

成都金堂李家梁子 M23 号墓石棺构件矿物组成及风化机理研究

肖 麟¹, 邹建文², 王通洋¹, 裴月霓², 刘雨茂¹, 王世明², 廖 昕^{2,3}

(1. 成都文物考古研究院, 四川 成都 610072; 2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;
3. 西南交通大学 世界遗产国际研究中心, 四川 成都 611756)

摘 要: 成都金堂李家梁子 M23 号墓出土的汉朝石棺存在表面粉化、剥落等病害现象, 急需保护修复。现场调查表明, 该石质文物风化病害主要表现为裂隙状风化、页片状风化、粒状风化、粉末状风化等。本文借助 X 射线衍射 (XRD)、偏光显微镜、扫描电镜等对金堂石质文物进行了微观成分及结构分析。结果表明, 文物材质为红色砂岩, 其碎屑物主要为石英、钠长石、岩屑和少量云母, 胶结物以钙质为主, 含少量的炭质及泥质。该砂岩产生风化病害的主要原因是钙质胶结物的溶解流失及泥质胶结物遇水的崩解, 同时还受岩屑、长石类碎屑风化蚀变的影响。该研究可为石棺的后期保护修复工作提供基础科学数据。

关键词: 石棺; 矿物成分; 风化机理; 保护修复

中图分类号: P588.21+2.3; K854.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)01-0097-07

A study of mineral composition and weathering mechanism of stone coffin from M23 tomb in Jintang Lijialiangzi of Chengdu

XIAO Lin¹, ZOU Jian-wen², WANG Tong-yang¹, PEI Yue-ni², LIU Yu-mao¹, WANG Shi-ming² and LIAO Xin^{2,3}

(1. Chengdu Institute of Cultural Relics and Archaeology, Chengdu 610072, China; 2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. World Heritage Research Center SWJTU, Chengdu 611756, China)

Abstract: The Han Dynasty stone coffin unearthed from M23 tomb in Jintang Lijialiangzi of Chengdu has suffered from surface weathering phenomena such as powdering, peeling and other diseases and hence needs protection and restoration as soon as possible. On-the-spot investigation shows that the main weathering diseases of the stone artifact include cracks, sheets, granules, powders, etc. In this paper, the authors used X-ray diffraction (XRD), polarized light microscopy, and scanning electron microscopy (SEM) to analyze the microstructure and structure of Jintang stone artifact. The results show that the stone artifact is made of red sandstone, and the main detrital minerals are quartz, albite, rock debris and a small amount of mica. The main cement is calcium with a small amount of carbonaceous and argillaceous material. It is also shown that the main factors responsible for the sandstone weathering is the dissolution loss of calcareous cement and the disintegration of muddy cement with water, together with

收稿日期: 2018-08-27; 接受日期: 2018-12-29; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 自然科学基金资助项目(41202042); 中央高校基本科研业务费专项资金(2682015CX013)

作者简介: 肖 麟(1964-), 女, 硕士, 研究馆员, 主要从事文物保护方面的研究, E-mail: cdxiaolin@139.com; 通讯作者: 王世明(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要从事火山岩岩石学、红层及红土成因方面的研究, E-mail: shimingw@home.swjtu.edu.cn.

the influence of the weathering alteration of debris and feldspar debris. The results obtained by the authors will help to provide basic scientific data for the post-protection and restoration of this stone coffin.

Key words: stone coffin; mineral composition; weathering mechanism; conservation and restoration

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41202042); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2682015CX013)

