

四川广元千佛崖石窟造像表面风化的环境地质问题分析

宗静婷^{1,2}, 王淑丽³, 张忠永⁴

(1. 西安文理学院 旅游与环境系, 陕西 西安 710065; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069;

3. 西北有色地质研究院, 陕西 西安 710065; 4. 西北有色地质勘查局, 陕西 西安 710061)

摘要: 采用温湿度测试、石窟造像渗水实验、石窟造像吸水的红外成像、岩石特征分析等手段, 对四川广元千佛崖石窟造像表面及其周围环境进行监测, 以及对石窟造像岩石特征进行分析。结果表明: 进深较大的窟室内外存在 $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 的温差, 岩石 $0\sim 40\text{ mm}$ 深度范围内温度与外界气温存在显著相关性; 石窟造像岩石主要成分为长石、石英、黑云母及黏土矿物, 岩石渗水率和吸水率高, 表层风化程度高。环境和岩石特征揭示广元千佛崖石窟造像的风化机理为: 石质文物棱角部位和小型石窟造像对温度的变化敏感, 当气温出现变化时, 其温度变化剧烈, 而其他部位相对滞后, 从而导致石窟造像表层岩石在热胀冷缩的应力下出现微裂隙, 并随着微裂隙逐渐增大, 石质文物表面出现疏松、起壳、鳞片剥落等病害。同时微裂隙的出现增加水入渗的途径并扩大水-岩相互作用的面积, 含水矿物的水合压力和结晶压力使岩石内部结构疏松逐渐破坏; 水化学作用导致可溶盐离子形成, 并随水毛细迁移在石窟造像表面聚集, 导致石窟造像表面酥碱、锈染、彩绘层空鼓等失去原真而破坏。最后提出在窟龕上面加盖窟檐和在崖顶及立面坡面刻槽疏排水流等石窟造像治理措施来减缓其表面风化。

关键词: 广元千佛崖; 石窟造像; 温度; 湿度; 岩石特征; 风化机理; 环境地质

中图分类号: K879.29; X144 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)02-0185-06

Study on Environmental Geology Problem of Surface Weathering of Grotto Statues in Guangyuan Qianfoya, Sichuan

ZONG Jing-ting^{1,2}, WANG Shu-li³, ZHANG Zhong-yong⁴

(1. Department of Tourism and Environment, Xi'an University of Arts and Sciences, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. Northwest Geological Institute of Nonferrous Metals, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 4. Northwest Mining and Geology Group Company Limited for Nonferrous Metals, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract Based on the temperature, humidity, seepage, infrared imaging and rock character tests, the surface of grotto statues and the surrounding environment were monitored, and the rock characters of grotto statues were analyzed in Guangyuan Qianfoya, Sichuan. The results showed that the difference in temperature was $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ for the deep grotto inside and outside; there was significant relationship between the temperature outside and that within the grotto with $0\sim 40\text{ mm}$ depth; rocks of grotto statues were mainly composed of feldspar, quartz, biotite and clay mineral; water permeability and absorption were high, and the degree of surface weathering was serious. The characteristics of environment and rock revealed the weathering mechanism of grotto statues in Guangyuan Qianfoya. The mechanism was that the angles of stone heritage and small grotto statues were sensitive to temperature, and other parts were insensitive, so that there were microfissuring in the surface rocks of grotto statues under the stress of expansion and contraction; the loose, shell and scales falling in the surface of stone heritage occurred with microfissuring expansion. At the same time, the ways of water infiltration increased and the areas of the water-rock interaction were expanded by microfissuring; the internal structures of rock were damaged by water and crystallization pressures of enhydrite; water chemistry resulted in the formation of soluble salt ions, and

收稿日期: 2010-07-03

基金项目: 陕西省科技厅软科学项目(2008RK61)

作者简介: 宗静婷(1975-), 女, 陕西兴平人, 西安文理学院副教授, 西北大学理学博士研究生, 从事地球环境科学研究。E-mail: zongjt@126.com

the ions gathered on the surface of grotto statues with the water capillary migration, so that the grotto statues were damaged by salting the surface, dying rust and painting layer hollow. Finally, some measurements which included building eave above the grotto and draining water along the groove in the elevation slope and the top of cliff, were put forward to improving the surface weathering of grotto statues.

