

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.10.001

## 石窟岩体水致劣化机理与防治研究进展

刁汉婷<sup>1</sup>, 仇文岗<sup>1,2</sup>, 王鲁琦<sup>1,2</sup>, 王 硕<sup>1</sup>, 王成龙<sup>1,2,3</sup>, 张凯强<sup>1</sup>, 林思成<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 3. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 401121)

**摘要:**我国石窟的病害类型繁多,由水诱发的石窟病害是石窟保护中的核心问题。为了更好地开展石窟保护工作,对石窟中与水相关的问题进行了详细地梳理。首先,进行了石窟水源分析,水主要来自降雨、地下水和凝结水。在此基础上梳理了由水直接或间接导致的各类石窟病害问题和岩体劣化机理,病害类型包括开裂失稳病害、水侵蚀病害、风化病害、生物病害,水作为中间介质或最终介质引起石窟岩体的材料劣化与结构失稳。最后,整理了目前石窟保护工作中针对雨水、地下水、凝结水的防治措施。全面综合梳理文物保护大背景下石窟中与水相关的问题,有助于提高石窟的保护效果,为石窟保护工作提供理论参考。

**关键词:**石窟;水岩作用;劣化机理;防治措施;文物保护

中图分类号:K879.2

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)10-001-24

## Research progress on mechanisms and prevention of water-induced deterioration of grotto rock mass in China

DIAO Hanting<sup>1</sup>, ZHANG Wengang<sup>1,2</sup>, WANG Luqi<sup>1,2</sup>, WANG Shuo<sup>1</sup>, WANG Chenglong<sup>1,2,3</sup>,  
ZHANG Kaiqiang<sup>1</sup>, LIN Sicheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China; 3. Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chongqing 401121, P. R. China)

**Abstract:** Grottoes in China face a wide range of diseases, with water-induced deterioration being a key issue in their conservation. In order to better carry out the grotto protection work, the water-related problems in the grottoes have been sorted out in detail. This study identifies the primary water sources in grottoes, including rainfall, groundwater and condensate, and explores the water-induced diseases such as cracking, water erosion, weathering, biological damage, and material degradation and structural destabilization of grotto rocks caused by water as an intermediate or final medium. Finally, preventive measures against rainwater, groundwater and condensate are outlined to improve conservation efforts and provide theoretical references for grotto protection.

**Keywords:** grotto; water-rock interaction; deterioration mechanisms; prevention and control measures; heritage conservation

收稿日期:2024-01-12

基金项目:重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2022NSCQ-LZX0001);大足石刻研究院科研资助项目(H20220387);国家自然科学基金(面上)项目(52478325,52478326)。

Supported by Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2022NSCQ-LZX0001), the Academy of Dazu Rock Carvings Foundation (H20220387), and National Natural Science Foundation of China(52478325, 52478326).

作者简介:刁汉婷(1999—),女,硕士研究生,主要从事文物保护研究,(E-mail) 202216021007@stu.cqu.edu.cn。

通信作者:仇文岗,男,教授,博士生导师,(E-mail) zhangwg@cqu.edu.cn。



目前,针对石窟中水害的劣化机理和防治措施已经有大量研究,但是非水害的石窟病害中,水的作用往往被忽略。为了响应和落实《“十四五”文物保护和科技创新规划》和《关于加强石窟寺保护利用工作的指导意见》,更好地指导石窟保护工作,笔者对石窟中与水相关的问题进行了全面的梳理。首先,分析了石窟水源,水主要来自降雨、地下水和凝结水;其次,梳理了由水直接或间接导致的各类石窟病害问题和岩体劣化机理,病害类型包括开裂失稳病害、水侵蚀病害、风化病害、生物病害,水作为中介介质或最终介质引起石窟岩体的材料劣化与结构失稳;最后,整理了石窟保护工作中针对雨水、地下水、凝结水的防治措施,以期对石窟病害诊断和防治提供参考。

## 1 石窟水源分析

赋存于石窟的水种类丰富,成分复杂,来源广泛。按照其来源可以分为降雨、地下水、凝结水 3 类。这些水通过不同的途径、不同的形态渗入到石窟内部,以不同的速度持续地侵害石窟岩体,导致各种石窟病害频发,给石窟保护工作带来了挑战<sup>[9]</sup>。

### 1.1 降雨

在大气中形成的水凝结成云,然后以液态的形式从云中落至地面的过程称为降雨。一般性降雨为石窟提供了所需要的水分,维持了石窟内部的湿度稳定。但是,不稳定性降雨是石窟内部病害的主要诱因。降雨有 2 种路径进入石窟内部。一是当降雨强度小于石窟上方岩石覆盖层的入渗能力时,雨水完全入渗<sup>[10]</sup>,通过岩石间的孔隙、岩壁间的裂缝、石窟的自然通风等路径缓慢渗透进石窟内部。例如,云冈石窟山体地下水的主要补给来源就是大气降水入渗,夏季强降雨和春季积雪的融化,都可能产生显著的入渗补给作用<sup>[11]</sup>。其次,降雨会导致石窟内部热湿环境发生明显变化,而热湿环境的变化为细菌、藻类的生长和微生物的活动提供了有利条件,进而对石窟内岩体造成损害<sup>[12]</sup>。二是当降雨强度大于石窟上方岩石覆盖层的入渗能力的时候,就会产生地表径流<sup>[10]</sup>。流水一般在石窟外部或者内部经过,往往带有较高的速度和压力,尤其是在经过岩石裂隙、孔洞的时候,对石窟表面造成冲刷破坏。此外,降雨中的水分和溶解的气体可以与石窟岩体发生化学反应,导致石质材料溶解,长期的降雨作用会导致石窟壁面的损坏和腐蚀。在降雨比较集中的时期,北石窟寺岩体上覆黄土层会发生形变,进一步导致岩体劣化,诱发岩体失稳破坏<sup>[13]</sup>。

不同强度的降雨,诱发的石窟病害类型也不一样。汪东云等<sup>[14]</sup>在探究大足石刻宝顶山石窟岩体风化的影响因素时,总结了暴雨、中雨小雨、霪雨雾气 3 种不同强度的降雨对石窟岩体的作用方式,指出在强降雨情况下,雨水对岩壁产生比较大的作用力,使松动的岩粒和切割体脱落,沿着裂隙贯入的方向发生机械潜蚀;在中小雨的条件下,雨水与岩石内部的黏土矿物作用,岩石体积膨胀,在干燥后岩石体积收缩,在经历多次的干燥循环后,岩石产生大量微裂纹并逐渐形成空腔;霪雨雾气浸润岩石表面,诱发盐害或者生物病害。

降雨作为一种自然现象,无论是处于北方干燥地区还是南方潮湿区域的石窟,都不可避免地要遭受到雨水的侵害。特别是干燥地区的石窟,如果区域内发生相对集中且强度较大的降雨,对石窟保护工作是一次极大的挑战。2012 年,莫高窟所在的区域内发生了多次强降雨事件,历时短,但雨量大,崖顶坡面的砂砾层经雨水浸泡后软化,雨水渗入崖体岩层,部分洞窟出现渗水情况,洞窟微环境出现较大波动,激发洞窟岩体中的盐、水迁移,诱发深度恶化<sup>[15]</sup>。王彦武等<sup>[16]</sup>基于热红外成像调查北石窟降雨过程中雨水对崖壁的冲刷范围,发现北石窟崖面总面积的 59.4% 遭受着雨水的冲刷,这加速了北石窟崖体的风化。吴宝燕等<sup>[17]</sup>在调查云冈石窟水害时,发现云冈石窟所处的降雨集中区域,其石窟前缘受雨水冲刷,外壁雕刻遭受严重风化。降雨进入石窟内部有雨水入渗和地表径流 2 种方式,引发的石窟病害包括生物风化、物理风化和化学风化 3 种类型,如图 2 所示。石窟中出现病害的区域与降雨都有高度的关联,应当引起保护人员的注意。

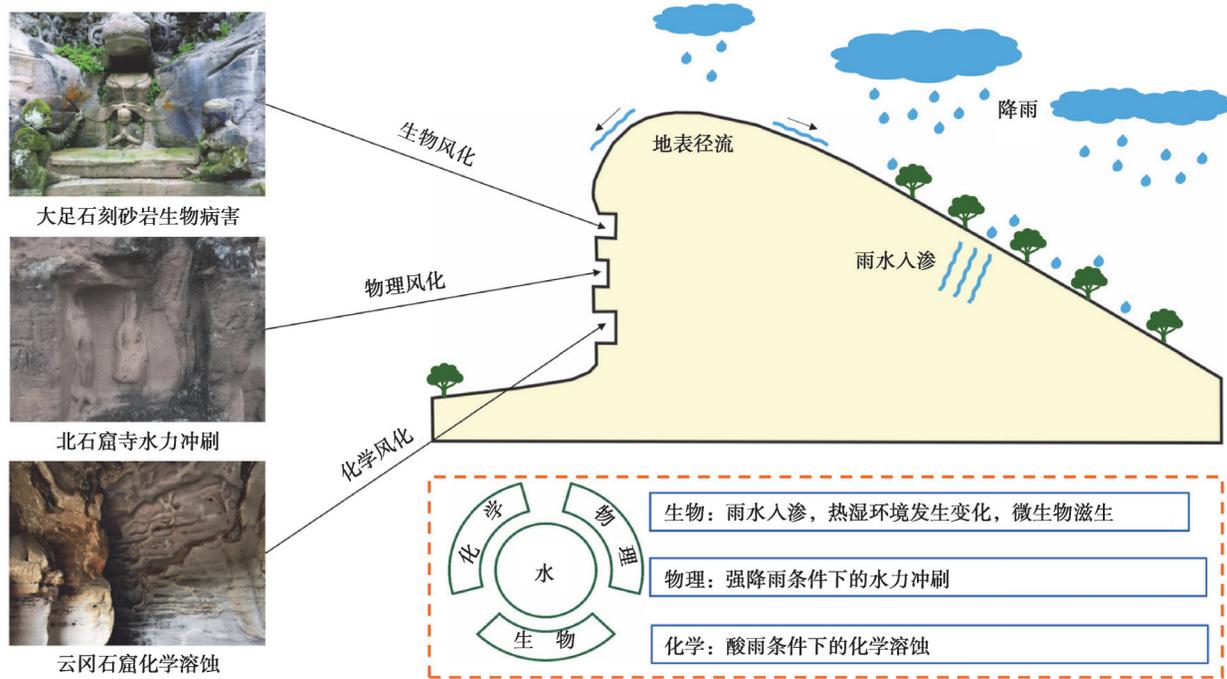
图2 降雨引发的石窟病害<sup>[16,18-19]</sup>

Fig. 2 Rainfall-induced grotto diseases

## 1.2 地下水

地下水是指存在于地表以下含水层、岩石裂隙或者孔隙中的水资源。石窟是一种人工挖掘的空间,通常建立在山脚或者山崖之中,处于地下水脉流经的位置,地下水是石窟中水分的重要来源。图3展示了地下水进入石窟内部2种主要方式和基本原理。地下水可以通过毛细上升和渗透作用进入石窟内部,二者都是通过岩石间的孔隙或者裂隙进入石窟,但是各自的原理又有所不同。岩石本身具有微小的孔隙和裂隙,是在漫长的地质构造中形成的,它们之间相互连接,具有一定的连通性,形成渗透网络。当水头差形成的时候,水就会从水头高的地方流向水头低的地方,水顺着岩石中的孔隙向下渗透,最终达到石窟内部。毛细现象是固体吸附力与液体表面张力共同作用、达到平衡的结果,岩石是由多种亲水性矿物组成的多孔介质,当水进入到岩石中的时候,岩石被润湿,水分子的表面张力和岩石的润湿性引起毛细力,水克服自身重力,在毛细力的驱动下进入石窟内部<sup>[20-21]</sup>。当水达到平衡状态时,停留的高度为

$$h = \frac{4T_s \cos\theta_v}{d\rho_w g}, \quad (1)$$

式中: $h$ 为毛细上升高度; $T_s$ 为水相表面张力; $\theta_v$ 为接触角; $d$ 为孔隙直径; $\rho_w$ 为水的密度。毛细水与冻融循环、干湿循环、可溶盐析出等多种破坏过程有着直接或间接的联系<sup>[22]</sup>。影响岩石毛细吸水能力的因素有很多,包括石窟内部温度、液体类型、孔径大小、孔隙数量和微观结构等<sup>[23-25]</sup>。毛细作用是水分子在分子引力的作用下通过岩石孔隙,而渗透作用是水在压力差作用下通过岩石孔隙。在实际情况中,地下水进入石窟内部是毛细上升与孔隙渗透共同作用。毛细作用使地下水通过微小通道上升,渗透则在更大的孔隙或裂隙中发挥作用,二者共同实现地下水进入石窟内部的过程。

地下水是石窟中水分的来源之一,查明水的来源,需要将气象、地质地貌、入渗条件等进行全面观测、详细分析<sup>[26]</sup>。Lu等<sup>[27]</sup>利用表面核磁共振方法和自然电位法2种无损探测方法探究金灯寺石窟渗水来源,探测结果表明,岩石裂隙渗水是金灯寺石窟渗水的主要源头之一。Li等<sup>[28]</sup>将莫高窟中的一个窟室完全封闭起来,测量窟室围岩的水蒸气含量,通过分析蒸发特征、围岩温度和湿度,确定了莫高窟中水分的主要来源是潜水。围岩的温度波动和地热力是水分蒸发的基本动力,在这2个因素的驱动下,潜水蒸发迁移,扩散到莫高窟的窟室中去。莫高窟重点保护区域属于地下水贫乏区,仅有的地下水赋存于上更新统玉门砾岩裂隙带和中更新统酒泉砾岩中,大泉河冲洪积扇的中下部地带普遍分布有地下潜水,地下水补给来源主要是附近流域地下

