

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.127



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 大足石刻北山佛湾诃利帝母造像风化机理

雷雨<sup>1</sup>, 刘欢<sup>2</sup>, 王淑婉<sup>2</sup>, 仇文岗<sup>2</sup>, 刘猛<sup>2</sup>, 蒋思维<sup>1</sup>, 陈卉丽<sup>1</sup>, 林思成<sup>2</sup>

(1. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**大足石刻北山佛湾诃利帝母造像具有极高的文化、历史、艺术价值,但风化严重,长久保存面临严峻挑战。为研究诃利帝母造像风化机理,对造像病害进行细致调查,在诃利帝母造像岩体表层收集风化尘土样品,进行X射线衍射(XRD)和离子色谱(IC)分析,测试其矿物组成和可溶盐的含量,通过气象和空气质量综合监测站对造像区域的空气温度、相对湿度、降雨量等气象参数和二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)、细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)等大气污染物浓度进行长期监测。病害调查结果表明,尘土及粉化剥落是造像石质和彩绘的最主要危害。XRD分析表明,造像矿物成分以石英、斜长石、石膏为主,风化程度较大,在化学风化作用下,石膏等成分易受各种酸的作用而分解。IC分析表明,硫酸根离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、硝酸根离子(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)和氯离子(Cl<sup>-</sup>)含量较高,其酸性腐蚀和盐析作用加速了造像矿物风化解体。环境监测结果表明,该区域处于70%~80%高湿范围内,空气温度受季节影响波动较大,夏季最高温度超40℃。温暖潮湿环境容易诱发石质文物风化,当温度波动伴随着湿度变化时,会进一步增加风化的风险。造像区域大气污染较严重,大气颗粒物是最主要的污染因子,颗粒物中的化学物质与SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>等酸性气态污染物加速了岩石表面矿物质的侵蚀。

**关键词:**大足石刻;湿热地区;石质文物;风化;环境因素

**中图分类号:**TU452      **文献标志码:**A      **文章编号:**2096-6717(2025)03-0079-12

## Weathering mechanism of the Hariti Statue in Fowan of the Beishan Rock Carvings at Dazu

LEI Yu<sup>1</sup>, LIU Huan<sup>2</sup>, WANG Shuwan<sup>2</sup>, ZHANG Wengang<sup>2</sup>, LIU Meng<sup>2</sup>,  
JIANG Siwei<sup>1</sup>, CHEN Huili<sup>1</sup>, LIN Sicheng<sup>2</sup>

(1. Dazu Engraving Research Institute, Chongqing 402360, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The Hariti Statue in Fowan of the Beishan Rock Carvings at Dazu has a very high cultural, historical and artistic value, however its weathering is serious, and the statue of the long-term preservation is facing a

**收稿日期:**2023-06-09

**基金项目:**重庆市大足区科技发展项目(DZKJ, 2021ABB1001);重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2022NSCQ-LZX0001);重庆市科研院所绩效激励引导专项项目(cstc2021jxjl00004)

**作者简介:**雷雨(1972-),女,文博馆员,主要从事石质文物保护与修复技术研究, E-mail:leiyu869@126.com。

刘欢(通信作者),女,博士, E-mail:huanliu@cqu.edu.cn。

**Received:** 2023-06-09

**Foundation items:** Chongqing Dazu District Science and Technology Development Project (No. DZKJ, 2021ABB1001); Chongqing Natural Science Foundation Innovation and Development Joint Fund (No. CSTB2022NSCQ-LZX0001); Chongqing Municipal Scientific Research Institute Performance Incentive Guidance Project (No. cstc2021jxjl00004)

**Author brief:** LEI Yu (1972-), cultural relics museum librarian, main research interests: conservation and restoration techniques for stone cultural relics, E-mail: leiyu869@126.com.

LIU Huan (corresponding author), PhD, E-mail: huanliu@cqu.edu.cn.

serious challenge. In order to study the weathering mechanism of the Hariti Statue, this paper made a detailed investigation on the diseases of statues. The samples of weathered dust were collected from the surface of the rock mass of the Hariti Statue for X-ray diffraction (XRD) and ion chromatography (IC) analysis, which tested the mineral composition and the content and composition of the soluble salts. The meteorological parameters such as air temperature, relative humidity, rainfall and the concentration of atmospheric pollutants such as sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ ), nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), 2.5-micrometer Particulate Matter ( $\text{PM}_{2.5}$ ), inhalable particles ( $\text{PM}_{10}$ ) in the study area were monitored for a long time by the integrated meteorological and air quality monitoring station. The results of disease investigation showed that dust and chalking flaking were the most important diseases to the stone and painting of the statue. XRD test showed that the mineral composition was dominated by quartz, plagioclase feldspar and gypsum. These mineral components have a large degree of weathering, and some components such as gypsum are susceptible to the decomposition under chemical weathering by various acids. IC analysis showed high content of sulfate ion ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrate Ion ( $\text{NO}_3^-$ ) and chloride ion ( $\text{Cl}^-$ ), whose acidic corrosion and salinization accelerate the weathering and disintegration of the artifactual minerals. The results of environmental monitoring showed that the area was in the high humidity range of 70%-80%. The air temperature fluctuates greatly depending on the season, and the maximum temperature in the area of the statue is over 40 °C in summer. The hot and humid environment is apt to induce the weathering of rock cultural heritage, and when the temperature fluctuation is accompanied by the change of humidity, the risk of weathering would be increased. The air pollution in the statue area is serious, among which atmospheric particulate matters are the most important pollution factors. The chemicals in particulate matter along with acidic gaseous pollutants such as  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  will catalyze the erosion of minerals on rock surfaces.

**Keywords:** Dazu rock carvings; hot and humid regions; stone cultural heritage; weathering; environmental factors

大足石刻是世界文化遗产,其中北山佛湾有“诃利帝母龕”、“观无量寿经变相”、“千手观音像”等代表性造像。以诃利帝母造像为代表的唐宋时期石刻作品,为中国晚期石刻艺术研究提供了很好的案例。近年来,龕内造像存在石质风化、彩绘剥落等不同类型和程度的病害,严重制约着北山佛湾石刻的健康保存。

已有研究表明,影响石质文物风化的原因包括岩体矿物组分、可溶盐离子等内在因素和空气温度、相对湿度、大气污染物等环境因素<sup>[1]</sup>。不同矿物组成抗风化能力不同。Zhang等<sup>[2]</sup>发现,大足石刻岩石中存在蒙脱石,其具有吸湿膨胀和干燥收缩性质,当环境湿度变化时会加剧砂岩破坏。可溶盐对于石质文物具有严重侵蚀作用。Yan等<sup>[3]</sup>发现,盐害是导致大足石刻造像风化的重要因素。高温加快了与石刻风化相关的化学反应,温度波动会使砂岩发生劣化。陈星<sup>[4]</sup>结合对表层岩体温度场的现场监测发现,暴露在日晒下壁温较高的岩壁表面风化严重,而靠近阴凉处的岩壁则保存完整。石质长时间处于高湿环境中容易出现表面起翘剥落等病害现象<sup>[5]</sup>。张兵峰等<sup>[6]</sup>对大足石刻进行调研后发现,长时间渗水会使岩体软化,影响其稳定性。大气中气体或颗粒污染物,如氮化物、硫化物、大气悬浮颗粒物等物质会形成腐蚀反应,直接损坏石刻,并加速风化<sup>[7]</sup>。王娟等<sup>[8]</sup>对大足石刻千手观音所处环境参数