Key words: Guangyuan Qianfoya; grotto statue; temperature; humidity; rock character; weathering mechanism; environmental geology

0 引言

石窟造像是一种精细的艺术,风化作用从其表面细微处毁损,使其缓慢破坏却无法逆转,造成造像失去本真色彩乃至科学艺术价值^[1-4]。广元千佛崖摩崖石窟是中国首批文物保护单位,赋存于四川省广元市城外的陡峭岩壁上,历经百年沧桑,季节交替,风雨剥蚀,多一半已经脱落无存或残缺不全,汶川5·12特大地震后,保护和修复愈显重要。

从环境地质角度来研究石质文物破坏与保护是一个趋势,也是由摩崖造像的特性决定的。摩崖造像雕刻在石壁上,而岩石材料是地质作用的产物,岩石的变形和破坏不但与岩石的复杂成因和结构密切相关,而且还受温度、围压、孔隙水等环境因素影响^[5-11]。因此,对摩崖石质文物风化病害机理的分析应当对地质与环境进行勘察,了解它所依存的岩石与当地环境因子的关系,分析环境条件对岩石风化的影响。从窟室内外温湿度变化、造像岩体温度变化、造像岩石渗水性和岩石学特征的角度对千佛崖石窟造像表面风化现象进行详细勘察并分析风化形成机理,为石质文物的保护提供科学依据。

1 环境因素

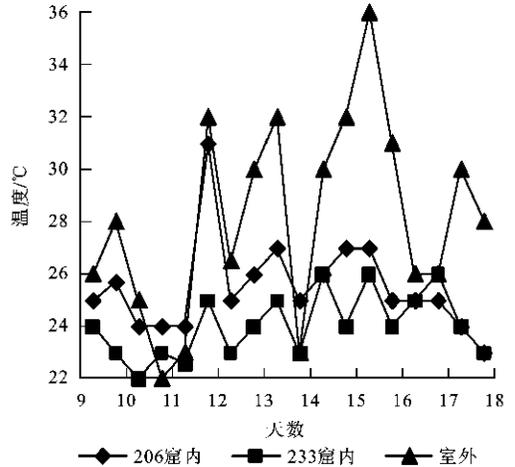
温湿度是影响石窟造像风化的主要环境因子。为了解广元千佛崖窟室内外温湿度和窟龕岩壁表层温度的变化,在岩壁表层和窟龕内外均做了温湿度的原位测试。

1.1 窟室内外温湿度测试

本次勘察在 206 窟、308 窟、400 窟、512 窟、744 窟等 5 个窟室放置高级 WS2020 温度和湿度计,每天 8:00、13:00、20:00 各观测一次。测试结果表明:底层洞室温度较大,当窟室进深较大时,内外温度相差 2℃~4℃,湿度相差 10%~20%;湿度大,在温度下降时会形成凝结水(图 1、2)。

1.2 岩体受日照温度变化测试

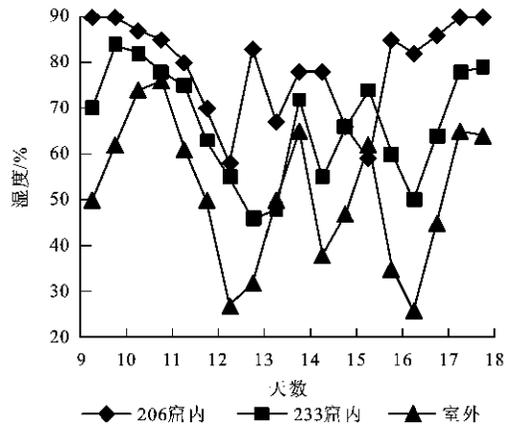
本次勘察在柏堂寺左上方岩壁钻微型孔 5 个,深度分别为 20、40、60、80、200 mm,通过 TP3001 多功能高稳定性高准确度温度计测孔底温度,测试结



