的降雨频率和总量并不大,因此总降雨量对整体湿度的影响不显著。

此外,较高的风速有利于水汽疏散,降低空气湿度^[35]。我们的研究也发现华阳岩低风速与高湿度的现象,风环境实测结果表明华阳岩静风率达到97%,风速集中在0~0.5 m/s的低风速区间内,湿空气容易堆积,因此长期处于高湿状态。其次,光照及温度对湿度变化也存在一定影响,太阳辐射的热作用有利于提高岩壁与环境温度,促进水汽的蒸发与疏散,进而降低环境湿度^[36]。监测结果验证了光照对两岩庙的温湿度影响,由于华阳岩面朝西南,而隐仙岩坐西朝东,华阳岩接受较强太阳辐射具有滞后性,使其出现当日温度极大值的时间落后于隐仙岩,也导致了华阳岩在12~16点更高的环境温度。结合12月与1月相对湿度最高日逐时数据(图7)来看,华阳岩相对湿度自8点左右开始下降并在12~16点区间内低于隐仙岩。然而总体来看,光照及温度对相对湿度的影响仅在午后时段起作用,华阳岩较隐仙岩更

高的平均温度并没有有效降低整体相对湿度。

综上,高湿度对武当山岩庙剥落病害最为相关;在影响相对湿度的各个因素中,降雨、温度及光照仅在特定时间区间内对相对湿度造成影响,在降雨期间相对湿度显著升高、日间升温时段相对湿度显著降低。降雨事件和温度效应在相对湿度极值的变化上十分显著,但对整体相对湿度的影响不大。风环境则显著影响两岩庙的整体相对湿度,低风速与华阳岩高湿度的形成密切相关。

4 结论

通过对武当山华阳岩和隐仙岩的现场病害勘察、持续环境监测以及CFD热湿模拟,得出的主要结论如下:

(1)剥落病害是武当山华阳岩与隐仙岩最严重的病害类型。华阳岩石殿剥落范围更大,程度更深,隐仙岩则整体病害较轻,风貌保存完好。华阳岩石殿存在显著的病害空间分布差异,石殿西侧须弥座剥落最为严重;

(2)环境监测数据分析表明,华阳岩与隐仙岩热湿环境差异集中体现在相对湿度的差异上。华阳岩长期处于高湿度环境中。CFD湿度模拟结果显示,华阳岩岩穴内高湿度区域与剥落病害严重区域高度吻合。实测分析综合模拟结果表明高湿度与剥落病害存在关联,推测高湿度是导致武当山岩庙剥落病害的重要环境因素;

(3)通过湿度与温度、光照、降雨及风的相关性分析,发现降雨事件和温度效应主要影响相对湿度极值,风环境则显著影响岩庙整体相对湿度。推测低风速与高湿度的形成密切相关。

赋存环境的变化将对文化遗产的保存构成严重威胁,武当山建筑群由于暴露程度高面临的气候风险更高,亟待探究有效的保护策略,研究结果为武当山岩庙建筑预防性保护提供了科学依据。

参考文献 References

- [1] 张良皋. 武当文化丛书精选: 武当山古建筑[M]. 北京: 中国地图出版社, 2006.
ZHANG Lianggao. Anthology of Wudang cultural series: The ancient architecture of Mount Wudang[M]. Beijing: Sino Map Press, 2006.
- [2] 安程, 吕宁. 故宫内外不可移动文物赋存环境的比较性分析[J]. 故宫博物院院刊, 2016(2): 147-153, 163.
AN Cheng, LÜ Ning. A comparative analysis of the environmental conditions of immovable cultural relics inside and outside the Forbidden City[J]. Palace Mu-

