

安岳圆觉洞石刻区防风化加固保护研究

杨 盛¹ 韦 荃² Mathias Kocher³ 蒋 成¹ 付成金⁴

(1. 成都文物考古研究所, 成都 610072; 2. 四川省博物院, 成都 610072;

3. 德国慕尼黑工业大学, 德国慕尼黑 80538; 4. 四川省安岳县文物局, 安岳 642350)

摘要: 安岳圆觉洞石刻保护研究是中德两国科技合作计划支持项目。该处造像受风吹日晒、雨水冲刷, 以及苔藓等生物病害的破坏, 风化严重。本文简述了现场勘查取样的矿物成分化学分析结果及各项性能测试结果, 研究了圆觉洞石刻区的风化病害形成机理。同时, 针对性的完成圆觉洞石刻区防风化加固材料筛选和现场实验, 并采用抗钻强度测试等方法对材料的渗透深度和加固补强效果进行了评估。

关键词: 安岳石窟 风化病害 防风化材料 抗钻强度测试 加固补强效果

1. 引 言

安岳县圆觉洞石刻区, 位于县城东面2km之云居山上。这里巨石盘踞, 山势奇拔, 峭壁耸立, 风景秀丽, 在唐、前后蜀及宋代期间开凿摩崖石刻共100余龛窟, 造像近2000余躯^[1], 为第六批全国重点文物保护单位。圆觉洞石刻区摩崖造像始凿于唐开元年间, 历前蜀、后蜀、北宋, 终于南宋绍兴, 经四百余年开凿而成, 具有很高的历史价值。石刻区内崖壁上的石窟群, 气势雄伟, 线条流畅, 刻镂精细, 造型优美, 艺术精湛。但由于长期处于露天环境, 雨水冲刷、生物病害、风化营力等因素作用, 石质文物表面出现了严重的风化现象, 需要研究如何进行科学的保护, 尤其是防风化保护。

安岳石窟保护研究项目于2006年纳入中德两国科技合作计划, 自2008年起, 中德安岳石窟保护研究项目组完成整个石窟群地区的地质勘探测绘工作后, 从圆觉洞石刻区采集了新鲜砂岩样本, 供实验室分析测试和防风化加固材料筛选试验使用。

2. 圆觉洞石刻区岩石特性

圆觉洞石刻区位于川中平缓褶皱带中部, 龙女寺半环状构造与威远辐射状构造之间。其总体特征构造简单, 地层单一, 岩性简单。根据中国地质大学文化遗产和岩土文物保护工程中心对圆觉洞石刻区岩石样本的X射线荧光分析, 可以得知该地区岩石造岩矿物成分主要为SiO₂, 其次为Al₂O₃^[2]。

该类型岩石抗风化能力不强，这是由岩石内部结构和物理性能所决定的。在做防风化加固材料筛选试验前有必要了解清楚新鲜砂岩样本的矿物组分、内部结构和物理性能。

2.1 岩相分析（图1）

显微镜薄片分析研究的结果综合如下：

颜色：均匀红色；结构：细粒砂状结构；质地：松散；纹理：未观察到；颗粒尺寸：主要尺寸在0.15~0.3mm，最大尺寸达0.6mm；颗粒形状：棱角状、次棱角状均匀分布；颗粒胶结形式：大多沿纵轴线式接触，罕见点接触；基质：细晶方解石和绢云母；孔隙：占总体积3%；矿物成分：碎屑石英含量70%~90%、黏土岩屑5%~14%，斜长石碎屑含量1%~4%、白云母2%~3%；类别：钙质与绢云母胶结岩屑质细粉砂岩。