注:第9天阴转小雨;第10天小雨转阴;第11天多云;第12天多云;第13天阴转晴;第14天多云;第15天中雨;第16天小雨;第17天阴;233窟内进深大于206窟内。

图 1 2009 年 7 月窟室内外温度变化

Fig. 1 Changes of Temperature of Grotto Inside and Outside in July, 2009



注:第9天阴转小雨;第10天小雨转阴;第11天多云;第12天多云;第13天阴转晴;第14天多云;第15天中雨;第16天小雨;第17天阴;233窟内进深大于206窟内。

图 2 2009 年 7 月窟室内外湿度变化

Fig. 2 Changes of Humidity of Grotto Inside and Outside in July, 2009

果表明:0~40 mm 深的温度变化与孔外温度较为接近,相关度较高;40~80 mm 深孔底温度维持在 28.8℃左右,变化较小;孔深大于或等于 200 mm 的孔底温度不受外界温度影响。

1.3 岩面和文物本体温度测试

本次勘察采用 DT8380 红外线温度测试仪先后对岩石不同部位和大小不同文物表面进行温度测试。测试结果表明: 岩石不同角度温度不同, 相差 $1^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$; 有地衣藻类植物处, 温度较低; 体积小的文物升温较快, 其温度比体积大的文物的温度高 $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$; 文物本体中, 手肘处温度高于躯体; 洞室进深浅的文物比进深大的文物温度高。

2 千佛崖岩石原位水和渗水实验

2.1 岩石自然状态下水渗透性原位实验

本次勘察于保护区内采取同类岩块 1 件, 尺寸为 $350\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$, 并将样品放在室内风干 3 d, 然后在岩层顶面用橡胶泥围成一个 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 渗水坑, 在坑中注碱性水溶液约 5 mm 深(相当于中雨), 2 h 后切开岩石检查水渗透深度, 实验结果为 20 mm/h。可见千佛崖岩层表层吸水渗透性较强, 水对岩层影响较大。

2.2 渗水影响的红外热成像法实验

为了调查千佛崖石窟造像病害对水的依赖关系, 选择千佛崖 308 窟、411 窟以及 689 窟等, 采用 NECTH7700SP 红外热像仪进行全面热成像检测(图 3)。检测日期为 2008 年 9 月 8 日 15:00 至 16:30, 气象条件为雨后初晴。

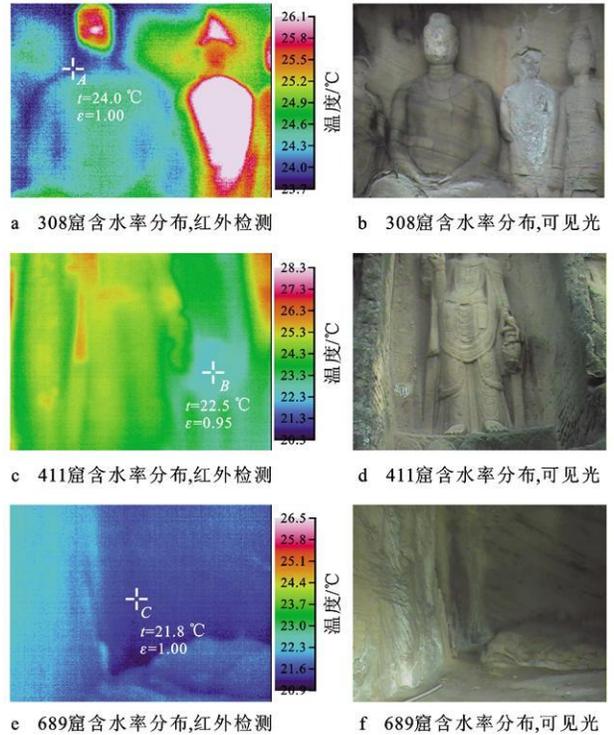
从红外检测图像可以看出, 造像及窟龕岩石的含水率与佛像的损坏程度呈显著对应关系, 损坏程度高的地方含水率高。但 308 窟佛像损坏最严重的部位, 红外检测显示其含水率反而不高; 现场勘察分析发现, 这些部位已经严重风化酥粉, 大小裂隙纵横分布, 岩石疏松, 雨水很快进入岩石内部, 因此表面水分反而较小。411 窟佛像左手的净瓶容易受雨淋, 其含水率明显偏高, 这个部位的损坏也明显严重得多; 689 窟内顶部有一较大的横向裂隙, 水沿裂隙下渗, 使窟内正面岩体表面含水率要高很多, 底部角落出现积水坑, 因此越靠底部含水率也越高。