成都市金堂县赵镇李家梁子 M23 号墓地所处区域李家梁子位于成都平原东北部龙泉山余脉,北面俯视赵镇,地形平坦,沱江从中穿过,南部为丘陵地带,墓区正处于平原和丘陵的分界线上(刘雨茂等,2007)。该区出露地层主要为四川盆地分布广泛、具有代表性的侏罗-白垩系红层(程强等,2004),岩性以砂岩、粉砂岩、泥岩为主,局部含砾岩及呈夹层或透镜体状的泥质灰岩,整体颜色以红色调为主,局部呈现灰绿色(郑清松,2016)。红层砂岩层理明显、力学强度不高、便于开采、易于雕刻,无论采用圆雕还是浮雕等技艺,大到开凿石窟雕造摩崖石雕,小到出土镇墓真文券、墓碣等,砂岩均为绝佳材料,如乐山大佛、重庆大足石刻、广元千佛岩摩崖造像等岩性均以红层砂岩为主(韦荃等,2009)。红层砂岩自身强度较低、便于雕刻的特性也使得其无论暴露于空气中还是埋藏于地下,都极易风化(周骏一,2006)。石材的矿物成分和胶结物质决定着自身的物理力学特性,而文物的保存状况与其自身特性有密切关系,因此对石材的矿物组成及其胶结物质的研究能进一步得出文物的病害机理,为后期文物的保护工作提供科学依据。

李家梁子 M23 号墓地出土的汉代画像,石棺整体仿木建筑式样,棺盖呈重檐庑殿顶形,棺身也雕刻有仿居室墙体的框栏装饰,画像内容丰富生动。其体量庞大,结构完整,在四川地区极为罕见,有极高的历史、艺术和科学价值。但在地下埋藏的过程中,在长期自然营力、水岩相互作用等诸多因素的作用下出现了不同程度的病害,严重损害了文物本体,影响其长久保存,急需对其进行科学有效的研究和保护修复。

1 风化病害类型

李家梁子 M23 号墓出土石棺构件均为砂岩质。考虑到该石棺体量巨大,古人在选用原材料时一般因地制宜、就地取材,故推测文物的石材应该取自距此不远的龙泉山脉。根据对石棺的现场调查情况,

几乎所有的石棺构件均有不同程度的风化。从病害的形态上来说,可将其病害类型归纳为如下几种:

(1) 裂隙状风化:指出现在岩石表面的线状裂隙。这些裂隙相互平行,主要分布在 2 个回廊和 2 个斗拱表面,达数十条之多,其中最长的—条近 60 cm 且已经贯穿,宽度为 2 mm,且开裂面大都沿着砂岩的原生层面(图 1a)。

(2) 页片状风化:指岩石呈薄片状脱落,脱落面与岩石自身的层面无关。若剥落物呈薄(约厚 1~2 mm)的平板状,常以多重剥落方式出现(图 1b)。

(3) 粒状风化:表现为岩体呈粒状脱落,岩层面物质结构松散,用手搓之容易撒落,粒径以细粒至粗粒为主(图 1c)。

(4) 粉末状风化:指岩石颗粒间的结合力丧失而导致颗粒脱落。手摸砂岩表面即粉碎,有大量粉末染指,无脱粒现象(图 1d)。

2 物相及微观特性研究

2.1 XRD 矿物成分检测

在成都文物考古研究院利用 X 射线衍射法(XRD)对取自成都市金堂县赵镇李家梁子墓地砂岩样品进行了矿物成分分析,测试仪器为日本理学 MiniFlex600 衍射仪,电流 60 mA,电压 60 kV,光管功率 2.2 kW,Cu 靶,Ni 滤波,扫描范围为 5°~70°,K α 射线波长为 0.154 nm,扫描速度为 6°/min。应用 MDI Jade 6.0 软件(白凌云等,2016)分析 X 射线数据,依据布拉格方程计算晶格间距的基本原理(胡林彦等,2004),再对比标准 PDF 索引卡片,获得砂岩各矿物的物相主要为石英、钠长石和方解石(图 2)。

2.2 薄片镜下观察

在偏光显微镜下对砂岩薄片进行显微结构观察,可见砂级碎屑颗粒(0.15~0.50 mm)构成了岩石的基本骨架,成分主要为石英、长石、云母、岩屑、炭屑等(图 3a,3b),碎屑颗粒的分选性中等,磨圆较差,大部分呈次棱角状,薄片内各矿物没有明显的定向排列及碎裂特征,推测其未经历后期变形的改造。

