

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.307>



石窟寺岩体劣化机制与失稳机理研究进展

兰恒星^{1,3},吕洪涛²,包含^{2*},李黎⁴,陈卫昌⁴,郭进京⁵,刘世杰¹

1. 长安大学地质工程与测绘学院,陕西西安 710054
2. 长安大学公路学院,陕西西安 710064
3. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101
4. 中国文化遗产研究院,北京 100029
5. 天津城建大学地质与测绘学院,天津 300384

摘要:石窟寺作为弥足珍贵的文化遗产,受内外因素的长期影响,劣化严重,失稳破坏现象频发。为更好地开展石窟文物保护,对石窟寺岩体劣化失稳方面的研究成果进行了系统梳理。在阐述石窟寺岩体劣化和破坏研究的基础上,从成岩环境与区域地质、区域环境演化、可溶盐、水环境、生物作用、洞窟形制和多因素耦合共7个方面总结了各因素作用下石窟寺岩体的劣化机制与失稳机理,指出石窟寺岩体劣化失稳的根本原因是内外因素引起的力学作用、物理作用、化学作用、生物作用的相互耦合,往往表现为岩体内部微结构产生—拓展—贯通—成网的演化过程,并导致岩体发生累积性和瞬时性破坏。石窟寺岩体的劣化失稳表现出多样性和地域差异性,研究思路可相互借鉴,并由此展望了石窟寺岩体保护在多尺度、多手段、多因素耦合和多区域联合等方面的研究需求。

关键词:石窟寺;文物保护;岩体劣化失稳;影响因素;耦合作用;工程地质学。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2023)04-1603-31

收稿日期: 2022-05-26

Advances in Degradation and Instability Mechanism of Grotto Temple Rock Mass

Lan Hengxing^{1,3}, Lü Hongtao², Bao Han^{2*}, Li Li⁴, Chen Weichang⁴, Guo Jinjing⁵, Liu Shijie¹

1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
4. Chinese Academy of Cultural Heritage, Beijing 100029, China
5. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

Abstract: As a precious cultural heritage, the grotto temples seriously deteriorate due to the long-term influence of internal and external factors, leading to instability and failure of rock mass as common occurrence. In order to better carry out the protection of grotto cultural relics, the research results on the deterioration and instability of grotto temple rock mass were systematically reviewed. On the basis of expounding the researches on the degradation and failure of grotto temple rock mass, the deterioration and instability mechanism of grotto rock mass under the action of various factors were summarized from seven aspects, which were

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2019YFC1520601);国家自然科学基金项目(Nos. 42177142, 42041006)。

作者简介:兰恒星(1972—),男,研究员,博士,从事工程地质与灾害地质方面的研究工作。ORCID: 0000-0002-7146-932X. E-mail: lanhx@igsnrr.ac.cn

*通讯作者:包含,ORCID:0000-0002-5432-9587. E-mail: baohangeo@163.com

引用格式:兰恒星,吕洪涛,包含,李黎,陈卫昌,郭进京,刘世杰,2023.石窟寺岩体劣化机制与失稳机理研究进展.地球科学,48(4):1603—1633.

Citation: Lan Hengxing, Lü Hongtao, Bao Han, Li Li, Chen Weichang, Guo Jinjing, Liu Shijie, 2023. Advances in Degradation and Instability Mechanism of Grotto Temple Rock Mass. *Earth Science*, 48(4): 1603—1633.

diagenetic environment and regional geology, regional environmental evolution, soluble salt, water environment, biological action, cave shape and multi-factor coupling. It is pointed out that the fundamental reason of degradation and instability of grotto temple rock mass is the coupling effects of mechanical, physical, chemical and biological actions caused by multiple factors. These effects are often manifested as the evolution of generation, expansion, connection and network formation of the internal microstructure in rock mass, and lead to the cumulative and instantaneous failure of grotto temple rock mass. The degradation and instability of grotto temple rock mass show diversity and regional differences, and the research ideas can be used for reference. The research needs of grotto temple rock mass protection in multi-scale, multi-means, multi-factor coupling and multi-regional combination are prospected. The review can not only provide references for related research work, but also provide basis for the formulation of protection policy of grotto temples.