3 千佛崖石窟造像岩石特征

3.1 千佛崖岩石落片偏光显微镜鉴定

在千佛崖岩体风化剥落的残块表面和石块中分别采集了 2 个风化层样品(样品 1 和 2)和 2 个岩芯样本(样品 3 和 4), 运用 LEICAMP5 60 偏光显微镜进行岩相分析(图 4)。

结果表明: 风化层样品呈黄褐色, 砂状结构, 块



注: 测温范围为 $-20^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$; 点 A、B、C 分别为 308 窟、411 窟、689 窟最低处; t 为图像最低处温度; ϵ 为图像最低处的辐射率改正。

图 3 不同窟的含水率分布

Fig. 3 Distribution of Water Moisture in Different Grottoes 状构造、质地疏松。砂屑粒径 $0.2\sim 0.5\text{ mm}$, 主要物相成分为长石、岩屑、石英、黑云母等; 颗粒支撑, 颗粒之间及空隙内胶结物为氧化铁和黏土矿物。

岩芯样品分析表明: 岩芯呈土褐色、砂状结构、块状构造。碎屑粒径 $0.1\sim 1.2\text{ mm}$, 碎屑体积分数约 95%, 以长石、岩屑、石英、黑云母等为主。胶结物主要为氧化铁质和泥质, 四壁常见铁质膜。

3.2 千佛崖岩石落片矿物组分 X 衍射分析

对千佛崖岩体采样用 D/MAX-rA-X 衍射仪进行矿物成分测试, 利用衍射峰强度值查 JCPDF 卡片进行物相鉴定, 通过强度值、峰位和峰宽计算物相的含量, 结果与偏光显微镜鉴定结果相符。风化层样品矿物平均体积分数为: 石英 67%、斜长石 17%、正长石 5%、伊利石 3%、蒙脱石 3.5%、硬石膏 2%、绿泥石 1.5%, 其他未检出 1%; 岩芯样品矿物平均体积分数为: 石英 72%、斜长石 12%、正长石 8%、伊利石 3%、蒙脱石 3%、硬石膏 1%, 其他未检出 1%。X 衍射分析图谱见图 5。