水的径流补给<sup>[29]</sup>。袁伟等<sup>[30]</sup>在研究安岳毗卢洞石窟的时候,发现石窟所处的地层中构造裂隙、风化裂隙与层面裂隙相互交错,构成了岩体渗流网络,创造了包气带水形成的良好条件。进入构造裂隙的包气带水一部分直接排泄,导致窟内湿度过高,剩下的排泄至石窟平台处。

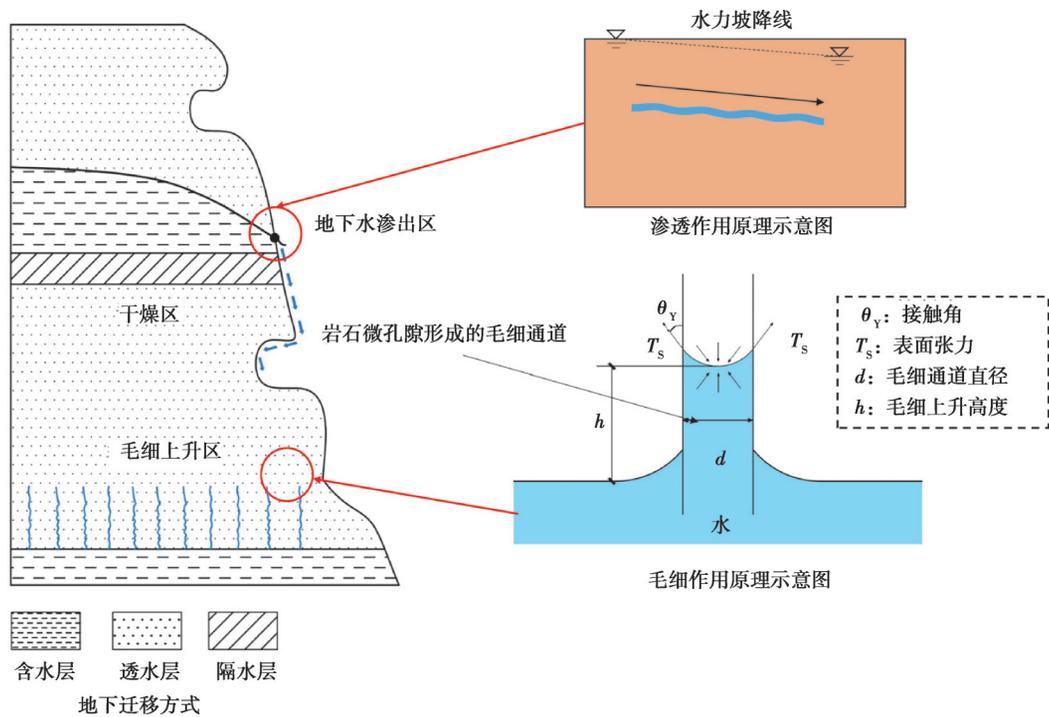


图 3 地下水迁移示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of groundwater migration

地下水的形成与地质条件、地表渗透性以及地下水循环等因素密切相关。地下水的迁移有渗透作用和毛细上升 2 种方式。针对石窟的保护和可持续利用,需要深入了解地下水的形成机理和水分迁移运动的规律,有效遏制石窟中病害的产生。

### 1.3 凝结水

石窟通常是封闭或者半封闭结构,不容易受到外部空气的直接影响,窟内与窟外有一定的温度差,窟内的湿度通常较高。这些环境因素为凝结水的形成提供了良好的条件。

Monteith<sup>[32]</sup>在 1965 年提出了凝结水理论,指出凝结是由于空气中的饱和水汽含量超过了某一表面的饱和水汽含量而发生的。当空气接触到相对较冷的表面时,水蒸气会凝结成液态水。物理学中的大气水分膜状凝结原理指出,当水汽遇到接触角小的低温壁面,会逐渐润湿壁面,并形成一层液膜,如图 4 所示<sup>[33]</sup>。比较石窟内墙壁的表面温度和露点温度,可以判断空气中的水汽是否发生了凝结。所谓露点温度,就是指水蒸气凝结的温度。当墙壁表面温度低于露点温度,水汽就会发生凝结。凝结水形成的 2 个必要因素是湿度和凝结核,大气中的水汽能在空气中的悬浮颗粒上凝结形成小水滴<sup>[34]</sup>,这种悬浮颗粒就是凝结核。如果缺少凝结核,即使空气中相对湿度很大,也不会发生凝结。石窟中相对湿度不会超过 100%,可以确认石窟中凝结水的形成与可溶性凝结核有关,一般来自于被风化的、附着于岩壁的粉尘<sup>[35]</sup>。水汽由气态变成液态成为凝结水对石窟进行破坏,而石窟中的水汽来源主要是空气和地下水。潮湿石窟内的空气在达到露点温度时,遇到冰冷的岩石成为

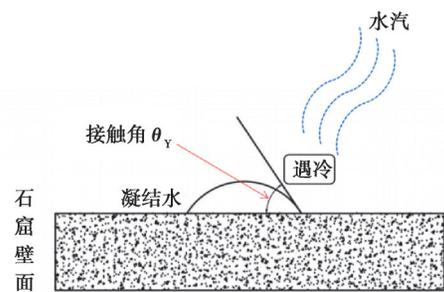


图 4 凝结水形成机理

Fig. 4 Mechanism of condensed water formation

潮湿石窟内的空气在达到露点温度时,遇到冰冷的岩石成为

凝结水。特别是在寒冷的冬季,石窟内相对湿度大、昼夜温差大,在这种环境中极易形成凝结水。还有一部分水汽赋存于岩石的包气带的裂隙和孔隙中,在地温场的作用下,蒸腾形成水汽扩散到石窟内部,在温度降低时形成凝结水<sup>[4]</sup>。岩石表面的凝结水会通过岩石裂隙或者孔隙渗入岩石中,当冬季降温时,这些存储在岩石内部的水结冰,产生冻胀破坏<sup>[36]</sup>。研究还发现,在凝结水出现比较频繁的区域,发生盐害的频率也会比较大<sup>[37]</sup>。水汽除了在岩石外部凝结,也可能在岩石内部凝结。Huang<sup>[38]</sup>确定了凝结水从气态变成液态的露点温度,随后采集了云冈石窟的砂岩作为样品进行验证实验,利用温度与相对湿度分析、电阻和湿度分析研究了水从气态转化为液态的过程,得出“当温度和湿度从岩石外部到内部降低的时候,凝结水就已经在岩石内部形成”的结论。如果仅仅只关注在岩石表面形成凝结水,忽略水汽在岩石内部一次又一次凝结,对石窟岩体是非常大的伤害。

季节变化、昼夜变化、降雨等自然环境的变化会对水汽凝结产生影响。李燕等<sup>[39]</sup>在研究麦积山石窟的凝结水形成机理的时候,根据监测数据发现只有夏、秋两季的环境条件可以促进凝结水的形成;而在分析昼夜变化时,指出一天中凝结水出现只有2个时间段,一个是气温升高使露点温度达到峰值导致其高于洞壁温度的下午;一个是温度降低导致洞壁温度低于露点温度的夜间。苏美亮等<sup>[40]</sup>利用红外热成像技术对大足石刻千手观音进行检测,根据检测结果发现千手观音春季的凝结水分布是最多的,冬季最少。方云等<sup>[41]</sup>在对龙门石窟潜溪寺的凝结水进行定量测试时,对比了早、中、晚3个时段的凝结水生成速率,指出上午的凝结水生成速率最大。马策<sup>[42]</sup>针对2020年8月云冈石窟的一次典型降雨,利用红外热成像技术对降雨前后100 h壁面的温度进行了监测,指出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,壁面出现凝结水。降雨期间空气温度骤降,洞窟内不再具备凝结水的形成条件,可以通过降低空气温度来避免凝结水的生成。因此,保护人员要根据环境的实际变化,采取针对性的措施,避免造成更大程度的伤害。

凝结病害是石质文物中的三大水害之一。凝结水存在于石窟岩体的内部与外部,其破坏的表现形式涵盖盐害、冻胀、溶蚀等多个方面。随着人们对凝结水危害的重视,凝结病害的研究也更深入。

## 2 石窟水致劣化机理

我国石窟种类繁多、规模庞大、分布广泛,不同的地域环境造就了不同的文化,也滋生了不同的石窟病害,需要一个规范体系来整合归纳石窟病害的类型<sup>[43]</sup>。水诱发的石窟病害类型包括开裂失稳病害、水侵蚀病害、风化病害、生物病害。在文物病害的形成过程中,水发挥的作用有大有小,需要根据具体的破坏过程进行分析。

### 2.1 开裂失稳病害

开裂失稳指的是石窟岩体、石窟围岩等由于外界环境的作用,导致固有的力学特性劣化,出现岩体开裂、变形乃至失稳崩落的破坏现象。石窟岩体开裂失稳会对石窟本体产生难以修复的毁灭性损害。

#### 2.1.1 软化作用

一些软岩在长期浸水后出现软化效应,导致岩石的强度变低,稳定性变差<sup>[44]</sup>。外力作用在石窟岩体上,裂缝在岩石内部扩张,岩体出现开裂现象,随时有坍塌的风险。岩石吸水软化的机理主要有2种。首先,在石窟中最常见的就是水与岩石成分发生化学反应,成岩矿物被溶解,使岩石强度降低。大足石刻中的北山石刻是在砂岩上雕凿而成,砂岩中含有大量的泥质物,例如,石英、钠长石等。当砂岩遇水软化后,形成易于失稳的软弱层,相邻的岩层失去依靠,导致岩体发生位移,面临着坍塌的风险<sup>[45]</sup>。另外一种机理是应力垮塌作用。Hadizadeh<sup>[46]</sup>在探究砂岩遇水弱化的问题时,指出砂岩中裂纹尖端处于拉伸状态,但强度较大的Si-O-Si键被强度较弱的Si-OH-OH-Si键代替,诱发裂纹拓展。黄宏伟等<sup>[47]</sup>分析了不含蒙脱石的泥岩遇水软化过程中,微观结构随时间变化的动态特征,指出水破坏了颗粒间的连接,进入层状颗粒之间,导致大量不均匀内应力和微隙在岩石内部产生。张娜<sup>[48]</sup>认为岩石吸水软化的根本原因在于黏土矿物的微观结构发生破坏,而非水与黏土矿物发生反应导致其形态变化。总而言之,是岩石内部的宏观形态或者微观结构的改变导致岩石力学性质发生了改变,引发岩体失稳。

### 2.1.2 冻胀作用

对于北方石窟来说,冻融交替引起的岩体破坏是一种常见的病害。云冈石窟坐落在山西省北部,冬季最低气温可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属于典型的高寒地区,其遭受循环冻融而引起的破坏较为严重<sup>[49]</sup>。大量研究表明,岩石中的小孔隙不断拓展连通形成大孔隙,导致岩石的抗拉强度、波速等物理力学性质在频繁的冻融循环中发生劣化<sup>[50-54]</sup>。冻融交替作用对石窟的伤害主要体现在岩石的强度降低之后,石窟更容易遭受破坏,岩体表层出现开裂、剥落现象。关于岩石的冻融损伤机理观点不一,贾海梁<sup>[55]</sup>认为岩石损伤与水主要有3种相互作用。1) 体积膨胀作用:水-冰相变过程中体积大约膨胀了 $9.05\%$ <sup>[56]</sup>,受到周围刚性空间的限制,对孔隙壁施加了压力,当压力超过了岩石的抗拉强度时,岩石就会开裂。2) 冰楔作用:岩石是一种天然的多孔材料,水分可以储存在岩石表面和内部<sup>[57]</sup>。孔隙水在结冰的过程中不能立即冻结并且还处于迁移的过程中,这就导致冰晶体持续生长,造成裂缝逐渐扩大<sup>[58]</sup>。3) 静水压理论:结冰过程中,未冻水被冰驱赶进岩石内部,如果冻结速率足够快或者岩石的渗透系数较低,未冻水就会对岩石产生压力,引起岩石的损伤<sup>[59]</sup>。岩石的冻融损伤是多种因素耦合的结果,分为外因和内因<sup>[60]</sup>。为了探究影响石窟岩体冻融损坏的因素,许多学者进行了岩石冻融循环的模拟实验。杨鸿锐等<sup>[61]</sup>对麦积山石窟砂砾岩进行了冻融循环模拟实验,设置了3个温度区间,指出温度对岩石冻融损坏起到了关键性作用,温度越低,岩石劣化越剧烈。Sun等<sup>[62]</sup>对太原龙山石窟的砂岩进行了冻融循环模拟实验,设置了不同的循环次数,随着循环次数的增加,岩样的孔隙度也随之增大,岩石损伤程度增大。可见长期的低温环境会对石窟产生持续性的伤害。刘向峰等<sup>[63]</sup>对比了云冈石窟砂岩在完整与缺陷状态下的冻融损伤程度,完整岩样在经历冻融循环后的抗压强度明显要比缺陷的岩样的抗压强度高。张景科等<sup>[64]</sup>也指出在冻融循环过程中裂隙催化了北石窟砂岩的劣化,裂隙的拓展是岩样孔隙率上升的关键因素。冻融循环的发生需要低温环境,因而冻胀破坏并不是我国石窟的一个共性问题,但是应当引起文物保护工作者的注意。