Key words: grotto temple; protection of cultural relic; deterioration and instability of rock mass; influencing factor; coupling effect; engineering geology.

0 引言

石窟寺是我国文化遗产中的一颗璀璨明珠,作为印度佛教传播的路标,沿丝绸之路东渐,经巴基斯坦、阿富汗分南北两线传入我国(程云霞,2010)。一座座历史悠久的石窟不仅构成了佛教的东传史,还记录着中华民族不同时期的历史文化特点,是不可再生的珍贵文物资源(程云霞,2010)。受长期自然作用以及人类活动的影响,石窟寺的损毁破坏十分严重。新中国成立以来,我国的文物保护事业进入了大发展时期,相关历程大致可分为环境清理及除险、多学科合作综合性保护和预防性保护与大规模本体修复3个阶段(王金华和陈嘉琦,2018)。

对病害的精准诊断是文物保护的先决条件(张金风,2008),而揭示石窟寺岩体损伤破坏机理是厘清石窟失稳破坏的前提。从石窟寺保护及石窟病害机理研究状况来看,影响石窟寺岩体性质的因素众多。近年来,学者们从不同的角度探究了影响石窟寺岩体稳定的内外因素。

石窟寺赋存区的岩性、原生结构、地形地貌、洞窟形制及洞窟密度等是影响石窟寺稳定的代表性内部因素(汪东云等,1994;方云等,2011)。岩性和岩体结构决定着石质文物自身的耐久性,岩性为差异风化的发展创造了良好条件(李智毅等,1995)。不同类型的结构面不仅使岩体的强度表现出显著的各向异性,而且弱化了岩体的力学特性(包含等,2015,2016),增加了石窟寺岩体发生变形、滑移、崩塌、错落的可能。石窟寺多数开凿于山体卸荷带中,特殊的地形地貌条件易引发产生许多不良地质现象,对石窟的长久稳定也带来了负面影响(黄克忠,1998;丁梧秀等,2004;刘佑荣等,2009)。由于开凿条件及所处文化背景的差异,使得洞窟风格迥异,不

同形制下洞窟的结构力学性能差异较大,稳定性不尽相同(王茜,2020)。

石窟寺岩体稳定性与所处的自然环境、人类活动等外部条件也密不可分(牟会宠等,2000)。从以往的研究成果来看,学者们对外因的关注多集中于以下两个方面:一类是自然营力(潘别桐和黄克忠,1992),如水环境(严绍军等,2005;Liu *et al.*, 2020;张梦婷等,2021)、气候(温湿度、风沙、降雨)(王亨通,1990;Wang *et al.*, 2006;Li *et al.*, 2015;王逢睿等,2017)、生物作用(张永等,2019;王金华和霍晓彤,2021)、可溶盐(Jiang *et al.*, 2015)及构造活动(Peng *et al.*, 2013;Guo *et al.*, 2021);另一类是人类生产活动(潘别桐和黄克忠,1992),如随着城市发展和全球工业兴起而加剧的酸雨、颗粒污染物、游客活动及工程振动等(赵以辛等,2002;张明泉等,2009;陈卫昌等,2017;Chen *et al.*, 2018)。这些外界因素增大了石窟寺保护的难度,使石窟寺的破坏呈现出加速趋势。

目前,针对石窟寺岩体劣化失稳机理已开展了大量的研究工作,但是由于各石窟赋存环境存在差异,影响石窟稳定性的主控因素不尽相同,各位学者研究工作的侧重点也不尽相同。为了贯彻文物工作系列重要论述精神,落实《“十四五”文物保护和科技创新规划》和《关于加强石窟寺保护利用工作的指导意见》,更好地指导石窟寺文物保护的科学研究与实践,亟需对以往研究中涉及的各种影响机制进行全面分析,并系统梳理相关成果。因此,本文在分析岩体损伤破坏机制的基础上,从成岩环境与区域地质、区域环境演化、可溶盐、水环境、生物作用、洞窟形制和多因素耦合共7个方面详细综述前人对石窟稳定性研究的成果,以期为开展卸荷带石窟寺岩体耦合劣化机制与失稳机理研究提供借鉴,

为石窟寺岩体病害诊断及防治提供参考.