的监测结果表明,大气颗粒物为首要污染物。

对于石质文物风化特征的微观研究主要使用X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、离子色谱(ion chromatography, IC)等分析方法。Zhang等<sup>[9]</sup>利用X射线衍射仪在微观结构分析实验室对大足石刻砂岩样本的矿物学特征进行表征,大足石刻的主要黏土矿物类型分别为高岭石、绿泥石/蒙皂石混合层和伊蒙混层混合层。Barnoos等<sup>[10]</sup>通过X射线衍射等方法研究发现,温度波动是影响石块物理劣化的重要因素,并得出结论:石灰岩的结构和化学特性对石块在不同气候条件下的劣化过程具有重要影响。Tian等<sup>[11]</sup>对大足石刻千手观音的石质进行了离子色谱分析发现硫酸盐含量最高,结果表明,潮湿大气环境中空气污染可能是侵蚀的主要原因。

石质文物正遭受着种类多样的风化病害侵蚀,1949年以来,石质文物保护相继经历了环境清理及除险、多学科合作综合性保护、预防性保护与大规模本体修复等3个阶段。20世纪末以来,文物保护的核心关注点从文物本体转移到文物所处的环境。但目前对大足石刻风化机理的研究成果较少,造像风化的影响因素仍缺乏量化,岩体特性和环境因素相结合的风化机理尚不明晰。针对目前研究的不足,笔者选择大足石刻北山佛湾诃利帝母造像作为研究对象,分析其矿物成分、可溶盐及保存环境,将现场调查和室内试验相结合,研究内因和外因共同

作用下石质文物风化的影响因素和风化机理,为湿热地区石质文物保护修复提供科学依据。

# 1 研究区域概况

## 1.1 研究对象

大足石刻北山佛湾位于重庆市大足区,距大足城区 1.5 km,属于亚热带季风气候,温暖湿润,多雨少晴,为典型的湿热地区<sup>[12]</sup>。其地形特征为“坪状”侵蚀剥蚀低山,山顶由厚层砂岩组成,该层砂岩厚 7~15 m,其上下均为紫红色泥岩构成的缓坡。北山摩崖造像雕刻在北山的斜坡砂岩陡崖上,陡崖南北延展,呈月牙形,长约 300 m,砂岩陡崖高 3~7 m。山顶高程为 545.5 m,为地表分水岭,北山石刻区内沟谷不发育<sup>[13]</sup>。诃利帝母造像所在区域立壁顶部地形平坦,形如围椅状,构成了地表水和地下水的汇水和储水地段。研究区域设置在重庆市大足石刻北山佛湾第 122 号龕诃利帝母龕,其地理位置如图 1 所示。



(a) 研究对象所在区域(大足石刻北山石刻景区)



(b) 研究对象所在位置(第 122 号龕诃利帝母龕)

图 1 研究对象地理位置图  
Fig. 1 The geolocation map of the study object

## 1.2 地层岩性

据中华人民共和国综合水文地质图内江幅(1978)(H-48-[22]),重庆大足区出露的地层位于蓬莱镇组(底层)与遂宁组(顶层)的交界处,属河湖相沉积环境,岩层基本呈水平状出露,河湖沉积环境

的特点导致地层岩性变化强烈,各种砂岩及砂泥岩互层交错的情况凸显。剖面上则表现为两大岩组地层随地形变化而频繁交替出露,地势高处(如丘陵顶部岩层)为蓬莱镇组底部岩层,地势低处(如冲沟谷底)则转变为遂宁组顶层岩层。根据以往资料,造像区内主要岩层可分为 4 组,上部 3 组主要以长石石英砂岩为主,石英含量总体上大于长石,属侏罗纪中期蓬莱镇组底部岩层;下部岩层以暗红色泥岩、砂质泥岩为主,局部夹浅灰至灰绿色砂岩,属遂宁组顶部岩层。

# 2 研究方法

## 2.1 岩体组分分析

诃利帝母造像千百年来一直裸露在自然环境中,龕窟造像表面尘土覆盖,这些尘土可能是大气中的污染物与龕窟造像粉末状风化产物的混合物,对文物危害较严重。为了分析诃利帝母造像尘土复杂的化学成分,根据岩石的风化特征及病害空间分布,在诃利帝母造像岩体表层共收集 7 个风化尘土样品,对尘土样品进行 X 射线衍射和离子色谱分析,试验测点分布如表 1 所示。

表 1 试验测点分布	
Table 1 Experimental measurement points distribution	
点位	位置
1	大足北山佛湾 122 号龕诃利帝母龕乳母手腕
2	大足北山佛湾 122 号龕诃利帝母龕左臂侍女
3	大足北山佛湾 122 号龕诃利帝母龕头顶花冠
4	大足北山佛湾 122 号龕诃利帝母龕门口地面
5	大足北山佛湾 122 号龕诃利帝母龕右手臂侍女手腕
6	大足北山佛湾 122 号龕诃利帝母龕正手臂座椅靠背
7	大足北山佛湾 122 号龕诃利帝母龕底部地面内侧

取 0.2 g 样品粉末,使用 Bruker D8 ADVANCE 系列 X 射线衍射仪分析诃利帝母造像的尘土样品,研究其矿物组成。

取 0.1 g 样品研磨成粉,以 10 mL 去离子水溶解,超声震荡 10 min 后离心处理,形成提取液。用注射器抽取 1 mL 提取液,通过滤芯注入 Thermo Fisher Scientific(赛默飞)ICS-1100 型离子色谱仪进行测定。分析样品硝酸根离子(nitrate ion,  $\text{NO}_3^-$ )、硫酸根离子(sulfate ion,  $\text{SO}_4^{2-}$ )、氯离子(chloride ion,  $\text{Cl}^-$ )、镁离子(magnesium ion,  $\text{Mg}^{2+}$ )、钠离子(sodium ion,  $\text{Na}^+$ )、钾离子(potassium ion,  $\text{K}^+$ )、钙离子(calcium ion,  $\text{Ca}^{2+}$ )等离子含量。

## 2.2 环境监测

为更好地保护文物,大足石刻研究院在诃利帝母造像北侧附近安装了监测设备,进行日常监测工



作并为大气质量监测提供必要的参数。在诃利帝母造像附近的孝经亭外设置了环境监测站,对环境参数进行了长期监测。

为了解北山佛湾诃利帝母造像物理环境现状,2019—2021年,通过北山空气质量监测站自动记录了环境空气质量情况,监测内容包括二氧化氮(nitrogen dioxide,  $\text{NO}_2$ )、二氧化硫(sulfur dioxide,  $\text{SO}_2$ )等气态污染物和细颗粒物(2.5-micrometer particulate matter,  $\text{PM}_{2.5}$ )、可吸入颗粒物(inhalable particles,  $\text{PM}_{10}$ )等大气颗粒物。2021年8月—2023年4月,通过北山168窟工程项目气象综合监测站对诃利帝母造像龕进行了气象参数现场监测,包括诃利帝母造像北侧表面附近空气温度、相对湿度和降雨量等。