综上所述,软化作用导致岩体自身的力学性质发生改变,强度降低;冻胀作用是在岩体内部产生裂缝,当裂缝发育到一定程度时,岩体失稳变形,如图5所示。岩体分离体的脱落不仅对文物本体产生了不可逆转的损害,还会对游客的生命安全产生威胁。因而,有必要采取措施对已经出现失稳预兆的岩体进行加固,常用的方式是锚杆加固和裂隙灌浆。同时,也要从源头上解决问题,密切关注石窟中水的存在和迁移。

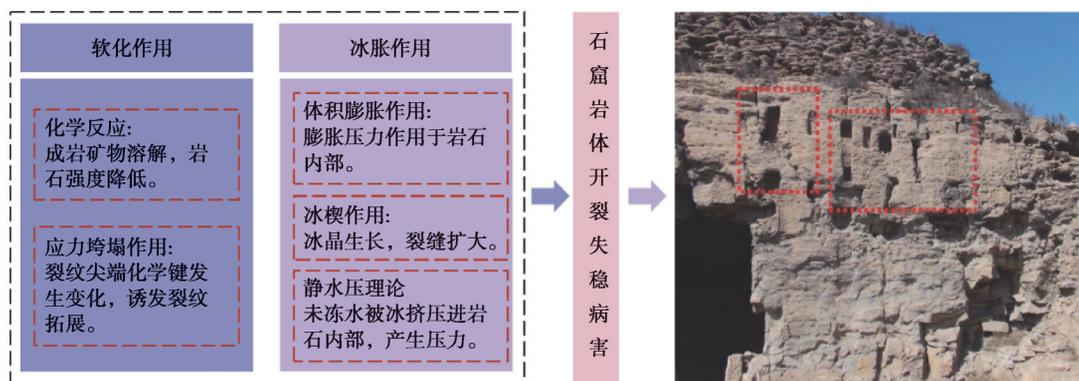
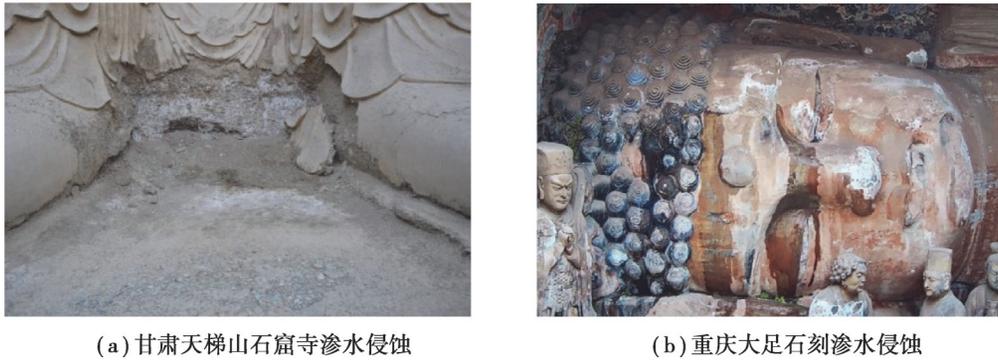


图5 石窟岩体开裂失稳劣化机理示意图<sup>[65]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of degradation mechanism of the cracking and destabilization of grotto rock mass

### 2.2 水侵蚀病害

国际古迹遗址理事会石质学术委员会将侵蚀归为缺失状病害,水侵蚀病害是指在水的作用下,石窟岩体出现缺失现象,图6展示了石窟文物在渗水作用下发生侵蚀病害的情况。水岩之间发生的反应通常是化学反应、物理反应、力学反应单独或者共同作用。文中主要阐述酸雨侵蚀和水合作用2个劣化机理。



(a) 甘肃天梯山石窟寺渗水侵蚀

(b) 重庆大足石刻渗水侵蚀

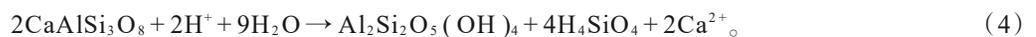
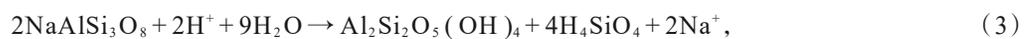
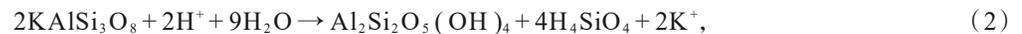
图6 水侵蚀病害<sup>[19,66]</sup>

Fig. 6 Water erosion damage

### 2.2.1 酸雨侵蚀

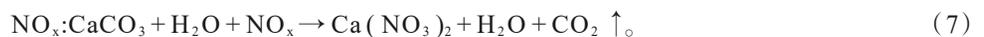
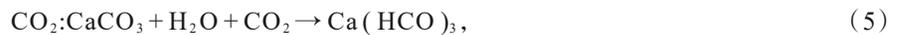
酸雨对岩石的侵蚀作用是指水中的溶解物质与岩石颗粒发生化学反应,改变了岩石的微观结构、组成成分、孔隙结构,导致岩石发生破坏。在溶蚀的作用下,石窟岩石出现了形态各异的溶洞、溶沟和溶孔,造成了石窟岩体的空架结构,降低了岩体的强度,破坏了石窟的完整性和美学性<sup>[67]</sup>。大量煤炭的燃烧导致二氧化氮、二氧化硫等有害气体产生,加剧了酸雨的形成<sup>[68]</sup>。酸雨是开放环境下加速岩石劣化的主要潜在因素<sup>[69]</sup>。

砂岩是我国石窟最常见的赋存岩石类型,砂岩型石窟占了全国石窟的80%以上<sup>[70]</sup>。因此,研究砂岩在酸雨条件下的劣化特征和机理,具有一定的实际意义。砂岩的矿物成分主要为石英、长石、方解石等,石英在中性溶液中的溶解效率比酸性溶液中的强,而长石恰恰与之相反<sup>[71]</sup>,因此,主要阐述酸性溶液中长石的溶解作用。长石是具有架状结构的铝硅酸盐,在化学上,硅(铝)氧四面体之间以桥键氧相联,四面体与钾、钠、钙等阳离子之间以非桥键氧相接<sup>[72]</sup>。长石在流体中的溶解反应,主要发生在桥键氧和非桥键氧上,这个过程包含了离子交换反应、水解反应、质子化反应一系列复杂的反应。最终的结果就是硅(铝)氧四面体中的硅、铝及硅(铝)氧四面体外的钾、钠、钙等从长石的骨架中脱离出来,进入溶液<sup>[73]</sup>。钾长石、钠长石、钙长石在酸性溶液中的化学反应式如下<sup>[74]</sup>:



长石的溶解形成了次生孔隙,岩体内部微观结构变得松散,在水流的冲击下,松散堆积体被带走。谢振斌等<sup>[75]</sup>选用四川崖墓石刻砂岩,进行模拟酸雨试验。岩石在与酸雨接触后,出现酥松、局部起泡和脱落现象,强度降低,抗风化性能变差。

另一种容易遭受酸雨溶蚀的岩石是石灰岩,石灰岩韧性较好,易于雕刻,我国保留着大量的石灰岩石质文物。石灰岩的主要成分是碳酸盐,环境中能够溶解碳酸盐的物质主要是 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{HNO}_3$ ,主要来源于大气中的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 以及 $\text{NO}_x$ ,以碳酸钙为例,其溶解过程反应式如下:



石灰岩中的碳酸钙在酸雨的淋滤作用下变成 $\text{CaSO}_4$ 和 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , $\text{CaSO}_4$ 的溶解度较高, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 本来是离子状态,被水流带走,坚硬的岩石变得松散<sup>[76]</sup>。陈为昌等<sup>[77]</sup>模拟了硫酸型酸雨加速侵蚀石灰岩的室内试验,研究酸雨作用下碳酸盐岩类文物的侵蚀过程和机理。结果表明,石灰岩在酸雨的淋滤作用下发生溶解脱落,新暴露出来的岩石继续与酸雨发生化学作用,加速了岩样的质量损失。

目前研究主要集中于不同外界条件下酸性液体对岩石侵蚀速度的影响。Zhang等<sup>[78]</sup>采用大足石刻释迦摩尼砂岩作为样本进行了酸雨循环实验,发现较高的 $\text{H}^+$ 离子浓度会加速砂岩的劣化。林云等<sup>[79]</sup>开展了不同赋存环境下碳酸盐岩石的溶蚀模拟实验,发现碳酸盐岩在开放环境侵蚀性最强,半封闭环境次之,封闭环境

最弱。余敏等<sup>[80]</sup>开展不同压力、不同温度下碳酸盐岩溶蚀模拟实验,指出碳酸盐岩的侵蚀量与温度呈反比、与压力成正比,且温度效应大于压力效应,符合化学热力学的规律。

### 2.2.2 水合作用

岩石的水合作用是指岩石内部的矿物成分与水分子发生反应,其中矿物成分的一个官能团或原子与水分子结合。在水化反应中,通常只涉及一个物质分子或离子与一个水分子结合,形成水合物。一方面,水合作用改变了岩石的原有构造,降低了岩石强度,使其更容易遭受到外部环境的侵蚀。例如,石膏( $\text{CaSO}_4$ )在经历水合作用后会变成硬石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),硬石膏的强度一般比石膏要低。砂岩中的长石在经历水合作用后变成了水云母,其硬度比原来低,抗侵蚀能力降低<sup>[81]</sup>。另一方面,在水合作用的过程中,矿物体积膨胀,对岩石造成巨大的压力,这个压力就是水合压力。Mortensen<sup>[82]</sup>提出的水合压力的计算公式为

$$P_h = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{P_w}{P_{\text{hyd}}}, \quad (8)$$

式中: $P_h$ 为水合压力,Pa; $R$ 为气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; $T$ 为绝对温度,K; $V_w$ 为结晶水的绝对体积, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ; $P_w$ 为给定温度 $T$ 条件下的水蒸汽压,Pa; $P_{\text{hyd}}$ 为水合盐的蒸汽压,Pa。一些物质转化为水合物之后,体积膨胀。七水硫酸镁的体积较无水硫酸镁体积的大约增长了173%<sup>[83]</sup>,无水硫酸钠的水合物十水硫酸钠,其体积相较于无水状态,大约增长了314%<sup>[84]</sup>。化学方程式为



由高岭土、水云母等组成的泥质胶结物与水发生水合反应,矿物颗粒体积膨胀,对基岩造成伤害<sup>[85]</sup>。四川广元千佛崖石窟在经历降雨之后,水沿着裂隙渗透进石窟岩体,其中的硬石膏遇水膨胀,水化为石膏,体积增长了31%,产生了0.15 MPa的水合压力<sup>[86]</sup>。因此,当岩体中的泥质胶结物与水发生水合反应,岩体受到水合压力作用发生劣化,岩体颗粒间的连接以及岩层内部与外部的连接被破坏,岩石表层疏松产生裂缝,出现剥蚀、脱落现象,加剧了水侵蚀的速度。

综上所述,关于石窟中的水侵蚀病害,主要梳理了酸雨侵蚀和水合作用2种劣化机理。砂岩型石窟被含酸溶液侵蚀,是砂岩中的长石与酸发生化学反应,而灰岩型石窟是碳酸盐与酸发生反应。二者的反应过程不同,但最终结果都是导致岩体结构松散,易于侵蚀。同样地,石窟岩体中的成分在变成水合物的过程中,其原本的硬度降低,还会产生水合压力,导致岩石表层出现剥蚀、脱落现象,水侵蚀速度进一步加快。酸雨侵蚀和水合作用都属于水与岩石之间的化学反应,岩石成分发生改变。

## 2.3 风化病害

石窟的风化病害是指在大气营力、生物活动和人类活动的因素影响下,文物表层出现材料劣化、结构损伤、外貌形态变化的现象,对文物的价值产生一定程度的影响<sup>[43]</sup>。风化按照劣化机理分类,可以分成物理风化和化学风化。在这里主要阐述水参与环境下的盐风化和机械风化的劣化机理。

### 2.3.1 可溶盐破坏

盐风化的过程是物理风化与化学风化共同作用的过程。从作用的机理来看,在盐风化的过程中涉及到矿物成分的改变,应当属于化学风化;从作用的结果来看,盐风化只是岩石内部的矿物成分在水的干涉下发生体积膨胀,对周围的岩石产生压力,加速了岩石的崩解,属于物理风化。因此,徐叔鹰<sup>[87]</sup>总结盐风化是属于化学风化与物理风化之间的一种过渡类型,以化学过程为机理,以物理过程为结果。盐风化是岩石风化的核心要素<sup>[88]</sup>。盐风化是指可溶盐在环境作用下经历膨胀收缩循环,最终造成岩石粉化的现象。产生风化的盐种类繁多,一般以硫酸盐、氯化物为主<sup>[89]</sup>。盐的风化是存在于石窟的共性问题。云冈石窟内盐大量堆积(见图7(a)),且盐的形态多样,以棉絮状为主,其次是钟乳状<sup>[90]</sup>。莫高窟所处的环境气候干燥、昼夜温差大,为可溶盐在岩体表面堆积提供了适宜的条件<sup>[91]</sup>(见图7(b))。延安清凉山石窟多处区域出现返碱现象(见图7(c)),可见大量盐结晶析出<sup>[92]</sup>。因而,解决石窟内可溶盐析出问题刻不容缓,研究石窟内水盐的迁移规律和积累机理,才是解决问题的根本。