1 岩石劣化过程

石窟寺多开凿于自然山体之上,其所依附的岩体不仅含有各种结构面,而且岩石本身也是一种非均质材料,内部随机分布有大量微裂隙、微孔洞等天然缺陷.从损伤力学的角度来看,岩体属于一种具有初始损伤的介质,在内外营力作用下,可能会引起初始损伤的扩展演化,甚至导致新的损伤,而这种损伤大多表现为裂隙或节理的萌生与扩展(袁建新,1993).

裂隙尖端的细微观损伤扩展是岩体宏观劣化过程的基础,细观裂纹的形成和发展是脆性岩石和节理岩体损伤演化最基本、最重要的细观机理(凌建明,1994).一般而言,岩石中的细观裂纹是由局部应力集中或局部变形不协调而引发(凌建明等,1992;凌建明和孙钧,1993).当外部应力超过岩石起裂应力后,岩石内部逐渐产生新的微裂隙.微裂隙的萌生扩展受到岩石材料异质性的控制(Lan et al., 2010, 2013),多萌发于晶粒边界、微裂隙和矿物节理等微观结构附近(刘泉声等,2018),并沿着较为薄弱的环节(岩桥)历经稳定扩展过程和失稳扩展两个阶段(李新平等,1995).除上述由应力引起的裂隙外,还存在由于岩石与酸反应,导致产生胶结物流失、矿物蚀变的浅表层风化裂隙.裂隙的产生使得岩石开始出现非线性行为和塑性变形,而室内试验是研究岩体裂隙萌生扩展机制的主要手段(刘学伟等,2016),国内外学者应用多种方法对岩石的损伤演化机制、裂纹起裂扩展规律等方面开展了大量研究.Mutlu and Bobet(2005)进行了非均匀表面摩擦滑移的直剪试验,发现接触面的前部易萌生裂纹并沿着薄弱部位扩展;Zhu et al.(2008)分析了各向异性脆性材料的细观力学特性,提出了一种基于损伤能量释放率的裂纹尺寸演化准则;杨圣奇等(2009, 2012)采用扫描电镜和声发射仪实时观测了岩石的损伤演化过程,表明孔隙附近的应力集中区是微裂纹的起始区域,并沿加载方向或晶粒边界逐渐向边界薄弱部位扩展;Geng et al.(2019)研究了酸性环境对大同云冈石窟砂岩内部结构的影响,指出酸性溶液溶解了砂岩中的钾长石和钠长石,破坏了胶结结构和充填形式,增加了岩石的有效孔隙率和裂隙.

在岩石力学领域,对岩石的裂纹扩展特征、破

坏形式,以及应力条件对岩石力学特性的影响等已开展了深入研究,取得了丰富的成果.Sahouryeh et al.(2002)对双轴压缩作用下三维裂纹扩展进行了实验和分析研究,指出双轴压缩条件下裂纹扩展行为与单轴压缩不同;刘泉声等(2017)研究表明,低围压条件下岩石新裂纹受局部张拉应力作用,按张开型模型起裂,并沿主压应力方向扩展连通,形成宏观劈裂面;Yang et al.(2018)研究了节理倾角和间距对砂岩破碎效应的影响,表明节理倾角在45°与60°之间时,试样的破裂角较低,随着节理间距的减小,裂缝形态由压剪模式向拉剪模式转变;汪杰等(2019)研究指出节理岩体的总损伤演化曲线随应变增大均呈“S”型分布,总损伤率随应变增加先缓慢增加,然后快速增加至峰值后又急剧减小,最后再次慢慢减小为零,且演化曲线近乎为正态分布.

