



降雨驱动下龙门石窟裂隙渗流响应机制研究

张 铎¹, 闫增峰¹, 倪平安¹, 岳英俊¹, 马朝龙², 姚珊珊³, 王江丽⁴,
毕文蓓⁵, 雷晗月¹, 杨晨雪¹

1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 龙门石窟研究院, 河南 洛阳 471000; 3. 郑州大学 建筑学院, 河南 郑州 450000; 4. 河南科技大学 土木建筑学院, 洛阳 471000; 5. 长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710054

摘要 以龙门石窟为例,通过集成红外热成像监测、气象数据采集与 ImageJ-Python 图像处理算法,构建高时空分辨率的渗水动态识别方法,并结合多元回归分析建立气候-渗流耦合模型,以揭示石窟在降雨驱动下的渗流响应机制。结果显示,渗流现象发生在降雨峰值后约 48 h,演化过程呈现“点状萌发—带状汇聚—片状扩散”的非线性扩散模式及昼夜振荡特征。气候因子中,降雨量(35%)、空气温度(28%)和太阳辐射(18%)是主要驱动因素,其中太阳辐射表现出 3 h 的相位延迟抑制效应;太阳辐射每增加 100 W/m²,渗流面积减少 15%~20%,且抑制效应存在 3 h 相位延迟,反映出岩体热惯性在渗流过程中的调控效应;湿度与风速的作用较弱,但在特定条件下可强化或抑制渗流过程。该研究揭示了降雨、热效应与蒸发循环共同作用下的复杂水岩耦合机制,为半湿润区露天石质遗产的水害机理解析及预防性保护提供了理论依据与方法支撑。

关键词 降雨驱动; 龙门石窟; 裂隙渗流; 响应机制; 红外热成像

中图分类号: TU-87; K879.23; TU111 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2026-02-008

Response mechanisms of fracture seepage at Longmen Grottoes under rainfall

ZHANG Duo¹, YAN Zengfeng¹, NI Ping'an¹, YUE Yingjun¹, MA Chaolong²,
YAO Shanshan³, WANG Jiangli⁴, BI Wenbei⁵, LEI Hanyue¹, YANG Chenxue¹

1. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Longmen Grottoes Academy, Luoyang 471000, China;

3. School of Architecture, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;

4. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China;

5. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract In the context of climate change, rainfall-driven fracture seepage has become a key factor threatening the long-term stability of open-air stone heritage, and its response mechanisms urgently require further elucidation. Taking the Longmen Grottoes as a case study, this study developed a high-spatiotemporal-resolution method for dynamic seepage identification by integrating infrared thermographic monitoring, meteorological da-

收稿日期: 2025-10-13 修回日期: 2025-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(52278127)

第一作者: 张铎, 男, 博士研究生, 从事建筑遗产保护研究, yuelu22227@xauat.edu.cn。

通信作者: 闫增峰, 男, 教授, 博士生导师, 从事建筑节能、大遗址保护研究, yanzengfeng@xauat.edu.cn。

ta, and ImageJ-Python image-processing algorithms. On this basis, a climate-seepage coupling model was established through multivariate regression analysis. The results show that seepage occurs approximately 48 hours after peak rainfall, exhibiting a nonlinear diffusion pattern that evolves from point initiation to band convergence and finally to surface expansion, along with pronounced diurnal oscillations. Among the climatic factors, precipitation (35%), air temperature (28%), and solar radiation (18%) were identified as the principal drivers. In particular, solar radiation exerts an inhibitory effect with a phase lag of approximately 3 hours; for every 100 W/m^2 increase in solar radiation, the seepage area decreases by 15% ~ 20%. This delayed suppression reflects the regulatory effect of the thermal inertia of the rock mass on the seepage process. By contrast, humidity and wind speed exert relatively weak influences, although under certain conditions they may either enhance or inhibit seepage. This study reveals the complex hydro-rock coupling mechanism driven by the combined effects of rainfall, thermal processes, and evaporation cycles, and provides a theoretical basis as well as methodological support for understanding water-induced deterioration and advancing preventive conservation of open-air stone heritage in semi-humid regions.

Keywords rainfall-driven; Longmen Grottoes; fissure seepage; response mechanism; infrared thermography

半个多世纪以来,石窟寺水害治理一直是文化遗产保护科学的重要研究内容^[1]。国家将石窟寺的保护利用置于关乎中华优秀传统文化的传承发展、社会主义文化强国建设以及促进“一带一路”文明交流互鉴的重大战略高度^[2]。对此,国家有关部门发文指出,“切实加强新时代石窟寺保护利用工作”是当前重要任务,并特别强调,“应对岩体风化、渗水、结构失稳等病害的关键保护技术尚未突破”^[3]。由此可见,石窟寺水害问题已成为文化遗产保护中一项长期而复杂的科学挑战^[4]。

在威胁石窟寺长期保存的诸多病害中,水害,尤以裂隙渗水为甚,已成为诱发石质文物不可逆性劣变的关键驱动因子^[5]。大量研究表明,水的渗入是诱发石刻文物劣化(如剥落^[6]、盐析^[7-8]、风化^[9-10])的关键因素之一,其存在已经成为评估石窟寺保存状况和制定保护策略的关键线索。值得关注的是,其渗流路径、强度与动态演化特征,直接表征着石窟载体的稳定状态,已成为评估保存状况、预警风险、制定保护方案的科学依据^[11]。然而,在全球气候变化持续加剧、极端天气事件愈发频繁的背景下^[12],以降雨为核心驱动源的渗水活动对龙门石窟等大型露天遗址的威胁日益严峻^[13-14],已对文物本体构成直接、突发的冲击^[15-16]。因此,深入研究石窟寺在降雨驱动下的渗流响应机制,是保障石窟文物长期稳定的重要前提。

在自然条件下,裂隙岩体的渗水过程高度复杂且动态变化^[17-18]。降雨作为渗水的主要外源

驱动,其强度与历时对渗透行为具有决定性的影响^[19]。高强度、长历时的降雨可以有效穿透风化表层并沿裂隙渗入岩体,而轻度短时降雨则难以入渗。同时,裂隙类型显著影响着渗流路径、传导效率及储水能力,加剧了渗流的空间非均质性^[20]。更为关键的是,该过程表现出非线性响应特征。相关研究及现场观测表明^[21],在降雨强度未达到某一临界阈值时,渗水路径较短,扩散缓慢^[22];而一旦超过该阈值,渗水现象会突然加剧,渗流面积呈指数级增长。这种复杂的响应机制同时受到雨量、历时、裂隙结构及岩体饱和状态等多因素的耦合作用。

目前针对降雨驱动下裂隙渗流演化的研究,仍多集中于经验性描述与定性分析层面^[23],缺乏高时空分辨率的原位动态监测与内在机制的定量解析。基于此,本研究以龙门石窟擂鼓台北洞为研究对象,创新性地提出一种融合 ImageJ 高精度图像处理与 Python 智能算法的渗水区域动态识别方法。同时,结合红外热成像动态监测与气象参数的耦合关联分析^[24-25],旨在揭示强降雨事件驱动下裂隙网络渗水的动态演化规律,精准量化渗流响应的关键控制阈值,解析其空间非均质性模式与非线性响应机制。本研究成果为龙门石窟建立科学可靠的水害风险预警模型提供了数据支撑与理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区域与对象选择

龙门石窟位于河南省洛阳市城南 13 km 的伊

河两岸,该区域属暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,年平均气温约15℃,最热月平均气温为27℃,最冷月平均气温为-1℃。其显著特点是雨热同期、无霜期较长,但降水量年际和季节分布不均,易受干旱、洪涝、