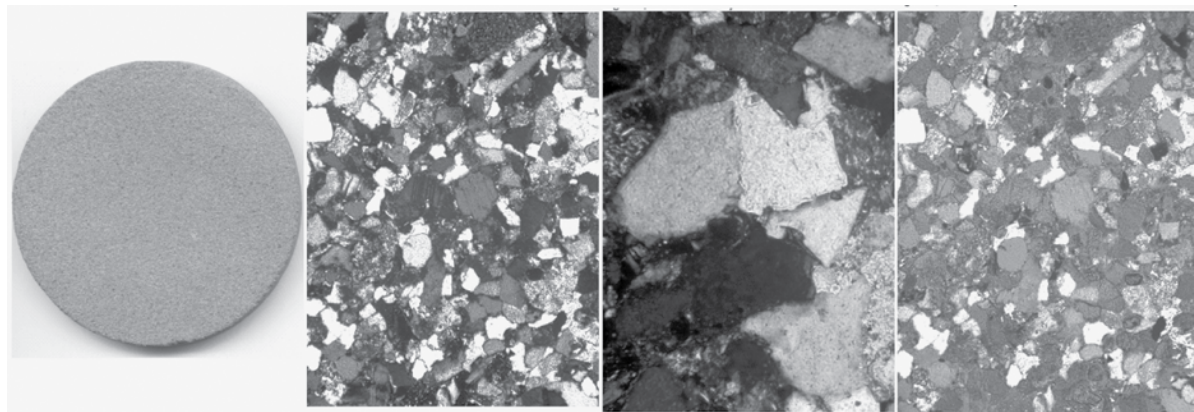


图1 新鲜安岳圆片形砂岩样本和显微镜薄片分析照片

2.2 性能测试

将采集的新鲜安岳砂岩样本制作成正方形岩样和圆片形岩样若干，首先利用体积法、水中称重法测得岩样真实密度 2.67 g/cm^3 ，毛体积密度为 2.13 g/cm^3 ，然后对岩样进行各项物理性能指标测试，包括吸湿性能指标、热学性能指标和力学性能指标。

岩石的吸湿性能指标，主要是指岩石孔隙度、吸水率、吸水膨胀率等。新鲜安岳砂岩样品的孔径分布和孔隙度由德国慕尼黑工业大学用压汞法测定。在新鲜安岳砂岩样品中，约70%的孔隙半径在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ ，大约20%的孔隙半径小于 $0.1 \mu\text{m}$ ，为细孔砂岩；吸水率的测定采用自由浸水法；饱和吸水率的测定采用真空抽气法；吸水膨胀率的测定采用自由浸水法，利用千分表测得。

岩石的热学性能指标，主要是指岩石的热膨胀率。热膨胀率的测定是将岩石加热到 50°C ，然后放在千分表下测量在X、Y和Z方向的长度变化，与其冷却状态下相比较后测得。

岩石的力学性能指标，主要是指岩石的杨氏模量、抗钻强度等。安岳新鲜砂岩样品的杨氏模量可以通过弯曲拉伸强度来测量确定，测试在Zwick公司的万能材料试验机Z010 [10KN]上完成，初步的试验压力为10N，然后压力逐渐增大，测试机器步进速度为 0.50 mm/min ；抗钻强度的测定是由SINT公司的DRMS（drilling resistance measurements system钻入阻力测定系统）抗钻强度测试仪来完成的，钻头使用的是直径5mm的金刚石钻头，所使用的标定材料为均质的陶瓷材料。

各项性能指标测试结果见表1、表2。

表1 岩样吸湿性能测试结果

项 目	孔隙率/%	吸水率(大气条件下)/%	吸水率(真空条件下)/%	吸水膨胀率(95%RF)垂直方向/($\mu\text{m}/\text{m}$)	吸水膨胀率(95%RF)平行方向/($\mu\text{m}/\text{m}$)	吸水膨胀率(水中)垂直方向/($\mu\text{m}/\text{m}$)	吸水膨胀率(水中)平行方向/($\mu\text{m}/\text{m}$)
新鲜安岳砂岩样本	20.14	6.46	9.57	448	391	2134	1375

表2 岩样热学性能和力学性能测试结果

项 目	热膨胀率垂直方向/($\mu\text{m}/\text{C}$)	热膨胀率平行方向/($\mu\text{m}/\text{C}$)	杨氏模量/(kN/mm^2)	弯拉强度/(kN/mm^2)	弯拉强度/杨氏模量(比率)	抗钻强度平均值(垂直方向)/N	抗钻强度平均值(平行方向)/N
新鲜安岳砂岩样本	13	11	3.72	2.43	0.65	3.6	4.2

3. 防风化保护材料筛选试验

岩石在风化过程中造成其内部黏结力的损失,是导致强度损失的原因。石质文物的防风化保护材料研究需要分析未风化的新鲜岩石和经过保护材料加固处理后的岩石的各项性能指标。比较处理前后的各项性能指标,确保处理后的岩石各个深度剖面的强度与新鲜岩石的强度匹配。同时综合考虑渗透性及表面色差等因素,以及防风化保护材料应该遵循最少干预性原则和可再处理原则,即在使用防风化保护材料对风化砂岩加固补强时不会引入与砂岩不容的有害物质,并且不影响以后的其他更有效的加固手段的引入。最后对筛选试验中使用的防风化保护材料进行综合评估,选择出最合适的防风化保护材料。