综上所述,石窟寺岩体是一种具有初始损伤的介质,微结构的损伤演化多沿着较为薄弱的区域发生.在不同影响因素作用下,岩石的裂纹扩展特征、破坏形式均存在较大的差异性,针对石窟岩石材料的劣化研究与保护需采取多种研究手段,探明岩石的损伤演化机制、裂纹起裂扩展规律等,以求减缓岩石材料的劣化,提高石窟寺稳定性(图1).值得注意的是,由于石窟文物的特殊性,石窟寺保护区的原位损伤劣化试验难以开展,而通过室内试验的手段重现岩石材料的损伤演化过程则存在一定的局限性.因此,可以考虑在石窟研究区附近选取赋存环境较为一致的人工洞窟开展原位试验研究,同时结合室内试验数据更加准确地分析石窟寺岩体的损伤劣化机制.相关研究成果不局限于定性分析,在定量或半定量评价方面也应有新的进展.

2 石窟寺岩体的主要破坏类型

石窟长期暴露于自然环境中,石窟寺岩体中各种微裂纹易发生扩展、连通、汇合,也就是损伤不断积累,一旦达到临界值便发生失稳断裂,产生垮塌、倾覆、滑移等不稳定性病害,严重威胁石窟文物的长期保存.考虑石窟寺岩体的破坏形式、规模及特点,本文在李宏松(2011)的研究基础上将石窟寺的失稳破坏分为两种:一种为岩石材料劣化,指岩石材料表层的风化破坏了石窟文物表面结构完整性或影响了文物价值体现;另一种为结构性破坏,指石窟及所依附山体产生的崩落、坍塌、块体滑移等不稳定现象.

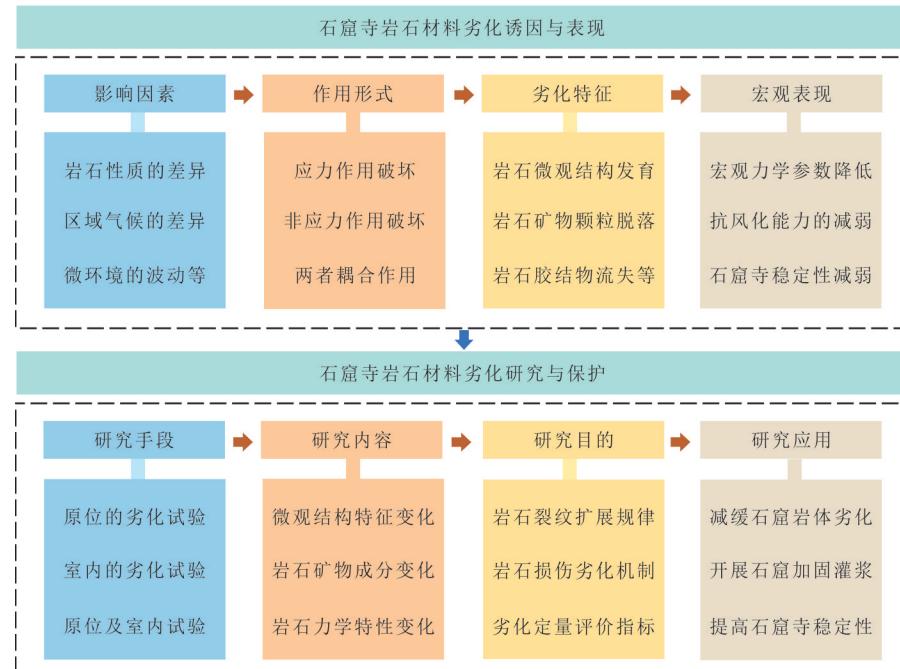


图1 石窟寺岩石材料的劣化
Fig.1 Deterioration of rock materials in grotto temple

石窟岩石材料劣化破坏一直以来是各石窟寺面临的普遍问题,其中剥落是较为典型的劣化类型。岩石表层剥落形式较为复杂,以砂岩为例,可分板状剥落、片状剥落、鳞片状剥落、粉末状剥落和粒状剥落、层状剥落6个独立类型(李宏松,2011)。汪东云等(1994)在宝顶山石窟风化破坏分析中发现,石窟寺岩体风化严重的区域形成了粒状脱落、片状卷曲状剥离和空腔状等破坏,部分地段形成层状、板状脱落,造成佛面及碑文模糊。虽然不同风化类型的诱发因素不同,但各类型之间存在一定的联系,可归结为由于粉状风化受到某些特殊因素影响而表现为其他形态(邓云和王金华,2019)。综合现有研究来看,岩石材料劣化的诱因众多,可以从内因和外因两个方面来分析,包括岩性、水环境、岩体结构等(汪东云等,1993a, 1993b),将在后面进行详细讨论。张景科等(2021)对庆阳北石窟寺砂岩表层风化调查时指出,北石窟寺砂岩表层发育的主要风化病害有:颗粒状剥落、层状剥落、片状剥落、鳞片状剥落等,这些剥落病害不仅受温湿度环境影响,而且与砂岩本身的性质有着密切关联。