高温、寒潮等气象灾害影响。图1统计了洛阳市逐年的年降水总量及最大单日降水量,值得注意的是,近5年间,洛阳地区最大单日降水量变化呈现多峰形式,极端降雨事件频发,最大单日降水量多次超过100mm。

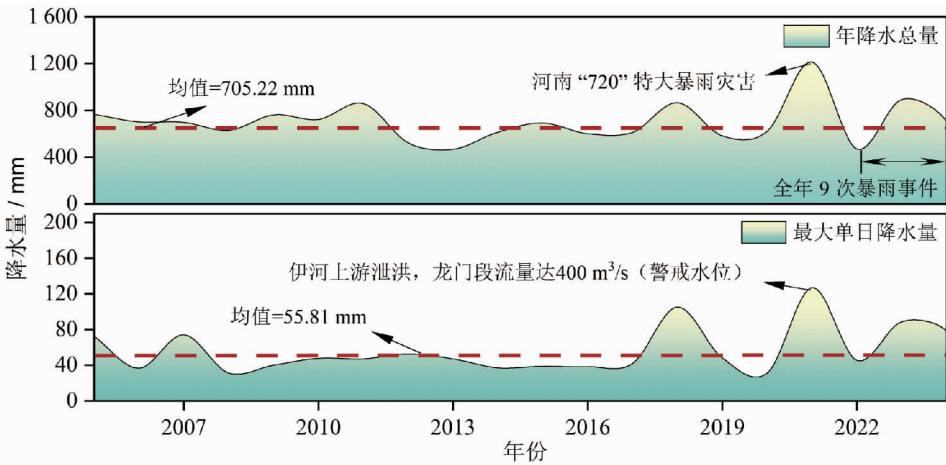


图1 洛阳市近20年的逐年总降雨量和逐年最大单日降雨量

Fig. 1 The annual total precipitation and annual maximum daily precipitation in Luoyang over the past two decades

龙门石窟的具体区位如图2(a)所示。擂鼓台区位于龙门东山南段万佛沟以南,是以俗称“擂鼓台”的窟龛造像为主体的相对独立区域^[26]。图2(b)所示为龙门石窟东山窟区的三维模型,其中,框选的绿色部分为擂鼓台区,该区域包括第3~9窟,其中第3、4、5窟即原俗称的擂鼓台南、中、北洞;本实验对象为擂鼓台北洞(白色部分),窟内效果见图2(c)。研究选择擂鼓台北洞正壁区域以及正壁两侧若干小龛作为监测对象。现场

勘查显示,坛上主尊整体风化严重,面部长圆,大部分漫漶不清[见图2(c)],左肩处有修补痕迹,正壁及其相邻区域存在大量裂隙渗水现象[见图2(c)],佛像正身部分径流现象明显,同时伴随着大量的盐分析出,受渗水径流影响的岩体表面发白。通过红外与可见光的同步观测,不仅可以无损识别石窟壁面渗流发生的时间,还可以较为准确地捕捉裂隙渗水的时空演化特征。



图2 龙门石窟区位及研究对象基础信息

Fig. 2 Basic information on the location and research object of Longmen Grottoes

1.2 数据采集及图像处理

实验在主尊佛像对侧及窟外擂鼓台台面布置测点,平面测点位置及现场照片如图 3(a)所示。现场实测内容主要为双光谱舱室红外热成像仪及窟外气象参数(空气温度、太阳辐射总量、降水量),仪器参数见表 1。本次监测时间为 2025 年 1 月 1 日至 2025 年 2 月 1 日。为实现无人值守与远程数据获取,本研究在窟内布设小型计算机及网络传输设备,通过红外热成像软件调试参数并同步窟外气象站实时监测时序,利用远程控制软件完成数据的的云端上传与下载,操作流程见图 3(b)。

基于上述采集数据,研究采用以下两步进行处理与量化分析[见图 3(b)、(c)]。步骤 1:对云

端回传的红外图像进行校对与预处理,以精确识别渗水区域,并对图像进行增强[见图 3(b)]。降噪处理采用 BM3D 算法,首先将图像分块并搜索相似块构建 3D 组,经 3D 变换、阈值去噪及逆变换后聚合生成初步降噪结果;基于此结果,二次搜索相似块,进行 Wiener 滤波,最终聚合输出高质量降噪图像。步骤 2:结合现场对佛龕本体的测绘,首先在 ImageJ 中设置对应的像素比例尺;其次,提取算法进行图像的动态阈值分割与形态学处理[见图 3(c)],并结合可见光图像验证精度,数次调整参数测试后,记录过程并写入代码;最后,利用 Python 实现渗水面积从像素到数值的可视化。

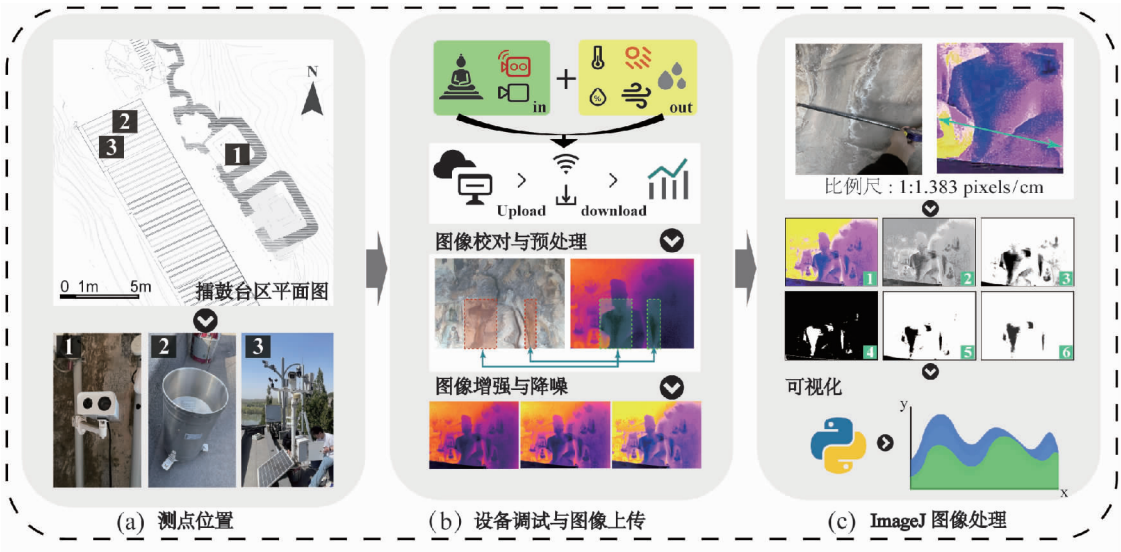


图 3 现场数据采集、设备调试及数据云上传

Fig. 3 On-site data collection, equipment commissioning and data cloud uploading

表 1 监测内容及仪器参数

Tab. 1 Monitoring content and instrument parameters

设备	要素	仪器精度	测试范围	监测内容	采样间隔/min
双光谱舱室红外热像仪	表面温度	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	佛龕壁面温度	1
	温度	$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	窟外环境温度	1
	湿度	$\pm 2\%$	$0\% \sim 100\%$	窟外空气湿度	
气象监测站	风速	$\pm 0.2\text{ m/s}$	$0 \sim 60\text{ m/s}$	窟外风速	
	总辐射	$\pm 3\%$	$0 \sim 1\,500\text{ W/m}^2$	窟外太阳辐射	
雨量监测仪	降雨量	$\pm 2\%$	$0 \sim 200\text{ mm/h}$	窟外降雨量	1

