

石窟寺保护关键科学问题及关键技术探讨

王金华 霍晓彤¹

(复旦大学 文物与博物馆学系 上海 200433)

【摘要】: 石窟寺遗存面临着风化、水患、失稳三大问题。我国的石窟寺保护工作还没有形成完整的学科体系,概念也不规范,文物保护精细工程地质学是石窟寺保护关键科学问题和石窟寺学科体系建设的理论基础。石窟寺保护亟需解决的关键技术难点如下:石窟寺风化病害危害程度评估标准的基础问题、水患渗流网络的精细探测关键技术问题、风化病害防治与本体修复适宜材料体系设计及应用技术效果评估问题。当前石窟寺保护工作的目标是创新工作模式,构建基础理论,突破关键技术难题,实现“走出一条具有示范意义的石窟寺保护利用之路”。

【关键词】: 石窟寺保护 文物保护 精细工程地质学 关键技术

【中图分类号】: K854.3; K979.2 **【文献标识码】:** A

一、引言

近期,国务院办公厅印发《关于加强石窟寺保护利用工作的指导意见》(以下简称“《意见》”),从国家政治意识层面明确了石窟寺作为典型性文化遗产所具有的重大价值,即“充分体现了中华民族的审美追求、价值理念、文化精神”;从国家文化自信战略层面明确了石窟寺保护利用工作的重大意义,即“事关中华优秀传统文化传承发展,事关社会主义文化强国建设,事关高质量共建‘一带一路’和促进文明交流互鉴”^[1]。同时,《意见》对石窟寺保护面临的迫切问题、严峻形势作出全面、准确的评估与判定,明确提出保护工作的指导思想、目标和任务。全面提升石窟寺保护工作的科技和管理水平,是未来我国文化遗产保护领域的重点工作之一。《意见》对我国文化遗产保护事业具有重大指导意义。

我国石窟寺是体系完整的文物类型,在石质文物中占主体地位,既具有人为建造、艺术创作的特点,又具有地质体的构造、结构特征,此特点决定了中国石窟寺保护工作的独特性^[2]。当前保护利用存在的难点和瓶颈问题包括“水患、岩体失稳及石雕表面风化等病害,安全风险高”“保护关键技术攻关难度大”“保护基础薄弱”等。究其原因,无不与石窟寺地质结构复杂、环境条件及保存状况差异性大、保护工作尚无标准有关,但关键症结是我国石窟寺保护工作没有形成完整的学科体系。

缺乏学科体系的支撑,石窟寺保护研究工作便会流于“救火”“抢险”的被动状态,陷入“头痛医头、脚痛医脚”的恶性循环。其根源就在于没有找准石窟寺保护的关键问题,没有形成石窟寺保护的基本理论。

缺乏科学理论指导的实践是盲目的,没有理论的总结、预测和导向作用,行动便举步维艰,结果也会事倍功半,严重的甚至适得其反。

二、石窟寺保护学科体系建设问题

¹**作者简介:** 王金华(1964-),男,复旦大学文物与博物馆学系教授、博士生导师,主要研究方向:石质文物与古遗址保护。霍晓彤(1989-),女,复旦大学文物与博物馆学系博士研究生,主要研究方向:石质文物保护、壁画保护。

（一）石窟寺保护基本概念

概念的不规范是石窟寺保护最基本、最突出的问题，比如在保护中涉及的“风化”“劣化”“文物本体”“文物载体”“病害”等概念，国内至今尚未形成权威、规范、清晰的定义。

针对“风化病害”，李宏松从石质文物作为“岩石材料”这一研究视角，提出用“劣化”取代原有的“风化”概念，并将之定义为：“劣化是风化作用衍生的概念，是岩石材料在风化作用下，岩石材料的功能性能已达不到使用要求，无法完成其功能角色的临界状态，于是材料进入劣化状态。”^[3]但将石质文物视为“岩石材料”，尤其是将地质结构特征明显的石窟寺视为“岩石材料”的恰当性需要商榷和斟酌，且风化的临界状态如何界定也缺乏评估标准的支撑。因此用“劣化”来评估石窟寺风化病害是否准确，有待进一步的探讨和完善。石窟寺“风化病害”概念涉及地质学风化作用及侵蚀作用、化学老化作用、材料学劣化作用等多个学科的内涵，其定义、内涵需要准确规范。