从前人所展开的研究工作可知,石窟寺的失稳破坏主要发生在洞窟及石窟崖壁。在洞窟开凿后,顶板、岩柱等受力复杂的部位容易形成失稳破坏。顶板岩体失稳是石窟寺普遍存在的病害,主要破坏

模式为板梁式折断、坠落(王金华等,2013)。石窟是在崖壁浅表层开凿形成的特殊洞室,这种低地应力区洞室围岩的变形破坏主要以洞顶垂直方向为主(胡夏嵩和赵法锁,2005)。洞窟顶部岩体在应力集中作用的影响下,其抗拉强度不足以承受拉应力而产生裂缝,裂隙的切割使得岩体形成大小不同的不稳定块体,极易掉块。若窟顶较薄,当薄层岩体截面上的剪应力超过了砂岩的抗剪强度,或截面弯矩超过了砂岩的抗弯刚度,则发生顶板坍塌(满君等,2009;王逢睿和肖碧,2011)。石窟中岩柱的稳定性问题主要表现为裂隙切割与风化蠕变作用下的失稳破坏。结构面的切割导致岩柱形态结构发生变化,引发受力状态调整(王金华等,2013)。岩体所具有的流变特性是研究岩体工程长期稳定性所必须考虑的因素(Zhang et al., 2016; Bobyleva and Shamaev, 2017; Scotti et al., 2017)。祝介旺等(2009)探讨了龙游石窟1号洞破坏成因,表明在长期荷载作用下,顶板、柱、墙向自由界面发生流变,在这种长期变形中,石窟顶板下沉,板底开裂,柱墙发生拉裂或剪裂。李丽慧等(2005, 2010)研究了龙游石窟在充水和不充水情况下围岩的受力以及洞室顶板的垂向位移情况,分析了顶板和岩柱的应力场和变形场分布规律以及变形破坏特征,并基于数值模拟结果提出了洞室的加固方案;Meng et al.(2020)利用三维数值

计算模型揭示了圆觉洞在静荷载条件下的变形规律,表明顶板变形从西北角向东逐渐增大,且梯度均匀,符合块体迁移的特征。

崖壁岩体被结构面切割成大小不同的块体,在有临空面存在的情况下构成危岩体(何德伟等,2008),当所处的应力环境发生变化时,危岩体的位移、应力、加速度放大系数等也发生相应调整,产生滑动、坠落与倾覆等问题,威胁着石窟文物和广大游客的安全。由于石窟危岩体崩塌的力学机制与一般危岩体相同,根据陈洪凯等(2003)提出的危岩体破坏模式,可将其分为3种:滑塌式破坏、倾倒式破坏和坠落式破坏。针对石窟岩壁崖体的稳定性问题,众多科研院所以对不同地区的石窟开展了一系列研究工作,并取得了丰硕成果。He et al.(2001)对灵泉寺石窟边坡危岩在地震作用下的稳定性进行了分析,得到了强震发生时边坡将保持稳定的结论;田小甫等(2010)用拟静力法和极限平衡法,发现在裂隙静水压和水平地震联合作用下,西山佛像岩体边坡的抗滑动稳定性和抗倾覆稳定性将大于临界值,陡崖将失稳破坏;郭志谦(2018)采用Fuzzy-AHP方法评估了莫高窟南区崖体存在的42处潜在危岩体,证明该方法结果可靠,可用于类似莫高窟这种文化遗产地的风险评估。