1.3 气候 - 渗流关联分析模型

对气候驱动因子权重进行计算^[27],采用标准化回归系数法分析变量贡献,以气候因子空气温

度、相对湿度、太阳总辐射、降雨量、北向风速和西向风速为自变量,渗水面积为因变量进行多元回归分析。首先对各项变量进行数据清洗与异常值

剔除,而后对数据进行标准化处理(Z-score)以消除量纲差异^[28]:

$$Z_x = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x}, Z_y = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \tag{1}$$

式中: μ_x, μ_y 为变量的均值, σ_x, σ_y 为变量的标准差。

进一步地,利用 SPSS 对各变量搭建拟合标准化回归模型:

$$Z_y = \beta_1 z_{x1} + \beta_2 z_{x2} + \cdots + \beta_6 z_{x6} + \epsilon \tag{2}$$

式中: β_i 为标准化回归系数,表示自变量对因变量的直接影响强度(如 $\beta_1 = 0.68$ 表示降雨量每增加 1 个标准差,渗流面积增加 0.68 个标准差)。

最后将标准化系数的绝对值归一化,通过 R^2

评估模型的解释力。检查方差膨胀因子(VIF)值,判断是否存在多重共线性情况,若 $VIF > 10$,表明存在多重共线性,表明变量间相关性极高。研究将采用相对权重分析法计算其贡献比例。

2 结果

2.1 降雨驱动下的渗流机制

基于 ImageJ 可视化的石窟佛龕裂隙渗水的时空演化规律如图 4 所示,图 4(a)呈现了降雨事件发生后,从出现渗水现象至渗水结束的 4 张典型时刻图,分别为渗水起始(A)、首次峰值(B)、中期异常点(C)和渗水结束(D)4 部分。

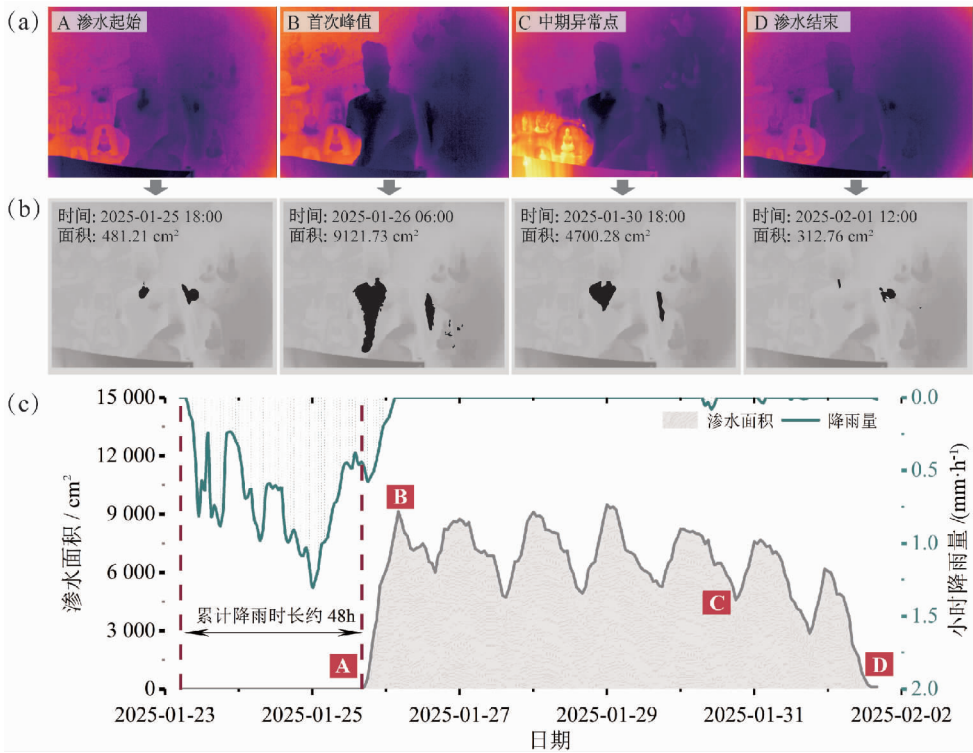


图 4 基于 ImageJ 可视化的石窟渗水图与降水全周期的渗水面积变化图
Fig. 4 Visualization of the cave seepage water map based on ImageJ and the variation chart of seepage area throughout the precipitation cycle

渗水区域表现出明显的空间异质性〔见图 4 (b)],初始渗水点呈点状萌发(如 2025 年 1 月 25 日 18:00,渗流面积仅 481.21 cm²)。随着时间的推移,渗流向周围扩散,形成带状或片状分布,并在 2025 年 1 月 26 日 6:00 时,达到首次峰值 9 121.73 cm²;经历周期循环后,在 2025 年 1 月 30 日 18:00 时,渗流面积达到 4 700.28 cm²,约 40 h 后,渗流面积衰减至 312.76 cm² 直至消失。从图 4(b)中可以发现,渗水区域从局部点源逐步

扩展至大面积覆盖,路径清晰可见,符合“点状—带状—片状”的扩散模式。此外,渗水路径主要集中在图像的中部,这表明岩体内部可以存在优势渗流通道。同时,这种演化也揭示了水分通过裂隙网络的多路径渗透特性,且受岩体裂隙连通度和渗透性的空间差异影响。降雨量与渗水面积的关系如图 4(c) 所示,降雨量(绿色区域)集中爆发于 1 月 23—25 日,累计达 40.16 mm,呈多峰形态,最大单小时降雨强度显著;渗水面积(浅灰

色区域)自 1 月 25 日滞后启动,呈现周期性波动,渗流面积迅速攀升至 $8\,000\text{ cm}^2$ 以上,并呈现多峰波动,峰值逐渐衰减至 $6\,000\text{ cm}^2$ 以下,整体呈现振幅递减趋势。此外,降雨呈快速衰减模式,1 月 25 日后接近零值,符合典型短时强降雨特征。裂隙渗水滞后响应后形成阻尼振荡曲线,初期(1 月 25—27 日)斜率陡增,峰值间隔约 24 h,渗水面积在夜间活跃期(如 2025 年 1 月 26 日 00:00,渗水面积达到 $6\,129.45\text{ cm}^2$) 与日间抑制期(如 2025 年 1 月 26 日 12:00,渗水面积增至 $7\,490.21\text{ cm}^2$) 交替出现,峰值与谷值间隔约 12 h,这种波动源于夜间岩体表面温度下降导致的冷凝作用增强,与日间太阳辐射驱动的蒸发效应形成对抗性周期循环。冷凝作用促使水汽在裂隙中积聚并沿毛细通道渗透,而日间蒸发加速水分流失,导致岩体表面

反复经历干湿交替,进而加速石质文物的风化过程。

进一步观察发现,后期振幅衰减率每周期约 15 %,说明系统存在能量耗散机制。渗流启动延迟 48 h(降雨峰值至渗流初现),符合多孔介质瞬态渗流理论,这表明滞后时间受裂隙网络连通度与岩体性质双重控制。渗流前锋在差异性渗透带(如岩体内部裂隙密集区与致密基岩交界处)发生分流-汇聚作用,导致渗水面积周期性涨落。降雨停止后,岩体内部形成非稳态渗流场,水分通过毛细上升与重力排水竞争机制再平衡,引发渗流振荡。