表一 石质文物病害表

序号	类别	病害类型
1	生物病害	植物病害
2		微生物病害
3		动物病害
4	机械损伤	断裂
5		残缺
6	表面风化	表面泛盐
7		表面分化剥落
8		表层片状剥落
9		鳞片状起翘与剥落
10		孔洞状风化
11		表面溶蚀
12	裂隙	机械裂隙（应力裂隙）
13		浅表性裂隙（风化裂隙）
14		构造裂隙（原生裂隙）
15	空鼓	表层空鼓
16	表面污染与变色	水锈结壳
17		人为污染
18	颜料病害	彩绘表面颜料脱落
19		彩绘表面颜料酥粉
20	不当修复	水泥修补

（二）石窟寺病害类型的界定

石窟寺及石刻病害类型划分是我国石窟寺保护学最基础的工作，“病害”用于描述威胁石质文物安全保存的破坏现象，已成为文物保护学通用的术语。我国已发布的指南、标准、规范及已出版的相关著作对石窟寺及石刻病害类型的描述，以破坏现

象、破坏方式、破坏形态为主要划分依据，同时又考虑到病害的破坏原因。如《石质文物病害分类与图示》(WW/T0002-2007)采用二级分类体系，提出了 8 个类别 20 种病害类型（表一）。

李宏松系统研究了石质文物病害的特征及评估方法，按照石质文物病害的现象及破坏形式，提出组群、典型类型、独立类型的三级分类分级体系，共界定了 5 个组群、17 个典型劣化类型、8 个独立类型，计 25 种病害类型（表二）^[4]。

上述分类以文物本体为主体，考虑到地质结构属性，但不能充分体现石窟寺特征，分类对象界定不够明确，各自孤立，系统性体现尚不够充分。石窟寺及石刻病害类型界定不系统、不规范的问题会影响文物保护技术信息的交流和学科体系的建立。

表二 石质文物典型劣化类型

组群	典型劣化类型									
表层完整性 破坏类	剥落						溶蚀		缺失	
	层状剥落	片状剥落	鳞片状剥落	板状剥落	粉状剥落	粒状剥落	均匀溶蚀	差异溶蚀		
表层完整性 损伤类	分离			空鼓		皸裂			划痕	
表层微观 形态改造类	结壳					结垢				
表层颜色 变化类	锈变			斑迹		晶析			附积	
生物寄生类	高等植物			低等植物		低等动物			微生物	

表三 石窟寺地质背景与病害特征表

序号	地质历史背景	气候条件	岩石类型	石窟内容特征	主要病害特征	地理区域
1	新生代 第三纪、 第四纪	干燥、严寒	砂砾岩	彩塑壁画	载体岩体失稳、彩塑壁画空鼓剥落	西北地区
2	中生代 侏罗纪、白垩纪	半干旱、 寒冷	砂岩	石雕像	石雕像风化破坏、载体岩体失稳	中原地区
3	中生代侏罗纪	潮湿、高温	砂岩	石雕像、 摩崖造像	石雕像 风化破坏、水患	南方地区
4	古生代 寒武纪、 奥陶纪、 石炭纪	半干旱或潮湿	石灰岩	石雕像	水患	中原及南方地区

（三）石窟寺病害危害性评估体系

石窟寺存在的病害主要分为三大类，即风化病害（含生物病害）、水患、失稳。由于病害的形成机制、影响因素、材质及结构差异性较大，所以危害性分级评估，尤其是石窟寺风化病害危害性分级评估内容、评估方法、评估指标等很难形成统一的标准，故至今未形成完善的体系。

石窟寺病害危害性分级评估体系既是构建石窟寺保护理论的必要基础，也是石窟寺保护工作实践的迫切需求。《国家文物事业发展“十三五”规划》提出“实现由注重抢救性保护向抢救性保护与预防性保护并重转变”的工作方针，如何科学理解和定位“抢救性保护”和“预防性保护”，石窟寺病害危害性分级评估体系的建设与完善工作十分重要。

我国石窟寺保存状况及病害特征、危害性分级评估与环境条件、地质构造特征、岩石结构及地质历史背景条件关联密切，综合以往的研究成果和各地的实践经验，分区域、分类型构建完善的石窟寺病害危害性分级评估体系具备学术基础和实践成果支撑的条件，参见表三。