3.1 防风化保护材料

近年来,我国文物保护技术专家在风化砂岩防风化保护研究上,采用了各类防风化保护材料,其中常用的无机材料有:石灰水、氢氧化钡、碱土硅酸盐及氟硅酸盐等^[3]。常用的有机材料有:环氧树脂、丙烯酸树脂和有机硅树脂^[4]。还采用了纳米材料对石质文物进行保护^[5]。

考虑到有机硅类材料在我国的砂岩保护方面已有十多年的使用经验,如四川省文物考古研究院采用甲氧基硅烷为主剂的防风化材料对巴中南龛石窟进行了风化加固试验^[6];山东省博物馆采用REMMERS有机硅材料对山西纯阳宫石质文物进行了保护^[7];陕西省的红石峡题刻抢救性保护工程,选用REMMERS有机硅材料进行补强处理^[8];重庆大足北山136窟的五百罗汉也选用REMMERS有机硅材料进行了加固处理;同时综合考虑安岳圆觉洞石刻区岩石特性和四川地区气候条件,经过初步筛选,我们采用的是德国REMMERS公司生产有机硅类加固补强材料:KSE OH、KSE 100和KSE 300,来进行实验室内的防风化保护材料筛选试验。KSE OH、KSE 100和KSE 300属于硅氧烷类风化岩石加固保护材料,主要成分是正硅酸乙酯,其分子式为 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OSi}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_3$,为无色透明液体,微溶于水,溶于乙醇、乙醚,适合于加固半多孔性,吸水性强,松散的矿物质,尤其是砂岩。试验中使用的三种材料的规格不同,其活性成分,密度和胶结物质,如表3所示。

表3 三种加固材料的产品规格及反应后的产物

项目	活性成分 质量分数/%	催化反应	密度20℃ /(g/cm ³)	色泽	气味	固化沉积 /(g/L)	反应产物	老化产物
KSE OH	75	中性	0.95	透明带黄	典型气味	300	气态乙醇	SiO ₂
KSE 100	20	中性	0.79	透明带黄	典型气味	100	气态乙醇	SiO ₂
KSE 300	99	中性	1.0	透明带黄	典型气味	300	气态乙醇	SiO ₂

3.2 加固机理

正硅酸乙酯的加固机理是以有机态进入岩石孔隙,缓慢地与空气中的水蒸气及岩石中的毛细水反应,生成无机态、矿物状的SiO₂胶体沉积在岩石的孔隙中形成新的胶结物,从而对岩石起到加固作用。正硅酸乙酯凝固胶结的过程分为以下几步:

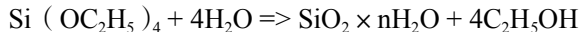
(1) 加固材料进入岩石后,溶剂逐渐蒸发,材料黏度轻微增加和水解,产生个别的Si-O-Si胶体。

(2) 溶剂大量蒸发,加固材料迅速固化沉积,同时黏度增加。

(3) 凝固胶结的产物,进一步水解,缩合和聚合反应继续出现,反应产物为气态乙醇。然后,反应产物挥发和固化沉积增多。缩合反应在岩石形成黏合力,使得风化砂岩产生强度。

(4) 固化沉积形成的最终产物是一种透明的胶结物,其化学式为SiO₂ × nH₂O。

整个化学反应可用下列化学反应方程式来表示:



这反应方程式可以示意分为连续两个阶段:

(1) 烷基团体水解反应,从硅醇基团分离出自由氧;

(2) 水分子从聚合产生的SiOH-HOSi结构的分离,产生SiO₂晶格结构。

这些反应是pH和温度十分敏感,会影响凝固胶结反应的过程,岩石中的可溶盐分也会有影响。

3.3 加固处理试验

在实验室的加固处理试验中,加固的样品是14个岩石圆片样本(直径76mm,厚8mm)和2个立方体样本(50mm × 50mm × 50mm)分别用初步筛选出的加固剂(KSE OH, KSE 100和KSE 300)进行加固处理。在处理过程中,实验室的相对湿度稳定在50%,室内温度稳定在24℃。处理前将加固的岩样干燥后称重,加固处理岩样时,将岩样与加固剂接触,利用毛细力吸收加固剂。岩样圆片每面接触加固剂3min,岩样立方体每侧面接触加固剂1min。加固处理完成后,将样品擦拭干净然后再称重。然后把样品放置在65%的相对湿度和20℃的环境中自然固化。加固材料完全固化时间约6个星期,完全固化后的样品再次称重。