2.2 裂隙渗流的时空演化特征

降雨驱动下裂隙渗流过程中的时空演化特征如图 5 所示。

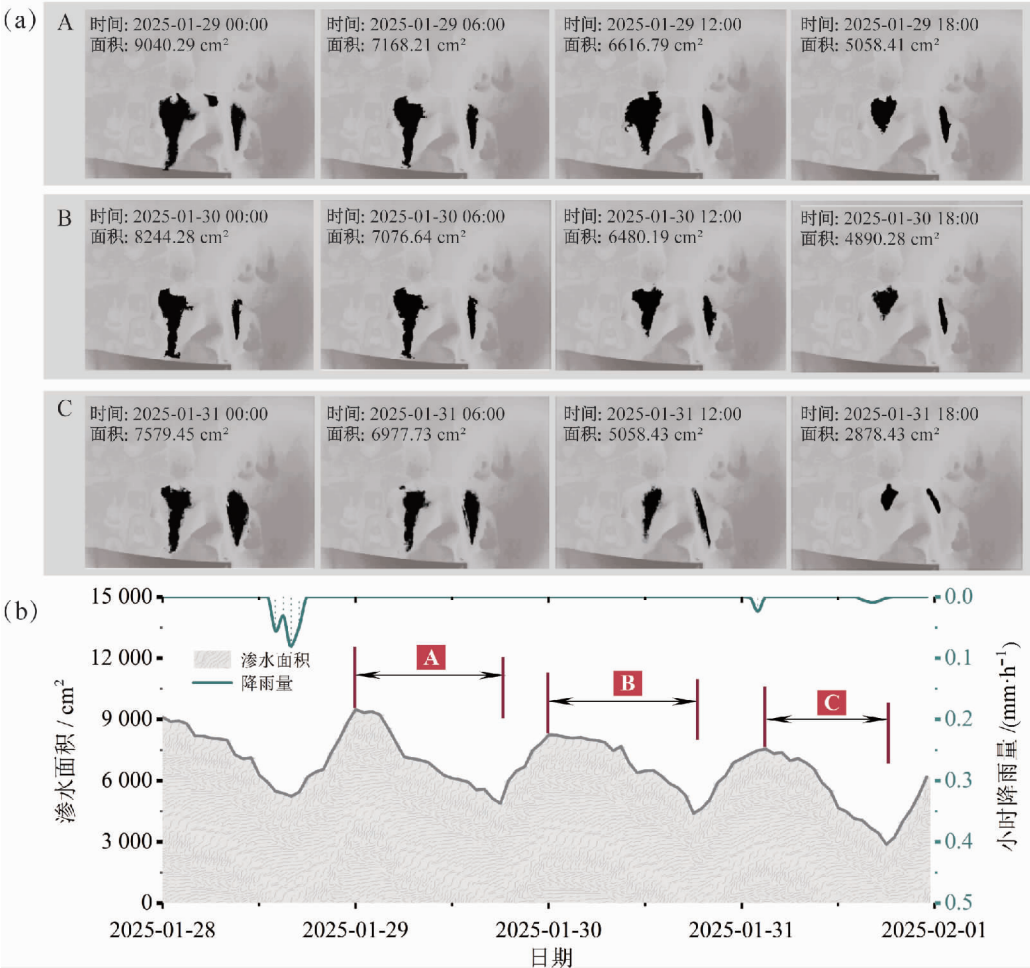


图 5 降雨驱动下裂隙渗流过程中的时空演化特征图

Fig. 5 The spatio-temporal evolution of fracture seepage processes driven by rainfall

图 5(a)可视化的石窟渗水时空演化图显示了 2025 年 1 月 29 日 00:00 至 2025 年 1 月 31 日 00:00 三日每隔 6 h 的渗水图像,分别对应图 5

(b) 的 A、B 和 C 部分。整体来看,龙门石窟的渗流面积呈现“先随降雨陡增、随后阶梯式衰减”的规律:1 月 29 日 00:00 渗流面积最高,达 $9\,040.29$

cm², 对应前一日降雨峰值; 之后每 6 h 依次降至 7 168. 21, 6 616. 79, 5 058. 41 cm², 降幅约 20% ~ 8%, 衰减逐渐趋缓。30 日 00:00 夜间受冷凝水补给影响, 面积仍高达 8 244. 28cm², 随后继续递减为 7 076. 64, 6 480. 19, 4 890. 28 cm², 幅度与首日相近。31 日 00:00 进一步降至 7 579. 45 cm², 但当日 12:00 起出现“加速衰减”现象, 即 12:00 为 5 058. 43 cm², 18:00 已低至 2 878. 43 cm², 日降幅超过 60%, 说明石窟岩体内部的蓄水体系进入快速排干阶段。这表明日间蒸发的增强, 促使夜间冷凝水补给, 形成次生渗流驱动, 揭示了降雨驱动下石窟渗流系统的非线性响应特性。

结合上述发现的规律, 将渗水面积与太阳辐射强度进行了时序表达[见图 6(d)]。图 6(d) 通过双纵轴对比了 2025 年 1 月 25 日至 2 月 2 日石窟表面渗水面积与太阳辐射强度的动态关系。由此可以发现, 逐日的太阳辐射强度峰值对应渗水面积变化的谷值, 值得注意的是, 渗水面积变化的

谷值较太阳辐射强度的峰值延迟约 3 h[见图 6(d) 中灰色部分], 这种延迟性源于日间辐射热驱动蒸发与夜间湿度回升的交替作用。随着太阳辐射强度的增强, 渗水面积逐渐递减, 这表明, 在降雨事件结束后, 太阳辐射与渗水面积呈高强度相关。在此基础上, 对图 6(d) 灰色部分对应的实时图像进行了可视化, 分别对应间隔为 30 min 的可见光图像[见图 6(a)]、红外图像[见图 6(b)] 及裂隙渗水变化图[见图 6(c)]。由图 6 可以清晰地观察到: 从 16:00 开始, 窟内正壁佛龛开始受到太阳辐射的影响, 随着时间变化, 辐射在正壁佛龛的照射范围逐渐扩大; 约 1 h 后, 辐射面积与正壁渗水的部分区域发生融合, 此时岩体受辐射 - 渗水 - 盐分多场耦合作用; 约 1 h 后, 辐射强度逐渐缩减, 渗水面积逐渐扩张, 逐渐向肩部蔓延。此过程中, 受太阳辐射影响而产生反复的干湿循环现象, 是导致文物风化损伤的重要原因之一。