（四）石窟寺保护理论研究

石窟寺保护理论应以价值认知为核心，建构保护的理念、原则和方法，涉及自然学科与人文学科有机结合。石窟寺保护是人文科学指导下的实践科学，在应用科学技术研究的基础上体现保护原则与价值阐释，但在实际保护决策及保护实践过程中如何遵循“最小干预”“不改变文物原状”等基本原则，实现“原材料、原工艺、原形制、原作法”“真实、全面地保存并延续其历史信息及全部价值”等保护理念，如何体现“真实性”“完整性”，依然存在不同的理解和不同的操作方法。典型案例就是2014年完成保护修复的重庆大足石刻“千手观音”保护工程，至今业界仍然存在不同看法，因而构建适合我国石窟寺的保护理论势在必行。

三、石窟寺保护关键科学问题的探讨

石窟寺保护是集地质学、地球系统科学、材料学、化学、建筑学、美术学、考古学、历史学等为一体的综合性学科，其人文科学领域以佛教考古、美术史、历史学为主线，保护科学以地质学为主线。把石窟寺细微工程地质学问题作为关键科学问题和把文物保护精细地质学作为石窟寺保护学科体系建设的理论基础，符合我国石窟寺保护工作的特点。

我国石窟寺存在的三大问题——风化病害、水患、失稳，与工程地质学关联密切，但又与普通工程地质学差异很大，其问题更为细微、更为深化、更为复杂，甚至涉及物质的物理学、化学层面，但归根结底是工程地质学的延伸、深化，属于文物保护精细工程地质学问题。以文物保护精细工程地质学为理论基础和科学基础，构建石窟寺保护学科体系，开展关键科学问题研究是突破石窟寺保护学科体系发展瓶颈的关键。



图一//云冈石窟题刻表层岩体片状风化破坏



图二//大足石刻石雕像表层岩体风化破坏（1 厘米）

（一）风化病害问题

“风化”一词源于地质学，石窟寺保护学借用地质学风化概念并进行了深化和拓展。石窟寺保护学与地质学的“风化”内涵是一致的，都是研究在风化营力作用下岩石矿物成分、微观结构、形貌、物理力学性质衰变演化的过程及其状态特征，但二者研究的对象、目的、时限、状态均有所差别（图一）。

地质学风化现象的研究对象主要是地壳岩体的风化带，规模尺寸为数米至数十米，甚至数百米，跨度大，而且是经过地质作用改造过的地貌形态；研究目的是解决岩体的工程性能问题，研究时限长，为地质年代演化进程中时间跨度（百万年计）。其研究的风化营力主要是自然风化营力，即温度、水、风、生物活动等；研究的风化状态包括未分化（新鲜岩石）、微风化、轻度风化、中度风化、严重风化、全风化、残积土全过程，无论哪个阶段的状态，都能够通过改造满足工程性能。

石窟寺保护学风化病害现象在岩体表层岩石的风化层，规模尺寸数毫米至数十厘米（一般 20~30 厘米）^[5]，最大 50 厘米^[6]，规模跨度微小、精细（图二）。研究目的是现有状态安全性及发展趋势评估，维持现有状态的稳定，或阻止、延缓风化病害演化进程，达到使文物延年益寿的目的，研究时限几百年至千年。研究的风化营力除了自然风化营力，还有人类活动的作用，包括大气污染、酸雨和人类活动造成的微环境改变等。例如大足石刻处于我国主要的酸雨区贵阳—重庆酸雨带，重庆降水 pH 值 4.38，酸雨频率为 43.6%，酸雨、酸雾（表四）等长期作用于石刻表面，会产生较严重的侵蚀^[7]。

（二）水患问题

地质工程的水患问题和石窟寺保护工程水患问题内涵相同，即水侵蚀作用诱发的工程问题；水的侵蚀机理也是相近的，即水岩作用引发岩土体的结构、物质成分变化，降低了原有岩土体的工程性能。但二者造成的影响后果差别巨大：地质工程的水患问题是水侵蚀诱发工程大规模的安全稳定性问题；石窟寺保护工程水患问题虽然不一定引发大规模安全问题，但会诱发石窟表层岩体结构、形态、成分的变化，损害、影响文物价值体现。由此可见石窟寺的水患问题是精细化、深化的工程地质学问题。

表四 重庆雾水 Ph 值(1984 年—1990 年)