综合前人的研究成果来看,石窟寺岩体破坏类型的划分尚不成熟与完善,划分依据存在较大差异,如:李宏松(2011)从石质文物病害的破坏形式及特征出发,提出了结构失稳、渗漏侵蚀、岩石材料劣化3种破坏类型;王金华等(2013)从规模、影响程度以及石窟形制几个方面对石窟寺岩体的失稳破坏模式进行划分;刘世杰等(2022)从工程地质的角度将石窟的变形破坏类型分为工程地质成因型和工程地质力学型,建立了2大类、6亚类、24种破坏现象的综合分类体系,以上3种分类如图2所示。除此之外,笔者认为从破坏现象、破坏形态、破坏诱因及损毁程度等几个方面划分也具有一定的合理性。目前,学者们多以研究石窟寺洞窟的稳定性与破坏形式为主,尚未形成权威、统一的石窟寺失稳破坏分类体系。而关于石窟寺的结构失稳,学者们研究较多的为不同尺度的危岩体,同时也意识到了复杂结构面在岩体失稳中所扮演的重要角色。尤其是失稳现象普遍存在且具有特殊塌落机理和破坏规律的石窟顶板,针对其失稳机理与加固技术的研究已成为当前众多学者关注的热点。

3 成岩环境与区域地质

3.1 岩性

不同类型岩石的成分组成、矿物排列方式、颗粒强度等岩性特征都有显著的差别,是石窟寺岩体病害产生的物质基础(石玉成,1997)。根据岩性可把我国石窟寺分为砂岩型石窟、砾岩型石窟、灰岩型石窟、结晶岩型摩崖造像、泥岩型石窟和大理岩型石窟,其中砂岩型石窟寺占我国石窟总数的80%以上(石玉成,1997;牟会宠等,2000),所开凿的砂岩主要由源区母岩经风化破碎形成的砂级碎屑颗粒堆积胶结而成(何杰等,2020)。不同岩性的石窟其抵抗病害的能力不尽相同:砂岩型石窟孔隙度大,吸水性强,抗崩解性能差,显著的特点是易风化;砾岩型石窟寺岩体完整性好,但较为疏松、成岩程度差,风化严重(王旭东,2007);泥岩型石窟物理力学指标较差,透水性较弱,遇水易软化,稳定性较差(李文军和王逢睿,2006);石灰岩型石窟具有刚硬、孔隙率小的特点,这类石窟受风化侵蚀较弱。此外,即便是同一类型的岩石,受成岩条件和后期环境的影响,其抗灾能力也可能存在较大的差异性(潘别桐和黄克忠,1992;王海军和马良,2019)。因此,岩性决定了岩石自身的耐久性,与石窟寺岩体病害的发育类型及发育程度有着密切的关联(汪东云等,1993b)。

3.1.1 胶结物 石窟的风化破坏与胶结物性质关系密切,关于二者之间的研究多以砂岩和砂砾岩石窟为主。砂岩和砂砾岩石窟胶结物多为泥质胶结,少量存在钙质胶结或钙泥质胶结(李最雄,2002;李黎和谷本亲伯,2005)。一般而言,含钙质、泥质胶结物的岩石抗风化能力较差,主要原因因为此类胶结物在外界营力作用下易流失,进而诱发了岩石结构松散,表现为矿物颗粒脱落、界面间距增大、孔隙增加和岩石强度降低等(李家钰,1993;张景科等,2018;乔榛等,2019;Xie and Zhang,2020)。李最雄(2002)、李黎和谷本亲伯(2005)在对以泥质胶结物为主的砂岩、砂砾岩型石窟的风化研究中发现,干湿循环过程会使粘土矿物处于不断的膨胀和收缩状态,从而导致砂砾岩结构遭到破坏。对于钙质胶结为主的石窟,其洞壁岩石对酸的敏感性非常强,与水和空气等接触后易发生化学作用,导致岩石中胶结物逐渐丧失而发生强度弱化(赵玉波和谭松娥,2012)。马在平等(2005)对云冈石窟地区砂岩的化学风化情