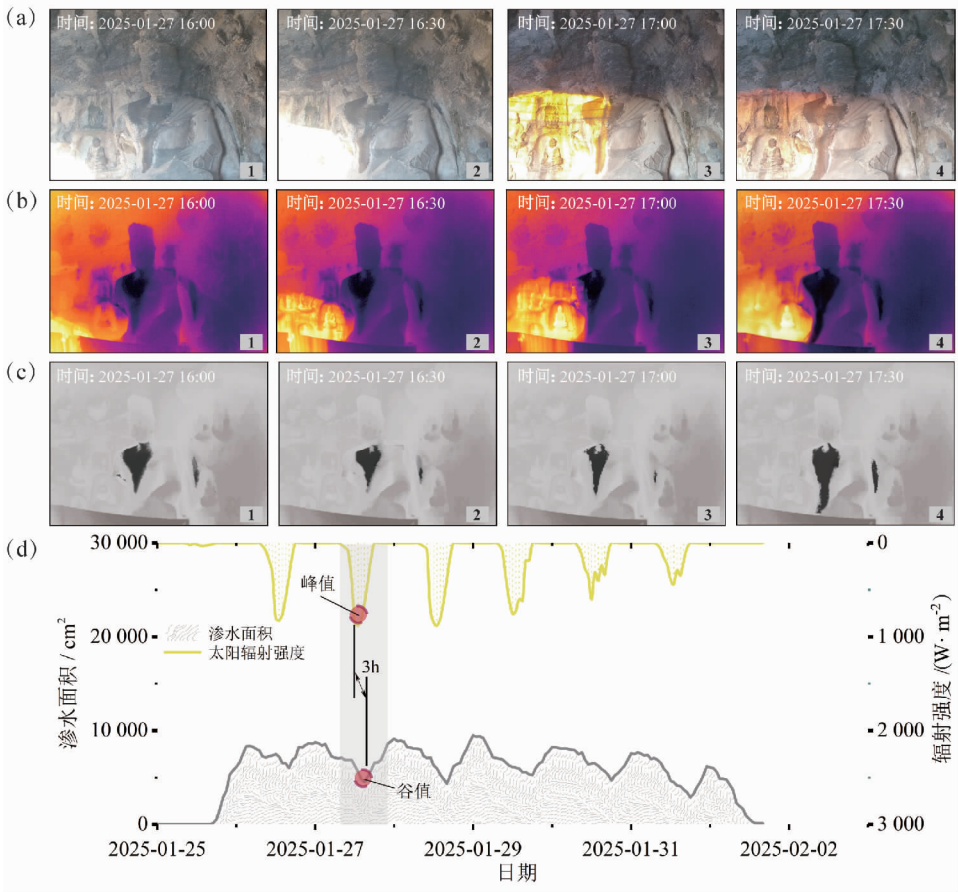


图 6 裂隙渗水时序变化与典型时刻对应关系图

Fig. 6 Time series variation of fracture seepage and corresponding relationships at typical moments

2.3 气候因子贡献度排序

采用标准化回归系数法对气候因子进行多元

回归分析, 得到 R^2 为 0. 71, 表明基于气候因子的回归模型能够解释约 71% 的渗水面积变异。剩

余约 29% 的未解释变异可能源于未纳入模型的结构因素,例如岩石材料孔隙率、裂隙发育程度及排水系统状态等。所有变量方差膨胀因子(VIF)值均 <3,排除多重共线性干扰。各因子贡献值如图 7 所示,从高到低依次为:降雨量(35.3%)、空气温度(27.8%)、太阳辐射(17.9%)、相对湿度(12.2%)、北向风速(4%)和南向风速(2.9%)。这表明,降雨量与空气温度是主要控制因素。其中,日温差引起岩石热胀冷缩,扩展既有裂隙,同时,温度升高加速水分蒸发-干湿循环。由于擂鼓台北洞属半开敞石窟,部分区域受辐射直接影响,辐射热效应引发表面与内部温差应力,进而加速表层风化。风速贡献较低的原因可能是窟内微环境受地形遮挡影响较大,空气流动主要影响蒸发速率而非直接渗水。进一步分析表 2 发现,降水量与湿度表现出高强度负向影响且统计显著,暗示二者升高可能抑制渗水,这可能与测量位置或滞后效应有关。太阳辐射及风速分量虽标准化系数绝对值较低,但显著性极强($p < 0.001$),揭示风力驱动的水汽输送与辐射

引发的蒸发冷凝循环对微裂隙渗流存在精细调控。综上所述,降雨量、空气温度和太阳辐射是驱动石窟裂隙渗水的 3 大核心气候因子,共同揭示了液态水渗透、热应力破坏与辐射风化的耦合作用机制。

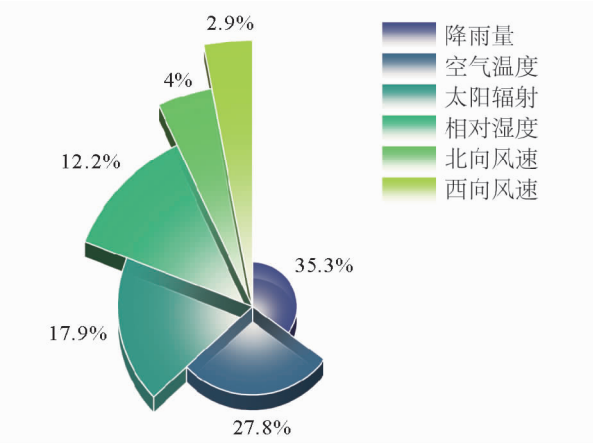


图 7 基于多元回归分析的各因子贡献度饼状图
Fig. 7 The contribution of each factor based on multiple regression analysis

表 2 多元回归模型系数
Tab. 2 Coefficients of multiple regression model

变量	非标准化系数	标准化系数	显著性	VIF
辐射	0. 01	1. 40%	0. 000	1. 864
温度	0. 34	- 34. 10%	0. 785	1. 459
相对湿度	0. 19	- 19. 40%	0. 002	2. 848
降水量	0. 55	- 55. 40%	0. 003	1. 926
北向风速	0. 26	33. 30%	0. 000	1. 53
南向风速	0. 18	18. 30%	0. 000	1. 48

2. 4 多因素相关性分析

为进一步分析石窟渗水的时空变化受环境驱动的关键因素,选择了降雨时间结束后,渗水现象开始至渗水现象结束的完整 4 天数据(2025 年 1 月 26 日至 2025 年 1 月 29 日),分别对应图 8(a)~(d)。结果显示,渗水面积与太阳辐射呈持续负相关,这是由于太阳辐射的增强加速了水分蒸发,减少了渗水面积。渗水面积与空气湿度呈强正相关,这说明空气中的湿度升高可能导致建筑材料吸水膨胀或排水效率降低,进而加剧渗水问

题,也不排除石窟内湿空气滞留凝结呈液态水,从而加剧渗水现象。渗水面积与温度显著负相关,高温可能通过蒸发减少渗水面积,也可能加剧热胀冷缩。渗水面积与南向风速呈正相关,风速可能通过影响水分的分布或蒸发速率间接影响渗水面积,但后期相关性减弱,还需结合石窟具体的地理空间位置等进行进一步分析。值得关注的是,降水量 28 日和 29 日无数据,26 日和 27 日的相关性微弱,说明短期内降水直接导致渗水现象产生,而岩体内长期积水或将引发结构问题。