年度	Ph 值
最小值	2.96
最大值	8.00
平均值	4.39



图三//大足石刻宝顶山大佛湾“卧佛”胸腹部渗水

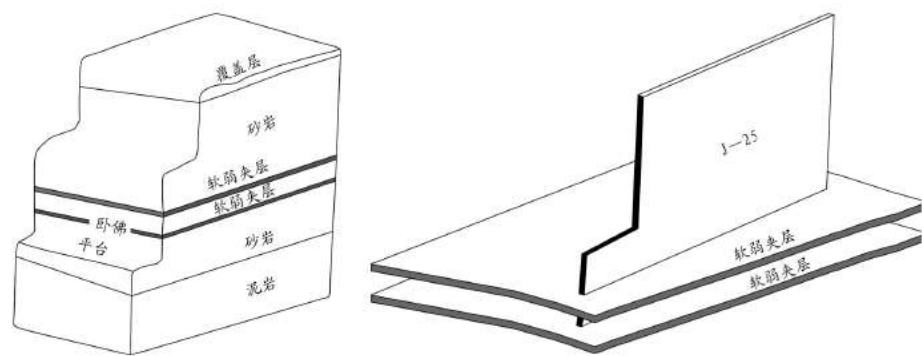
地质工程、水利工程等领域的水患问题一般是指存在较大渗流或明显渗流的地下水现象，破坏方式是水直接侵蚀、冲刷，或水压诱发岩土体垮塌等工程地质问题，对地下水诱发的潮湿、浸湿，或与季节相关的间断性微细渗流不作特别关注和治理。我国石窟寺开凿时避开了长期渗水或地下水严重渗流的区域，但普遍存在季节性、间接性细微渗水病害，其原因是自然地质体

各种裂隙十分发育，大气降水形成的上层滞水、裂隙水诱发形成。其特点是渗水结构细小，渗水的方式是间歇性的潮湿、浸湿、微细的渗流。即使是间歇性、微细渗流，虽然不会诱发工程安全稳定性问题，但是长期作用诱发石雕像表层结构及形态损伤，影响外观形貌的艺术价值，是文物保护必须面对的严重问题。例如，大足石刻宝顶山大佛湾“卧佛”的细小的构造裂隙、沉积层理面、软弱夹层渗水（图三），导致大佛头部、胸腹部产生长期间歇性渗水侵蚀病害（图四）^[8]。

（三）失稳问题

失稳问题的地质学专业术语为“不良地质现象”，包括危岩体、滑坡、泥石流、地震等，其破坏规模比较巨大，破坏方式十分剧烈。石窟寺岩体失稳问题与地质失稳问题内涵一致，都是岩体应力调整引发的结构失稳问题，但多为局部范围岩体的结构问题，也是精细化的工程地质学问题。

古人在选择石窟寺营造地点时考虑到安全性，一般会依托地质体工程条件较好、地质环境及载体基本稳定的岩体开凿石窟。选址区域一般不存在大规模的地质灾害现象，存在的主要失稳问题是局部岩体失稳，或石雕岩体的结构变形、失稳，以及石窟寺环境有限规模的洪水、泥石流危害和地震危害。例如甘肃天水麦积山石窟山体整体基本稳定，但历史上多次因为地震作用诱发石窟寺岩体垮塌，对局部石窟寺造成毁灭性破坏。从有记载的一千九百多年间，地震引发的严重破坏 15 次。唐开元二十二年（734 年），秦陇地区发生了强烈地震，麦积山崖面中部窟群及东崖上部大面积坍塌，使开凿于北周天和元年（566—568 年）的七佛阁前廊柱和石雕龕檐及以下约一千平方米的崖壁震塌，窟群自此被分裂为东西两崖，后人便有“东崖”“西崖”之称（图五）。



图四//大足石刻宝顶山大佛湾“卧佛”头部、胸腹部渗水模型



图五//地震诱发麦积山石窟中部区域石窟岩体垮塌



图六//乐山大佛饱受大气降水和地下水的侵蚀破坏

四、石窟寺保护的关键技术

石窟寺保护关键技术是石窟寺保护工作中的深层次问题，也是迫切需要解决的关键技术难点。经过七十余年的保护研究及实践，我国石窟寺岩体失稳病害治理技术体系基本成熟，当前需要解决的深层次问题及关键技术是石窟寺风化病害和水患问题的探测、评估和治理技术研究。

