

石质文物科技保护研究进展

叶良¹, 李强强¹, 孙平平²

(1. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江水利水电学院 建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 总结了石质文物病害机理研究及病害检测技术、石质文物清洗方法、石质文物保护材料、石质文物监测方法、现代化信息技术,在石质文物科技保护中的应用等方面的研究现状和取得的重要成就,并针对石质文物科技保护在保护材料、仪器设备等方面现存的问题提出了一些建议。

关键词: 石质文物; 科技保护; 现状; 研究进展

中图分类号: G264.2; K876.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2016)05-0394-07

Advances in research on protection of stone relics by science and technology methods

YE Liang¹, LI Qiangqiang¹, SUN Pingping²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper summarized research situation and great achievements obtained in stone cultural relics disease mechanism research and disease detection technology, stone cultural relics cleaning method, materials for stone cultural relics conservation, stone cultural relics monitoring method, the application of modern information technology in stone cultural relics protection. Based on that, some suggestions are put forward for the problems existed in protection of stone relics by science and technology methods in protective materials, equipment and other aspects.

Keywords: stone cultural relics; science and technology protection; present situation; research advance

收稿日期: 2016-09-18

基金项目: 浙江省文物保护科技项目(2015017); 浙江省公益性技术应用研究计划项目(2015C33058); 浙江省自然科学基金项目(LY13E080018)

作者简介: 叶良(1973—), 男, 浙江省嘉兴人, 副教授, 硕士, 主要从事古建筑施工技术与管理的研究。

石质文物因为其历史意义和艺术价值,一直受到社会各界的关注。然而,石质文物在长期的历史变迁过程中,受自然环境及人类经济、社会活动等方面的影响正在遭受着不同程度的破坏。传统方法虽能在一定程度上保护石质文物,但是,随着工业社会的发展,石质文物病害呈现复杂化和多样化的特点,传统方法由于其技术等条件的限制,存在对石质文物病害诊断不当而产生次生破坏的风险。科技保护方法则可以对石质文物病害进行准确的分析与诊断,采用新型科技材料及工艺对石质文物进行保护、长期监测,进而延长石质文物的寿命。本文综述了近年来石质文物科技保护在病害机制诊断、清洗方法、新型材料、监测技术及信息技术运用等方面取得的重要成果。

1 石质文物保护的相关研究

1.1 石质文物病害及检测技术研究

1.1.1 石质文物病害产生原因及破坏机理

WW/T 0002—2007《石质文物病害分类与图示》^[1]界定了文物表面生物病害、机械损伤、表面(层)风化、裂隙与空鼓、表面污染与变色、彩绘石质表面颜料病害、水泥修补7种石质文物破坏的类型。近年来也有不少学者针对石质文物病害产生的原因及其机理展开了详细而深入的研究。

谢振斌等^[2]通过一系列模拟实验,认为通过冻融、水解等作用形成的水的运动,是砂岩表层裂变、砂岩内部化学成分迁移和盐类物质转化的重要原因。此外,一些有害气体、苔藓等生物、可溶性盐也是崖墓风化破坏的关键因素。邵明申等^[3]发现承德避暑山庄的一些砂岩文物上面也产生了比较严重的风化病害,进而在实验室通过对这种砂岩检测所得的岩石学、化学、物理学等数据分析该种砂岩文物的风化机理,发现岩体内的盐分膨胀及钙质胶结物的溶解是该种砂岩风化剥落及粉化破坏的主要原因。除了WW/T 0002—2007《石质文物病害分类与图示》载明的病害种类外,其他产生石质文物病害的原因也是不容忽视的,张克燮等^[4]认为水文、气候、地质构造等因素在一定程度上也会产生石质文物的环境地质病害。金皓^[5]通过对宁波地区气候、降雨的分析,认为温湿度、冻融、酸雨、风沙等外部环境因素综合作用是石质文物病害产生的重要原因。王翀等^[6]从露天石质文物风化角度,分析了藻类、地衣、苔藓等生物及复杂生物群落对石质文物的破坏机理,提出了一些处理和预防石质文物表面生物破坏的方法。

1.1.2 石质文物病害检测技术

采用一些无损或微损检测技术对石质文物的病害进行科学诊断是合理制订石质文物保护方案的前提和基础。随着现代科技的发展,在石质文物保护领域也运用了很多先进的检测设备和检测技术,这些设备和技术的应用大大提高了对石质文物病害诊断的准确率。