3.4 性能测试

对加固后的岩样进行各项性能指标进行测试,包括吸湿性能指标、热学性能指标和力学性能指标。试验方法与新鲜安岳砂岩样品性能测试方法相同。各项性能指标测试结果见表4、表5。

表4 岩样吸湿性能测试结果

项 目	真实密度 /(g/cm ³)	毛体积密度 /(g/cm ³)	孔隙率体积 分数/%	吸水率质量 分数(大气 条件下)/%	吸水率质量 分数(真空 条件下)%	吸水膨胀率 (95%RF) /(μm/m)	吸水膨胀率 (水中) /(μm/m)
新鲜安岳砂岩样本	2.67	2.13	20.14	6.46	9.57	470	2134
KSE OH加固岩样	2.67	2.15	19.47	6.31	9.05	500	2350
KSE 100加固岩样	2.66	2.13	19.90	6.42	9.34	580	2700
KSE 300加固岩样	2.67	2.14	19.80	5.90	9.26	500	1920

表5 岩样热学性能和力学性能测试结果

项 目	热膨胀率 垂直方向 /(μm/°C)	热膨胀率 平行方向 /(μm/°C)	杨氏模量 /(kN/mm ²)	弯拉强度 /(kN/mm ²)	弯拉强度/杨 氏模量 (比率)	抗钻强度平 均值(垂直 方向)/N	抗钻强度平 均值(平行 方向)/N
新鲜安岳砂岩样本	13	11	3.72	2.43	0.65	3.6	4.2
KSE OH加固岩样	14.007	14.160	11.11	5.53	0.50	2.8	3.3
KSE 100加固岩样	16.446	16.181	7.04	4.16	0.59	3.2	4.7
KSE 300加固岩样	18.072	17.385	13.05	5.77	0.44	3.7	7.2

3.5 测试结果分析

三种防风化加固材料渗透性均很理想, 加固处理后的岩样的外表颜色均无变化。KSE 100加固处理过的岩样在吸水膨胀率测试中较其他两种材料偏高, KSE 300加固处理过的岩样在热膨胀率测试中较其他两种材料偏高。KSE OH加固处理过的岩样在实验室内各项性能测试中无明显缺点。吸水膨胀率和热膨胀率是衡量加固材料环境适应性的重要指标, 考虑到四川安岳地区气候属中部亚热带季风性湿润气候, 吸水膨胀率和热膨胀率两项指标如果与当地新鲜砂岩不一致, 有可能影响加固处理效果。综合看来KSE OH的加固效果要优于其他两种防风化保护材料, 可以选择作为现场试验的防风化保护材料。

4. 防风化保护材料现场试验

现场试验是防风化保护材料对文物本体保护施工可行性论证的必要环节, 可以检验实验室筛选出的防风化保护材料KSE OH对安岳当地环境的适应性, 加固材料现场试验区域选择在安岳圆觉洞10号窟右侧崖壁(图2), 2009年5月进行加固处理试验, 2009年11月对现场试验区域进行加固效果评估。

2009年5月, 现场试验加固材料主剂为KSE OH, 标准浓度由1份加固剂和2份稀释剂配制而成。用药量为1.75 l/m², 施工工艺为喷涂法。采取的施工步骤是先喷低浓度加固试剂, 再喷标准浓度的加固试剂。每喷涂一次, 待表面被吸收完成后, 再进行下次喷涂, 直至岩石表面吸收饱和为止。材料喷涂时, 使用塑料薄膜将实验区外部分覆盖, 防止对周围环境产生影响。

2009年11月对现场试验区域进行加固效果评估。传统的风化岩石加固处理效果采用划痕硬度、贯入硬度或回弹硬度来评价, 这些方法在定量分析时具有一定的局限性。在欧洲DRMS抗钻强度测