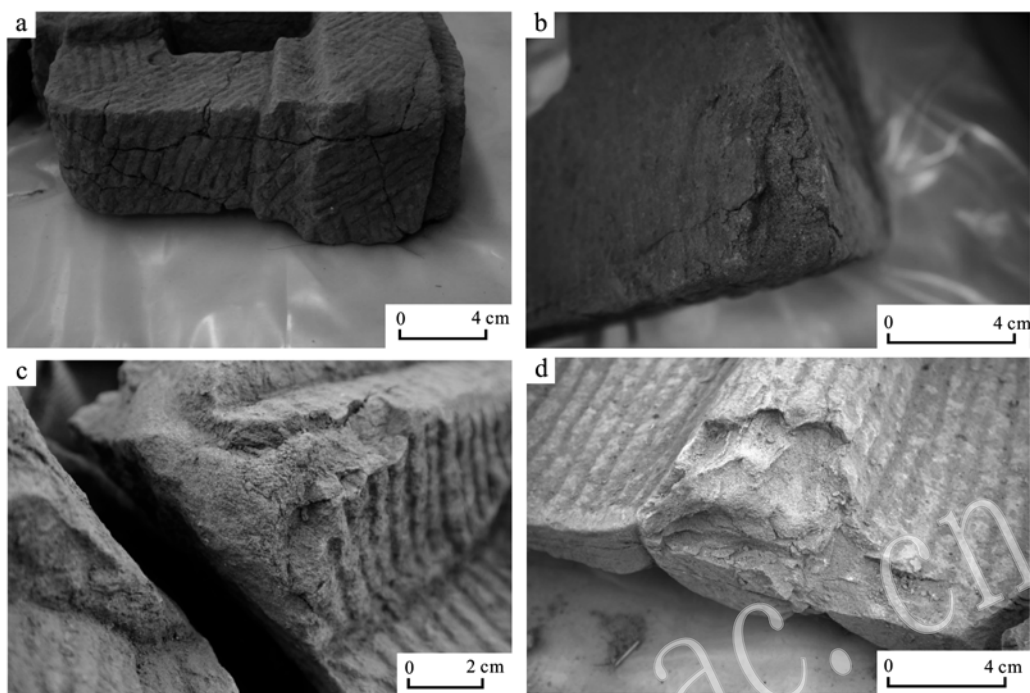


图 1 文物典型病害照片
Fig. 1 Damages of artifacts

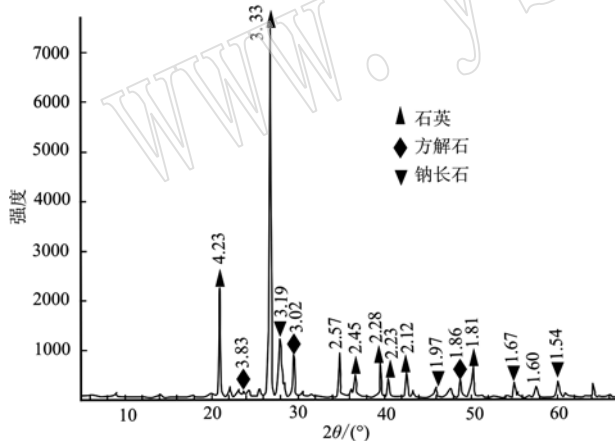


图 2 石棺材料的 XRD 谱图
Fig. 2 XRD pattern of stone coffin

利用图像处理软件 Image-Pro Plus 6.0 (张雄等, 2015) 将显微图像中的各类矿物进行像素点提取, 并计算各类矿物的百分含量, 处理后的结果如图 3c。其中石英表面干净, 含量约为 21.5%。长石在镜下表面混浊, 总含量约为 35.5%, 其中斜长石表面及边缘可见高岭土化及绢云母化, 微斜长石多见格子双晶。云母在薄片中含有量较低, 单偏光无色透明, 正交偏光下呈彩色, 长条形可见一组完全解