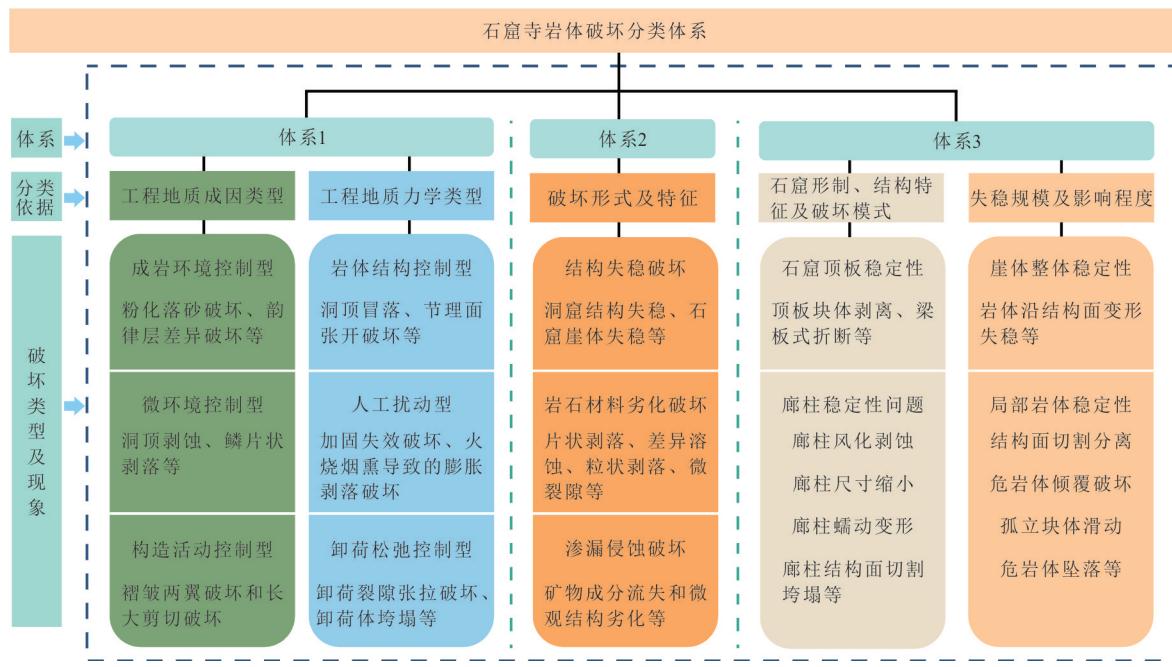


图 2 石窟寺岩体破坏分类

Fig.2 Classification of rock mass failure of grotto temple

况进行了研究,发现碳酸盐胶结物溶解后引发岩石孔隙度增加,平均孔喉半径变大,岩石的风化逐渐加剧。

3.1.2 微观孔隙 岩石作为一种非均质多孔介质材料,其内部的微观孔隙对石窟的风化程度存在较大的影响。岩石的孔隙状态影响其渗透性能(陈淑慧等,2022),多孔介质的平均孔径与渗透率的关系如公式(1)(黄继忠等,2021)。

$$d = 2\sqrt{8\varphi/\mu}, \quad (1)$$

式中: d 为平均孔径, φ 为渗透率, μ 为孔隙率。

研究表明,岩石孔隙率越大,吸水量越高。当岩石内部存在不连通的孔隙通道时,可以使水在岩石中保留的时间更长,导致岩石与水更充分地发生物理化学反应,使岩石强度降低,抗风化能力减弱(王冲等,2017;张娜等,2018;Liu et al., 2018)。李化敏等(2018)发现砂岩抗压强度随着孔隙直径的增加而减小,两者之间存在负指数关系。此外,岩石吸水后会导致微观孔隙特征(如孔径分布)发生变化,进而影响盐溶液的运输和岩石内部产生的结晶压力(Cardell et al., 2003)。杨鸿锐等(2021)研究了岩石强度与孔隙表面积的关系,指出对具有相同孔隙率的岩石而言,岩石内孔隙越小,其表面积越大,孔隙内结晶对具有小孔隙结构的岩石产生的均化应力较小,岩石的抗压强度较大。