试仪通常被推荐为表征岩石硬度和评价风化岩石加固处理效果的标准工具^[9]。安岳圆觉洞10号窟右侧崖壁现场试验加固效果检测设备为抗钻强度测试仪（图3）。通过在试验面上利用直径5mm的钻头钻取小孔，测定岩石表面0~10mm深度的钻入阻力（进尺速度：10 mm/min，旋转速度：600 rpm），得到试验区域岩石的抗钻强度曲线。

加固前利用抗钻仪检测现场试验区域R1、R2，得到抗钻强度曲线，可以得到风化层的厚度、风化砂岩的抗钻强度等参数，加固后6个月再利用抗钻仪检测现场试验区域R1、R2，得到抗钻强度曲线（图4、图5），可以得到加固剂渗透深度和加固后砂岩风化层的抗钻强度等参数。



图2 防风化保护材料现场试验区R1、R2



图3 现场试验中使用的抗钻强度测试仪

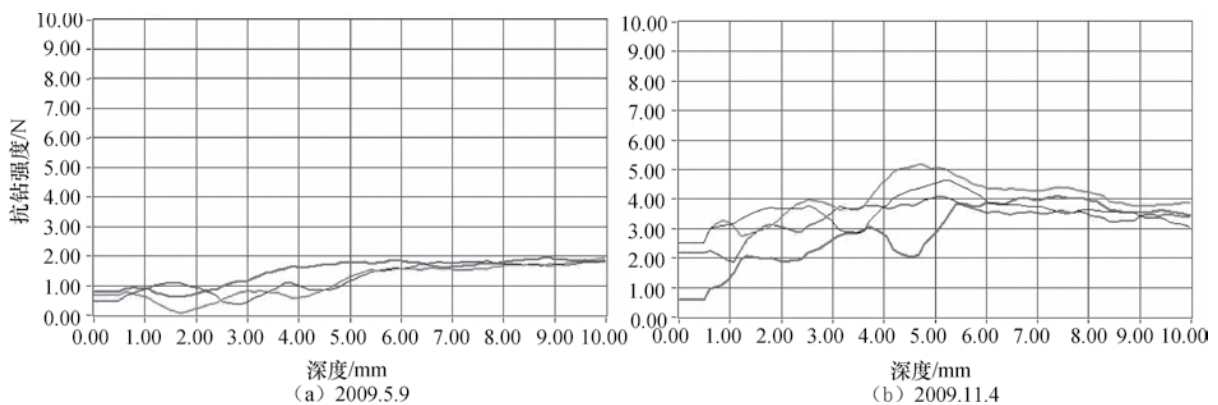


图4 试验区域R1加固前和加固后的抗钻强度

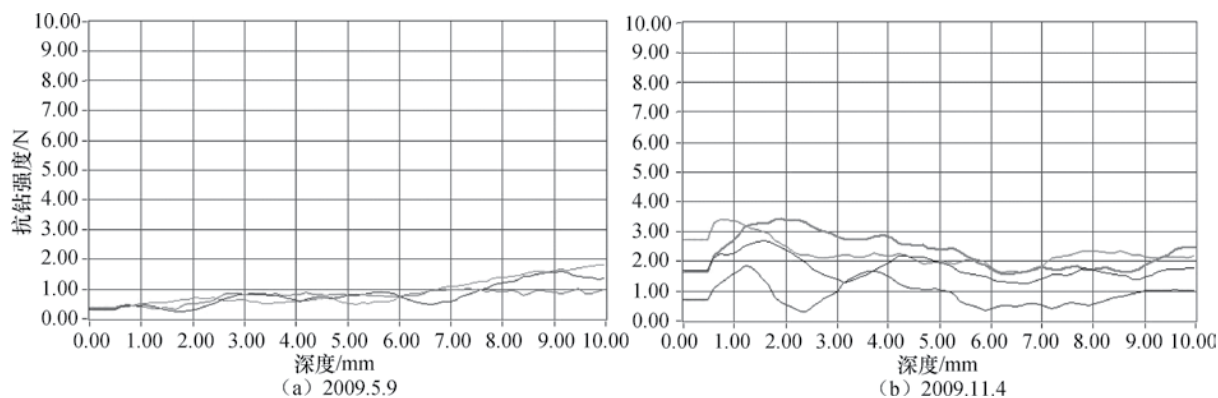


图5 试验区域R2加固前和加固后的抗钻强度

5. 小 结

研究表明,四川安岳圆觉洞石刻区岩石特性,新鲜岩石样本的孔隙率是比较高的(总体积的20%),因此可以被称为多孔砂岩。在大气压力条件下,新鲜岩石样本6.5%的吸水率也很高。这种砂岩在四川地区湿润气候条件下,十分容易风化,水分作用使得砂岩内部结构中的胶结成分水解,导致岩石表面出现粉化脱落现象。从四川乐山大佛石刻^[10]、四川巴中南龛石窟^[6]和四川其他摩崖造像^[11]的保存状况来看,均存在类似的风化病害。