理, 约占 1%。岩屑含量约占 18%, 主要为石英、粉砂、泥质、燧石类。充填于空隙间的胶结物及杂基总含量约为 24%, 其中杂基以粘土矿物为主, 含少量粉砂级碎屑及炭质碎屑, 含量约为 5%; 胶结物以方解石为主, 含量约为 14%, 有机质含量约为 5%。各矿物分布如图 3d。

由于杂基的含量小于 15%, 故该类岩石为净砂岩, 再根据长石、石英和岩屑的比例对砂岩分类, 长石与岩屑之比约为 1.65, 且石英的含量小于 75%, 依据砂岩三角分类图 (QFR), 该砂岩定名为岩屑长石砂岩。

2.3 扫描电镜 (SEM) 分析

采用牛津 X-MAXN50MM2 扫描电镜对样品形貌进行观察, 同时利用样品的背散射 (BSD) 电子成像, 来区分样品不同组分的分布, 其原理是平均原子序数愈大的元素产生的背散射电子数目越多, 成像亮度愈亮 (侯贵华等, 2008)。采用能谱面扫描确定元素的分布。

体视镜下, 选取 JTW-1-1 位置和 JTW-1-2 位置进行扫描电镜分析 (图 4a)。其中 JTW-1-1 区域呈椭圆形, 颜色发黑, 推测为一含有机质的泥质岩屑, 放大 1 000 倍的扫描电镜下显示, 深黑色团块 (JTW-1-1)