（一）石窟寺风化病害评估体系的建立

石窟寺风化病害是最普遍、最直接、危害最大、治理工作最为迫切的问题。随着科技进步和保护工作的深化，我们更加清晰地认识到，相对于抢救性的“被动保护”，防患于未然的预防性保护更为主动、更为有效、更为经济，是保护发展的方向，由此也产生新的重大需求。安全预警和预防性保护最基础、最核心的工作是石窟寺风化病害危害程度的评估方法、指标、标准等评估体系的构建，不但是保护工作的基础，也是保护实践的迫切需求。由于我国石质文物在地域、气候、岩性、风化营力等方面差异较大，风化病害评估标准、评估指标还未形成系统、规范的认知体系。

目前石窟寺的保护工作需要以砂岩质石窟寺文物风化机理研究及危害程度分级评估为突破口，构建我国以石窟寺文物风化病害特征、风化程度及危害性评估内容、指标为框架的数据库，梳理评估技术、方法、指标，建立规范、系统的评估标准和评估体系。以大足石刻风化病害为案例，开展高温、潮湿环境条件下，粉末状风化病害风化程度、风化深度及梯度、风化速度、微观结构特征及矿物成分、风化病害程度分级等评估，以及如何制定相关评估方法、指标、标准等项系统性研究工作，建立大足石刻粉末状风化病害危害性分级评估体系，并以此为示范，逐步建立我国完整的石窟寺文物风化病害评估体系。

（二）水患渗流的精细探测关键技术

由于石窟寺岩体水患渗流的微小性、复杂性、探测技术反应信号的微弱性以及石窟寺水患治理最小干扰、精准性要求，迫切需要在石窟寺水患渗流网络、途径等精细探测关键技术领域的突破及理论支撑。大足石刻“卧佛”水患的勘察评估与治理工作是我国石窟寺水患治理工作的典范，具有典型性。“卧佛”水患勘察评估及治理工作起步于 20 世纪 60 年代，六十多年间采用了地质学、地球物理学等多种技术手段，全面、详细地查明了岩体地层岩性、结构、构造特征以及渗水的水源、途径等，但治理工作一直没有取得显著效果。2017 年，在更加全面、详细的勘察评估基础上，采用封堵—导流—排水等综合性治理措施，取得了“情理之中，意料之外”的显著治理效果。“情理之中”是对水患研究及治理工作持之以恒的坚持取得了收获，“意料

之外”是治理效果超出了预期的想象。但在治理技术精准科学原理等方面还没有得到完全的清晰阐述，其中很重要的原因是现有的地质学理论和勘察技术无法像对待人体毛细血管一样对细小渗流网络探测、阐释清楚。精细探测、精准评估是石窟寺细微渗流网络、微弱渗流病害水患治理的关键技术难点。如坐落于大渡河、青衣江、岷江三江汇流处的四川乐山大佛，常年饱受水患侵蚀，大佛本体安全受到严重威胁，文物价值损害严重。由于缺乏精细勘察技术对乐山大佛水患渗流网络进行精准判断，治理工作至今未能启动（图六）。

（三）石窟寺文物修复材料体系设计及适宜性材料

修复保护材料，尤其石窟寺文物本体修复保护材料，是关键保护技术中的关键。目前，石窟寺本体修复保护材料研究是以问题为导向，以需求为目标，工作模式还是“东一榔头西一棒槌”的“游医郎中式”，没有“同仁堂药库”，缺乏修复材料体系的系统设计。多年的保护实践证明，材料除了有效性、耐久性外，其匹配性、安全性更为重要，目前针对修复保护材料在需求指标、需求体系设计等方面均显薄弱。众所周知，奉先寺“卢舍那大佛”是河南洛阳龙门石窟寺造像艺术的精品和代表作，高超的雕凿工艺与艺术审美将神性与人性的结合完美体现，被誉为“东方蒙娜丽莎”“世界最美雕像”。远处仰望，大佛庄严中透着神圣与威武，却又不乏温婉与慈祥。若走到近处仔细观察，大佛表面覆盖一层灰土，细小坑槽布满脸部，日晒雨淋留下的斑驳水痕犹如几行清泪，其所受之苦无以言说。表面病害影响佛像的艺术呈现，而且此种状态还在进一步恶化。但大佛本体病害的修复保护工作一直未能启动，其中一个重要原因就是还未能研发出适合它的本体修复材料，无“药”可用，不敢着手治理。

五、石窟寺保护深层问题解决路径

如何破解石窟寺保护深层次问题，实现关键技术的突破？解决路径除了国家层面重大科技计划研发、重点课题研究的全力支持外，重视基础科研工作的积累，动员社会力量，整合行业资源，发挥社会人力、智力、科技资源，联合攻关是必须的。事关全局性问题，采取多途径加强培养和培训基层单位年轻科技人员，既是国家层面保护管理政策的补充，也是我国石窟寺保护工作的实际需求。