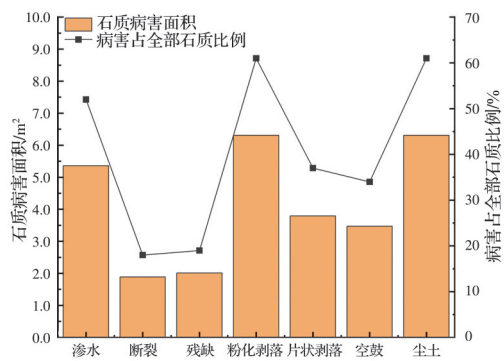
### 3 病害分类与研究结果

#### 3.1 病害现状

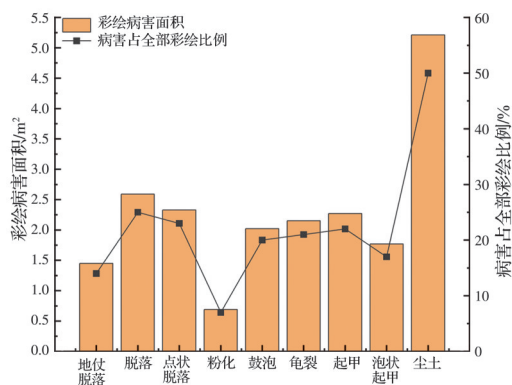
北山佛湾1952年修建了长廊保护建筑,作为室外遗存的诃利帝母造像,位于北山佛湾北段转角处,避免了直接的风吹日晒,相较于北山同时期其他造像,其彩绘和金箔保存都相对较好。石质文物表层风化主要包含石质和彩绘两个方面,可结合石质文物病害的界定及基本形态特征,对造像病害进行细致的调查统计,全面了解石质文物病害的种类、分布情况和残损程度。诃利帝母龕造像总面积约为 $10.34\text{ m}^2$ ,通过现场病害调查可知,诃利帝母造像病害总面积约 $6.31\text{ m}^2$ 。对主要病害及面积进行统计分析,结果见图2,病害类型见图3,诃利帝母造像病害测绘图件如图4所示。

由图2和图3可知,诃利帝母造像石质病害统计共发现7种病害,其中,渗水 $5.3\text{ m}^2$ 、断裂 $1.89\text{ m}^2$ 、残缺 $2.01\text{ m}^2$ 、粉化剥落 $6.31\text{ m}^2$ 、片状剥落 $3.79\text{ m}^2$ 、空鼓 $3.47\text{ m}^2$ 以及尘土 $6.31\text{ m}^2$ 。尘土及粉化剥落为石质最主要危害,病害面积占全体石质比例高达61%,其次为渗水,病害面积占全体石质比例达52%,断裂与残缺两种病害相对较少,病害面积占全体石质比例的20%左右。诃利帝母造像彩绘病害统计共发现9种病害,其中,地仗脱落 $1.45\text{ m}^2$ 、脱落 $2.59\text{ m}^2$ 、点状脱落 $2.33\text{ m}^2$ 、粉化 $0.69\text{ m}^2$ 、鼓泡 $2.02\text{ m}^2$ 、龟裂 $2.15\text{ m}^2$ 、起甲 $2.27\text{ m}^2$ 、泡状起甲 $1.17\text{ m}^2$ 以及尘土 $5.21\text{ m}^2$ 。彩绘病害整体所占比例较少,尘土为彩绘最主要危害,病害面积占整体彩绘比例达61%,其次为脱落、点状脱落、起甲与龟裂,病害面积占全体彩绘比例的20%左右,粉化相对较少,病害面积仅占全体彩绘比例的7%。

由统计结果可知,诃利帝母造像病害种类较



(a) 诃利帝母造像石质病害面积及所占比例



(b) 诃利帝母造像彩绘病害面积及所占比例

图2 诃利帝母造像病害面积及所占比例

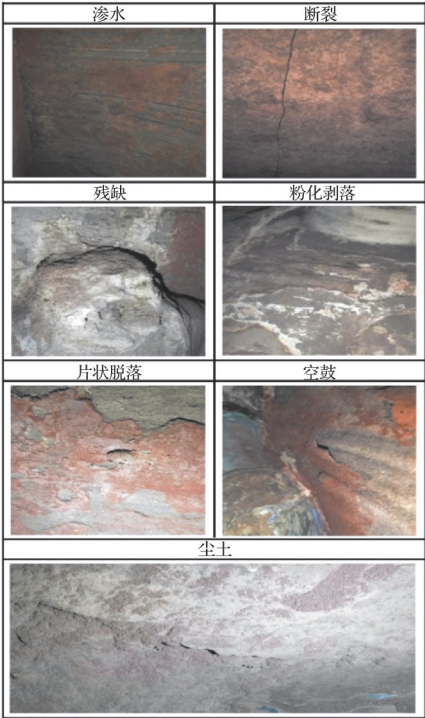
Fig.2 The area and proportion of Hariti Statue's diseases

多,面积大,积尘严重,剥落与脱落等病害的影响是毁灭性的,影响了诃利帝母造像长期保存与展示,为使造像重新恢复到相对稳定状态,必须采取抢救性保护修复措施。可结合环境参数和岩性特征提取蕴含在病害表现之下的潜在规律,分析病害形成的原因。

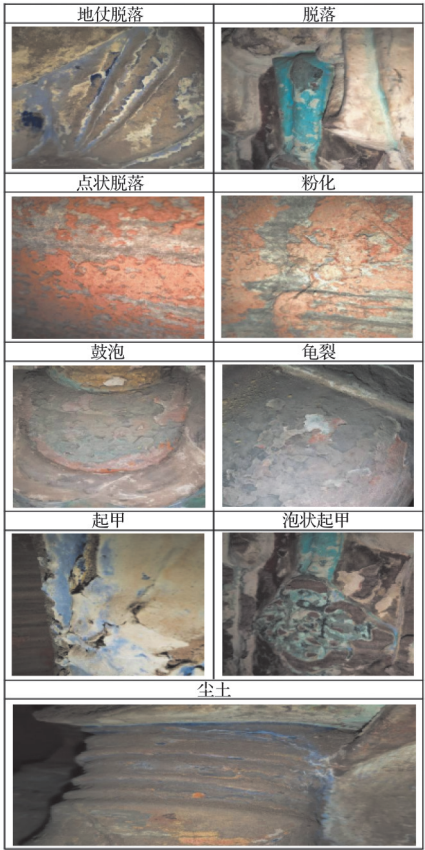
#### 3.2 矿物成分

为研究诃利帝母造像的矿物成分,在现场提取具有代表性的尘土进行室内X射线衍射试验,结果见表2。由表2可见,7个尘土样本中主要矿物成分均为石英、斜长石、钾长石、硬石膏、方解石、伊利石、绿泥石和高岭石等8种矿物,其中高岭石和硬石膏为次生矿物。诃利帝母各龕尘土的矿物成分以石英和斜长石为主,石膏和伊利石次之,其他矿物成分含量相对较少,一般都小于8%。石英含量范围为55%~63%;长石含量范围为18%~25%,一般斜长石含量稍多于钾长石;石膏含量范围为4%~18%;方解石含量范围为2%~7%;伊利石含量范围为4%~8%;绿泥石含量为2%;高岭石含量范围为2%~6%。