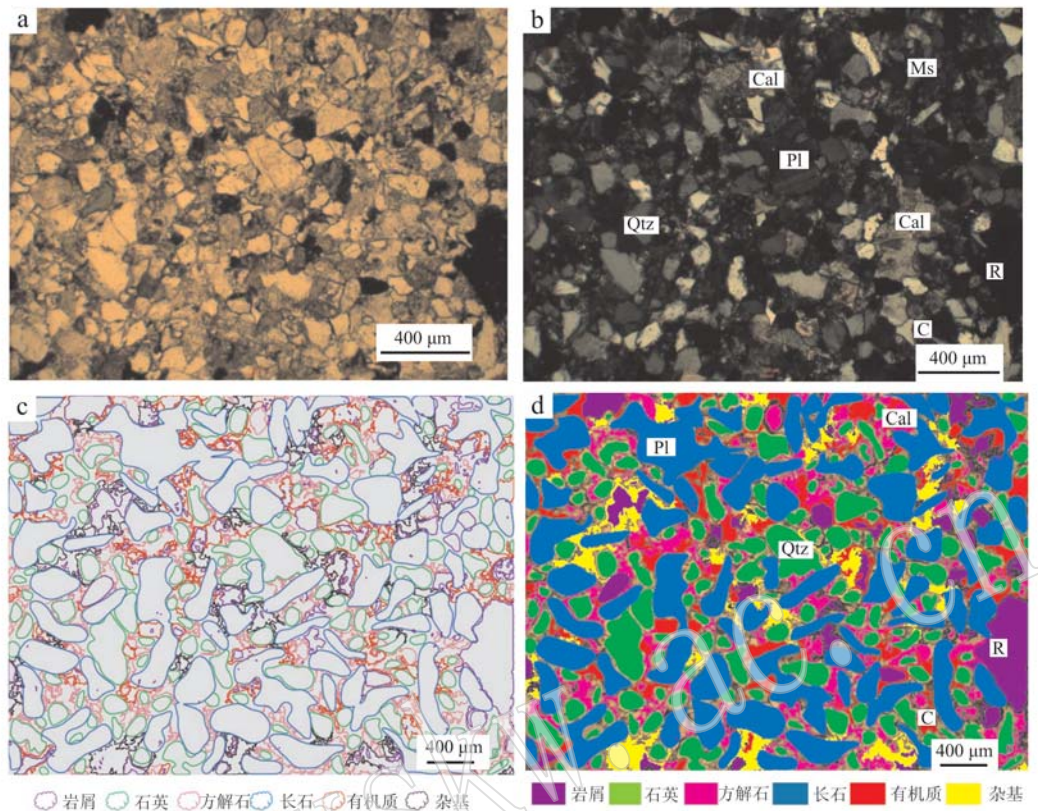


图3 矿物分布图

Fig. 3 The distribution of minerals under microscope

a—单偏光图; b—正交偏光图; c—像素提取轮廓图; d—矿物合成成分分布图; Qtz—石英; Ms—白云母; Pl—斜长石; Cal—方解石; R—岩屑
a—plainlight image; b—crossed nicols image; c—mineral outline diagram; d—mineral distribution diagram; Qtz—quartz; Ms—muscovite;
Pl—plagioclase; Cal—calcite; R—rock fragments

结构较为致密(图4c),几乎看不到孔隙,粘土矿物呈片状密集分布,据其形态判断为伊利石,结构较致密,大的孔隙很少;而砂岩整体的微观结构JTW-1-2(图4b、4d)显示,样品粒间孔隙较为发育,结构较疏松,矿物颗粒间的空隙中有较多粉砂级碎屑和泥质充填,同时可见呈菱形解理的结晶方解石胶结物及薄片状粘土矿物。砂岩元素分布图显示,Ca元素沿颗粒边界密集分布(图5d),经偏光显微镜图像及扫描电镜图像(图5b)相应区域的对比分析,可以确认Ca元素富集区主要为方解石形成的钙质胶结物,局部可见后期重结晶的方解石。Si元素最富集区为石英,次富集区为斜长石(图5c),黑色区域为有机质。

3 风化机理分析

砂岩质文物风化的因素总体来说可以分为两类:自身因素和外界因素。自身因素主要包括岩石

的矿物成分和结构,外界因素主要是外界环境引起的物理、化学和生物风化。其中自身因素是引起风化的基础,而外界因素则加速了风化作用的发展趋势。

(1) 矿物成分因素:岩石的矿物成分是导致砂岩质文物风化的物质基础。

XRD分析结果显示该砂岩包含的主要物相为石英、钠长石、方解石。石英在自然条件下比较稳定,而钠长石则易风化后产生绢云母等,方解石酸性条件下易溶解流失。

由偏光显微镜分析可知该砂岩质文物为岩屑长石砂岩,主要碎屑为石英、长石及岩屑,胶结物以钙质和炭质为主,含少量的泥质。方解石在岩石内主要起胶结作用,在自然环境下方解石易风化溶解,而其中胶结物中的有机质也易氧化分解,使胶结物流失。粉砂、泥质、燧石类岩屑以及长石等矿物也都较易风化。