(a) 山西云冈石窟表面盐堆积

(b) 甘肃莫高窟壁面盐风化

(c) 陕西清凉山石窟壁面返碱

图7 石窟中的盐害<sup>[92-94]</sup>

Fig. 7 Salt damage in grottoe

盐分的迁移与水密切相关,水盐运移是引起盐害的根本原因<sup>[95-97]</sup>。地下水是石窟中盐的主要来源,石窟岩体在地下水的淋滤作用下,岩层中含有的矿物成分被水氧化水解<sup>[98]</sup>。因为岩石属于多孔材料,水在渗透作用或者毛细作用下通过岩体内部的孔隙或者裂隙带动盐分迁徙。Jiang等<sup>[94]</sup>在研究云冈石窟水盐运移的时候发现,盐的生成与土壤和岩石风化带的垂直运移有关,盐运移源于土壤,经过砂岩风化带,最终在石窟内部聚集。此外,空气中的粉尘有时候会充当水汽的凝结核,跟随凝结水沉降吸附到岩石表面,成为石窟中盐分的另一来源<sup>[99]</sup>。随后,盐在环境的作用下结晶并产生压力,当压应力超过石窟岩体的抗拉强度时,就会引发岩石破坏,扩大原有孔隙,产生新的裂缝,为盐分富集提供更多的空间,周而复始,成为一个恶性循环<sup>[9]</sup>。目前,认为盐风化有3种机理:结晶、水合、热膨胀<sup>[100]</sup>。结晶压力被认为是导致盐风化的主要诱因。当温度升高、水分蒸发、盐析出时,盐晶体在岩石的孔隙中受到周围空间的限制,对岩石施加一个挤压力<sup>[101]</sup>,导致颗粒键局部断裂,这个挤压力就是结晶压力。在结晶压力的作用下,岩石发生脱落剥离,抗风化能力降低。水合压力是除了结晶压力之外另一个导致盐风化的重要机理。许多盐分在吸水之后会发生相变,转化为水合物,体积发生膨胀,对孔隙壁产生挤压力。在气候湿度和岩石表面温度的变化下,寄存于岩石内部的盐晶体反复经历干湿交替循环,于是盐晶体在岩石孔隙中反复膨胀收缩<sup>[92]</sup>,导致岩石疏松膨胀,抗风化能力大大降低。盐分和岩石产生的热膨胀差异也是导致岩石劣化的不可忽略的因素。一般盐分的热膨胀系数比岩石的矿物成分的热膨胀系数大<sup>[100]</sup>,导致当温度变化时,盐分的膨胀程度比岩石矿物的膨胀程度大,盐分对孔隙壁产生膨胀压力,造成破坏。虽然,盐分膨胀的热应力对岩石的影响甚微,但是在温度反复变化下,岩石难免会发生疲劳破坏。上述3种机理共同作用在石窟岩体上,只有弄清楚可溶盐的劣化机理,才能采取相应的保护措施。除此之外,盐以固体的形态附着于文物上,影响了石窟的外观形态,破坏了其美学价值,对石窟文物也是一种伤害。

### 2.3.2 水力冲刷

岩石表层的成分在水流压力冲击下脱离岩石,被水流带走,这一个过程称为水力冲刷。常年遭受水力冲刷作用的岩石区域比较容易出现风化现象,粉状、层状、块状等不同形态的脱离体堆积在岩石表面,不仅影响了石窟的美观性,还降低了岩石的强度,抗风化性能降低。水力冲刷是物理作用过程,中国的石窟中基本上存在这种现象。潼南大佛寺的地表水直接从岩顶排泄形成一条冲沟,破坏了石窟岩体整体结构,并伴有岩面颗粒、块状脱落现象<sup>[102]</sup>。天龙山石窟在经历暴雨之后,崖壁上存在大面积的面流现象,对崖壁上的石雕和石像造成了伤害,波及范围比较广。安岳毗卢洞石窟所处的区域降水充沛,石刻造像均为开放型石窟,地面径流可以直接作用在石窟文物的表面,对石窟岩体造成冲刷风化<sup>[30]</sup>。云冈石窟所处的区域降水量相对不多,但是与毗卢洞石窟一样,所存的石窟几乎全部暴露在自然之中,在历史的变迁中,石窟外壁雕刻被雨水冲刷破坏,仅存的雕刻也只剩一个朦胧的轮廓<sup>[103]</sup>。大足石刻雕刻于砂岩之上,胶结物主要以泥质与钙质为主,在流水的过程中,泥质胶结物被水流带走,钙质胶结物与水成分发生化学反应后被水带走,表层出现颗粒剥落风化破坏<sup>[5]</sup>。

如图8所示,盐风化是物理化学耦合作用的一个过程,水在其中的主要作用是生产和运输。岩石中的矿物成分溶解于水中形成盐,水又带动盐迁移至石窟内部。机械风化主要是水力冲刷的过程,是一种物理作

用,水在其中发挥了撞击和运输功能。在流水的作用下岩石表层松动脱离,分离体又随着流水迁移。针对石窟的风化现象,应对其形成机理进行针对性的修复措施,将风化对石窟产生的伤害降到最低。

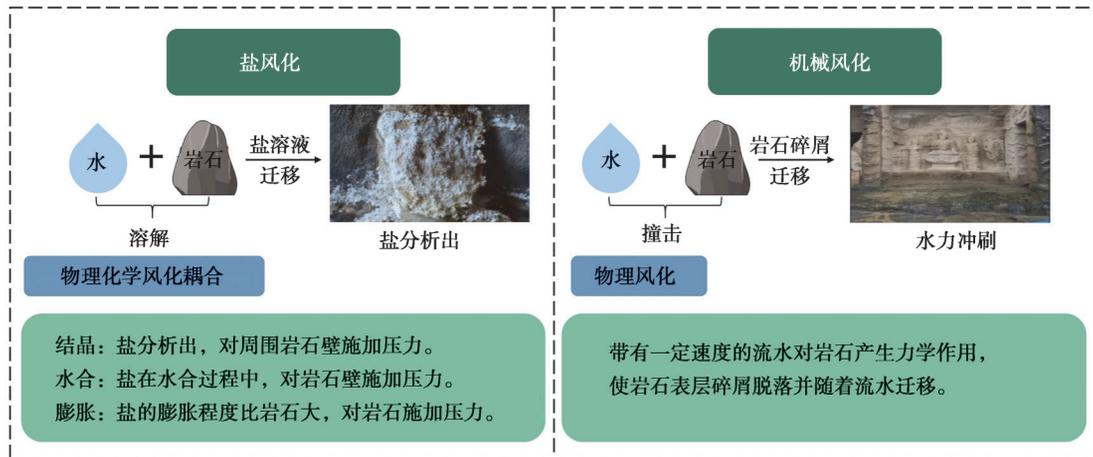


图 8 风化病害劣化机理示意图<sup>[66]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of deterioration mechanism of weathering diseases

## 2.4 生物病害

由于生物生长致使石窟岩体表层受到微观、结构、外貌的破坏称为石窟的生物病害。在生物病害中,生物的种类大致有植物、微生物和动物 3 类<sup>[43]</sup>。其中,微生物的繁殖与水有高度的相关性,以下主要阐释水是如何诱发微生物病害的。

### 2.4.1 微生物破坏

研究表明,在所有影响微生物生长的环境因素中<sup>[104]</sup>,湿度是与其相关性最高的,水汽的增长为微生物的生长提供了有利的环境。He 等<sup>[105]</sup>用高通量测序分析了麦积山石窟正常墙壁样品和微生物斑块的细菌和真菌群落来探究影响微生物爆发的环境因素,典型关联分析(CCA)表明石窟内外的湿度过高是微生物爆发的主要原因。胡军舰等<sup>[106]</sup>分析了麦积山石窟第 32 窟大环境、微环境中的温湿度的变化特征,指出微生物的爆发与相对湿度季节性变化高度吻合、窟门位置和洞窟深处的病害是最严重的,根本原因是长时间的高湿度环境。武发思等<sup>[107]</sup>在研究太原北齐徐显秀墓的微生物病害时指出湿度是真菌生长的关键因素,高湿度的赋存环境、凝结水都促进了微生物爆发的进程。

大多数石窟光照缺乏,通风不足,不能提供微生物繁殖所需要的养分和水分,是一种寡营养环境<sup>[12]</sup>。而有些微生物具有超强的环境适应能力,能够在极端环境中生存。当石窟内部由于降雨或者其他原因导致湿度上升时,空气中的水汽形成凝结水吸附在石头上,不仅为微生物的定殖提供了水分,凝结水还溶解了一些化合物为其提供了营养物质,这也是湿度影响微生物生长的原因<sup>[108]</sup>。微生物对石窟的侵害可以分为表观损害和内部侵蚀。微生物会释放色素,在石窟岩石的表面形成星星点点的斑状污染物。细菌、真菌、藻类都有产生有色代谢产物的能力,包括但不限于白色、灰色、黄色、粉色等<sup>[12]</sup>。假诺卡式菌会产生白色污染<sup>[109]</sup>,放线菌会在岩石表面形成灰色斑点<sup>[110]</sup>,链霉菌参与石质文物劣化的途径就是产生生物色素,包含黑色素、类胡萝卜素(红色、黄色、粉色、紫色)以及与放线菌有关的蓝色素<sup>[111]</sup>。微生物还可以通过生成绿色生物膜的方式对文物表面造成污染,这类微生物以藻类为主,例如,拉科斯洞穴内绿藻不受控制的繁殖导致了绿色生物膜生成<sup>[112]</sup>。微生物对岩石内部的侵蚀可以总结为物理作用和化学作用。菌丝体侵入岩石内部后,生长过程对其周围的岩石产生孔隙压力,直接引发应力破坏、岩缝扩大,导致岩石表层脱落<sup>[113]</sup>。微生物代谢的产物有 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、无机酸和有机酸等,无机酸包括亚硝酸、硝酸、硫酸等<sup>[114]</sup>,有机酸有葡萄糖酸、乳酸、柠檬酸等<sup>[115]</sup>。代谢产物通过溶解岩石中的矿物成分造成岩石劣化,还有可能与岩石中的无机物反应生成盐,造成盐风化破坏。有机酸还可以络合岩石中的金属离子,破坏矿物晶格的稳定,加速岩石性能退化<sup>[18,116]</sup>。

综上所述,高湿度的环境给微生物的繁殖提供了水分和养分,适宜微生物大量繁殖。微生物繁殖后,对

石窟造成的伤害包括表观破损和内部侵蚀。表观破损是由于微生物产生了色素(见图9(a))和生物膜(见图9(b)),污染了文物本体,影响了其观赏性。而内部侵蚀又可以归纳为物理作用和化学作用,物理作用微生物菌丝穿透至岩石,造成裂隙发育(见图9(c));化学作用是微生物产生酸与岩石发生反应,造成岩石侵蚀(见图9(d))。石窟所处的环境和建筑构造决定了势必会受到微生物的破坏,需采取措施应对微生物破坏。

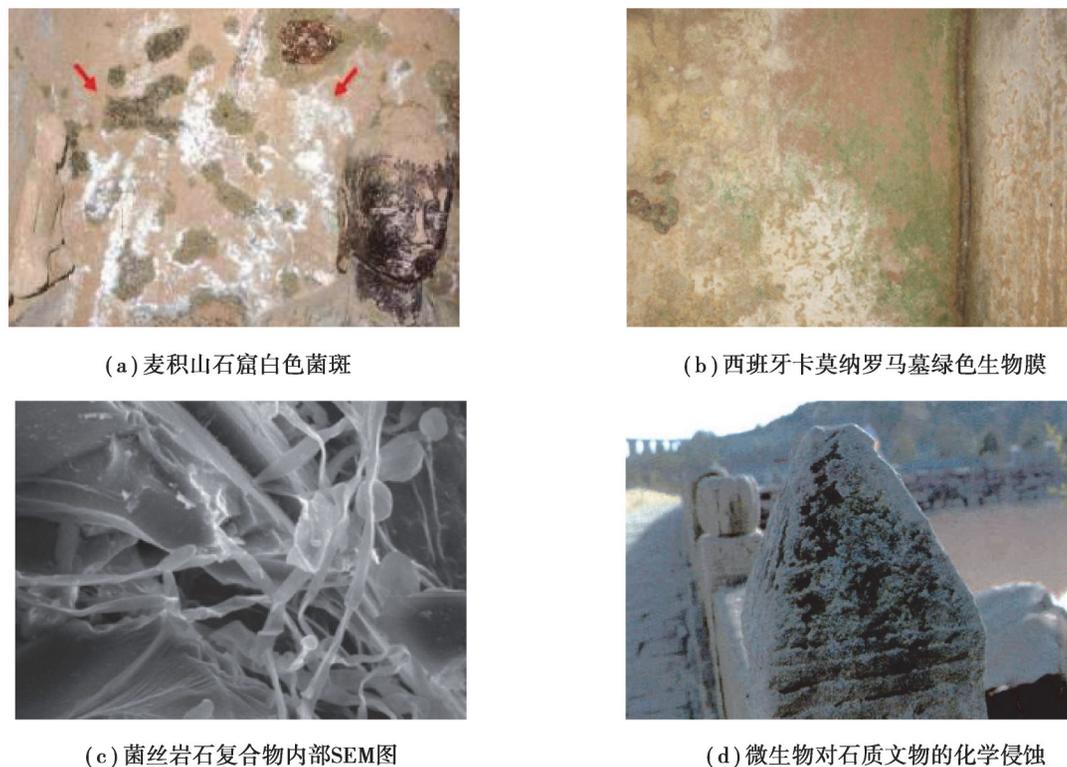


图9 石质文物微生物劣化类型<sup>[12,117-119]</sup>

Fig. 9 Types of microbial deterioration of stone relics

### 3 石窟防水治水措施

#### 3.1 降雨治理

##### 3.1.1 窟檐防雨

窟檐是最普遍的一种防雨水的设施。窟檐的作用主要有3种:1)减少壁面雨水冲刷和润湿;2)维护窟内微环境稳定;3)美化修饰石窟。窟檐是古人智慧的一种象征,用简单的设施完成了石窟保护的多重要求。杨泓先生认为石窟窟前建筑有两种:一种是“在窟室的外部雕凿出仿木建筑结构,使洞窟的外貌呈现出佛殿或佛塔的外貌”,另一种是“在山崖所开凿的窟龕前面,接连修筑木构的殿堂或重阁等建筑”。前者是在石窟岩洞上方开凿出一个斜度(见图10(a)),在上面直接进行窟檐的雕刻,后者是在石窟外部连接防雨水的窟檐(见图10(b))。前者是石质结构,后者在古代一般为木质结构,随着科学技术的发展和保护材料的创新,钢结构、砼结构也逐渐涌现,很好地发挥了窟檐防雨水的作用。