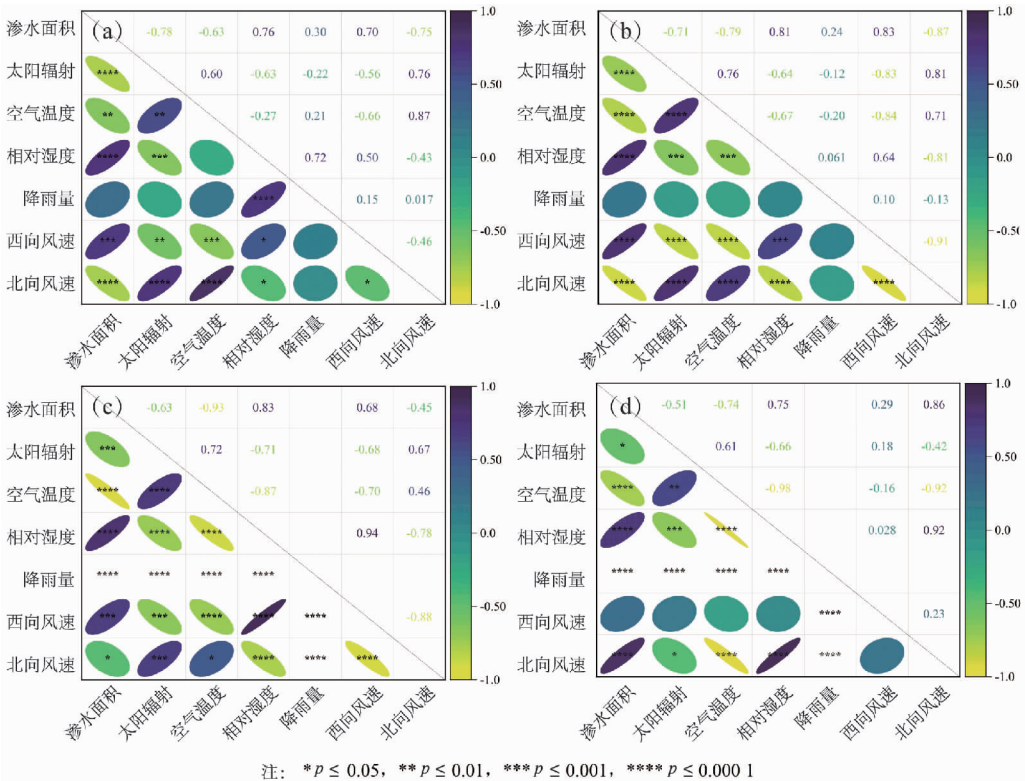


图 8 气候因子与渗水面积的相关性热图

Fig. 8 Heat map of the correlation between climatic factors and seepage area

为进一步分析各环境因子驱动下的渗流面积变化情况,本研究通过多项式拟合曲线和 95% 置信带、预测带对各组数据进行了可视化,结果如图 9 所示。其中,图 9(a) ~ (e) 分别为太阳辐射强度、空气温度、相对湿度、西向风速、东向风速与渗水面积的多元回归分析。4 天中,各因子与渗流面积的拟合曲线及可信区间均呈相同的变化趋势。其中,渗流面积受太阳辐射与温度协同主导,且温度突破 0℃ 时渗流呈指数下降;相对湿度在日间高辐射下与渗流呈正相关,说明低湿度加速蒸发、抑制渗流,夜间则微弱正相关,表明高湿度促使露水补给;北向风速超过 4 m/s 时显著抑制渗流,西向风速小于 -1 m/s,渗流面积显著下降,这是由于擂鼓台区域均为半开敞洞窟,且均面向西南侧,导致洞窟壁面受风速驱动,直接与窟外进行大量的空气对流。部分因子与变量的拟合模型置信带狭窄,但风速预测带较宽,提示其扰动敏感性。

3 讨论

3.1 降雨驱动下的渗流动态机制

本研究揭示了降雨事件与渗流响应间的非线性

性迟滞效应和振荡衰减特征,这与大足石刻研究中观测到的“雨停后渗流持续 35 天”的现象具有相似特征^[29]。此外,这种“滞后-突变”型渗流响应模式与龙门石窟的地质背景密切相关。擂鼓台区碳酸盐岩含水层具有低渗透性特征^[30],裂隙网络作为主要导水通道,其连通度直接影响渗流效率。对比大足石刻(砂岩质)^[31]、云冈石窟(砂岩质)的渗流特征,发现碳酸盐岩区渗流响应的时间更短(滞后 < 60 h),而砂岩区因孔隙结构复杂呈现显著滞后效应^[32]。进一步对比发现,龙门石窟的昼夜周期性振幅(日间蒸发引致面积缩减达 27%) 显著高于云冈石窟的同类研究^[33],这可能与伊河河谷特有的湿度梯度及硅质灰岩的毛细吸附特性有关。

需要指出的是,本研究聚焦于气候因子对渗流的主导作用,尚未充分考虑植被覆盖的潜在影响。与麦积山石窟(高植被覆盖的湿润区)^[34]、云冈石窟(干旱区植被稀疏)^[35]及乐山大佛(亚热带灌草混杂区)^[36]相比,龙门石窟伊河两岸具有独特的植被类型、覆盖度与根系发育特征。这些差异很可能通过冠层截留、蒸腾耗水及径流路径调节等方式^[37],影响水分在岩体中的运移效率,进而改变渗流响应的滞后时间与动态演化过

程^[38]。因此,在后续研究中,需将景观生态特征与植被动态纳入分析框架,重点揭示植被覆盖度、群落结构及根系空间分布对渗流的调控机制,尤

其应关注的是,植被-水分-岩体三者之间在变化环境下的非线性反馈关系。

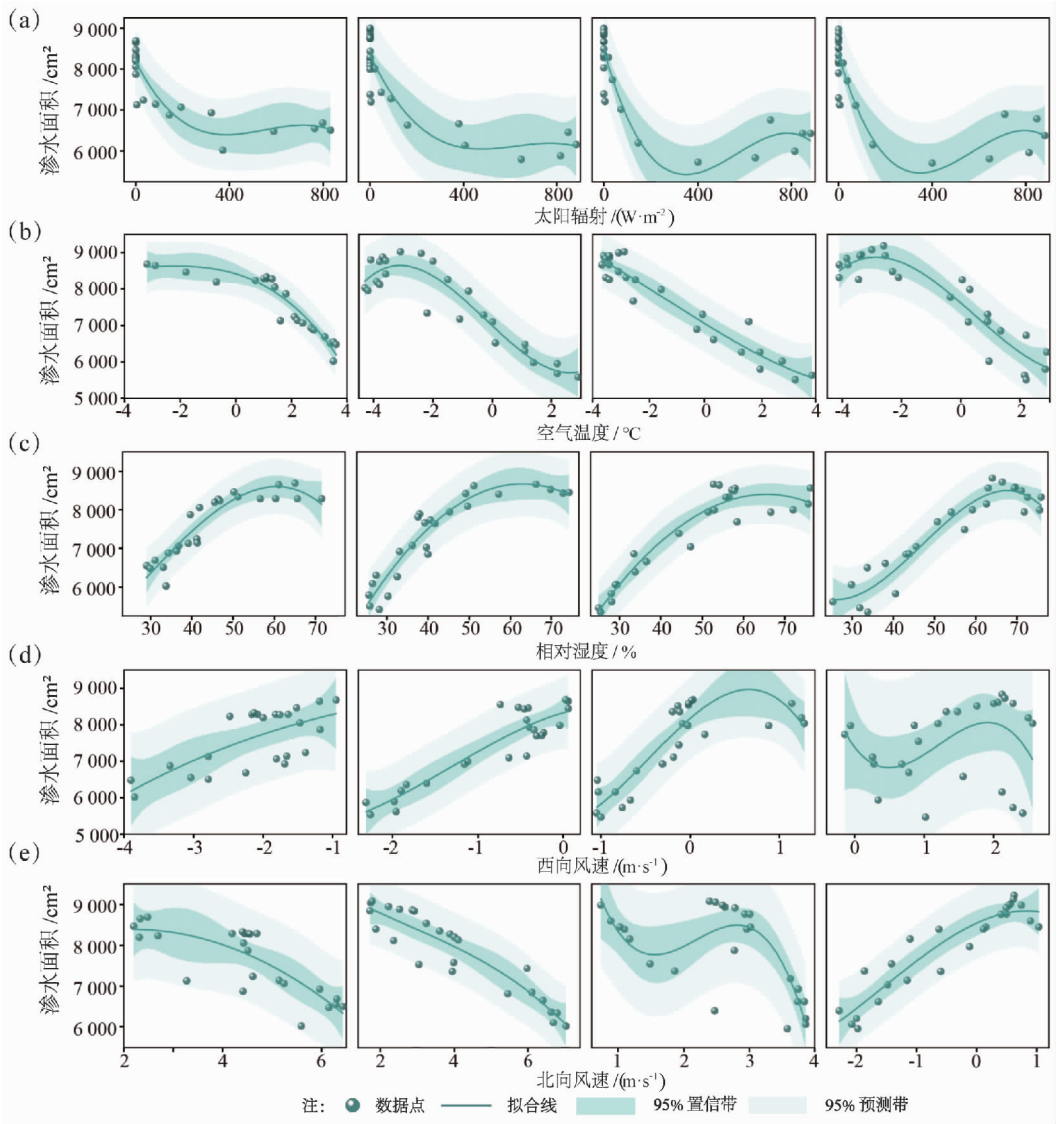


图 9 典型日气候因子与渗水面积的多元回归分析

Fig. 9 Multiple regression analysis of typical daily climatic factors and seepage area