造像表面和地表的尘土矿物主要来自于母岩的风化作用,包括岩石破碎的物理风化作用和具有



(a) 诃利帝母造像石质病害类型



(b) 诃利帝母造像彩绘病害类型

图 3 诃利帝母造像病害类型

Fig.3 The types of Hariti Statue's diseases

离子交换反应的化学风化作用。研究表明,随着气候变湿热,伊利石化学风化加剧,将进一步分解为高岭石。高岭石形成于温暖潮湿的气候环境,是弱

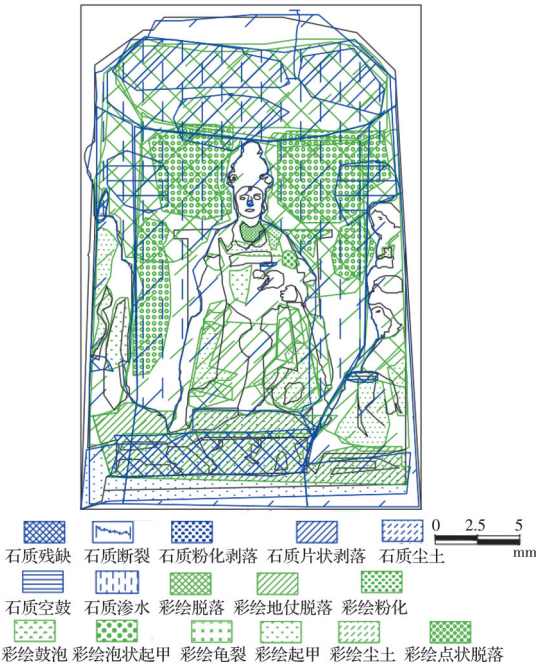


图 4 诃利帝母造像病害图

Fig.4 The pathology diagram of Hariti Statue

酸性和淋滤作用、化学风化作用强烈的环境指示矿物;绿泥石形成于碱性环境,富集于以物理风化为 主、化学风化作用受抑制的地区<sup>[14]</sup>。由鉴定结果可知,方解石极不稳定,易在外界环境因素影响下发生流失,而石英化学性质十分稳定,因此,可按照方解石含量与石英含量之比来量化分析砂岩的风化程度,将结果按式(1)处理<sup>[15]</sup>,计算出各龛造像尘土样本风化程度的变化关系。

$$W_{ck} = \frac{M_{CaCO_3}}{M_{SiO_2}} \tag{1}$$

式中:  $W_{ck}$  为风化程度;  $M_{CaCO_3}$  为方解石含量;  $M_{SiO_2}$  为石英含量。

由表 2 可知,各样本  $W_{ck}$  值均小于 0.29,表明砂岩风化程度较大,属强风化砂岩。不同风化程度的样本矿物成分变化不大,说明化学风化不是诃利帝母造像风化的主导因素。

3.3 可溶盐离子

在诃利帝母各龛表面采样,进行离子色谱分析,得到诃利帝母造像尘土样品中离子团的成分和离子质量浓度,如表 3 所示。由测试结果可知,可溶盐阳离子主要包括  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  四种,阴离子主要包括  $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$  三种。根据《文物脱盐处理规范第 4 部分:砖石质文物》中给出的式(2)<sup>[16]</sup>,对所得的离子质量浓度进行换算,得到诃利帝母造像尘土样品中离子质量百分比含量,见表 4。

$$W_i = \frac{C \times V \times N}{G \times 10\,000} \tag{2}$$

由表 4 可知,诃利帝母造像尘土样品中  $SO_4^{2-}$  含

表 2 诃利帝母尘土样品矿物含量

Table2 The mineral content of dust sample of Hariti Statue

样品编号	矿物含量/%								风化程度 $W_{ck}$
	石英	斜长石	钾长石	石膏	方解石	伊利石	绿泥石	高岭石	
1	54.5	21.8	3.3	13.3	1.3	3.7	2.1		0.02
2	54.7	20.5	1.9	8.7	5.3	4.3		4.6	0.10
3	57.0	15.0	2.9	15.3	1.6	6.3		1.9	0.03
4	57.2	18.9	3.5	8.3	5.7	4.6		1.8	0.10
5	54.7	11.7	1.4	17.5	1.5	8.0		5.2	0.03
6	58.5	22.5	1.5	4.8	6.5	4.5		1.7	0.11
7	62.7	17.2	1.9	3.2	3.6	5.7		5.7	0.05

表 3 诃利帝母尘土样品离子质量浓度

Table3 The ion concentration of the dust sample of Hariti Statue

样品 编号	离子质量浓度/(mg/L)						
	$Cl^-$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$
1	4.39	10.96	1 094.63	1.71	1.29	3.08	460.11
2	7.86	22.28	1 411.69	2.22	2.47	3.90	582.43
3	3.87	9.69	573.77	2.51	1.48	1.50	255.62
4	0.63	2.06	109.98	2.30	4.00	3.60	514.22
5	8.46	10.52	948.69	1.39	1.83	1.62	395.55
6	1.37	4.07	473.12	1.06	0.95	2.95	209.97
7	1.26	3.60	439.71	1.68	1.12	1.88	194.30

量和  $Ca^{2+}$  含量大于 1%, 其余离子含量均小于 1%。阳离子含量由高到低依次为  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $Na^+$ , 阴离子含量由高到低依次为  $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$ 。

根据《文物脱盐处理规范第 4 部分: 砖石质文物》行业标准中砖石质文物可溶盐危害程度评价指标可知<sup>[16]</sup>, 诃利帝母造像所有尘土样品中的  $SO_4^{2-}$  离子含量均达到极其严重的危害程度, 2、3、5 号尘土样品中的  $NO_3^-$  含量达到严重程度, 1 号尘土样品中  $NO_3^-$  含量达到中等程度, 5 号尘土样品中  $Cl^-$  含量达到严重程度, 1、2、3 号尘土样品中  $Cl^-$  含量达到中等程度。

3.4 气象参数

对诃利帝母造像附近气象综合监测站的热湿

环境监测数据进行分析, 掌握造像所在地整体温湿度情况。2021 年 8 月—2023 年 4 月, 监测期间诃利帝母造像北侧表面附近空气温度、相对湿度和降雨量的月均值统计数据如图 5 所示。监测期间, 年平均降水量 467.53 mm, 年中的 6 月—9 月降雨最多, 最大降雨量为 3 280 mm, 8 月和 9 月降雨量占全年降雨量的 48% 左右。最小降雨量为 0, 2021 年 11 月、2022 年 1 月、2023 年 1 月降雨量低于 10 mm。月平均气温及相对湿度的波动可能与降雨量相关。针对监测点的空气温度变化, 大足石刻北山佛湾诃利帝母造像年平均温度为 17.5℃, 气温月均值在 6.7~32.9℃之间, 最高月平均气温为 32.9℃, 出现在 8 月; 最低月平均气温为 6.7℃, 出现在 12 月。监测期间的月均气温数据集中在 21.0~32.9℃之间, 环境温度较高, 气温的月极差最大为 35.2℃, 最小为 12.2℃, 气温稳定性较差。空气温度季节差异较大, 春季平均温度为 19.4℃, 夏季平均温度为 27.7℃, 秋季平均温度为 17.6℃, 冬季平均温度为 8.6℃。造像区域多发高温事件, 2021 年 8 月、2022 年 6 月—9 月, 2023 年 4 月, 6 个月的月温度最大值均超 35℃。针对监测点的空气相对湿度变化, 诃利帝母造像年平均相对湿度高达 78%, 相对湿度月均值在 54%~91% 之间, 最高月平均相对湿度为 91%, 出现在 10 月; 最低月平均相对湿度为 54%, 出现在 8 月。监测期间的月均相对湿度数据集中在 80%~

表 4 诃利帝母尘土样品离子质量百分比含量

Table4 The percentage ion mass content of the dust sample of Hariti Statue

样品编号	离子含量百分比/%							总离子含量/%
	$Cl^-$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	
1	0.04	0.11	10.95	0.02	0.01	0.03	4.60	15.76
2	0.08	0.22	14.12	0.02	0.02	0.04	5.82	20.33
3	0.08	0.19	11.48	0.05	0.03	0.03	5.11	16.97
4	0.01	0.02	1.10	0.02	0.04	0.04	5.14	6.37
5	0.17	0.21	18.97	0.03	0.04	0.03	7.91	27.36
6	0.01	0.04	4.73	0.01	0.01	0.03	2.10	6.93
7	0.01	0.04	4.40	0.02	0.01	0.02	1.94	6.44