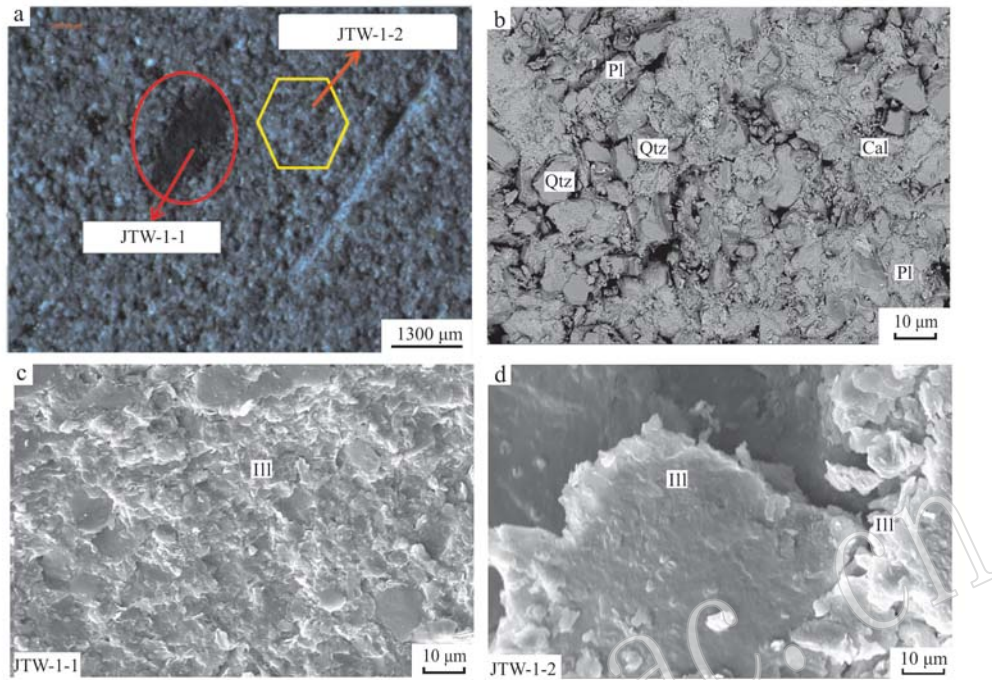


图 4 样品体视镜(a)、背散射(b)和扫描电镜下(c,d)形貌图
 Fig. 4 Mineral morphology observed by stereoscopic (a), backscatter and SEM (c, d)

Ill—伊利石; Qtz—石英; Pl—斜长石; Cal—方解石
 Ill—Illite; Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Cal—calcite

在扫描电镜下分析可知颗粒孔隙间胶结有方解石,存在薄片状粘土矿物,黑色区域为炭质,表明颗

粒间的胶结主要为钙质、炭质及泥质,结合颗粒间有较多空隙,水分较易进入岩石内部,导致钙质和泥质

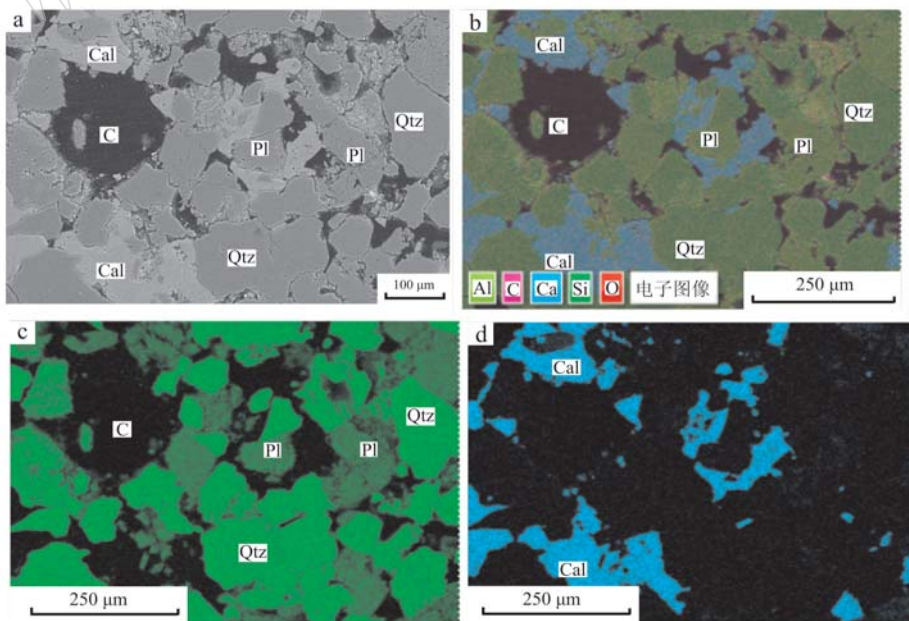


图 5 样品的背散射图(a)、能谱面扫描图(b)、Si 元素(c)和 Ca 元素能谱图(d)

Fig. 5 Backscattering diagram (a), energy spectrum scanning diagram (b), Si element (c) and Ca element (d) energy spectrum

C—有机质; Qtz—石英; Pl—斜长石; Cal—方解石
 C—organic matter; Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Cal—calcite