20世纪60年代—80年代,修补加固工程最多的措施就是修建窟檐。1974年,北石窟在165窟窟顶外坡体和32窟上部修建了临时雨篷(见图10(c)),在一定程度上降低了大气降水对石窟岩体的直接冲刷<sup>[120]</sup>。龙门石窟的窟檐修建大多是在1987-1992年完成的,包含了仿古式窟檐、简易雨篷和防雨栈道3种类型,对防止雨水直接冲淋、坡面的流水冲刷起到了积极的作用<sup>[121]</sup>。天龙山石窟的窟檐则可以分为石构窟檐、木构窟檐和栈道型窟檐(见图10(d)),对于石窟本体来说,修建窟檐对防止日晒雨淋、延缓石窟寿命有很大的效用<sup>[122]</sup>。

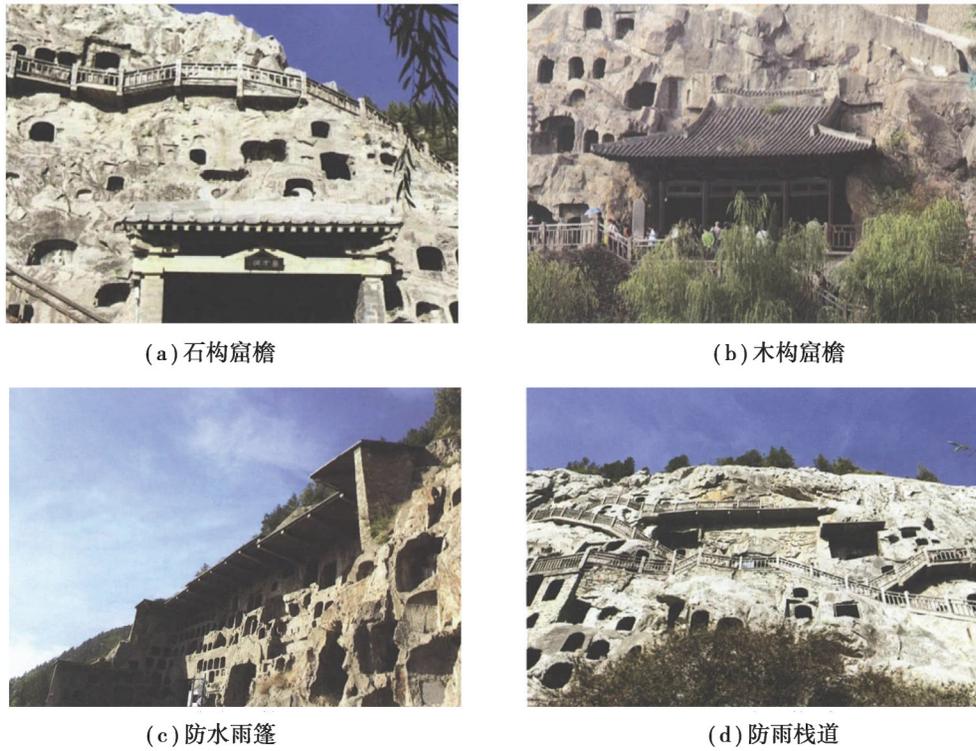


图 10 石窟防雨窟檐种类<sup>[121]</sup>

Fig. 10 Types of rainproof grotto eaves

### 3.1.2 窟顶防渗

大气降水除了以地表径流的方式排泄和蒸发外,剩余的部分通过石窟岩体中的裂隙和孔隙从顶部渗入到石窟内部。石窟窟顶渗水问题一般采取铺设防渗层的措施。在窟顶铺设防渗层,阻碍了大气降水的下渗。甘肃榆林窟的东崖窟顶在 1990 年的加固工程中铺设了 10 cm 的混凝土防渗层,由于榆林窟所属区域的温差较大,加之窟顶原有冲沟的存在,防渗层建造不久之后,表面就出现了大量的凹坑,雨水聚集在防渗层的凹坑里。因为混凝土防渗层的存在,水分不易挥发,导致窟内湿度上升,加剧了窟内水害的发生。1995 年,保护团队将混凝土防渗层全部拆除,重新铺设了厚度为 15 cm、东西坡度为 25° 的三合土(沙土:石灰=7:3)防渗层,不仅保留了石窟原有的外观,还具有良好的防渗效果<sup>[123]</sup>。对于莫高窟石窟顶层薄顶洞窟,保护团队钉上一层金属拉网,然后在金属拉网之上铺一层土工薄膜,随后叠加一层土工织物,最后铺撒沙石,同时喷洒 PS 加固,在此工程完成后的 8 年时间内,石窟都没有出现渗水病害<sup>[124]</sup>。

目前,国内外比较常用的防渗层是 GCL(钠基膨润土防水毯)和 HPDE(高密度聚乙烯)土工膜。GCL 防水毯的主要构成材料是膨润土,主要优势是透水性小、修复能力强,钠基膨润土在出现小缺陷的情况下具有自我闭合的能力<sup>[125-126]</sup>。最重要的是,虽然渗透系数低,但是能够维持土层之间的水分和空气交换。HPDE 土工膜的主要成分是 HPDE 树脂,渗透系数低,能够阻止水分蒸腾,而且质量轻、化学稳定性好、安装方便,因而在防渗层市场上应用广泛<sup>[127]</sup>。图 11 展示了一般防渗层铺设的顺序,防渗层的设计综合考虑石窟顶部的覆盖层的成分、厚度和渗透度,确定铺设防渗层的合理位置,同时还要考虑防渗层的重量,以免质量过大造成窟顶坍塌。在铺设防渗层之前一般要对裂隙进行灌浆封堵,铺设之后

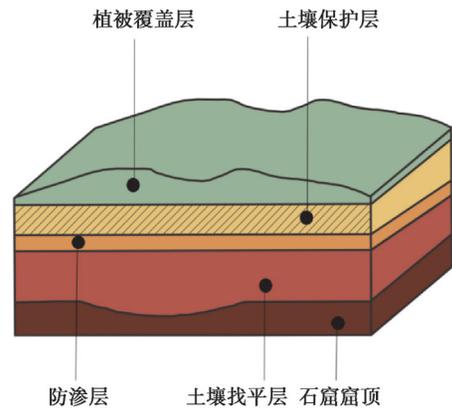


图 11 防渗层铺设顺序示意图

Fig. 11 Laying sequence of the impermeable barrier

还要覆盖一层天然植被,因为天然植被具有固定土壤、吸收水分的功能<sup>[128]</sup>。

### 3.2 地下水治理

#### 3.2.1 沟渠排水

地下水治理的两个原则是打通地下排水通道和降低地下水位。排水沟的作用在于改变地下水的径流场,切断地下水侧向径流,使其不朝石窟排泄,而地下水位的降低可以消除毛细水对石窟岩体的侵蚀<sup>[4]</sup>。沟渠排水分为暗渠排水和明渠排水,对于不影响文物观赏的岩体可以采用明渠排水,影响文物的则采用暗渠排水。合理设置排水沟的平面位置和深度,是石窟地下水治理的关键。为保证排水时的流畅,需要对石窟所处区域的地理情况进行仔细探查,一般情况下石窟排水位置的布置,如图12所示。首先,排水沟需要处于一个合适的高度,才能排走基岩中的裂隙水。其次,如果排水沟距离石窟本体过近,会影响石窟岩体的稳定性;过远的话,排水效果又可能不是很理想<sup>[128]</sup>。以疏为主是石窟水害治理的重要原则之一,而沟渠排水是一种比较常见的治理方式。1974年—1976年,云冈石窟在窟前修建了排水沟渠,缓解了地下水对岩体造成的损害<sup>[17]</sup>。甘肃庆阳的北石窟窟前距崖壁3 m处有一道深4 m、宽1.6 m、南北向长60 m的排水沟,在降低地下水位、加速排泄裂隙水方面发挥了很大的作用。

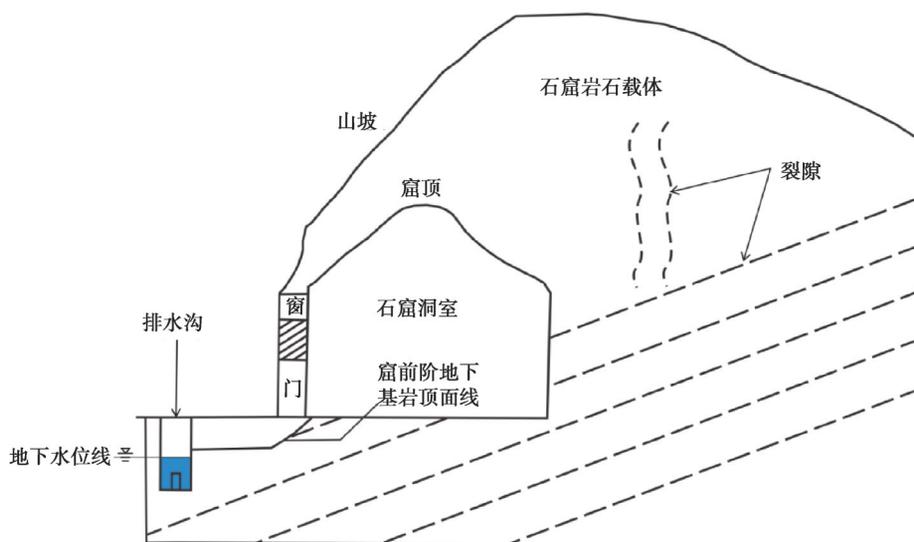


图12 石窟排水沟布置断面图

Fig. 12 Cross-section of grotto drain layout

#### 3.2.2 裂隙灌浆

当基岩裂隙水排泄不畅的时候,在裂隙中的滞留时间过长,会导致裂隙水渗出,提高洞窟内的湿度,加速石窟内文物的风化。除了疏通的方法外,还可以采取裂隙灌浆的方式堵截渗水。裂隙灌浆的主要作用在于加固岩体,同时达到封堵阻水的目的。灌浆材料的选择是重中之重,不仅要达到阻水的目的,还要保证对文物本体不会产生副作用,需要全面考虑灌浆材料的流动性、凝结时间、抗压强度、黏结强度、收缩性等性质。在龙门石窟的加固工程中,最常用的一种材料是环氧树脂类材料,可以灌注较细的裂缝,且硬度大、体积小、收缩时无气泡<sup>[129]</sup>。刘祥友等<sup>[130]</sup>采用一种混合灌浆材料对龙门石窟潜溪寺区域内的裂隙进行灌注,这种材料以偏高岭土为主,由高细水泥、硅粉、氢氧化钠和水玻璃按照一定比例配置而成,具有良好的力学性质,能够控制材料的返碱,减少对文物本体的污染。针对岩体松散、强度较低的砂砾岩型石窟,李最雄等<sup>[131]</sup>研究出一种PS-F(PS-模数3.7~3.8,浓度8%~12%的硅酸钾,F-粉煤灰)浆液,不仅能确保灌浆的密实性,还能牢固连接灌浆结石体和裂隙两壁。

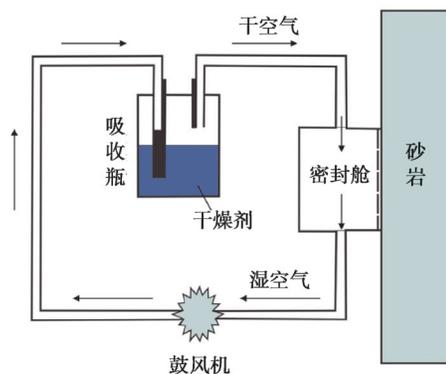
对于渗水问题不太严重的石窟,采用裂隙灌浆的方式可以阻止水的渗出。但是对于渗水问题比较严重的石窟,这个方式治标不治本,反而会产生新的破坏。方云等<sup>[3]</sup>对龙门石窟中裂隙灌注过的区域进行重新调查后,发现渗水点发生了转移,渗水区域扩大。由于水长期封堵在岩体内部,导致原本就松动的岩体的位移