对石质文物的检测工作主要有超声波无损探伤、电法勘探检测裂隙等,分析工作有成分分析、晶相分析和力学状态分析等^[7]。孙进忠等^[8]运用瑞雷波和超声透射波对义乌古月桥桥身条石、北京西黄寺抱鼓石和故宫汉白玉栏板进行了无损检测。张志国等^[9]运用超声波法对北京出土的乾隆御碑的内部损伤情况进行了检测,该方法甚至可以通过定量探测碑体内部裂缝的发育程度及其走势来判断其风化程度。杨隽永等^[10]用X射线衍射(XRD)对新昌大佛寺石塔矿物成分、密实度、孔隙率等理化性能进行检测,用超声波测量仪、回弹仪和划痕仪进行石塔风化程度的检测,采用便捷式荧光仪配合X衍射仪检测石塔表面风化成分;同时,通过测量基因序列后与全球基因数据库比对来分析微生物的种属关系,进而为合理设计石塔修复方案奠定了基础。张新鹏等^[11]在对花山岩画勘察分析的同时进行了声波测试,对采集的岩体波速和开裂厚度的数据进行了建模、拟合,随后定量计算出岩体风化厚度,进而找出该类岩体开裂的主要原因。张中俭等^[12]利用三维扫描结合超声波技术对承德避暑山庄部分不规则形状的石质文物的裂隙

发展深度进行了无损定量检测。此外,方云等^[13]用探地雷达来检测龙门奉先寺大佛的裂隙,该技术因其具有精度高、无损和快速的特点而极大程度地简化了对一些隐藏岩体裂隙和岩洞的调查工作,有利于对一些不易取样的石质文物开展科学研究。孙亚丽等^[14]在衢州古城墙采集多块不同岩性的岩石,然后在同等风化条件下进行了风化速度及风化剥落深度的研究,进而定量得出了砂岩、砾岩等 7 种岩石抗风化能力大小的关系,为石质文物风化病害诊断提供了理论依据。黄志义等^[15]在研究北魏宣武帝景陵地下墓室时,认为雷达与红外热成像技术两者相结合对墓室渗水病害的检测与治理有良好效果。张慧慧^[16]通过在实验室模拟岩石渗水情形,验证了可以用红外热成像法对大型石质文物病害等级进行划分的设想。周霄等^[17]从温度分布角度,对承德永佑寺避暑山庄后序碑进行红外探测,借助 24 h 内温度场的变化图像分析其内部裂隙及水分状况,进而测出碑体内部裂隙走向,为后序碑的稳定性保护提供了依据。

1.2 石质文物的主要清洗方法

一般而言,石质文物表层的污染物在一定程度上展现了其悠久的历史,应该将其保留下来。但是,在当今工业发达和环境污染日益加剧的情形下,石质文物和古建筑表面污垢的沉积病害对其本体石材的寿命造成了极大的威胁。在这种情况下,清洗便是石质文物和古建筑保护的重要环节。

石质古建筑和文物具有特殊价值,在清洗前要做好充分的准备工作,确保在不对其产生副作用的前提下达到一个科学合理的清洗效果。陆文宝^[18]认为,在对石质文物清洗前应做好石质文物环境调研,对石质文物劣化情况进行分析,分析污垢类型并选取合适的清洗方法,然后进行清洗试验等一系列工作。

目前,石质文物清洗方法有手工、物理、化学清洗和吸附脱盐技术等^[19]。张秉坚等^[20]主要介绍了几种常用的清洗方法,如水清洗、化学清洗、洗粒子喷射和激光清洗。水清洗法包括水浸泡、高低压喷淋、喷射雾化蒸气等。化学清洗方法主要有螯合法、生物法、吸附材料和贴敷技术、表面活性剂法等,因为敷贴法具有耗用药剂量少、易于在垂直面和顶面敷贴、时间可控等特点,所以它是大体量石质文物化学清洗的一种重要方法^[21]。粒子喷射清洗作为一种物理清洗方法,具有清洗效率高、可控制度好及无化学残留等优点,其工作原理主要是在微粒子冲击作用下使污垢层直接从石材表面剥离或者微粒子冲击运动将污垢磨损去除,因此,对表面简单的积尘、土锈及其钙化结壳等无机形态的污染物,清洗效果比较好^[22]。激光清洗污染物范围广泛,且具有无损、精度高、绿色环保等优点^[23],其清洗原理是激光照射在污垢表层,在污染微粒或表层吸收能量后,产生汽化或光分解等作用,进而达到清洗污垢的效果^[24]。此外,叶亚云等^[25]研究了在激光辐照下砂岩的损伤程度,先试验性地用激光清除砂岩表层墨迹污垢,得到了一些激光清洗的参数并且总结了能够达到最佳激光清洗效果的方法,随后在四川绵阳碧水寺进行了外场实验,进而证实激光能安全有效清洗烟熏污垢。齐扬等^[23]也在云冈石窟验证了激光清洗的效果。