胶结物的流失,同时可加速长石颗粒边部的风化,而胶结物的流失和风化蚀变后的土状或鳞片状产物都不利于岩石结构的稳定,将直接导致岩石结构变松散,使岩石出现剥落或粉化。

(2) 结构因素: 岩石的孔隙率、胶结物类型和颗粒间的排布规律等结构方面的因素决定了其风化的发展方向。

由扫描电镜下的背散射图可知该类砂岩文物呈粒状碎屑结构,颗粒间排布疏松,孔隙率较大,且连通性好。胶结物充填在粒间孔隙中,呈细小的颗粒状,为孔隙式胶结。胶结物结构呈带状、薄膜状胶结,主要是钙质、炭质和泥质。由于颗粒间的孔隙连通性较好,水分等物质容易进出,易溶物质流失,尤其是钙质胶结物的溶解析出,将导致岩石孔隙率的进一步加大,频繁的物质流失形成恶性循环,引起岩石的结构发生变化,裂隙贯通,出现开裂等不良现象。

(3) 外界环境因素: 金堂县位于成都平原东部和川中丘陵西缘,居我国亚热带季风气候区中部。气温温和,四季分明,雨量充沛,湿度大,植被繁茂(孙璐璐, 2011)。闫宏彬等(2005)认为云冈石窟石质文物的状况与其赋存环境有很大关系,温、湿度的变化就是其中的重要指标。在温差变化较大、干湿交替频繁的环境下可能会导致砂岩的结构性破坏。例如,西班牙重要的史前艺术遗存阿尔瓦拉辛的洞穴砂岩岩画,就是因为盐分在干湿交替作用下导致岩画表面粒状分解和脱落(Benito *et al.*, 1993)。

该砂岩组分中长石和方解石所占比重大,加上砂岩的孔隙率较大,水分易渗流进入孔隙,同时水的渗流作用也会加速岩体风化破坏(汪东云等, 1993)。钠长石和方解石在水的作用下会导致钠长石高岭土化以及钙质胶结物(即方解石)的溶蚀,致使石刻出现表层粉化、剥落、表面溶蚀、岩石内部结构遭到破坏等不良现象(王金华等, 2013)。该样品存在炭质胶结和泥质胶结,炭质胶结物的氧化,泥质胶结物遇水易发生崩解,也都可导致文物的破坏。

4 结论与建议

(1) 金堂李家梁子汉墓石质文物的材质为岩屑长石砂岩,碎屑物质主要为石英、长石、云母及岩屑,胶结物主要为钙质、炭质和泥质。

(2) 该类砂岩为孔隙式胶结,胶结物结构呈带状、薄膜状胶结,胶结填隙物主要为方解石、有机质

和粘土矿物。

(3) 钙质胶结物的溶解流失和长石的风化导致岩石结构变松散,使岩石强度降低,这是该类砂岩质文物发生开裂、粉末状风化、粒状风化、片状风化、卷曲状风化等病害的主要原因。

(4) 建议该类文物在修复过程中注意避免使用酸性或偏酸性的化学试剂,谨防碳酸盐胶结物的溶蚀。在文物保护修复完成以后,应保存于干燥、避光及恒温恒湿的环境中。

References

- Bai Lingyun, Li Wenkui and Xiang Junhuai. 2016. Application Experiment of Computer in Materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 37~87(in Chinese).
- Benito G, Machado M J and Sancho C. 1993. Sandstone weathering processes damaging prehistoric rock paintings at the Albarracin Cultural Park, NE Spain[J]. Environmental Geology, 22: 71~79.
- Cheng Qiang, Kou Xiaobing, Huang Shaobin, *et al.* 2004. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China [J]. Journal of Engineering Geology, 1: 34~40(in Chinese with English abstract).
- Hou Guihua, Li Weifeng, Guo Wei, *et al.* 2008. Analysis of mineral phase of converter steel slag by backscattered electron images of SEM[J]. Materials Review, 22(S2): 208~211(in Chinese with English abstract).
- Hu Linyan, Zhang Qingjun and Shen Yi. 2004. A method for weighted data fusion to estimate the population mean-value of random variables [J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 3: 83~86(in Chinese with English abstract).
- Liu Yumao, Suo Dehao, Liu Shouqiang, *et al.* 2007. A brief report of tombs of the Tang and Song dynasties at Li Jialiangzi in Zhao Town, Jintang County were excavated[J]. Chengdou Archaeology and Discovery, 564~580(in Chinese with English abstract).
- Sun Lulu. 2011. Research on hydrogeological features of weathering fracture weak aquifer and types of water-storing units in Red Beds[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Wang Dongyun, Zhang Zanzun, Fu Linsen, *et al.* 1993. Formation of weathered product and destroying effect of an ancient grotto in Beishan [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 6: 39~44(in Chinese with English abstract).
- Wang Jinhua, Yan Shaojun, Ren Weizhong, *et al.* 2013. Systematic Studies on the Stability of Rock Caves[M]. Wuhan: China University