近些年,环境污染的加剧加速露天石质文物的风化速度。环境治理需耗费大量人力和资金,并非易事。如果对石质文物进行加固保护,提高石质文物自身的防风化能力,则是切实可行的保护露天石质文物的方法^[12]。针对四川安岳圆觉洞石刻区砂岩风化状况,我们筛选出硅氧烷类防风化加固保护材料来进行加固补强处理。该种材料的反应对象是岩石中的毛细水和空气中的水分,生成的SiO₂胶体沉积在岩石的孔隙中形成新的胶结物。其优点是在加固反应中,不引入与砂岩不容的物质,而且老化产物与安岳圆觉洞石刻区砂岩的主要成分相同,并且不会影响以后的其他更有效的加固手段的引入,符合最少干预性原则和可再处理原则。

现场试验表明,利用防风化保护材料KSE OH加固补强处理的区域,前后色泽无变化,未见苔藓生物覆盖,加固处理后使用喷壶对试验区进行喷水检测,发现水雾在岩石表面形成水珠,说明加固处理后的砂岩表面有憎水性。在现场试验中我们使用抗钻强度测试仪来进行试验区加固效果评估。与传统分析方法相比较,抗钻强度测试仪在加固处理后岩石强度提升的定量测定和加固材料渗透深度测定方面,结果十分精确。现场试验区R1、R2抗钻强度的测试结果表明:防风化加固材料KSE OH反应完成后,风化层增加强度为风化砂岩原强度的1.5倍,为新鲜砂岩强度75%,渗透深度为8~10mm,达到了给安岳圆觉洞10号窟右侧崖壁试验区岩石风化层加固补强的效果。

致谢:安岳圆觉洞石刻区防风化加固保护研究工作得到了成都文物考古研究所王毅所长、李明斌副所长和安岳县文物局的支持。安岳圆觉洞石刻区防风化加固保护现场试验得到了德国巴伐利亚州文物保护局Vojislav Tucic先生协助。在此一并致谢。

参考文献

- [1] 邓之金. 安岳圆觉洞“西方三圣”名称问题探讨. 四川文物, 1991, (6): 34.

-
- [2] 方云. 四川安岳圆觉洞石刻区环境地质病害防治对策研究报告. 武汉: 中国地质大学, 2007: 93.
- [3] 韩冬梅, 郭广生. 化学加固材料在石质文物保护中的应用. 文物保护与考古科学, 1999, (02).
- [4] 王丽琴, 党高潮. 加固材料在石质文物保护中应用的研究进展. 材料科学与工程学报, 2004, 22 (5): 778-782.
- [5] 柳振安, 李化元, 陆寿麟. 纳米材料在石质文物保护中的应用研究. 2005年云冈国际学术研讨会论文集.
- [6] 谢振斌. 巴中南龛石窟风化破坏原因及防风化加固保护. 四川文物, 2005, (3): 82-86.
- [7] 张建华. 纯阳宫石质文物保护与修复. 文物世界, 2006, (2): 70-72, 80.
- [8] 周伟强, 杨秋颖. 红石峡题刻保护及室外砂岩保护中若干问题的思考. 文博, 2005, (1): 86-89.
- [9] Tiano P, Delgado R J, De Witte E, et al. The conservation of monuments: a new method to evaluate consolidating treatments. Int J Restoration of Buildings and Monuments, 2002, 6: 133-150.
- [10] 秦中, 张捷. 四川乐山大佛风化的初步探讨. 地理研究, 2005, 24 (6): 928-934.
- [11] 韦荃, 贺晓东. 四川摩崖造像岩石的工程物理特性. 文物保护与考古科学, 2009, (02): 48-52.
- [12] 王丽琴, 党高潮. 露天石质文物的风化和加固保护探讨. 文物保护与考古科学, 2004, (04): 58-63.