1.3 石质文物的相关保护材料

石质文物具有特殊的历史文化价值,且具有不可再生性,因此,在对石质文物加固保护之前,应结合所保护石材特征仔细了解保护材料的物理化学性质,谨慎选取保护材料。

目前,应用于石质文物修复的无机材料有 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 、石灰水等灌浆加固材料,以及油、蜡等表面封护剂,常用于石质文物保护的有机材料主要有环氧、丙烯酸类树脂和有机硅树脂等。刘佳等^[26]对各种无机、有机材料的优缺点进行了对比。无机材料,如石灰水、氢氧化钡、硅酸盐加固材料,以及油、蜡表面封护剂,能在岩石表面形成保护层,但对岩石内部的保护作用并不大,弹性、疏水性、黏结力等性能并不理想;环氧树脂,能在常温常压下固化,黏结性强、收缩性小、耐霉菌,是较强的抗化学溶剂,但耐候性、疏水

性及渗透性差,易堵塞水蒸气的流通,紫外线照射后易变黄;丙烯酸树脂,有良好的耐候性、疏水性、成膜性,且附着力好,但形成的膜非常脆,耐碱性、耐候性差。有机材料,如有机硅树脂,有良好的渗透性、憎水性、耐候性、呼吸透气性,但附着力较差,固化温度高,固化时间长,保护膜易破裂;有机氟聚合物,有优良的防水、抗氧性能,耐紫外线、耐酸碱、耐粘污,具有超耐候性,但附着力和耐低温性、透气性差,且价格昂贵。

近年来,随着社会对石质文物的重视,不少机构也研制出了一些用于石质文物保护的复合材料和新型材料。洪坤等^[27]认为仿生无机材料因为具有良好的耐磨性、疏水透气性、环境友好性等特点,在石质文物保护方面具有较好的研究价值与应用价值。刘玉荣等^[28]介绍了介孔材料具有较高的比表面积和规则的孔结构,且介孔涂层材料应用于石质文物保护具有良好的透水性和疏水性,较强的抵抗酸雨的能力及无裂缝等优点,但是,在目前的应用过程中还存在着介孔涂层的有序度不是很高、孔径分布范围较宽等缺点。范敏等^[29]认为有机硅具有较好的黏结性、疏水透气性,优良的耐候性、保光性等特点,对石质文物的加固和抗风化都能起到较好的作用,但是,受岩石湿气的影响,有机硅易产生轻微变色,其抗老化性能需进一步改善。王丽琴等^[30]研制了一种纳米 TiO_2 改性石质文物防水材料,通过在重庆大足石刻上的试验,证明该种材料耐盐性、透气性及耐光性等比改性前有显著改善,并且可以长期保持它良好的憎水性。

1.4 石质文物监测技术

石质文物的监测主要用于了解现存石质文物的保存状况,石质文物本体材料风化速度,以及风化到何种程度需要预警。同时,监测石质文物的各项理化数据,对其未来病害发展状况进行预测预警,并在监测过程中采取措施及时干预以减少不利因素对石质文物的破坏,对石质文物实施动态保护,从而大大降低破坏后修复的风险和成本。此外,对石质文物定期进行各项指标的监测也可以对某些材料和技术的修复效果进行跟踪检验,以总结经验,为后续石质文物修复或其他石质文物的修复提供技术支撑。