值得注意的是,植被对水文过程的调节作用在未来气候情境下可能进一步发生改变^[39]。基于CMIP6气候模型预测^[40],预计2030年后,龙门山区年均降雨强度增加15%~20%,暴雨天数增长30%。以本研究建立的标准化回归模型测算($R^2=0.71$),降雨量增加20%,渗流面积将扩大42%。若将龙门石窟伊河两岸的植被覆盖、群落结构、根系分布等景观生态要素纳入模型,有望进一步提升模型预测的精度。

3.2 保护策略及未来发展方向

当前,基于本研究团队收集的若干红外与可见光图像研究发现,红外无损检测技术在识别渗

流区域方面潜力显著,但由于洞窟内无人造光源,夜间可见光图像无法有效与红外图像进行融合,加之夜间水汽对8~14 μm长波红外存在显著吸收与散射^[41],导致探测器接收的辐射能量衰减,进而对图像识别精度构成挑战。后续可考虑同步布设微型温湿度探头,实时获取测点的水汽密度,代入大气透射模型进行辐射定标。同时,建议在窟区补充人造光源,可实现夜间非接触式可见光数据采集,进而为全周期的图像融合与增强技术提供基础。对于本研究所捕捉到的渗水区域,可对其进行防水处理^[42],如沟渠排水、裂隙灌浆等^[43]。其次,可考虑利用微生物矿化修复技

术^[44],取自然脱落的石质样本,进行不同工况下的模拟研究,验证其在碳酸盐岩文物中的适用性及可靠性,进而对窟区的石质文物裂隙进行填充及残缺补配修复。

未来,基于本文的研究思路与分析方法,应进一步融入景观与地质等多学科视角,系统评估不同植被覆盖类型、群落结构及根系分布对水分运移的调控机制,并将这一生态水文调控因子纳入“气候-岩体-渗流”综合评价系统中,共同用于量化不同降雨强度与历时下的裂隙渗流动态响应过程。同时,以擂鼓台北洞为原型,建立集红外热像、微气象与裂隙三维激光扫描的传感器阵列,获取多源连续观测数据。在此基础上,整合点云与地质信息从而构建离散裂隙网络模型,并在COMSOL中耦合岩体属性、裂隙结构及环境变量,构建跨尺度渗流模拟体系,实现未来24~72h渗水时空演化的精准预测,为龙门石窟乃至半湿润区露天石质遗产的预防性保护提供系统性范式。

4 结论

1) 渗流时空响应特征:降雨驱动下,龙门石窟的裂隙渗流呈现显著的非线性迟滞效应,渗流响应滞后降雨峰值48h,并伴随振幅衰减率15%的周期振荡特征。渗流面积昼夜周期性变化显著,夜间因冷凝作用活跃,日间受太阳辐射抑制,渗流演化表现为“点状萌发—带状汇聚—片状扩散”。

2) 气候因子的贡献度:标准化回归分析表明,降雨量(贡献度35%)、空气温度(28%)、太阳辐射(18%)是驱动渗流的3大核心气候因子,累计解释71%的渗流面积变异。其中:太阳辐射对渗流的抑制作用存在3h相位延迟,主要源于岩体热惯性效应;湿度波动通过毛细吸附与蒸发冷凝循环加剧渗流,加速毛细孔隙破坏。

3) 多因素相关性分析:渗流面积受太阳辐射与温度协同主导,晴天工况下,主龛佛像受16h至18h太阳直射影响,且辐射强度每增加100W/m²,渗水面积减少15%~20%,揭示了热辐射通过加速水分蒸发主导了日间渗流抑制机制;空气湿度与渗水面积呈显著正相关,表明高湿度环境通过毛细吸附和冷凝作用加剧了渗流风险;北风与西风对渗流变化有直接影响,当北向风速超过4m/s、西向风速小于-1m/s时,蒸发显著增

强,从而加速岩体风化。

参考文献

[1] 王金华,陈嘉琦.我国石窟寺保护现状及发展探析[J].东南文化,2018(1):6-14,127-128.
WANG J H, CHEN J Q. Current status and future development of cave temples protection in China[J]. Southeast Culture, 2018(1):6-14,127-128.

[2] 雷玉华,范元元.石窟寺保护利用与中华民族共同体学科建设[J].大足石刻研究,2024(1):36-47.
LEI Y H, FAN Y Y. On conservation and use of cave temples and disciplinary construction of a community for the Chinese nation[J]. Studies in Dazu Rock Carvings, 2024(1):36-47.

[3] 中华人民共和国中央人民政府网.《国务院办公厅关于加强石窟寺保护利用工作的指导意见》(国办发〔2020〕41号)[EB/OL].[2020-11-04][2020-12-20] http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/04/content_5557313.htm.

[4] 李黎,陈卫昌,刘建辉,等.石窟寺岩体稳定性预测与加固关键问题[J].石窟与土遗址保护研究,2022,1(1):28-38.
LI L, CHEN W C, LIU J H, et al. Critical issues in grotto stability predication and its conservation technology[J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2022, 1(1):28-38.

[5] 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 J Z, ZHENG Y, ZHANG Y, 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.

[6] WU H, XIE Q, HE Y, et al. In-situ monitoring of changes in temperature and microstrain during the chemical corrosion of stone cultural relics[J]. Heritage Science, 2024, 12(1):1-13.

[7] 王金华,陈嘉琦,王乐乐,等.我国石窟寺病害及其类型研究[J].东南文化,2022(4):25-32.
WANG J H, CHEN J Q, WANG L L, et al. Deterioration patterns of grotto temples in China[J]. Southeast Culture, 2022(4):25-32.