3.3 可溶盐离子分析

多数岩壁、窟龕及造像表层都有可溶盐的浸润, 使表层酥碱、沙化以及彩绘粉化等(图 6、7), 是造成

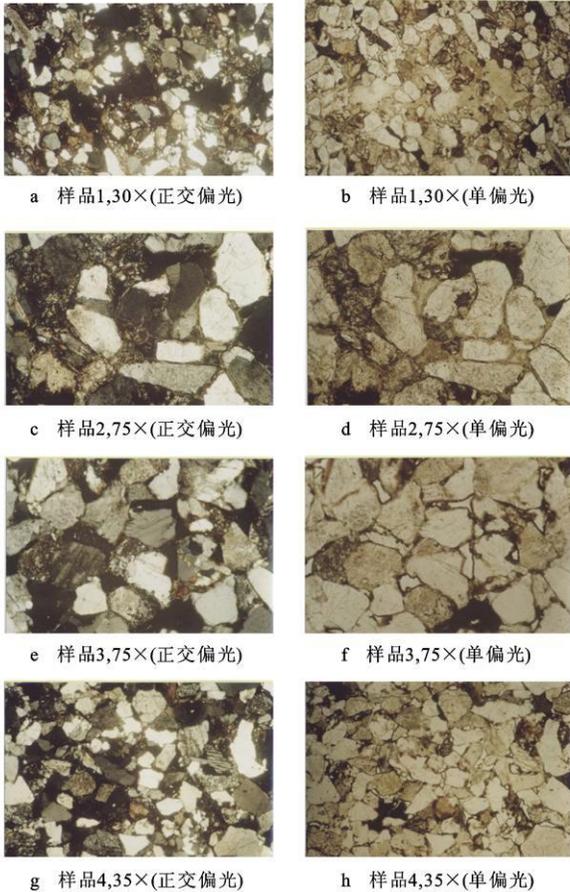


图 4 样品的偏光显微镜岩相照片

Fig. 4 Photos of Lithofacies of Samples with Petrographic Microscope

岩壁龛窟造像病害最常见和最主要的原因之一。对千佛崖石窟像区可溶盐的种类及分布情况进行调查分析,在千佛崖的不同部位分别采集石材表面风化粉样,检测其中可溶盐含量,样品采集点位及阴、阳离子的分析结果见表 1。

表 1 表明,千佛崖窟的可溶盐离子主要有 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 5 种阳离子以及 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 4 种阴离子。从 333 窟和崖壁一层不同高度可溶盐的分布可以看出,阳离子主要以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量相对较高,阴离子以 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 含量为最高,其他离子的含量均比较低。结果表明,千佛崖石窟的可溶盐主要以硫酸盐和硝酸盐为主。

4 石窟造像表层风化病害分析

4.1 温度影响

通过实验测试数据可以看出,石窟造像表层温度随气温的变化显著。夏天千佛崖气温达 $35\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $36\text{ }^\circ\text{C}$,遭曝晒的石雕,表面温度达 $50\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $60\text{ }^\circ\text{C}$,特别是那些没有生物体覆盖、易被晒透的小型佛像和

佛像手指等与外界多方位接触的部位,温度会更高。而暴雨过后,温度急剧下降,岩石膨胀产生的挤压力和冷却收缩产生的拉力会产生破坏作用,在石窟造像表面形成微裂隙;同时,暴雨面状流动和线状流动都具有强大冲刷能力,降雨强度越大,冲刷岩壁表层的微裂隙越强,在温差反复变化和晴雨交替过程中,微裂隙逐渐增多增大,那些温度稍高的棱角部位和小型造像,风化速度要明显快于其他部位,就会出现疏松、起壳、鳞片剥落等病害现象。

4.2 水-岩相互作用的风化破坏

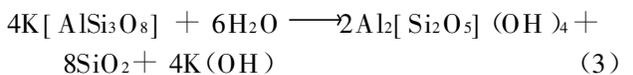
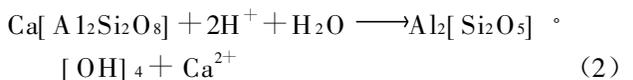
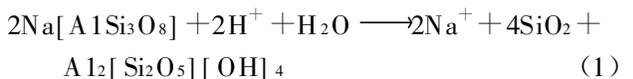
千佛崖岩石具有很强的吸水性,水对千佛崖造像的毁坏主要表现为可溶盐离子表聚、彩绘层空鼓、酥碱、沙化和色素粒子沿微裂隙锈染等,使造像失去原真。

4.2.1 水合压力和结晶压力

影响千佛崖造像表层侵蚀的因素除了降雨就是凝结水,广元地区降雨量大特别是夏秋季节,降雨过后空气湿度也增大,早、晚就会在窟室内造像表面凝结,水沿微裂隙下渗,岩石中的膨胀性矿物遇水膨胀,如硬石膏水化成石膏时,体积增大 31%,同时产生 0.15 MPa 的膨胀压力^[1];蒙脱石吸水后体积可膨胀 10~30 倍^[2]。破坏石刻岩体颗粒间的连结和岩石表层与里层的连结,使造像表层疏松产生裂缝,最终导致岩壁表层孔隙、空穴起壳剥落等。