目前,对石质文物的监测主要侧重于对石质文物力学性能监测、本体材料监测和环境监测等方面。如吕恒柱^[31]通过建立苏州虎丘古塔监测数据库及古塔变形的数学模型,根据数据处理结果输出古塔沉降观测曲线、形变趋势预测图、超警戒线异常点等数据图表,科学直观地对虎丘古塔进行监测预警。周伟等^[32]对颐和园佛香阁进行激光扫描,然后进行整体点云数据的拼接,并对通天柱用椭圆方程进行拟合,进而对其倾斜偏移等各项指标进行监测,为古建筑精细化保护奠定了基础。葛琴雅等^[33]采用一种优化后的 ATP 生物发光法,在文物的现场和实验室内进行抑制菌效力测试;同时,该方法还可以监测药剂在文物上的残留情况,进而为石质文物微生物病害的科学治理提供依据。孟诚磊^[34]利用表面粗糙度仪、红外热成像仪等一系列先进设备对灵隐寺双经幢进行了表面风化和水迁移活动的监测,得出该双经幢风化和微生物污染严重的结论,进而建议进行清理修复;对丽水市延庆寺塔进行砂浆强度监测,得出砂浆强度和塔身倾斜具有相关性的结论;还对龙德寺塔修补前后砂浆强度和成分进行监测,进而证明其修补材料的合理有效性。方云等^[35]采用位移传感器及三芯应变片、小型气象站、MiniTrase 等设备,采集位移、力学、温湿度、土体湿陷性等数据,对唐顺陵天禄石雕进行了变形监测,并通过对比分析不同因素与石雕形变的相关性来判断天禄石雕裂隙的变形方式,确定影响石雕稳定性的最不利因素,从而为抢救保护该石质文物提供了科学依据。崔亚平^[36]通过设置相应的传感器采集温湿度、太阳辐射强度、紫外线强度数据,对广州南越王墓进行了长达3年的环境监测,通过分析得知,与潮湿相比,湿差对于墓室岩石造成的危害更大,温差、紫外线、照度也对石质墓室风化起一定作用,进而提出通风、除湿、空调等控制手段综合配合来维持气候状况的稳定性,同时,对光棚进行针对性的改造来减少光照、紫外线对墓室的破

坏;但是,监测过程中也存在不能实时获取数据、监测指标较少、缺少与监测相匹配的数据系统等问题。

1.5 现代科学信息技术在石质文物保护中的应用

随着社会的进步及科学技术的发展,信息技术等逐渐与石质文物保护紧密结合起来,这些信息技术的产生和运用为石质古建筑和石质文物的科技保护起到了积极的推动作用,有利于石质文物的数字化保护,以及延长石质文物的寿命。

近年来,有不少专家学者将现代科学信息技术用于石质文物的抢救性保护,取得了显著成效。如李树坤等^[37]对石质文物三维扫描的方法和原理进行了介绍,并结合具体工程提出了三维激光扫描技术在石质文物精确三维量算、虚拟修复、变化检测等方面的应用。何勇^[38]介绍了在云冈石窟的保护工程中,运用 GIS、计算机网络、三维扫描等技术对石质文物本体进行永久化的数字保护。陶涛^[39]设计并实现了重庆大足石刻千手观音造像三维展示系统,随后实现了多点触控等常用的几种三维模型的交互技术。马文武等^[40]通过对某工程土建施工中发现的石碑高光谱数据进行基于阈值的最小噪声分离变换,提取了原始影像中模糊不可见人偶图像,并对其颜料成分进行了分析,该实验结果为后期石碑的修复和研究提供了依据。葛怀东等^[41]引入自适应三维重建系统与三维全景空间测量技术,构建南朝陵墓石刻数字化保护方案,为以后石质文物的保护与研究提供了依据。此外,意大利佛罗伦萨大学的 Piero Baglioni 等^[42]提出了构建一个关于文物保护的多媒体数字图书馆的设想,可以将所保护文物的各种信息,特别是对其修复保护的各种图片、录像等资料实时录入到该数字平台,为文物的后续保护提供可靠依据。

2 石质文物科技保护存在的问题及对策

综上现状分析,由于石质文物科技保护开展时间较短、研发投入相对较少等因素的限制,中国在石质文物科技保护领域与国外先进水平,特别是与欧洲发达国家相比还有一定的差距,如石质文物的修复材料、石质文物的保护设备、石质文物的保护施工与监测等,需不断改进。