进一步扩大。因此,采取裂隙灌注的方式时要考虑石窟渗水的实际情况,不能因小失大。

### 3.3 凝结水治理

#### 3.3.1 环境监测

众所周知,当洞壁温度大于露点温度时,会形成凝结水,有必要对石窟内的环境进行实时监测。对石窟内部不同深度和高度的温度和湿度进行全面的监测,可以更深入地了解凝结水形成的环境<sup>[132]</sup>,帮助工作人员发现石窟内异常环境。北石窟监测了重点洞窟十几年的温湿度变化和异常情况,为后续的保护工作奠定了坚实的基础<sup>[120]</sup>。除了微环境的监测,还可以对凝结水的含量进行直接的监测。云冈石窟研究院和中国地质大学(北京)联合研制了一种专门用于凝结水测量的装置,如图 13 所示,利用空气回路系统吸收石壁上的凝结水,再通过干燥剂的质量变化获取吸收的凝结水的质量<sup>[133]</sup>。利用该监测系统进行长期监测可以探究石窟岩体中水汽循环的规律,为控制水汽风化提供有利的数据支撑。



(a) 凝结水测量装置结构图



(b) 凝结水测量装置实物图

图 13 凝结水测量装置<sup>[27,134]</sup>

Fig. 13 Condensed water measuring device

#### 3.3.2 通风除湿

由凝结水的形成条件可知,减小露点温度可以减少凝结水的出现频率。露点温度与气温和相对湿度有关,表达式为<sup>[135]</sup>

$$T_D = \frac{237.3 + T}{7.5} (\log R_H - 2) + T, \quad (11)$$

式中: $T_D$ 为露点温度,°C; $R_H$ 为空气相对湿度,%; $T$ 为空气温度,°C。

由此可知,降低温度和空气相对湿度都可以降低露点温度。降低环境温度在操作上不具有可行性,可以通过降低湿度来降低露点温度。具体措施可以采取通风和除湿。通风主要是加速石窟内空气的流动,将湿气排除洞外。通风的时间也需仔细挑选。窟外环境湿度较小时,通风可以驱除窟内的湿气,但在降雨前后,空气中水蒸气含量较高,过量的通风只会导致窟内湿度上升<sup>[136-137]</sup>。除湿的目的在于降低窟内的湿度,可以利用干燥剂和除湿设备达到目的。干燥剂不能与水发生化学反应且不能有其它的副作用,同时成本最好要低廉一些。当石窟内湿度过大时,干燥剂不能满足要求,可以采用除湿机。除湿机可以收集空气中的水汽,达到通风的目的。

## 4 结论

水在石窟病害形成的过程中发挥的作用是多样的、持续的,由水诱发的石窟病害是石窟保护工作中的核心问题,根据其作用的方式可以分为直接作用和间接作用。软化作用、冻胀作用、酸雨侵蚀、水合作用、机械风化都属于直接作用,是水通过化学、物理、力学作用直接对石窟载体和本体产生伤害;而盐风化和微生物破坏属于间接作用,是盐和微生物通过一种或者多种方式损害石窟。

1)文中针对由水诱发的石窟病害,详细阐述了病害的劣化机理。

①石窟中的水主要来自降雨、地下水和凝结水,但这不是绝对意义上的。例如,雨水可以直接侵蚀石窟岩体,也可以渗入石窟内部,汇入地下水,还可以蒸发成水汽,在特定条件下变成凝结水。

②在不同的病害类型中,水充当的角色是不同的。对于冻胀作用、水合作用、水力冲刷作用来说,是水在静止或者移动情况下通过状态的改变对岩体产生力的作用,这里水充当的角色是作用力的传导桥梁;对于软化作用、酸雨侵蚀来说,水通过一定的反应对岩体产生伤害,这里水充当的角色是不同物质的反应场所;对于盐风化、微生物破坏来说,水并不直接破坏岩体,但是水是盐和微生物形成的必不可少的条件,这里水充当的角色是物质形成的必要条件。

③水在不同相态、圈层之间转换、迁移时,对石窟岩体造成的影响也是各不相同的。例如,水在固态、液态转换时产生的冻融循环,在岩体内部反复地收缩膨胀,导致岩体内裂缝的形成和发育;石窟中的凝结水是水在气、液态的转变中形成的,凝结水可侵蚀石窟的岩体。

④不同地域的石窟中,由水诱发的石窟病害的出现频次也是有差异的。在干旱地区的石窟中,例如,莫高窟、麦积山石窟,降水不是很充足,雨水冲刷、酸雨侵蚀并不是当地石窟的主要病害,而在潮湿区域的石窟中,例如,龙游石窟、安岳石窟,雨水充沛,降雨所引发的病害出现频率较高。此外,根据南北方温度的差异,冻胀破坏出现在北方石窟的可能性比出现在南方石窟的大。

⑤面对不同来源的水,目前都有针对性的保护手段来减缓水对石窟岩体的损害程度。这些保护手段既有从古代流传下来的传统方法,也有基于时代发展同现代技术相结合的创新方法。在实际石窟保护工作中,研究人员将传统方法与先进技术有效融合,具有一定的参考价值。

2)文中从石窟水分探查、石窟岩体水致劣化机理、石窟防水治水措施3个方面提出了未来研究的方向。

①发展石窟水分可视化探查技术。水岩作用是导致石窟病害发育的重要原因,探查石窟水分来源和赋存是解决石窟水害的主要任务。水分探查工作要做到“不损坏文物”“测量数据准确”“不受环境扰动”。因而,无损检测技术需要得到进一步的发展,降低检测给文物带来的损伤。探查技术在精确性、灵敏性上还有很大的发展空间,提供更加准确的石窟水分来源和水分分布的数据。石窟大多处于露天环境中,检测技术易受到环境变化的影响,例如,红外成像技术就易受到植物苔藓的影响,降低环境扰动的影响也是水分探查技术未来发展的方向之一。

②深化石窟水致劣化机理研究。结合现场情况与室内实验,探究水致劣化的具体过程。考虑多种因素耦合作用下石窟岩体的水致劣化机理,综合考虑湿度、降雨、微生物等因素的参与进行全面的实验研究。利用先进的技术手段,例如,红外成像技术聚焦岩体劣化微观层面的观察,探究水分对岩体内部结构的影响。集合化学、气象学、地质学等多个学科的专业知识,开展跨学科合作。

③加强石窟防水治水措施技术创新。“预防性保护”是文物保护的重要理念,也是未来发展的新方向,及时对石质文物赋存环境和病害演化进行监测是预防性保护工作的基础。监测系统要具备准确性、完善性、适用性强等特点,实时监测文物的环境条件,及时发现并解决潜在的危害。新型文物防水材料的研究是文物保护科学的重要内容之一,仿生超疏水材料是近年研究的热点,研究人员模仿自然界中生物表面的不黏附现象研发出超疏水材料。超疏水材料能够阻碍液态水在石质文物表面的附着,自发清理表面的污染物。但是,超疏水材料在文物保护领域的应用还不够成熟,如何针对不同赋存环境选择石窟防水材料种类,如何在超疏水材料投入使用后对其性能进行长期监测,如何降低生产成本以满足石窟岩体的大面积使用,是需解决的问题。

## 参考文献

- [1] 王旭东,张虎元,郭青林,等.敦煌莫高窟崖体风化特征及保护对策[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1055-1063.  
Wang X D, Zhang H Y, Guo Q L, et al. Weathering characterization and conservation treatment of cliff at Mogao Grottoes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1055-1063.(in Chinese)
- [2] 王旭东,李最雄.安西榆林窟的岩土工程问题及防治对策[J].敦煌研究,2000(1):123-131.  
Wang X D, Li Z X. Problems and control of geotechnical engineering of Anxi Yulin Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2000(1): 123-131.(in Chinese)

- [ 3 ] 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.(in Chinese)
- [ 4 ] 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 H M, Ma G D, Su B Y. A discussion of the treatment of water-seepage disease of the stone carvings in the Yungang Grotto near Datong[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(5): 64-67.(in Chinese)
- [ 5 ] 张兵峰. 川渝石窟裂隙水病害机理研究: 以大足石刻大佛湾卧佛区域为例[J]. 中国文化遗产, 2018(4): 27-34.  
Zhang B F. Study on the mechanism of fissure water disease in Sichuan-Chongqing Grottoes—taking the reclining Buddha area in Dazu stone carving Buddha Bay as an example[J]. China Cultural Heritage, 2018(4): 27-34.(in Chinese)
- [ 6 ] 童登金. 大足石刻的保护与展望[J]. 文物保护与考古科学, 2003, 15(3): 57-60.  
Tong D J. Protection and outlook of Dazu Rock Carvings[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2003, 15(3): 57-60.(in Chinese)
- [ 7 ] 李黎,谷本亲伯. 龙游石窟地质环境及病害的初步调查[J]. 敦煌研究, 2002(4): 92-96, 120.  
Li L, Tanimoto C. The preliminary investigation of the geological environment of the Longyou Grottoes and its existing disease [J]. Dunhuang Research, 2002(4): 92-96, 120.(in Chinese)
- [ 8 ] 张明泉,张虎元,许敬龙,等. 炳灵寺石窟保护面临的主要环境地质问题[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(1): 58-63.  
Zhang M Q, Zhang H Y, Xu J L, et al. Main environmental geological problems faced by Bingling Temple Grottoes protection [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1996, 10(1): 58-63.(in Chinese)
- [ 9 ] 兰恒星,吕洪涛,包涵,等. 石窟寺岩体劣化机制与失稳机理研究进展[J]. 地球科学, 2023, 48(4): 1603-1633.  
Lan H X, Lyu H T, Bao H, et al. Advances in degradation and instability mechanism of grotto temple rock mass[J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1603-1633.(in Chinese)
- [ 10 ] Liu H L, Wang X D, Guo Q L, et al. Experimental investigation on the correlation between rainfall infiltration and the deterioration of wall paintings at Mogao Grottoes, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79 (3): 1199-1207.
- [ 11 ] 王旭升,万力,彭涛,等. 云冈石窟入渗水的形成和运移[J]. 工程勘察, 2012, 40(11): 12-16.  
Wang X S, Wan L, Peng T, et al. Infiltration water in Yungang Grottoes and its movement[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(11): 12-16.(in Chinese)
- [ 12 ] 贺东鹏. 麦积山石窟壁画微生物病害成因及防治研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.  
He D P. Study on the causes and prevention of microbial diseases in Maijishan grottoes murals[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2022. (in Chinese)
- [ 13 ] 马雪雅,张理想,陈银桥,等. 庆阳北石窟寺濒危岩体变形特征分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1145-1155.  
Ma X Y, Zhang L X, Chen Y Q, et al. Deformation characteristics of dangerous rock masses in the North Grotto Temple, Qingyang City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(5): 1145-1155.(in Chinese)
- [ 14 ] 汪东云,张赞勋,付林森,等. 宝顶山石窟岩体风化破坏的作用因素分析[J]. 工程地质学报, 1994, 2(2): 54-65.  
Wang D Y, Zhang Z X, Fu L S, et al. Analysis of factors affecting weathering failure of rock mass in Baodingshan Grottoes[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(2): 54-65. (in Chinese)
- [ 15 ] 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 Z M, Liu H L, Guo Q L, 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.(in Chinese)
- [ 16 ] 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.(in Chinese)
- [ 17 ] 吴宝燕,张爱国,朱丽君. 云冈石窟水害及其治理措施[J]. 地下水, 2008, 30(3): 116-118.  
Wu B Y, Zhang A G, Zhu L J. Water damage in Yungang Grottoes and its control measures[J]. Ground Water, 2008, 30(3): 116-118.(in Chinese)
- [ 18 ] 武发思,李洁. 石质文物微生物研究现状与展望[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2022(4): 14-33.  
Wu F S, Li J. The current status and future prospects for microbial research on stone cultural relics[J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2022(4): 14-33.(in Chinese)