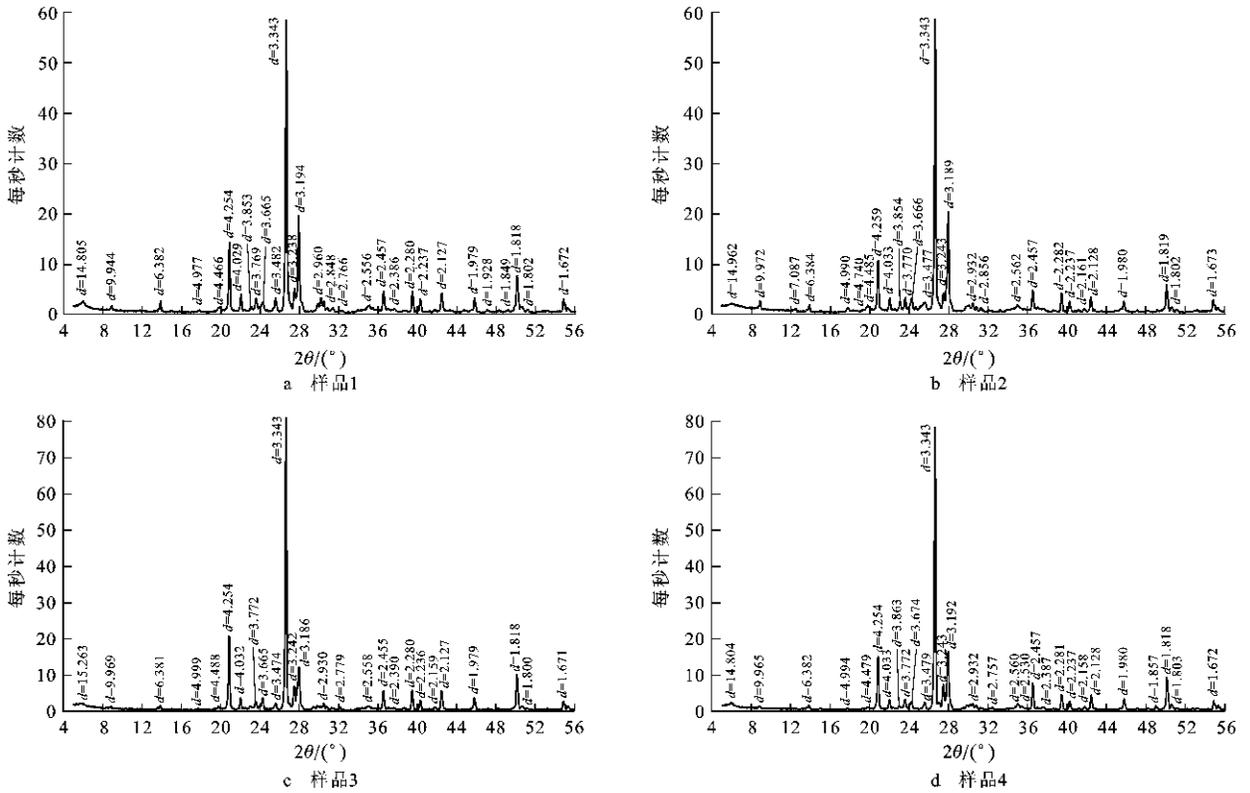
4.2.2 水化学作用—可溶盐离子形成

千佛崖岩石成分中含有较多的斜长石、钾长石、云母等易水合水化作用的矿物,在水以及水中溶解的 SO_2 、 NO_2 等酸性成分的作用下(式(1)、(2)),水化作用的速度会加快,形成可溶性阳离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 以及阴离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等,这些可溶盐离子溶出后,表层岩石成分遭到破坏,岩石内部结构疏松,特别是其中的 Fe^{2+} 氧化后,会形成锈染,导致造像沿裂隙变色。