- seum Journal, 2016(2): 147-153, 163.
- [3] ZHU L P, WANG J C, LI B Y. The impact of solar radiation upon rock weathering at low temperature: a laboratory study[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2003, 14(1): 61-67.
- [4] 陈海玲, 陈港泉, NEVILLE A, 等. 开放参观对莫高窟洞窟微环境的影响[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(6): 10-17.
CHEN Hailing, CHEN Gangquan, NEVILLE Agnew, et al. The impact of visitation on the microenvironment of the Mogao Caves[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(6): 10-17.
- [5] MIKE C. The conservation of cave 85 at the Mogao Grottoes Dunhuang: A collaborative project of the Getty conservation institute and the Dunhuang academy[J]. Journal of the Institute of Conservation, 2016, 39(1): 64-67.
- [6] LAIZ L, GONZALEZ J M, SAIZ-JIMENEZ C. Microbial communities in caves: Ecology, physiology and effects on paleolithic paintings[J]. Art, Biology and Conservation: Biodeterioration of Works of Art, 2003(1): 210-225.
- [7] ELENA S, S. A G, CHIARA C, et al. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2021, 12(4): e710.
- [8] 陈海玲, 陈港泉, 薛平, 等. 敦煌莫高窟第465窟温湿度时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 155-160.
CHEN Hailing, CHEN Gangquan, XUE Ping, et al. Spatial and temporal distribution of temperature and relative humidity in Mogao Cave 465[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2): 155-160.
- [9] 贺东鹏, 武发思, 胡军舰, 等. 麦积山石窟第127窟赋存环境特征及对壁画病害的影响[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 678-690.
HE Dongpeng, WU Fasi, HU Junjian, et al. Environmental characteristics of cave 127 in the Maijishan Grottoes and its influence on mural diseases[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(4): 678-690.
- [10] 孟圆悦, 闫增峰, 王江丽, 等. 龙门石窟大卢舍那像龕太阳辐射特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 129-138.
MENG Yuanyue, YAN Zengfeng, WANG Jiangli, et al. Research on solar radiation characteristics in Vairocana Buddha niche in Longmen Grottoes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6):

- 129-138.
- [11] 尚瑞华, 闫增峰, 王旭东, 等. 敦煌莫高窟窟区风环境研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(1): 99-104.
- SHANG Ruihua, YAN Zengfeng, WANG Xudong, et al. Research on wind environment of Mogao Grottoes in Dunhuang[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(1): 99-104.
- [12] 孟庆龙, 王元, 李彦鹏. 环境模拟实验室内温度场与速度场的数值模拟与实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(5): 712-718.
- MENG Qinglong, WANG Yuan, LI Yanpeng. Numerical simulation and experiment for temperature and velocity field in man made environment laboratory[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013, 45(5): 712-718.
- [13] 黄翔, 李婷婷, 刘凯磊, 等. 乌鲁木齐某数据中心热环境分析及气流组织优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(1): 104-108.
- HUANG Xiang, Li Tingting, Liu Kailei, et al. Analysis of the thermal environment analysis and air distribution optimization for a data room in Urumqi[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(1): 104-108.
- [14] 张春庭, 苏伯民, 张正模. 敦煌莫高窟微环境控制方式的 CFD 仿真与实验[J]. 敦煌研究, 2017 (6): 167-171.
- ZHANG Chunting, SU Bomin, ZHANG Zhengmo. The CFD simulation and test of the control mode of the Mogao Grottoes micro environment[J]. Dunhuang Research, 2017(6): 167-171.
- [15] 刘振生. 武当山隐仙岩砖石殿建筑特征及成因解析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- LIU Zhensheng. Analysis and research on the architectural features and causes of the brick-and-stone hall of Yinxian rock in Wudang mountains[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 馆藏砖石文物病害与图示: GB/T 30688—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, standardization Administration of the People's Republic of China. Stone and brick collection disease and illustration: GB/T 30688—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [17] 许萍, 刘壮壮, 秦嘉琦, 等. 基于 Fluent 模拟降雨对木结构古建筑室内温湿度的影响[J]. 林产工业, 2021, 58(8): 85-89, 92.
- XU Ping, LIU Zhuangzhuang, QIN Jiaqi, et al. Influence of rainfall on the indoor temperature and humidity of an ancient timber building based on fluent simulation [J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(8): 85-89, 92.
- [18] PATANKAR S V, IVANOVIC M, SPARROW E M. Analysis of turbulent flow and heat transfer in internally finned tubes and annuli [J]. Journal of Heat Transfer. 1979, 101(1): 29.
- [19] LI G S, WANG C W F, QUA D J J, et al. Study on temperature and humidity environment of grotto 72 at the Mogao Grottoes in Dunhuang, China [J]. International Journal of Climatology, 2013, 33 (8): 1863-1872.
- [20] 苏振妍, 杨冰卓, 张虎元. 莫高窟第 276 窟可溶盐测定与环境监测分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 226-232.
- SU Zhenyan, YANG Bingzhuo, ZHANG Huyuan. Soluble salt determination and environmental monitoring of Cave 276 in Mogao Grottoes [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2021, 57(2): 226-232.
- [21] LIU Xiaobo, MENG Han, WANG Yali, et al. Water is a critical factor in evaluating and assessing microbial colonization and destruction of Angkor sandstone monuments [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 133: 9-16.
- [22] 陈港泉, 苏伯民, 赵林毅, 等. 莫高窟第 85 窟壁画地仗酥碱模拟试验[J]. 敦煌研究, 2005(4): 62-66.
- CHEN Gangquan, SU Bomin, ZHAO Linyi, et al. Research on the distribution characteristics of air temperature and humidity and the effects of precipitation on humidity in Mogao Cave 85 [J]. Dunhuang Research, 2005(4): 62-66.
- [23] AGNEW N, MAEKAWA S, WEI S. Causes and mechanisms of deterioration and damage in Cave 85 [C] // SRC. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2010.
- [24] 赵国利. 基于 μ HAM-CFD 瞬态耦合模型的南唐二陵壁画原位环境特征研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- ZHAO Guoli. Study on in-situ environmental characteristics of murals in two Nantang tombs based on Mham-CFD transient coupling model [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [25] 胡军舰, 贺东鹏, 武发思, 等. 麦积山石窟第 32 窟内外温湿度比较研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6): 66-72.
- HU Junjian, HE Dongpeng, WU Fasi, et al. Comparison of temperature and relative humidity between inside and outside Cave 32, Maijishan Grottoes [J]. Jour-