- [19] 杜之岩, 江姝, 王金华. 云冈石窟保护面临的困境及解决途径[J]. 自然与文化遗产研究, 2021, 6(6): 8-16.  
Du Z Y, Jiang S, Wang J H. Analysis on the predicament and solution for Yungang Grottoes conservation work[J]. Study on Natural and Cultural Heritage, 2021, 6(6): 8-16.(in Chinese)
- [20] 张悦, 章云梦, 黄继忠. 典型石窟砂岩的毛细吸水与变形响应特征[J]. 文物保护与考古科学, 2022, 34(3): 85-93.  
Zhang Y, Zhang Y M, Huang J Z. Characteristics of capillary water absorption and deformation response of sandstones in typical grottoes[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2022, 34(3): 85-93.(in Chinese)
- [21] Rozhko A Y. Capillary phenomena in partially-saturated rocks: Theory of effective stress[C]// 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, June 26 - 29, 2011. San Francisco: American Rock Mechanics Association.
- [22] Zhang Y, Zhang Y M, Huang J Z. Experimental study on capillary water absorption of sandstones from different grotto heritage sites in China[J]. Heritage Science, 2022, 10(1): 25.
- [23] 宋佳航, 严绍军, 项伟, 等. 大足石刻宝顶山砂岩毛细水迁移特性影响因素[J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 282-291, 300.  
Song J H, Yan S J, Xiang W, et al. Influencing factors of capillary water migration characteristics of the sandstones in Baoding Mountain, Dazu Stone Carvings[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 282-291, 300.(in Chinese)
- [24] 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(S2): 3284-3294.  
Zhang H Y, Yang S Q, Sun B, et al. Study on the relationship between salt damage types and evaporation rate of stone cultural relics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3284-3294.(in Chinese)
- [25] Jia Q Q, Chen W W, Tong Y M, et al. Experimental study on capillary migration of water and salt in wall painting PlasterA case study at Mogao Grottoes, China[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2022, 16(5): 705-716.
- [26] 黄继忠, 万力, 彭涛, 等. 云冈石窟水分来源探查工程及若干成果[J]. 工程勘察, 2012, 40(11): 1-5, 11.  
Huang J Z, Wan L, Peng T, et al. Survey on water sources in Yungang Grottoes and some results[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(11): 1-5, 11.(in Chinese)
- [27] Lu K, Li Z Y, Niu R Q, et al. Using surface nuclear magnetic resonance and spontaneous potential to investigate the source of water seepage in the JinDeng Temple grottoes, China[J]. Journal of Cultural Heritage, 2020, 45: 142-151.
- [28] Li H S, Wang W F, Zhan H T, et al. Water in the Mogao Grottoes, China: where it comes from and how it is driven[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(1): 37-45.
- [29] 郭青林. 敦煌莫高窟壁画病害水盐来源研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.  
Guo Q L. Study on water and salt sources of mural diseases in Dunhuang Mogao Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. (in Chinese)
- [30] 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 Pilu Cave Grottoes in Anyue[J]. Ground Water, 2022, 44(3): 45-47.(in Chinese)
- [31] 杨盛清. 石窟寺砂岩盐风化与水盐运移响应关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.  
Yang S Q. Study on the response relationship between salt weathering and water and salt migration in cave temple sandstone [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (in Chinese)
- [32] Monteith J L, Unsworth M H. Principles of environmental physics plants, animals, and the atmosphere[M]. 4th ed. Burlington: Elsevier Science, 2013.
- [33] 王效嘉. 含不凝气蒸汽在不同竖直异形表面凝结传热特性的数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
Wang X J. Numerical simulation of condensation heat transfer characteristics of steam containing non-condensable gas on different vertical irregular surfaces[D]. Jinan: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [34] Hudson J G. Cloud condensation nuclei[J]. Journal of Applied Meteorology, 1993, 32(4): 596-607.
- [35] 甘向明. 云冈石窟凝结水研究与防治[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.  
Gan X M. Study and prevention of condensed water in Yungang Grottoes[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006. (in Chinese)
- [36] 郎嘉琛. 麦积山石窟窟内热湿环境研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.  
Lang J C. Study on thermal and humidity environment in Maijishan Grottoes[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)
- [37] Liu R Z, Zhang B J, Zhang H, et al. Deterioration of Yungang Grottoes: diagnosis and research[J]. Journal of Cultural Heritage, 2011, 12(4): 494-499.

- [38] Huang J Z, Zheng Y, Li H. Study of internal moisture condensation for the conservation of stone cultural heritage[J]. Journal of Cultural Heritage, 2022, 56: 1-9.
- [39] 李燕. 麦积山石窟水汽凝结机理及防治措施研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.  
Li Y. Study on water vapor condensation mechanism and prevention measures in Maijishan Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese)
- [40] 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 M L, Fang Y, Zhou W Q, et al. Infrared imaging detection on avalokitesvara condensation water[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 295-300.(in Chinese)
- [41] 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 Y, Huang X, Wang X D, et al. Quantification research on condensation water on Qianxi temple of Longmen Grottoes[J]. Geoscience, 2011, 25(6): 1214-1218.(in Chinese)
- [42] 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.(in Chinese)
- [43] 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. (in Chinese)
- [44] 杨春和, 冒海军, 王学潮, 等. 板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2090-2098.  
Yang C H, Mao H J, Wang X C, et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2090-2098.(in Chinese)
- [45] 蒋思维, 谢本立. 大足北山石窟的水害和治理[J]. 工程勘察, 1995, 23(6): 34-36.  
Jiang S W, Xie B L. Water damage and treatment of Dazu Beishan grottoes[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1995, 23(6): 34-36.(in Chinese)
- [46] Hadizadeh J, Law R D. Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1991, 28(5): 431-439.
- [47] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 866-870.  
Huang H W, Che P. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 866-870.(in Chinese)
- [48] 张娜, 王水兵, 赵方方, 等. 软岩与水相互作用研究综述[J]. 水利水电技术, 2018, 49(7): 1-7.  
Zhang N, Wang S B, Zhao F F, et al. Review on study of interaction between soft rock and water[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(7): 1-7.(in Chinese)
- [49] 方云, 乔梁, 陈星, 等. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2433-2442.  
Fang Y, Qiao L, Chen X, et al. Experimental study of freezing-thawing cycles on sandstone in Yungang Grottos[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2433-2442.(in Chinese)
- [50] 刘海康, 张思渊, 张鑫鑫. 不同初始含水率下砂岩冻融劣化特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 322-327.  
Liu H K, Zhang S Y, Zhang X X. Experimental study of freeze-thaw deterioration specialty of sandstone in different initial moisture content[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(26): 322-327.(in Chinese)
- [51] 乔榛, 王逢睿, 王捷, 等. 循环作用对马蹄寺石窟群岩体性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(28): 64-70.  
Qiao Z, Wang F R, Wang J, et al. Cycling effect on rock mass properties of mati temple grottoes[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(28): 64-70.(in Chinese)
- [52] 吴刚, 何国梁, 张磊, 等. 大理岩循环冻融试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2930-2938.  
Wu G, He G L, Zhang L, et al. Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2930-2938.(in Chinese)
- [53] Feng Q, Jin J C, Zhang S, et al. Study on a damage model and uniaxial compression simulation method of frozen - thawed rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(1): 187-211.
- [54] Gao F, Cao S P, Zhou K P, et al. Damage characteristics and energy-dissipation mechanism of frozen - thawed sandstone subjected to loading[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 169: 102920.

- [55] 贾海梁, 项伟, 谭龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 879-895.  
Jia H L, Xiang W, Tan L, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 879-895.(in Chinese)
- [56] Park J, Hyun C U, Park H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze - thaw action[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 555-565.
- [57] Peng N B, Hong J, Zhu Y, et al. Experimental investigation of the influence of freeze - thaw mode on damage characteristics of sandstone[J]. Applied Sciences, 2022, 12(23): 12395.
- [58] Sarici D E, Ozdemir E. Determining point load strength loss from porosity, Schmidt hardness, and weight of some sedimentary rocks under freeze - thaw conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(3): 62.
- [59] Vlahou I, Worster M G. Ice growth in a spherical cavity of a porous medium[J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(196): 271-277.
- [60] 杨鸿锐. 冻融循环对麦积山石窟砂砾岩微观结构损伤机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.  
Yang H R. Study on damage mechanism of freeze-thaw cycle to microstructure of glutenite in Maijishan Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. (in Chinese)
- [61] 杨鸿锐, 刘平, 孙博, 等. 冻融循环对麦积山石窟砂砾岩微观结构损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 545-555.  
Yang H R, Liu P, Sun B, et al. Study on damage mechanisms of the microstructure of sandy conglomerate at Maijishan grottoes under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 545-555.(in Chinese)
- [62] Sun B, Li X Y, Cui K, et al. Study on the characteristics of damaged sandstone in the Longshan Grottoes using water chemistry and freeze - thaw cycling[J]. Minerals, 2023, 13(3): 430.
- [63] 刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 等. 冻融循环作用下石窟砂岩物理力学性质损伤规律研究[J]. 实验力学, 2020, 35(5): 943-954.  
Liu X F, Guo Z Y, Wang L G, et al. Experimental study on physical and mechanical property damage of grotto sandstone in freeze-thaw cycle[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(5): 943-954.(in Chinese)
- [64] 张景科, 刘盾, 马雨君, 等. 弱胶结砂岩水岩作用机制: 以庆阳北石窟为例[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(7): 1019-1032, 1064.  
Zhang J K, Liu D, Ma Y J, et al. Water-rock mechanism of weakly consolidated sandstone: a case study of Qingyang north grottoes[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(7): 1019-1032, 1064.(in Chinese)
- [65] 孙瑜, 闫宏彬, 张志忠. 鲁班窑石窟病害调查及保护研究[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2018(9): 148-156.  
Sun Y, Yan H B, Zhang Z Z. The disease investigation and protection study of lubanyao grotto[J]. Journal of National Museum of China, 2018(9): 148-156.(in Chinese)
- [66] 王彦武. 甘肃典型石窟渗水机制与防治技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.  
Wang Y W. Study on seepage mechanism and prevention technology of typical grottoes in Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023. (in Chinese)
- [67] 方云, 顾成权, 严绍军, 等. 河南洛阳龙门石窟溶蚀病害机理的研究[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 479-482.  
Fang Y, Gu C Q, Yan S J, et al. Research on the Karst diseases of the Longmen grottoes in Luoyang, Henan province[J]. Geoscience, 2003, 17(4): 479-482.(in Chinese)
- [68] Zhang M, McSaveney M J. Is air pollution causing landslides in China?[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 481: 284-289.
- [69] Livingston R. Mass balance evidence for hydrochloric acid vapor attack on the marble of the statue of Phoenicia by sea salt dechlorination[C]//Proceedings of the 12th international congress on the deterioration and conservation of stone, Columbia University in the City of New York, 2012:22-26.
- [70] 李宏松. 文物岩石材料劣化特征及评价方法[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.  
Li H S. Deterioration characteristics and evaluation methods of cultural relics rock materials[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese)
- [71] 霍润科, 李静, 辛宏伟, 等. 酸雨环境下砂岩的物理化学性质变化规律分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(2): 165-170.  
Huo R K, Li J, Xin H W, et al. Regularity analysis on corrosion progressive and physical-chemical characteristic of sandstone subjected to Acid Rain[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2016, 48(2): 165-170.(in Chinese)

- [72] 罗孝俊, 杨卫东, 李荣西, 等. pH 值对长石溶解度及次生孔隙发育的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(2): 103-107.  
Luo X J, Yang W D, Li R X, et al. Effects of pH on the solubility of the feldspar and the development of secondary porosity[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, 20(2): 103-107.(in Chinese)
- [73] 张永旺, 曾溅辉, 张善文, 等. 长石溶解模拟实验研究综述[J]. 地质科技情报, 2009, 28(1): 31-37.  
Zhang Y W, Zeng J H, Zhang S W, et al. An overview of feldspar dissolution experiments[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(1): 31-37.(in Chinese)
- [74] Zhang Y, Cao C, Du H M, et al. Investigation into the gaseous SO<sub>2</sub> attack on sandstone in the Yungang Grottoes[J]. Minerals, 2023, 13(1): 123.
- [75] 谢振斌, 郭建波, 陈显丹. 外界因素对崖墓石刻风化影响的实验研究[J]. 四川文物, 2014(1): 54-62.  
Xie Z B, Guo J B, Chen X D. Experimental study on the influence of external factors on weathering of cliff tomb stone carvings [J]. Sichuan Cultural Relics, 2014(1): 54-62.(in Chinese)
- [76] 周骏一, 李晓, 彭斌, 等. 模拟酸雨对乐山大佛基岩影响及其防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2005(1): 79-84.  
Zhou J Y, Li X, Peng B, et al. Impacts of the simulated acid rain on bedrock of the Leshan Great Buddha and its countermeasures of prevention[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005(1): 79-84.(in Chinese)
- [77] 陈卫昌, 李黎, 邵明申, 等. 酸雨作用下碳酸盐岩类文物的溶蚀过程与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2058-2067.  
Chen W C, Li L, Shao M S, et al. Experimental study on carbonate dissolution and erosion effect under attack of simulated sulphuric acid rain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2058-2067.(in Chinese)
- [78] Zhang J K, Li Z, Li L, et al. Study on weathering mechanism of sandstone statues in Southwest China: example from the sandstone of niche of sakyamuni entering nirvana at Dazu rock carvings[J]. Natural Hazards, 2021, 108(1): 775-797.
- [79] 林云, 任华鑫, 武亚遵, 等. 不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 15-26.  
Lin Y, Ren H X, Wu Y Z, et al. Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 15-26.(in Chinese)
- [80] 余敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 碳酸盐岩溶蚀规律与孔隙演化实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 564-572.  
She M, Shou J F, Shen A J, et al. Experimental simulation of dissolution law and porosity evolution of carbonate rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 564-572.(in Chinese)
- [81] 王新录. 钟山石窟的风化及保护初探[J]. 文博, 1992(1): 86-90.  
Wang X L. Preliminary study on weathering and protection of Zhongshan Grottoes[J]. Relics and Museology, 1992(1): 86-90.(in Chinese)
- [82] Mortensen H. Die Salzsprengung und ihre bedeutung für die regionalklimatische gliederung der Wüsten[J]. Petermanns Geographische Mittheilungen, 1933, 79: 130-135.
- [83] Rothert E, Eggers T, Cassar J, et al. Stone properties and weathering induced by salt crystallization of Maltese Globigerina Limestone[J]. Geological Society of London Special Publications, 2007, 271(1): 189-198.
- [84] Fahey B D. A comparative laboratory study of salt crystallisation and salt hydration as potential weathering agents in deserts[J]. Geografiska Annaler Series A, Physical Geography, 1986, 68(1/2): 107.
- [85] 张遥. 成都王建墓地宫石质文物盐分破坏机理及保护对策研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.  
Zhang Y. Study on salt destruction mechanism and protection countermeasures of stone cultural relics in tomb of Wangjian underground Palace[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023. (in Chinese)
- [86] 宗静婷, 王淑丽, 张忠永. 四川广元千佛崖石窟造像表面风化的环境地质问题分析[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 185-190.  
Zong J T, Wang S L, Zhang Z Y. Study on environmental geology problem of surface weathering of grotto statues in Guangyuan Qianfoya, Sichuan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 185-190.(in Chinese)
- [87] 徐叔鹰. 干旱区盐风化过程的初步研究[J]. 干旱区地理, 1993, 16(2): 14-20.  
Xu S Y. Preliminary study on the salt weathering process in arid area[J]. Arid Land Geography, 1993, 16(2): 14-20. (in Chinese)
- [88] Goudie A, Viles H A. Salt weathering hazard[M]. Chichester: Wiley, 1997.
- [89] 李黎, 王思敬, 谷本亲伯. 龙游石窟砂岩风化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1217-1222.  
Li L, Wang S J, Tanimoto C. Study of weathering characteristics of sandstone at Longyou Grottoes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1217-1222.(in Chinese)