2.1 修复材料

目前,应用于国内石质文物保护的大多是有机材料,但随着时间的推移,有机材料失效后则会对石质文物保护带来副作用及次生破坏,不利于石质文物的长期保存。因此,环境友好型的石质文物仿生材料及传统材料有待加强研发和应用。

2.2 保护设备

专门针对石质文物科技保护的高精度、友好型施工与监测设备有待研发,如石质文物风化表层的微损取样设备、便携式现场检测监测设备等。此外,激光清洗设备虽然可控度高、效果好,但由于使用成本较高,在国内较少使用。因此,与激光清洗设备具有同等功能而成本较低的清洗设备有待研发。

2.3 保护施工与监测

在石质文物保护性施工中缺少规范的施工工法及质量控制标准。此外,对石质文物本体保存状况动态监测的指标较少,仅局限于粗糙度、色差、回弹强度等方面,还不能更为客观、全面地评价其健康状况。因此,应该针对不同石质文物结合其材质等特点采用不同的监测指标,制订合理的监测方案。

2.4 抢救性发掘与数字化保护

在国家文物局公布的 7 个批次的全国重点文物保护单位中,石窟及石刻累计仅有 244 个,浙江省仅有 15 个石窟寺及石刻全国重点文物保护单位,31 个石窟寺及石刻省级重点文物保护单位。目前,全国仍有大量的石质文物未被发现或未受保护甚至面临毁灭的风险,因此,对石质文物进行抢救性的发掘,并

采用三维扫描等科技手段建立石质文物数字博物馆,对其进行数字化的保护成为当务之急。

2.5 人才培养

石质文物保护涉及建筑结构、建筑施工、建筑材料、生物学、矿物学、岩石学、化学、物理学等多个学科,国内开设文物保护专业的高校较少,专门培养石质文物保护技术专业人才的院校更少,因此,在石质文物保护领域,有待培养一批复合型石质文物科技保护专业的高级应用型人才。

3 结 语

近年来,政府相关部门高度重视文物保护工作,也针对文物保护制定了一系列法律法规,专项支持了一批重大文物保护工程和相关科研项目。2012年底,国家科技支撑计划“石质文物保护关键技术研究”项目通过验收,这为中国的石质文物全方位科技保护研究起到了很好的示范作用,石质文物保护程序也得到了很好的完善。针对石质文物保护关键技术问题,国内文物科技保护工作者特别是高校的科研人员可以充分利用高校的多学科优势和实验室设备联合攻关,应用多种现代科技手段,开展无损及微损探测技术应用、岩体稳定性评估、危岩体加固治理技术、防风化加固材料等方面的技术研发,逐渐形成一批石质文物检测、监测、评估及保护新材料等方面的关键技术和自主知识产权。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家文物局. 石质文物病害分类与图示:WW/T 0002—2007[S]. 北京:文物出版社,2008.
- [2] 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.
- [3] 邵明申,张中俭,李黎. 承德避暑山庄砂岩文物的基本性质和风化机理[J]. 工程地质学报,2015,23(107):533.
- [4] 张克燮,李树一,韦胜利,等. 飞来峰摩崖造像地质病害分析及保护对策研究[J]. 科技通报,2015,31(199):136.
- [5] 金皓. 环境因素对石质文物影响研究[J]. 文物世界,2015(4):78.
- [6] 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.
- [7] 《文物保护与鉴定执法实务全书》编委会. 文物保护与鉴定执法实务全书:第一卷[M]. 北京:科学技术文献出版社,2002:194.
- [8] 孙进忠,陈祥,袁加贝,等. 石质文物风化程度超声波检测方法探讨[J]. 科技导报,2006(8):19.
- [9] 张志国,彭华,马寅生,等. 超声波无损探伤检测在现代出土石质文物保护中的应用[J]. 地质力学学报,2005(3):278.
- [10] 杨隽永,范陶峰,杨毅,等. 新昌大佛寺石塔病害的检测与防护研究[J]. 石材,2014(1):23.
- [11] 张新鹏,严绍军,黄志义,等. 花山岩画开裂岩体声波测试与分析[J]. 物探与化探,2014,38(5):1085.
- [12] 张中俭,张涛,邵明申,等. 基于超声波法的石质文物表面裂隙深度测量[J]. 工程勘察,2014(7):81.
- [13] 方云,翟国林,乔梁. 探地雷达探测技术在奉先寺保护工程中的应用[J]. 物探与化探,2014,38(4):815.
- [14] 孙亚丽,曹冬梅,方建平,等. 衢州古城墙通仙门不同岩性岩石砌块相对风化速度研究[J]. 工程地质学报,2014,22(6):1279.
- [15] 黄志义,方云,张新鹏,等. 基于探地雷达/红外热成像的地下墓室渗水机理及应用研究[J]. 科学技术与工程,2014(10):140.
- [16] 张慧慧. 红外热成像法检测岩石渗水病害的实验研究[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2014(1):71.
- [17] 周霄,付永海,李黎. 承德永佑寺避暑山庄后序碑红外热像[J]. 无损检测,2015,37(4):33.
- [18] 陆文宝. 石质文物清洗前的准备工作[J]. 石材,2010(4):20.
- [19] 赵林娟. 几种常用清洗方法的清洗效果对比讨论[J]. 中国文物科学研究,2014(3):85.
- [20] 张秉坚,铁景沪,刘嘉玮. 古建筑与石质文物的清洗技术[J]. 清洗世界,2004(5):25.
- [21] 石美风,陈刚,张秉坚. 石质文物保护中的化学清洗技术[J]. 文物保护与考古科学,2011(1):91.
- [22] 周伟强. 石质文物表面污染物微粒子喷射清洗技术研究[D]. 武汉:中国地质大学,2015.