4.2.3 可溶盐离子活动规律

研究表明水诱发酥碱的机理是一种单纯的物理过程^[3]。当岩体中有水的运动,岩体以及地下水中的可溶盐会随着毛细水的上升移动到石窟造像表层而结晶,但是蒸发又促使毛细水不断上升,当水分再



注: 2θ 为衍射谱仪扫描的角度; 每秒计数为接收器每秒检测到的 X 射线量子数; d 为衍射强度。

图 5 岩石样本 X 衍射分析图谱

Fig. 5 X-ray Diffraction Patterns of Rock Samples



图 6 400窟顶的盐类结晶

Fig. 6 Salt Crystallization on the Ceiling of Grotto 400

经过表层时这些盐又重新溶解并随着水分的迁移而迁移。千佛崖上、中部的岩壁、龛窟和造像受雨水漂淋的部位, 可溶盐流失, 而在雨水汇集部位, 水分蒸发后可溶盐富集在表层。千佛崖底层部位以及水泥栈道以上部位, 往往是以降雨积水及地下水的影响为主, 可溶盐会随着毛细水的上升移动到岩壁、龛窟和石窟造像的表层并结晶。当再一次的雨水漂淋或冲湿表层时这些盐又重新溶解并随着水分迁移, 即岩石表面的盐常常处于“溶解→结晶→再溶解→再结晶”的过程。溶解—结晶使石质体积发生膨胀, 缓



图 7 689窟造像的盐类结晶

Fig. 7 Salt Crystallization on the Statues of Grotto 689

慢的侵蚀造像, 最终导致造像表层疏松脱落, 对文物本体造成病害。

5 减缓石窟造像表面风化的措施

减缓广元千佛崖石窟造像表面温差风化的破坏效应, 可以在窟龛上面加盖窟檐。这种窟檐既可减少阳光对石窟造像的直射, 改变石窟造像随气温的变化速度和频率, 又可减少雨水对石窟造像表面的直接漂淋。针对窟龛的顶部渗水, 在崖顶开挖排水沟槽, 使大气降水能够迅速通过排水沟槽疏干。针

表 1 千佛崖风化层可溶盐阴阳离子质量分数

Tab. 1 Mass Fraction of Anion and Cation of Soluble Salts in the Weathering of Qianfoya

采样地点	Na ⁺ +K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
一层 200 cm	0.018 7	0.010 1	0.037 7	0.815 1	0.006 0	0.019 8		0.008 5
一层 100 cm	0.016 4	0.011 0	0.026 3	0.423 9	0.006 8	0.021 4	0.090 8	1.399 9
一层 20 cm	0.021 5	0.004 6	0.023 4	0.775 0	0.006 7	0.019 1	0.079 5	0.863 2
二层			0.012 7	0.707 4	0.007 6	0.009 7	0.047 9	1.301 4
三层	0.038 4		0.018 8	1.462 2	0.007 5	0.021 6	0.015 0	1.276 9
333 窟中 600 cm	0.034 4	0.038 7	1.189 7	0.017 0	0.006 8	0.036 2	0.155 7	2.934 8
333 窟下 10 cm	0.035 3	0.039 6	1.384 0	0.005 8	0.007 2	0.040 1	0.106 7	1.950 8
366 窟中 100 cm	0.065 0	0.073 8	1.108 8	0.027 8	0.008 0	0.049 9	0.106 5	2.172 3
366 窟下 10 cm	0.127 7	0.067 5	1.515 2	0.032 6	0.008 7	0.066 5	0.149 5	2.301 7
400 窟上 150 cm	0.277 9	0.006 4	0.397 5	0.005 7	0.016 1	0.072 2	0.274 2	2.198 5
400 窟中 70 cm	0.004 1	0.001 3	0.114 0		0.009 4	0.024 2	0.135 3	0.901 2
400 窟下 10 cm	0.006 9	0.007 6	0.465 9	0.015 4	0.019 0	0.018 6	0.073 9	1.024 0
512 窟右壁下	0.593 6	0.017 3	0.373 9	0.010 7	0.016 6	0.019 2	0.095 1	1.302 5
744 窟上 200 cm	0.109 1	0.069 4	1.458 4	0.023 9	0.011 0	0.069 9	0.090 2	1.178 0
744 窟下 10 cm	0.048 2	0.061 7	1.510 9	0.035 4	0.009 2	0.063 6	0.119 1	3.818 9