100% 之间,环境湿度较高,相对湿度的月极差最大为 82%,最小为 45%,湿度稳定性较差。湿热地区微环境持续保持高湿状态,月平均相对湿度普遍高于 50%,有将近 3% 的时间相对湿度达到 100%。2021 年 8 月—12 月,2022 年 1 月、5 月、6 月、9 月—12 月,2023 年 1 月、3 月,14 个月的月平均相对湿度均超过 80%,监测期间每月相对湿度最大值均达到 100%。

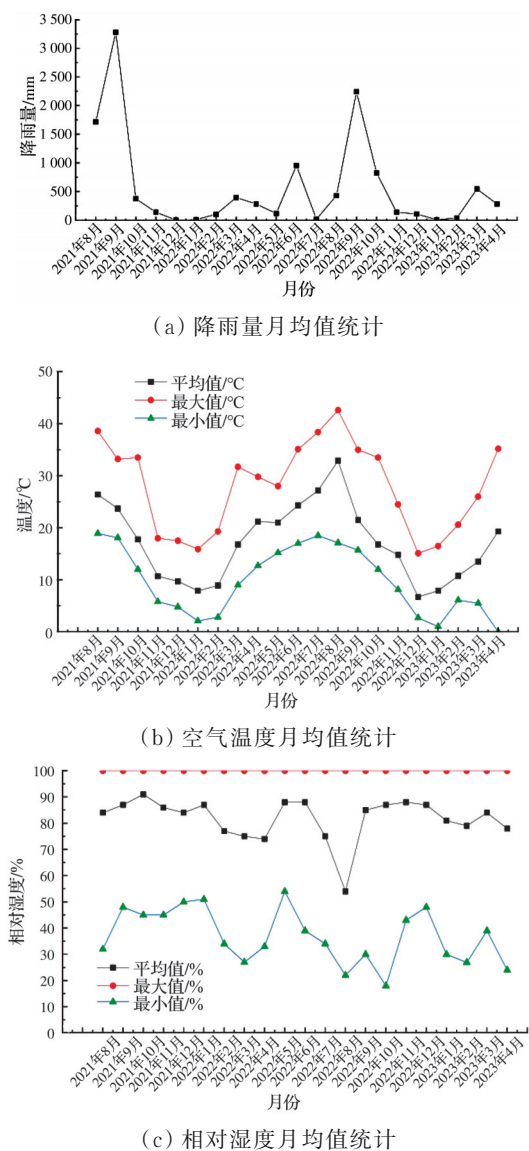


图 5 气象参数月均值统计

Fig.5 Statistical tables of monthly averages of meteorological parameters

在众多影响文物保存的环境因素中,温度和湿度是两个最关键的参数,应减少文物保存随环境温湿度的季节波动,保持“适当”“稳定”的湿热条件<sup>[17]</sup>。大足为典型的湿热地区,归纳诃利帝母造像本身所处的环境特征可知,4 月—8 月为其高温高湿时间段,需要在此时间段内进行重点调控。

3.5 大气污染

对北山空气质量监测站 2019—2021 年的监测数据进行处理,SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 等大气污染物质量浓度年均值统计见表 5。从监测数据中可知,近年来 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度呈持续上升趋势。与 2019 年相比,2020 年 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 质量浓度年均增长率分别为 9%、30%、143%、29%,与 2019 年相比,2021 年 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 质量浓度年均增长率分别为 18%、10%、153%、63%。对空气质量的检测结果表明,PM<sub>2.5</sub> 年平均质量浓度增长率最大,说明大气颗粒物可能是诃利帝母造像的首要污染物。高温环境和大量扬尘等因素都可能导致大气颗粒物质量浓度升高。SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 等酸性气体溶于石质文物内的水,形成酸性可溶盐离子,腐蚀岩体。诃利帝母龕左壁乳母造像保存情况对比见图 6,与 2019 年相比,2021 年造像粉化剥落扩展,风化裂隙进一步发育,灾害情况日渐严重。可见,环境污染复杂多变,需以破坏机理为依据,关注大气污染物的监测和防控。

表 5 大气污染物质量浓度年均值统计

Table5 Annual average statistics of atmospheric pollutant concentrations

年份	SO <sub>2</sub> / (mg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> / (mg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> / (mg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> / (mg/m <sup>3</sup> )
2019	0.011	0.010	0.187	0.696
2020	0.012	0.013	0.454	0.895
2021	0.013	0.011	0.477	1.137

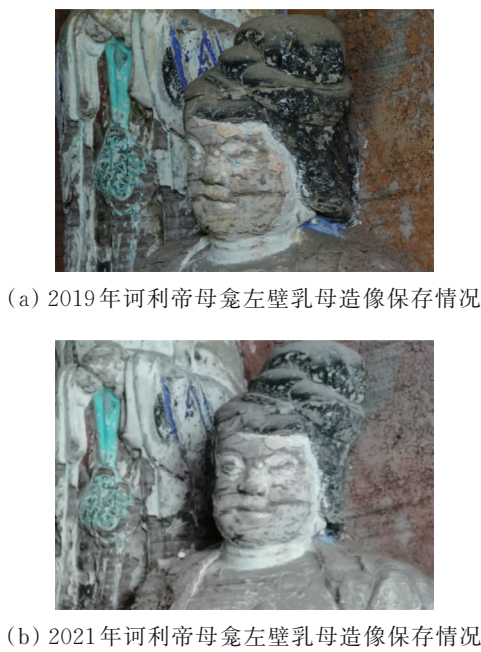


图 6 诃利帝母龕左壁乳母造像保存情况对比图

Fig. 6 Comparison of the preservation of the Wet Nurse Statue on the left wall of the shrine of Hariti Statue

## 4 病害发生机理分析

### 4.1 岩体特征

#### 4.1.1 矿物引起的石刻风化

岩石在风化时的稳定程度主要取决于矿物组成成分及岩石的结构构造。对北山佛湾河利帝母造像进行X射线衍射分析发现,其岩体矿物成分主要以石英、斜长石、钾长石、方解石、硬石膏和黏土矿物为主,黏土矿物由伊利石、绿泥石和高岭石等组成,砂岩中主要成分为石英颗粒,含量在57%左右。石英是最稳定的造岩矿物,在风化过程中几乎只发生机械破碎,不易发生化学溶解。砂岩风化程度越深,石英的相对含量越高,说明河利帝母造像风化程度较深。河利帝母造像黏土矿物含量在14%左右,杨阳等<sup>[18]</sup>发现,砂岩中黏土矿物含量较高的特点会导致其水理性质较差,抗风化能力较差,是导致砂岩风化的主要原因。黏土矿物中伊利石含量最高,占比约57%。伊利石吸水易膨胀,抗干湿循环能力较差,易导致石质文物劣化<sup>[19]</sup>。河利帝母造像砂岩中钾长石和斜长石等长石类矿物含量在21%左右。长石类矿物在物理风化作用下易沿解理面破碎,在化学风化作用下易受各种酸溶液(主要是碳酸和有机酸)的作用而发生化学反应,生成次生矿物高岭石,高岭石的化学性质较为稳定,但在水的作用下容易分散变形,使砂岩变得疏松,降低岩石强度<sup>[20]</sup>。研究发现,风化后砂岩的方解石、斜长石和钾长石会大量流失,且出现次生矿物高岭石和硬石膏<sup>[21]</sup>。河利帝母造像的矿物成分中石膏占比10%左右,石膏具有最低的溶解度和吸湿性,在高湿度环境下易发生潮解,最终形成硬化的石膏石。硬石膏有很强的膨胀性,会对砂岩矿物颗粒产生较大的膨胀力,使其剥落,这意味着位于湿热地区的河利帝母造像极易风化,并粉化剥落。