- [23] 齐扬,周伟强,周萍,等.激光清洗石质文物工艺[J].江汉考古,2015(1):112.
- [24] 宋峰,刘淑静,颜博霞.激光清洗:富有前途的环保型清洗方法[J].清洗世界,2004(5):44.
- [25] 叶亚云,齐扬,秦朗,等.激光清除石质文物表面污染物[J].中国激光,2013,40(9):90.
- [26] 刘佳,刘玉荣,涂铭旌.石质文物保护材料的研究进展[J].重庆文理学院学报(社会科学版),2013,32(5):13.
- [27] 洪坤,詹予忠,刘家永.仿生无机材料在石质文物保护中的应用[J].材料科学与工程学报,2006(6):948.
- [28] 刘玉荣,刘佳.介孔材料在石质文物保护中的应用研究进展[J].材料导报,2014,28(增刊2):334.
- [29] 范敏,陈粤,崔海滨,等.有机硅材料在石质文物保护中的应用[J].广东化工,2013,40(21):107.
- [30] 王丽琴,李迎,赵星.纳米 TiO_2 改性石质文物防水材料 WD-10[J].精细化工,2015,32(3):250.
- [31] 吕恒柱.砖石古塔纠偏加固的分析方法与监测技术的研究[D].扬州:扬州大学,2005.
- [32] 周伟,李奇,李畅.利用激光扫描技术监测大型古建筑变形的研究[J].测绘通报,2012(4):52.
- [33] 葛琴雅,潘晓轩,李强,等.ATP 生物发光法在文物抑菌剂效力检测中的应用[J].文物保护与考古科学,2014,26(4):39.
- [34] 孟诚磊.浙江古塔本体材料的风化监测研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [35] 方云,董庆贺.唐顺陵天禄石雕变形监测及分析[J].安全与环境工程,2014,21(5):174.
- [36] 崔亚平.南越王墓的环境监测[J].南方文物,2014(3):178.
- [37] 李树坤,侯妙乐,吴育华,等.石质文物三维信息留存与应用[J].城市勘测,2013(2):85.
- [38] 何勇.大型高浮雕石质文物的数字化探索:以云冈石窟为例[J].中国文化遗产,2016(2):30.
- [39] 陶涛.大足石刻千手观音造像三维展示系统关键技术研究[D].北京:北京建筑大学,2014.
- [40] 马文武,侯妙乐,胡云岗.基于地面高光谱遥感的石碑特征信息提取[J].北京建筑大学学报,2015,31(2):65.
- [41] 葛怀东,邓抒扬.南朝陵墓石刻三维数字化保护研究[J].城市勘测,2014(6):14.
- [42] BAGLIONI P, GIORGI R, CHEN C. Nanoparticle technology saves cultural relics; potential for a multimedia digital library[C]// Online Proceedings of DELOS/NSF Workshop on Multimedia Contents in Digital Libraries. [S. l.]:[s. n.], 2003: 2.