（一）创新机制，共谋发展

充分发挥中国岩石力学与工程学会古遗址保护与加固工程专业委员会、中国古迹遗址保护协会石窟专业委员会、石窟寺科技创新联盟等行业协会、科技协会的平台作用，联合遗产地、高等院校、科研院所和相关企事业单位，聚焦中国石窟寺保护的深层次问题，整体设计、科学筹划，夯实科研基础，联合攻关、重点突破；高度重视和加快推进石窟寺文物保护智库建设，加强顶层设计，制订跨区域文物科技的发展战略与中长期规划，完善我国石窟寺保护理论体系和技术规范，形成技术和材料研发、成果转化与推广、人才培养等产学研用优秀科技示范模式；针对石窟寺保护的科技需求和成果转化之间存在的瓶颈，建立科技成果评价机制，加强技术的安全性、有效性和适用性评价，实施一批科技创新成果应用示范工程；利用高校、科研院所和高新技术企业的人才资源，采取符合自身需要和特点的合作方式，壮大石窟寺保护科学研究力量。

（二）以保护材料研发为切入点，实施石窟寺关键技术研发突破计划

保护材料一直是石窟寺保护的关键技术，也是保护工作的重点和难点，保护材料的发展水平基本上代表了我国石窟寺保护水平，保护材料的技术突破将提升石窟寺保护的能力。要结合石窟寺本体保存特点和特殊需求，构建石窟寺修复保护材料体系设计，指导行业发展。

石窟寺文物大多历经千年，已十分脆弱，加之石窟文物的稀缺性、脆弱性、不可复制性，材料的匹配性、适应性、安全性是保护的首要原则，其次是材料的有效性、耐久性、无衍生破坏等要求。在几十年保护实践的经验和教训基础上，石窟寺保护

材料现以无机硅酸盐材料或无机及有机复合材料为优选方向和发展趋势。

目前我国石窟寺保护实践迫切需要在石窟寺渗水病害治理工程灌浆新材料、失稳加固工程灌浆新材料、修复加固新材料、风化病害防治新材料等方面有所突破，并构建我国石窟寺保护材料体系设计，指导保护材料的研发。

（三）以教材编写为抓手，加强基础理论研究

制订石窟寺学科体系建设发展规划，通过组织编写石窟寺保护教材，逐步完善石窟寺保护基础工作、基础理论，构建以文物保护精细工程地质学为理论支撑的学科体系。如从保护科学入手，筹划编写我国石窟寺特点、石质文物类型学、石窟寺病害概念及类型学、石窟寺精细工程地质学基础、勘察技术、石窟寺病害精准探测技术及评估、石窟寺文物保护材料、石窟寺保护技术等具有针对性、系统性的专业教材。同时，总结近现代我国石窟寺保护史、研究成果，凝练关键科学成果，探寻关键技术难点，关注案例的评估分析，扎实做好石窟寺保护基本概念、基本理论、基本原则的阐释，引导行业健康发展。

参考文献：

[1]中华人民共和国中央人民政府网：《国务院办公厅关于加强石窟寺保护利用工作的指导意见》（国办发[2020]41号），[EB/OL][2020-11-04][2020-12-20]http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/04/content_5557313.htm。

[2]王金华、陈嘉琦：《我国石窟寺保护现状及发展探析》，《东南文化》2018年第1期。

[3]李宏松：《石质文物岩石材料劣化特征及评价方法》，文物出版社2014年，第31页。

[4]a.同[3];b.李宏松：《大足宝顶山摩崖造像岩体表层风化特征及风化深度研究》，中国岩石力学与工程学会等编《第四届全国岩土与工程学术大会论文集》，中国水利水电出版社2013年。

[5]方玉禹、夏鸿、欧宗豪等：《地球物理勘探方法在云冈石窟的应用》，云冈石窟研究院1965年。

[6]陈卉丽：《大足石刻的病害类型及保护措施》，中国考古与文物保护化学学术研讨会，2006年。

[7]王金华：《大足石刻大佛湾摩崖造像渗水病害机理研究》，中国地质大学出版社2019年，第147页。

[8]黄克忠：《岩土文物建筑的保护》，中国建筑工业出版社1998年，第81页。