#### 4.1.2 可溶盐离子引起的石刻风化

大足石刻北山佛湾河利帝母造像可溶盐的种类较多,是影响造像风化的重要因素。其中,风化作用生成的 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-$ 是石刻盐类病害的主要成分。大足石刻多雕刻于含泥质砂岩上,由于其岩石孔隙大,吸水性强,在大气降尘、降雨及岩体渗水的作用下,有利于可溶盐的生成和溶解<sup>[22]</sup>。风化作用生成的可溶性盐积聚在表层岩石孔隙中,潮湿时结晶水膨胀,失水时收缩,反复进行的溶解-结晶作用造成石质结构改变<sup>[23]</sup>。结果表明,硫酸盐和硝酸盐是对河利帝母造像侵蚀破坏危害性最大的两种盐类。 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 对砂岩风化的机理有一些区别,主要体现在以下几个方面:在化学反应方面,

当 $\text{SO}_4^{2-}$ 与水和氧气相互作用时,会形成硫酸盐,在酸性条件下矿物质会加速溶解,导致砂岩风化。 $\text{NO}_3^-$ 通常与岩石中的钙、镁、铁等离子发生化学反应,形成相应的硝酸盐;在酸性影响方面, $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 都可以形成酸性环境,但硫酸(Sulfuric Acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ )通常比硝酸(Nitric Acid,  $\text{HNO}_3$ )酸性更强,这意味着硫酸根离子在酸性风化中作用可能更加剧烈;在矿物质作用方面, $\text{SO}_4^{2-}$ 主要与硫酸盐矿物反应,如石膏或硫铁矿。 $\text{NO}_3^-$ 则常与碳酸盐矿物反应,如方解石,这与刘汉龙等<sup>[24]</sup>的研究结论相同。 $\text{Cl}^-$ 同样也是河利帝母造像表面析出盐的主要成分之一,危害较严重。 $\text{Cl}^-$ 可以与砂岩中的其他离子进行离子交换反应,例如,与 $\text{Ca}^{2+}$ 交换形成氯化钙(Calcium Chloride,  $\text{CaCl}_2$ ),导致岩石中的其他矿物质被释放出来。 $\text{Cl}^-$ 还可以促使矿物质在水中溶解,导致岩石的侵蚀和分解。例如在有氯化钠(Sodium Chloride,  $\text{NaCl}$ )存在的条件下,石灰岩文物表面生成的硫酸钙(Calcium Sulfate,  $\text{CaSO}_4$ )会不断溶解,从而使酸雨对文物的侵害反复进行<sup>[25]</sup>。此外, $\text{Cl}^-$ 与过氧化物等氧化剂相互作用时,可能会产生酸性条件,有助于加速岩石的风化。

### 4.2 保存环境

#### 4.2.1 高湿环境引起的石刻风化

对大足石刻北山佛湾河利帝母造像的长期环境监测结果显示,造像区域雨量充沛、历时长,降雨量季节分布差异明显,夏季降雨量最大。受降雨影响,河利帝母造像区域的相对湿度常年在80%左右。重庆盆地四周高山环绕,水汽不易散失,导致大足常阴霾寡照,湿度较大<sup>[12]</sup>。Liu等<sup>[26]</sup>对重庆1996—2015年小时降水量数据的分析表明,重庆雨量充足,夏季是降雨的主要季节,最大的小时降雨强度从50.8 mm到115.9 mm不等。郑箐舟等<sup>[27]</sup>整理了重庆市1980—2020年间15个地面气象观测站点的日值观测数据发现,20世纪80年代整个研究区相对湿度在78%~83%左右,到了21世纪初,相对湿度在68%~73%左右,相对湿度较高且高相对湿度持续时间较长。根据河利帝母造像监测结果可知,高湿度环境易导致石质文物病害发生。大足石刻区构造简单,地层产状平缓,为近水平的岩层。石刻区内不断裂发育,层面节理与构造节理交切,构成了石刻区的裂隙网络系统,成为地下水储存和渗流的空间和通道<sup>[28]</sup>。丰富的大气降水形成水源,或地表水源或地下水源,地表水沿岩体裂隙潜入地下,通过网络状裂隙导向崖壁表面,危害造像,使其长时间处于潮湿状态。因毛细水作用,干湿、季节温度波动,加之风蚀和雨季的强降雨对河利帝母造像



岩壁的物理冲刷等作用,使表层岩石变得疏松,呈粉状、块状剥落<sup>[29]</sup>。黄继忠等<sup>[30]</sup>得出相同结论:岩体长期维持在高湿环境会诱发石质文物空鼓、脱落等现象。张兵峰等<sup>[6]</sup>对大足石刻的研究结果类似:降雨带来的液态水会通过孔隙网络进入岩体内部,通过冰冻凝结和吸水膨胀作用,直接造成砂岩类石质文物的水解。此外,在相对湿度达到条件,尤其在夏季雨季空气湿度较高时,窟岩壁温与空气温度形成温差,容易发生结露现象。析出的水汽凝结水作为溶剂溶解空气中 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 等有害气体,形成可溶盐,增加诃利帝母造像可溶盐离子含量,可溶盐通过毛细作用随着水分进入到岩体内部,在保存环境的温湿度变化下发生迁移和相变,与岩石中的矿物质反应,导致岩石化学成分与微观结构的改变,对造像造成破坏<sup>[31]</sup>。可见,水不仅对石窟寺危害大、破坏严重,同时又是许多病害产生的根源<sup>[6,32]</sup>。诃利帝母造像为裸露在自然环境下的石质文物,难以杜绝大气降水的入渗补给,唯一的途径是疏导含水体中的地下水。为使北山石刻能更好地得到科学保护,1990年已制定了“大足北山石窟防治水害工程初步设计方案”,此后,针对北山大佛湾渗水病害严重地段,中国文物研究所石窟研究室和大足石窟艺术博物馆进行了排水隧洞设计,有效地疏导凹地含水体中的地下水水流,缓解了石刻渗水现象。

#### 4.2.2 温度变化引起的石刻风化

研究结果显示,大足石刻北山佛湾诃利帝母造像区域夏季高温事件频发,月空气温度最大值超 $35^\circ\text{C}$ 。造像区域空气温度波动受季节的影响,不同季节间平均空气温度差值为 $9.5^\circ\text{C}$ ,月平均温度波动范围在 $20^\circ\text{C}$ 左右,波动较大。川渝地区地形复杂特殊,四季分明,受气候变化趋势影响,高温事件频发。Yao等<sup>[33]</sup>研究发现,从1951年到2010年,重庆市年平均温度呈 $0.10^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ 的平均上升趋势,远高于全球 $0.074^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ 的平均上升趋势,表明重庆市升温程度更高。到21世纪20年代,重庆超过 $35^\circ\text{C}$ 的高温热浪天气灾害水平显著增加,影响面积扩大<sup>[34]</sup>。Wang等<sup>[35]</sup>分析了重庆2012—2020年的气象数据发现,重庆的热环境受到气候特征和季节差异的影响,表现出明显的年际和季节差异。石质文物所处地域的气候与文物的保存密切相关,文物保护需要一个温度相对稳定的环境。根据监测结果推测可知,高温条件可能会催化诃利帝母造像矿物质的化学反应,加速溶解或改变矿物质的化学组成,诃利帝母造像区域内季节性的温度波动还会造成岩体的不均匀膨胀和收缩。热作用已被证明是