[8] 张虎元,杨盛清,孙博,等.石质文物盐害类型与蒸发速率的关系研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(增刊2):3284-3294.
ZHANG H Y, YANG S Q, SUN B, et al. Research on the relationship between salt damage types and evaporation rate of stone relics[J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40 (Z2): 3284-3294.
- [9] ZHANG D, YAN Z, NI P, et al. Monitoring and analysis of heritage inner surface temperatures using infrared thermal imaging and interpretable machine learning [J]. Building and Environment, 2026: 114404.
- [10] 孙满利, 刘璇清, 曹张喆, 等. 甘肃砂岩石窟浅表层风化区域特征研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 333-343.
- SUN M L, LIU X Q, CAO Z Z, et al. The regional characteristics of surface weathering of sandstone grottoes in Gansu Province[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 333-343.
- [11] 王彦武, 韩增阳, 郭青林, 等. 甘肃庆阳北石窟寺水环境特征研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 360-369.
- WANG Y W, HAN Z Y, GUO Q L, et al. Research on the characteristics of water environment in Beishiku Temple, Qingyang City, Gansu Province[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 360-369.
- [12] YANG X, ZHOU B, XU Y, et al. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38: 817-830.
- [13] 李向东, 吴崇可. 强降雨环境下文物受灾情况调查评估及预防性保护措施——以河南“720”特大暴雨灾害为例[J]. 中国文化遗产, 2023(1): 91-98.
- LI X D, WU C K. Investigation and assessment of the damage condition to cultural heritage under heavy rainfall environment and protection measures: A case study of the “720” rainstorm disaster in Henan Province[J]. China Cultural Heritage, 2023(1): 91-98.
- [14] 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.
- [15] 马朝龙. 龙门石窟擂鼓台南洞抢险支撑保护研究[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2022, 1(3): 34-39.
- MA C L. A study on the emergency support system for the south cave of Leigutai in the Longmen Grottoes [J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2022, 1(3): 34-39.
- [16] 范子龙, 卫婉英, 刘轶. 龙门石窟奉先寺水害治理研究[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2024, 3(1): 26-37.
- FAN Z L, WEI W Y, LIU Y. Research on water damage control at Fengxian Temple in the Longmen Grottoes [J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2024, 3(1): 26-37.
- [17] 张彦洪, 柴军瑞. 岩体离散裂隙网络渗流应力耦合分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(2): 253-262.
- ZHANG Y H, CHAI J R. Stress-fluid coupling analysis in fractured rock mass with the theory of discrete fracture networks [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2): 253-262.
- [18] 刘鸿, 裴强强, 郭青林, 等. 北石窟寺平顶窟顶板裂隙灌浆黏接材料性能研究[J]. 岩石力学与工程报, 2023, 42(增刊2): 4028-4044.
- LIU H, PEI Q Q, GUO Q L, et al. Research on the properties of grouting bonding materials for cracking of roof rock mass of the flat top cave of North Grottoes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Z2): 4028-4044.
- [19] 袁伟, 阚艳伶, 曾开帅. 安岳毗卢洞石窟水害成因分析[J]. 地下水, 2022, 44(3): 45-47.
- YUAN W, KAN Y L, ZENG K S. Analysis on causes of water damage in Pulu Cave Grottoes in Anyue [J]. Ground Water, 2022, 44(3): 45-47.
- [20] 刘祥友, 翟国林, 方云, 等. 龙门石窟岩体裂隙防渗注浆机制及参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 3941-3947.
- LIU X Y, ZHAI G L, FANG Y. et al. Impermeable grouting mechanism and parameter analysis of fracture rock in Longmen Grottoes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 3941-3947.
- [21] 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 J, XU J M, GONG M Q, 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.
- [22] 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 C, JIANG X W, YAN H B, 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.
- [23] 周康, 张秉坚, 王丽雅, 等. 南方多雨区域石窟寺防

- 渗效果评价研究——以飞来峰造像二期保护工程为例[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(5): 14-25.
- ZHOU K, ZHANG B J, WANG L Y, et al. Evaluation study of seepage-control effects on grotto temples in rainy areas of southern China: A case study of the second-stage conservation project for Feilaifeng statues [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(5): 14-25.
- [24] 张铎, 闫增峰, 岳英俊, 等. 红外热成像技术在龙门石窟石质文物监测中的应用与分析[J]. 干旱区资源与环境, 2025, 39(5): 194-208.
- ZHANG D, YAN Z F, YUE Y J, et al. Application and analysis of infrared thermal imaging technology in monitoring stone cultural relics in Longmen Grottoes [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, 39(5): 194-208.
- [25] 袁逸齐, 兰恒星, 刘世杰, 等. 砂岩石窟热诱导裂纹损伤时空特征与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2530-2542.
- YUAN Y Q, LAN H X, LIU S J, et al. Spatial-temporal features of thermal induced crack damage in sandstone grottoes [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2530-2542.
- [26] 焦建辉. 龙门东山擂鼓台佛足迹图像碑补正[J]. 故宫博物院院刊, 2025(3): 78-91, 148.
- JIAO J H. A more study of the stele engraved with buddha's footprint at Leigutai site, East Hill in Longmen Grottoes [J]. *Palace Museum Journal*, 2025(3): 78-91, 148.
- [27] LOBELL D B, FIELD C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming [J]. *Environmental research letters*, 2007, 2(1): 014002.
- [28] HE L, GUO J, YANG W, et al. Multifaceted responses of vegetation to average and extreme climate change over global drylands [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159942.
- [29] 马嘉程, 崔学凯, 王呈意, 等. 大足石刻裂隙渗流路径模拟研究[J]. 水利规划与设计, 2024(11): 45-52.
- MA J C, CUI X K, WANG C Y, et al. Simulation study on seepage pathways in cracks of the Dazu Rock Carvings [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2024(11): 45-52.
- [30] 高东亮, 范子龙, 李心坚, 等. 用羧甲基纤维素封护法加固龙门石窟擂鼓台南洞一尊宝冠佛像的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2008, 20(1): 42-45.
- GAO D L, FAN Z L, LI X J, et al. The use of carboxymethyl cellulose glue for the protection and consolidation of a buddhist statue in the southern cave of Leigutai of the Longmen Grottoes [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2008, 20(1): 42-45.
- [31] 崔学凯. 大足石刻裂隙渗水机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [32] 唐智亮. 固结灌浆在保护云冈石窟石质文物遗址的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [33] 武晋文, 陈淑萍. 升温 and 降温对无约束花岗岩热破裂的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 108-115.
- WU J W, CHEN S P. Effect of heating and cooling on thermal cracking of granite under unconstrained conditions [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(1): 108-115.
- [34] 陈利云, 王弋博. 麦积山草地植物群落物种多样性及结构相似性特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 148-152.
- CHEN L Y, WANG Y B. Species diversity, community structure similarity of the grassland communities, Maiji Mountain [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(1): 148-152.
- [35] ZHANG G W, ZENG G, YANG X Y, et al. Future changes in extreme high temperature over China at 1.5 °C ~ 5 °C global warming based on CMIP6 simulations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(2): 253-267.
- [36] 吴福佳, 孙博, 陈旭黎, 等. 乐山大佛佛体表面植被空间异质性[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(4): 979-984.
- WU F J, SUN B, CHEN X L, et al. Spatial heterogeneity analysis of the vegetation on the surface of the Leshan Giant Buddha [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(4): 979-984.
- [37] 刘逸莹, 高东亮, 马朝龙, 等. 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[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(5): 787-796.
- LIU Y K, GAO D L, MA C L, et al. Monitoring and assessment of the microclimate of Fengxian Temple in Longmen Grottoes based on time series analysis [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(5): 787-796.
- [38] 乔莹. 植被覆盖条件下云冈石窟表层水分运移特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023.
- [39] XU H, CHEN H, WANG H. Future changes in precipitation extremes across China based on CMIP6 models [J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42

(1): 635-651.

[40] DING Y, JIANG C, ZHOU Z, et al. Evaluation of precipitation and its time series components in CMIP6 over the Yellow River Basin[J]. Climate Dynamics, 2023, 60(3): 1203-1223.

[41] 李云红,曹彬,苏雪平,等. 红外阵列成像精确测温及温度补偿[J]. 红外与激光工程,2024,53(10): 117-126.

LI Y H, CAO B, SU X P, et al. Infrared array imaging for precise temperature measurement and temperature compensation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(10): 117-126.

[42] 张兵峰. 石窟保护技术概论[M]. 北京:文物出版社,2017:185.

[43] 赵莽,严绍军,何凯,等. 龙门石窟裂隙防渗灌浆新材料试验研究[J]. 长江科学院院报,2016,33(6): 115-123,128.

ZHAO M, YAN S J, HE K, et al. Experimental study on novel grouting materials for fracture seepage of the Longmen Grottoes[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 115-123, 128.

[44] 刘汉龙. 生物建造体系与展望[J]. 土木与环境工程学报,2024,46(4):1-22.

LIU H L. Biogenic construction: System and perspectives[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(4): 1-22.

(编辑 雷雁林)