注:表中可溶盐阴阳离子质量分数/%。

对立面坡表面存在的一些水量集中并且流经窟龕的现象,宜适当改造微地形,在局部适当刻槽或修建小挡水坎,将水流引导到窟龕之外,减少水岩作用的时间。

6 结语

(1)广元千佛崖石窟造像温度在表层 40 mm 内的变化与外界气温变化相关性很高,特别是阳光直射的部位以及窟室浅的石窟造像和小的石窟造像温度变化较快,热胀冷缩的频率和幅度均大于进深大的石窟造像,岩石膨胀产生的挤压力和冷却收缩产生的拉力会在石窟造像表面形成微裂隙,更有利于温差风化作用。

(2)千佛崖风化层孔隙率和疏松程度均高于岩芯层,岩石吸水性和透水性均高,雨水和凝结水均能从表层进入造像内部,有利于水-岩相互作用,吸水性相对高的地方风化严重。

(3)可溶盐离子沿岩石裂隙和孔隙在毛细作用下从内部迁移于表层,并在表层反复发生“溶解→结晶→再溶解→再结晶”过程,造成造像表层酥碱、粉化、结壳和色素粒子锈染等。

(4)广元千佛崖石窟造像表面风化的保护可采取在石窟造像上面加盖窟檐以降低石窟造像表面温差变化和雨水的漂淋入渗,同时采取疏排水措施防止水从地面下渗到石窟造像和流进窟室,改变石窟

造像的小环境,达到减缓风化的目的。

参考文献:

- [1] 李福春,李莎,杨用钊,等.原生硅酸盐矿物风化产物的研究进展——以云母和长石为例[J].岩石矿物学杂志,2006,25(5):440-448.
- [2] 李黎,王思敬,谷本亲伯,等.龙游石窟岩面水岩作用研究[J].工程地质学报,2008,16(6):798-805.
- [3] 李黎,谷本亲伯.龙游石窟砂岩的水稳定性研究[J].文物保护与考古科学,2005,17(4):28-33.
- [4] Grossi C M, Esbert R M, Díaz-Pache F, et al. Soiling of Building Stones in Urban Environments[J]. Building and Environment, 2003, 38(1): 147-159.
- [5] 孙亚乔,钱会,段磊.pH 值对混合溶液中矿物溶解/沉淀的影响[J].地球科学与环境学报,2009,31(4):413-417.
- [6] Cama J, Ayora C, Lasaga A C. The Deviation-from-equilibrium Effect on Dissolution Rate and on Apparent Variations in Activation Energy[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(17): 2481-2486.
- [7] 王丽娟,王文科,王哲,等.奎屯河流域包气带盐分分布特征与影响因素[J].地球科学与环境学报,2008,30(4):429-433.
- [8] Lewin S Z. 用于石刻艺术保护的化学合成物的现状[J].文物保护与考古科学,2001,13(2):58-64.
- [9] 张金凤.石质文物病害机理研究[J].文物保护与考古科学,2008,20(2):60-67.
- [10] 何德伟,马东涛,吴杨.敦煌莫高窟北区岩体变异变形及修复对策[J].工程地质学报,2008,16(2):283-288.
- [11] 白国良,梁冰.偏碱性矿井水演化过程中的水岩作用[J].地球科学与环境学报,2008,30(2):192-196.