导致许多岩体加速降解的重要因素<sup>[36]</sup>。作为热的不良导体,温度的季节变化会使岩石表面与内部存在温度梯度,当温差过大时,热应力作用会导致岩体形成裂缝,降低其强度,破坏其完整性<sup>[16]</sup>。尤其是当季节温度波动伴随着湿度的变化时,更会增加风化的风险。大足石刻北山佛湾诃利帝母造像区域常年处于 $70\%\sim 80\%$ 的高湿状态,相较于温度较低的其他季节,夏季超 $35^\circ\text{C}$ 高温可能导致岩石中的水分体积膨胀,岩石表层热胀冷缩产生鳞片状起翘与剥落等病害<sup>[37]</sup>。Hoxha等<sup>[38]</sup>研究了法国香波城堡的典型石墙由温湿度波动引起的石质损伤,结果表明,气象条件变化引起的应力波动是导致石材表面彩绘层的剥落和褪色并引起石质风化的主要因素。根据此结论推测,在大足石刻北山佛湾诃利帝母造像现有环境下,升温 and 降温季节周期反复作用会使造像岩体长期处于应力反复变化中,造像石质和赋存于石质表面的颜料会不断劣化,石质粉化、脱落、彩绘褪色等病害更加严重。

#### 4.2.3 大气污染引起的石刻风化

大足石刻北山佛湾空气质量监测结果显示,诃利帝母造像区域大气污染较为严重,大气中的污染物主要为 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 与 $\text{NO}_2$ ,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 等大气颗粒物是诃利帝母造像的首要污染物。根据监测结果推测可知,颗粒物中富集的Fe、Mn元素微粒可能会催化大气中的气态污染物与诃利帝母造像岩体的化学反应,随着时间的流逝,风化病害将更加发育。此外,大足石刻北山佛湾诃利帝母造像中的石膏成分对酸性气体污染物最为敏感。石膏是 $\text{CaSO}_4$ 的矿物,当 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 与水蒸气及其他气体反应,会形成含有硫酸盐和硝酸盐等酸性物质的酸雨,石膏极易溶解在硫酸性酸雨中,进而造成石质文物表面的酸性腐蚀破坏<sup>[39]</sup>。张世杰<sup>[40]</sup>和Hua等<sup>[41]</sup>的研究验证了此结论:作为环境酸化的前体物,大气中的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 等水溶性酸性氧化物气体及其形成的酸溶液会吸附在岩石表面或进入岩石孔隙,与砂岩发生反应,破坏其矿物结构,同时加速石质文物的溶蚀速度,降低文物的抗风化性能,使岩石发生表面粉化、溶蚀、片状剥蚀等病害特征。大气污染物向来被认为是促进文物病害生成的重要诱因,环境污染问题日益突出,硫氧化物、氮氧化物和悬浮颗粒等大气污染物浓度不断上升,导致空气质量的不断恶化,造像破坏明显加剧<sup>[42]</sup>。

## 5 结论与展望

调查了大足石刻北山佛湾诃利帝母造像的病

害现状以及在矿物成分、可溶盐含量等内因和空气温度、相对湿度、大气污染物等环境因素影响下的潜在风化机理,得到以下主要结论:

1)依据大足石刻北山佛湾诃利帝母造像病害现状的精细调查,尘土及粉化剥落为岩体表层主要病害物,病害面积占全体石质比例达61%。

2)通过对风化砂岩样品的室内X射线衍射检测分析可知,大足石刻北山佛湾诃利帝母造像矿物组成主要以石英和斜长石为主,风化砂岩含矿物高岭石和石膏次生矿物。砂岩风化程度较大,属强风化砂岩。硬石膏有很强的膨胀性,会对砂岩矿物颗粒产生较大的膨胀力,使其剥落。石膏和长石在酸性环境下溶解,可使造像表面产生粉化剥落、片状剥落等。

3)离子色谱检测结果显示,硝酸根离子、硫酸根离子与氯离子是对大足石刻北山佛湾诃利帝母造像侵蚀破坏危害性最大的盐类,且危害程度大部分在严重及以上。硝酸根离子与硫酸根离子通过化学反应、酸性作用和氧化作用等机制可以促进砂岩的风化和分解。氯离子可以通过离子交换、溶解作用和潜在的酸性影响等机制促进砂岩的风化过程。

4)大足石刻北山佛湾诃利帝母造像区域为典型的湿热地区,相对湿度较高,长期处于70%~80%高湿范围内,部分数值受降雨量影响存在波动。高湿是导致石质文物风化剥落等病害的根本原因,长期的水-岩作用对石质文物的风化破坏作用显著,它既可以直接产生物理破坏,也可以作为媒介加速硝酸根离子与硫酸根离子等酸性可溶盐腐蚀造像的化学反应。

5)大足石刻北山佛湾诃利帝母造像区域夏季最高温度超40℃,冬季最低温度在0℃左右,空气温度受季节影响波动较大,易出现极端值。高温通常会加速化学反应的速度;温度的波动会引起造像的膨胀和收缩,使其产生劣化;温度季节波动伴随着湿度改变更不利于造像的保存。

6)大足石刻北山佛湾诃利帝母造像区域大气污染较严重。空气污染是造成石质文物表面病害的重要原因,其中大气颗粒物是最主要的污染因子。颗粒物中富集的金属元素微粒会加速造像的风化反应,硫氮氧化物作为酸性污染物会造成造像溶蚀。

将矿物组成和可溶盐含量等内部因素与温湿度、酸雨等外部因素相结合,确定石质文物产生风化破坏的机理是砂岩风化研究的关键。诃利帝母造像作为裸露在自然环境下的石质文物,温湿度、

酸性降雨、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、大气颗粒物等外部因素与砂岩岩体特征相互作用是其岩体风化的动力,对易受化学风化影响的矿物组分、高温高湿环境特征以及以硫酸根和硝酸根为代表的酸性可溶盐阴离子所导致的石质文物风化机理进行了推测。后期研究中应利用模拟试验手段,结合实验室研究,深入探究以上各影响因素下造像岩体的劣化机理,并注重气候变暖背景下的石质文物保护研究,为湿热地区石质文物制订保护措施提供重要的参考。