of Geosciences Press, 7 ~ 10(in Chinese).

Wei Quan, He Xiaodong, Xie Zhenbin, *et al.* 2009. The Physical characteristics of rock cliff figures in Sichuan province[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 21(2): 48 ~ 52(in Chinese with English abstract).

Yan Hongbin, Huang Jizhong and Zhao Xinchun. 2005. The change law of temperature and humidity of Yungang Grottoes and its influence on Grotto preservation [A]. *Proceedings of Yungang International Symposium 2005*[C]. Yungang Grottoes Research Institute, 101 ~ 108 (in Chinese).

Zhang Xiong, Huang Tinghao, Zhang Yongjuan, *et al.* 2015. Image-pro plus analysis of pore structure of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 18(1): 177 ~ 182(in Chinese with English abstract).

Zheng Qingsong. 2016. Research on the Influence of microstructure of red beds sandstone on its Engineering Mechanical Properties in Longquan mountain area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University(in Chinese with English abstract).

Zhou Junyi. 2006. Study on the protection for lithoid cultural relic of red layer in southwest area, China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 243 ~ 250(in Chinese).

附中文参考文献

白凌云, 李文魁, 向军淮. 2016. 计算机在材料中的应用实验指导 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 37 ~ 87.

程 强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 2004. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. *工程地质学报*, 1: 34 ~ 40.

侯贵华, 李伟峰, 郭 伟, 等. 2008. 用扫描电镜的背散射电子像分析转炉钢渣中的矿物相[J]. *材料导报*, 22(S2): 208 ~ 211.

胡林彦, 张庆军, 沈 毅. 2004. X 射线衍射分析的实验方法及其应用[J]. *河北理工学院学报*, 3: 83 ~ 86.

刘雨茂, 索德浩, 刘守强, 等. 2007. 金堂赵镇李家梁子唐宋墓发掘简报[J]. *成都考古发现*, 564 ~ 580.

孙璐璐. 2011. 红层风化裂隙弱含水层水文地质特征及储水单元类型研究[D]. 成都: 成都理工大学.

汪东云, 张赞勋, 付林森, 等. 1993. 北山石窟渗水特征及其对造象岩体的破坏作用[J]. *水文地质工程地质*, 6: 39 ~ 44.

王金华, 严绍军, 任伟中, 等. 2013. 石窟岩体结构稳定性分析评价系统研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 7 ~ 10.

韦 荃, 贺晓东, 谢振斌, 等. 2009. 四川摩崖造像岩石的工程物理特性[J]. *文物保护与考古科学*, 21(2): 48 ~ 52.

闫宏彬, 黄继忠, 赵新春. 2005. 云冈石窟温湿度变化规律及对石窟保存的影响[A]. 2005 年云冈国际学术研讨会论文集[C]. 云冈石窟研究院, 101 ~ 108.

张 雄, 黄廷皓, 张永娟, 等. 2015. Image-Pro Plus 混凝土孔结构图像分析方法[J]. *建筑材料学报*, 18(1): 177 ~ 182.

郑清松. 2016. 龙泉山红层砂岩微结构对其工程力学性质的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学.

周骏一. 2006. 我国西南地区“红层”石质文物的保护研究[C]. *工程地质学报*, 243 ~ 250.