- [90] 任建光, 黄继忠, 任志伟, 等. 云冈石窟盐类析出物与石雕表面风化破坏形式的关系研究[J]. 文物保护与考古科学, 2021, 33(6): 47-51.  
Ren J G, Huang J Z, Ren Z W, et al. Study on the relationship between salt precipitates in Yungang Grottoes and the surface destruction forms of stone carvings[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2021, 33(6): 47-51.(in Chinese)
- [91] 张景科, 梁行洲, 叶飞, 等. 敦煌莫高窟北区崖体沿纵深方向风化特征研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1499-1507.  
Zhang J K, Liang X Z, Ye F, et al. Study on weathering characteristics of rock mass along depth direction of cliff located at north of Dunhuang Mogao Grottoes[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1499-1507.(in Chinese)
- [92] 张仲明. 延安清凉山石窟风化特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2020.  
Zhang Z M. Study on weathering characteristics of Qingliangshan Grottoes in Yan 'an[D]. Xi'an: Northwest University, 2020. (in Chinese)
- [93] Hu T F, Brimblecombe P, Zhang Z M, et al. Capillary rise induced salt deterioration on ancient wall paintings at the Mogao Grottoes[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 881: 163476.
- [94] Jiang G H, Guo F, Polk J S. Salt transport and weathering processes in a sandstone cultural relic, North China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2015, 30(1): 69-76.
- [95] 郭青林, 王旭东, 薛平, 等. 敦煌莫高窟底层洞窟岩体内水汽与盐分空间分布及其关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3769-3775.  
Guo Q L, Wang X D, Xue P, et al. Research on spatial distribution and relations of salinity and moisture content inside rock mass of low-layer caves in Dunhuang Mogao Grottoes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S2): 3769-3775.
- [96] 王旭东, 郭青林, 李最雄, 等. 敦煌莫高窟洞窟围岩渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3139-3144.  
Wang X D, Guo Q L, Li Z X, et al. Research on permeability of surrounding rock at Dunhuang Mogao Grottoes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3139-3144.(in Chinese)
- [97] Kuchitsu N, Ishizaki T, Nishiura T. Salt weathering of the brick monuments in Ayutthaya, Thailand[J]. *Engineering Geology*, 2000, 55(1/2): 91-99.
- [98] 黄继忠, 袁道先. 水与盐对云冈石窟石雕的影响初探[J]. 文物世界, 2004(5): 61-66.  
Huang J Z, Yuan D X. Preliminary study on the influence of water and salt on stone carving in Yungang Grottoes[J]. *World of Antiquity*, 2004(5): 61-66.(in Chinese)
- [99] 黄继忠, 张俊芳. 粉尘对云冈石窟石雕影响的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2004, 16(1): 1-8.  
Huang J Z, Zhang J F. Influence of airborne particles on the stone sculptures of Yungang Grottoes[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2004, 16(1): 1-8.(in Chinese)
- [100] Cooke R U, Smalley I J. Salt Weathering in Deserts[J]. *Nature*, 1968, 220(5173): 1226-1267.
- [101] Winkler E M, Singer P C. Crystallization pressure of salts in stone and concrete[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1972, 83(11): 3509.
- [102] 谭沉军, 曾小宇, 李晓钦. 潼南大佛寺摩崖造像水害治理浅析[J]. 中国文化遗产, 2023(1): 99-104.  
Tan Y J, Zeng X Y, Li X Q. A primary study on water hazard control for buddhas carved into the cliff of great Buddha temple in Tongnan County[J]. *China Cultural Heritage*, 2023(1): 99-104.(in Chinese)
- [103] 黄继忠. 云冈石窟主要病害及治理[J]. 雁北师范学院学报, 2003, 19(5): 57-59.  
Huang J Z. Main damages and preservation of the Yungang Grottoes[J]. *Journal of Yanbei Normal University*, 2003, 19(5): 57-59.(in Chinese)
- [104] Li Y H, Huang Z, Petropoulos E, et al. Humidity governs the wall-inhabiting fungal community composition in a 1600-year tomb of Emperor Yang[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 8421.
- [105] He D P, Wu F S, Ma W X, et al. Insights into the bacterial and fungal communities and microbiome that causes a microbe outbreak on ancient wall paintings in the Maijishan Grottoes[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2021, 163: 105250.
- [106] 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 J J, He D P, Wu F S, et al. Comparison of temperature and relative humidity between inside and outside Cave 32, Maijishan Grottoes[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(6): 66-72.(in Chinese)
- [107] 武发思, 武光文, 刘岩, 等. 太原北齐徐显秀墓壁画真菌群落组成与菌害成因[J]. 微生物学通报, 2016, 43(3): 479-487.

- Wu F S, Wu G W, Liu Y, et al. Fungal community composition on normal and moldy mural in Xu Xianxiu's tomb of Northern Qi Dynasty, Taiyuan[J]. *Microbiology China*, 2016, 43(3): 479-487.(in Chinese)
- [108] Dedesko S, Siegel J A. Moisture parameters and fungal communities associated with gypsum drywall in buildings[J]. *Microbiome*, 2015, 3: 71.
- [109] 李强, 葛琴雅, 潘晓轩, 等. 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1371-1378.  
Li Q, Ge Q Y, Pan X X, et al. Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1371-1378.(in Chinese)
- [110] Schabereiter-Gurtner C, Saiz-Jimenez C, Piñar G, et al. Altamira cave paleolithic paintings harbor partly unknown bacterial communities[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2002, 211(1): 7-11.
- [111] Sakr A A, Ghaly M F, Edwards H G M, et al. Involvement of streptomyces in the deterioration of cultural heritage materials through biomineralization and bio-pigment production pathways: a review[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2020, 37(7): 653-662.
- [112] Bastian F, Alabouvette C. Lights and shadows on the conservation of a rock art cave: the case of Lascaux cave[J]. *International Journal of Speleology*, 2009, 38(1): 55-60.
- [113] Sterflinger K. Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage[J]. *Fungal Biology Reviews*, 2010, 24(1/2): 47-55.
- [114] 张秉坚, 周环, 贺筱蓉. 石质文物微生物腐蚀机理研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2001, 13(2): 15-20.  
Zhang B J, Zhou H, He X R. Biodegradation mechanism of historic stone[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2001, 13(2): 15-20.(in Chinese)
- [115] 丁丽君. 岩石微生物对碳酸盐岩的风化作用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.  
Ding L J. Study on weathering of carbonate rocks by rock microorganisms[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009. (in Chinese)
- [116] Turkington A V, Paradise T R. Sandstone weathering: a century of research and innovation[J]. *Geomorphology*, 2005, 67(1/2): 229-253.
- [117] Cañaveras J C, Fernandez-Cortes A, Elez J, et al. The deterioration of circular mausoleum, Roman necropolis of Carmona, Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 518: 65-77.
- [118] 王宁宁, 孙冬梅, 杨克胤, 等. 苦粉孢牛肝菌菌丝及其发酵液对黄山岩石的风化作用[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(4): 911-919.  
Wang N N, Sun D M, Yang K Y, et al. Effects of the mycelia and its fermentation broth of *Tylopus felleus* on weathering of Huangshan rocks[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(4): 911-919.(in Chinese)
- [119] 王翀, 王明鹏, 白崇斌, 等. 露天石质文物生物风化研究进展[J]. *文博*, 2015(2): 86-91.  
Wang C, Wang M P, Bai C B, et al. The new developments of the researches on the biological weathering of the open-air stone cultural relics[J]. *Relics and Museology*, 2015(2): 86-91.(in Chinese)
- [120] 崔惠萍. 北石窟寺病害调查研究[J]. *石窟寺研究*, 2014(00): 391-401.  
Cui H P. Investigation on diseases of the North Cave Temples[J]. *Cave Temples Studies*, 2014(00): 391-401.(in Chinese)
- [121] 陈建平, 陈嘉琦, 方云. 龙门石窟保护性窟檐(雨篷)的修建和思考[J]. *中国文化遗产*, 2018(5): 46-50.  
Chen J P, Chen J Q, Fang Y. Construction and thinking of protective eaves (awnings) of Longmen Grottoes[J]. *China Cultural Heritage*, 2018(5): 46-50.(in Chinese)
- [122] 连颖俊. 天龙山石窟保护性窟檐建设探讨[J]. *文物世界*, 2012(5): 24-27.  
Lian Y J. Discussion on the construction of protective eaves in Tianlongshan Grottoes[J]. *World of Antiquity*, 2012(5): 24-27. (in Chinese)
- [123] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Li Z X. Conservation of ancient sites on the silk road[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [124] 王旭东, 郭青林, 谌文武, 等. 石窟寺岩体保护加固研究进展[J]. *石窟与土遗址保护研究*, 2022(1): 6-27.  
Wang X D, Guo Q L, Chen W W, et al. Advances in research on the conservation and reinforcement of cave temple rock structures[J]. *Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites*, 2022(1): 6-27.(in Chinese)
- [125] 张瑞刚, 王在柱, 张在刚. 浅谈膨润毯在水利上的应用[J]. *内蒙古水利*, 2007(1): 101-102.  
Zhang R G, Wang Z Z, Zhang Z G. Discussion on the application of swelling blanket in water conservancy[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2007(1): 101-102.(in Chinese)
- [126] 周正兵, 王钊, 王俊奇. GCL: 一种新型复合土工材料的特性及应用综述[J]. *长江科学院院报*, 2002, 19(1): 35-38.

- Zhou Z B, Wang Z, Wang J Q. An overview about properties and application of a new geocomposite-GCL[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(1): 35-38.(in Chinese)
- [127] 夏雄, 谢献锟, 高兆国, 等. 高密度聚乙烯土工膜对分层垃圾填埋体渐进滑移的稳定性影响分析[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(3): 86-91.
- Xia X, Xie X K, Gao Z G, et al. Stability analysis of high-density polyethylene geomembrane on gradual slip of layered landfill bodies[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(3): 86-91.(in Chinese)
- [128] 李文军. 北石窟寺地下水与石窟岩体潮湿渗水的关系及地下水治理措施[J]. 敦煌研究, 2006(4): 109-114, 126.
- Li W J. Relationship between groundwater in North Cave Temple and wet seepage of grotto rock mass and groundwater control measures[J]. Dunhuang Research, 2006(4): 109-114, 126.(in Chinese)
- [129] 李心坚. 龙门石窟保护中的灌浆技术[J]. 雕塑, 2008(6): 36-37.
- Li X J. The grouting technique of protecting the Longmen Grottoes[J]. Sculpture, 2008(6): 36-37.(in Chinese)
- [130] 刘祥友, 张新鹏, 范子龙. 龙门石窟潜溪寺裂隙灌浆施工技术研究[J]. 石窟寺研究, 2014(00): 410-418.
- Liu X Y, Zhang X P, Fan Z L. Research on construction technology of grouting in fissure of Qianxi Cave, Longmen Grottoes [J]. Cave Temples Studies, 2014,(00): 410-418.(in Chinese)
- [131] 李最雄, 赵林毅, 李黎. 砂砾岩石窟岩体裂隙灌浆新材料研究[J]. 敦煌研究, 2011(6): 59-64.
- Li Z X, Zhao L Y, Li L. On new fracture grouting material for conglomerate grottoes rock[J]. Dunhuang Research, 2011(6): 59-64.(in Chinese)
- [132] 黄继忠, 王金华, 高峰, 等. 砂岩类石窟寺保护新进展: 以云冈石窟保护研究新成果为例[J]. 东南文化, 2018(1): 15-19.
- Huang J Z, Wang J H, Gao F, et al. Recent progresses in sandstone cave temples conservation: a case study of Yungang Grottoes[J]. Southeast Culture, 2018(1): 15-19.(in Chinese)
- [133] 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 L, Cao W B, Wang X S, et al. Preliminary investigation on water-vapor transfer in Yungang Grottoes[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(11): 6-11.(in Chinese)
- [134] 柴利杰. 云冈石窟水分来源控制因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- Chai L J. Controlling factors of water source in Yungang Grottoes[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese)
- [135] Camuffo D. Microclimate for cultural heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments [M]. Elsevier, 1998.
- [136] 张艳杰. 敦煌莫高窟第87窟现状调查和主要病害成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- Zhang Y J. Existing condition investigation and study on main deterioration mechanism of cave 87 in the Mogao Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.(in Chinese)
- [137] 杨婷. 麦积山石窟防渗防潮技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- Yang T. Study on seepage and moisture-proof technology of Maijishan Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)