**致谢:**感谢大足石刻研究院的赵岗主任、冯雪梅、冯太彬及中国矿业大学(北京)陶志刚教授、刘珂源博士对本文数据来源的贡献。

## 参考文献

- [1] 何海平. 石质文物风化因素探讨[J]. 首都博物馆论丛, 2016(1): 324-331.  
HE H P. The factor of efflorescence of stone relics [J]. A Collection of Essays About Capital Museum of China, 2016(1): 324-331. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] YAN S J, XIE N, LIU J H, et al. Salt weathering of sandstone under dehydration and moisture absorption cycles: An experimental study on the sandstone from Dazu rock carvings [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022, 47(4): 977-993.
- [4] 陈星. 云冈石窟砂岩表层温度效应及劣化机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.  
CHEN X. Study on surface temperature effect and deterioration mechanism of sandstone in Yungang Grottoes [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese)
- [5] 周鹏, 周晓晗, 夏畅畅, 等. 基于环境监测的南京上坊孙吴墓环境风险评估[J]. 文物保护与考古科学, 2023, 35(2): 97-105.  
ZHOU P, ZHOU X H, XIA C C, et al. Environmental risk assessment at the Shangfang Eastern Wu Tomb in Nanjing, based on environmental monitoring [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2023, 35(2): 97-105. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] ALEXANDROWICZ Z, MARSZALEK M. Efflorescences on weathered sandstone tors in the Stone Town Nature Reserve in Ciężkowice (the Outer Carpathians, Poland)—Their geochemical and geomorphological controls [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(36): 37254-37274.
- [8] 王娟, 张彭义, 向丽, 等. 不可移动文物保存环境研究: 以千手观音造像环境监测与维护方案为例[J]. *中国文物科学研究*, 2013(3): 37-41.  
WANG J, ZHANG P Y, XIANG L, et al. A study of immovable cultural relics' preservation environment [J]. *China Cultural Heritage Scientific Research*, 2013(3): 37-41. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] BARNOOS V, OUDBASHI O, SHEKOFTEH A. The deterioration process of limestone in the Anahita Temple of Kangavar (West Iran) [J]. *Heritage Science*, 2020, 8(1): 66.
- [11] TIAN X L, LI N S, ZHANG Z G, et al. Analysis of the stones of thousand hand Buddhism by the combination of on-site and laboratory techniques [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 557/558/559: 1461-1466.
- [12] YANG H Q, CHEN C W, NI J H, et al. A hyperspectral evaluation approach for quantifying salt-induced weathering of sandstone [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885: 163886.
- [13] 王金华. 大足石刻保护[M]. 北京: 文物出版社, 2009.  
WANG J H. Dazhu grottos conservation [M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2009. (in Chinese)
- [14] 何梦颖, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江流域沉积物黏土矿物组合特征及物源指示意义[J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 544-551.  
HE M Y, ZHENG H B, HUANG X T, et al. Clay mineral assemblages in the Yangtze drainage and provenance implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 544-551. (in Chinese)
- [15] 严绍军, 陈嘉琦, 窦彦, 等. 云冈石窟砂岩特性与岩石风化试验[J]. *现代地质*, 2015, 29(2): 442-447.  
YAN S J, CHEN J Q, DOU Y, et al. Characteristics of Yungang grottoes sandstone and weathering simulation tests [J]. *Geoscience*, 2015, 29(2): 442-447. (in Chinese)
- [16] 文物脱盐处理规范第4部分: 砖石质文物: WW2020-006-T [S]. 北京: 中国标准社, 2020.  
Technical code of practice for desalination of culture relics—Part 4: Brick and stone relics: WW2020-006-T [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [17] SHENG L, XIE H R, MA Y, et al. Assessing the deterioration risk of polychrome clay sculptures based on the hygrothermal environment: A case study of Baosheng temple, China [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01287.
- [18] 杨阳, 刘汉龙, 张良帅, 等. 不可移动石质文物岩石理化性质研究: 以重庆市石佛寺遗址摩崖造像区为例[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(3): 1-8.  
YANG Y, LIU H L, ZHANG L S, et al. Physicochemical properties of immovable stone relics: A case study of Moya statue area of Shifosi Site in Chongqing [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(3): 1-8. (in Chinese)
- [19] 仇文岗, 王硕, 刘汉龙, 等. 重庆老鼓楼衙署遗址强度劣化规律及渗水病害防治对策[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(5): 26-36.  
ZHANG W G, WANG S, LIU H L, et al. Strength deterioration pattern and anti-seepage measures of the Old Drum Tower Yamen site in Chongqing [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(5): 26-36. (in Chinese)
- [20] 李震. 大足石刻卧佛造像砂岩粉化剥落病害特征及机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.  
LI Z. Study on the characteristics and mechanism of sandstone pulverization and spalling in Dazhu stone carving reclining Buddha statue [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. (in Chinese)
- [21] LEZZERINI M, TOMEI A, GALLELLO G, et al. The crystallization effect of sodium sulfate on some Italian marbles, calcarenites and sandstones [J]. *Heritage*, 2022, 5(3): 1449-1461.
- [22] 谭松娥. 可溶盐对大足石刻砂岩劣化作用实验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.  
TAN S E. Experimental study on the deterioration of soluble salt on Dazhu stone carved sandstone [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [23] SCRIVANO S, GAGGERO L. An experimental investigation into the salt-weathering susceptibility of building limestones [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5329-5343.
- [24] 刘汉龙, 韩绍康, 陈卉丽, 等. 潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(6): 219-220.  
LIU H L, HAN S K, CHEN H L, et al. Microbial reinforcement and repair method of sandstone grottoes in humid environment [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(6): 219-220. (in Chinese)
- [25] 丁会娟. 可溶性盐对石灰岩文物风化的影响[J]. *文物鉴定与鉴赏*, 2023(8): 21-24.  
DING H J. Influence of soluble salt on weathering of



- limestone cultural relics [J]. Identification and Appreciation to Cultural Relics, 2023(8): 21-24. (in Chinese)
- [26] LIU Y, ZHANG Y P, ZHANG J P, et al. Characteristics of summer precipitation in Chongqing based on hourly rain gauges data [J]. Advances in Meteorology, 2022, 2022: 8187897.
- [27] 郑箐舟, 何军, 李深智, 等. 重庆地区城郊人体舒适度变化特征差异及其影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(6): 1089-1097.
- ZHENG Q Z, HE J, LI S Z, et al. Analysis on the differences and influencing factors of human comfort between urban and rural areas in Chongqing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(6): 1089-1097. (in Chinese)
- [28] 孟庆彬, 王杰, 韩立军, 等. 极弱胶结岩石物理力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(Sup 1): 19-29.
- MENG Q B, WANG J, HAN L J, et al. Physical and mechanical properties and constitutive model of very weakly cemented rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(Sup 1): 19-29. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 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. (in Chinese)
- [31] 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)
- [32] 邓华锋, 张恒宾, 李建林, 等. 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2344-2352.
- DENG H F, ZHANG H B, LI J L, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2344-2352. (in Chinese)
- [33] YAO R M, LUO Q, LUO Z W, et al. An integrated study of urban microclimates in Chongqing, China: Historical weather data, transverse measurement and numerical simulation [J]. Sustainable Cities and Society, 2015, 14: 187-199.
- [34] HUANG H J, JIE P Y, YANG Y F, et al. Spatial and temporal characteristics of high-temperature heat wave disasters in Chongqing [J]. Atmosphere, 2022, 13(9): 1396.
- [35] WANG R X, MIN J E, LI Y C, et al. Analysis on seasonal variation and influencing mechanism of land surface thermal environment: A case study of Chongqing [J]. Remote Sensing, 2022, 14(9): 2022.
- [36] VAGNON F, COLOMERO C, COLOMBO F, et al. Effects of thermal treatment on physical and mechanical properties of Valdieri Marble-NW Italy [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 116: 75-86.
- [37] 卜海军, 张宁, 郭宏. 广元千佛崖石窟石刻造像物理风化及其影响因素研究[J]. 中国文化遗产, 2018(5): 34-39.
- BU H J, ZHANG N, GUO H. Study on physical weathering and its influencing factors of stone carvings in Guangyuan Qianfoya grottoes [J]. China Cultural Heritage, 2018(5): 34-39. (in Chinese)
- [38] HOXHA D, BELAYACHI N, DO D P. On thermo-hydro-mechanical (THM) fatigue damage of historical stone buildings [J]. Advanced Materials Research, 2014, 891/892: 36-41.
- [39] 屈静. 大气污染对 20 世纪建筑遗产石材的影响及预防性保护措施探究[J]. 建筑与文化, 2022(10): 220-222.
- QU J. The influence of air pollution on architectural heritage stone in the 20th century and the preventive protection measures [J]. Architecture & Culture, 2022 (10): 220-222. (in Chinese)
- [40] 张世杰. 云冈石窟大气污染特征及在砂岩风化中的作用[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- ZHANG S J. Characteristics of air pollution in Yungang Grottoes and its role in sandstone weathering [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020. (in Chinese)
- [41] HUA Y, JONNALAGADDA R, ZHANG L, et al. Assessment of general and localized corrosion behavior of X65 and 13Cr steels in water-saturated supercritical CO<sub>2</sub> environments with SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017, 64: 126-136.
- [42] 金舒婷. 大足石刻千手观音造像表面结露风险预测及防控技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- JIN S T. Study on the risk prediction and prevention and control technology of dew on the surface of avalokitesvara statue in Dazu stone carving [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)