- nal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(6):66-72.
- [26] AN W B, WANG L, CHEN H. Mechanical Properties of weathered feldspar sandstone after experiencing dry-wet cycles[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020:1-15.
- [27] WANG Chengaonan, CHEN Mu, WANG Yansong. Surface flaking mechanism of stone components of ancient building complex in Wudang Mountain, China [J]. Construction and Building Materials, 2023, 399 (10):1-19.
- [28] DUDKO V, ROSENFELDT S, RENÉE SIEGEL, et al. Delamination by repulsive osmotic swelling of synthetic na-hectorite with variable charge in binary dimethyl sulfoxide-water mixtures[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2022, 38(35):10781-10790.
- [29] LI S, HE H, LIANG X, et al. Transformation of Ordered Albite into Kaolinite: Implication for the "Booklet" Morphology[J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2022, 6(4):1133-1142.
- [30] GUO F, JIANG G. Investigation into rock moisture and salinity regimes: Implications of sandstone weathering in Yungang Grottoes, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2015, 30 (1): 1-11.
- [31] YAO Shanshan, YAN Zengfeng, MA Qian, et al. Analysis of the annual hygrothermal environment in the Maijishan Grottoes by field measurements and numerical simulations[J]. Building and Environment, 2022, 221(8): 1-19.
- [32] 张博,崔惠萍,裴强强,等. 不同开放环境下北石窟洞窟温湿度变化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (S1):2834-2840.
- ZHANG Bo, CUI Huiping, PEI Qiangqiang, et al. Characteristics of Temperature and humidity variations in Northern Grottoes under different open conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2834-2840.
- [33] 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.
- [34] 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 & Culture, 2014(3): 62-65.
- [35] 周宝发,郎嘉琛,闫增峰,等. 强降雨天气下麦积山石窟第126窟自然通风规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(10):155-160.
- ZHOU Baofa, LANG Jiachen, YAN Zengfeng, et al. Natural ventilation law for the cave 126 under heavy rainfall in Maiji mountain Grottoes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(10): 155-160.
- [36] 孟圆悦. 基于文物风化机理的龙门石窟物理环境调控技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2023.
- MENG Yuanyue. Research on Longmen Grottoes physical environment control technology based on the mechanism of cultural relic weathering [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2023.

(编辑 吴海西)