3.1.3 岩石矿物成分 岩石的矿物成分对石窟寺岩体病害有着重要影响。研究发现,组成岩石的矿物颗粒越小,易溶和易于氧化的矿物含量越高,与水和空气发生的化学反应越严重,结果不仅会使岩石的结构破坏、成分改造,还可能会产生一些新矿物(方云等,2001;严绍军等,2015)。严绍军等(2013b)发现砂岩的风化可以归因于矿物蚀变,指出云冈石窟砂岩风化是碳酸钙矿物遇酸后生成泻利盐($MgSO_4$)以及长石高岭石化作用的结果。岩石中各种矿物的导热系数、热膨胀系数和水膨胀率存在差异(李智毅等,1995),当温度和湿度反复变化时,受差异性水热变化的影响,矿物接触面间将产生附加应力,若此附加应力超越了岩石的临界破裂条件,裂隙将萌生扩展。王冲等(2017)在研究乐山麻浩崖墓石刻风化机理时指出,在长期冷热循环条件下,受矿物热胀冷缩系数差异的影响,崖面产生了异质性风化。此外,岩石矿物的形态及其排列组合关系控制着岩石的细微观异质性,对裂缝的起裂、聚集和扩展有着重要影响(兰恒星等,2022)。

3.2 原生结构

砂岩型、砾岩型等石窟寺岩体中发育有丰富的沉积结构面,这种沉积结构面具有高度贯通性,分布广泛,削弱了岩体的完整性,控制着岩体的变形和破坏规律(孟召平等,2009),其中软弱夹层、层理面对石窟的影响较为显著。

3.2.1 软弱夹层 软弱夹层与普通岩石不同,具有低强度、高压缩性的特点,是岩体的脆弱带(孟召平等,2009).软弱夹层因抗风化能力较弱,在内外营力的作用下易使石窟寺岩体产生差异风化,甚至形成岩腔. He *et al.*(2001)在对灵泉寺石窟的研究中指出,软弱、薄层状的泥质夹层风化形成了约100 mm高的空洞,使岩体结构发生劣化,显著影响了石窟的稳定性.除此之外,软弱夹层也是岩体渗流的通道,地下水的活动使夹层发生软化,导致充填物从崖壁内流失(仵彦卿,1999).软弱夹层作为岩体中的最小阻力面,控制着岩体的变形和破坏规律,易引发岩体失稳滑动,对岩体稳定性起着极为重要的控制作用(孟召平等,2009;王逢睿和肖碧,2011).如太原晋阳大佛腹部的软弱层,受到上覆岩层的挤压作用出现较大的变形,引起上部岩层向崖面外部倾斜、弯折溃曲(田小甫等,2007).

3.2.2 层理 在水动力强弱交替下形成的弱面型层理粘结较弱,易发生沿层理面的剪切滑移与垂直层理的张性破坏(孟召平等,2009).当层理较为发育时,在内外因素的综合作用下,洞窟顶部岩体因抗拉强度不足而沿层理面产生裂缝,致使洞顶下部岩体与上方岩体产生离层,发生逐步坍落破坏,破坏形式多为沿水平层面的逐层剥落坍塌(齐干等,2011),如四川安岳圆觉洞12号窟顶板表现出的片状剥落现象(图3).一般而言,弱面型层理面的粗糙程度和发育密集度会显著影响石窟寺岩体的整体稳定性.层理越发育,顶板岩层在内外营力作用下稳定性越低,且水平层理及平整光滑层理比斜交波状层理及粗糙不平整层理比更易产生离层(钱四发,2003).与构造、卸荷裂隙对石窟寺影响不同的是,弱面型层理是岩体中的原生结构,风化可以沿层理面发生,使洞窟壁面上形成条状凹槽.此外,弱面型层理面的存在也可使得水溶液较顺畅地进入岩体内部,加速岩体中碳酸盐胶结物的风化(马在平等,2005).

3.3 区域构造活动

我国幅员辽阔,石窟寺赋存区域不同,构造活动也表现出显著差异,且部分地区处于强构造活动影响范围内.构造活动不仅使石窟寺岩体发生倾斜、弯曲、断裂等,强烈的构造活动还可以发生地震,使石窟产生局部或整体的瞬时破坏(牟会宠等,2000),控制和影响着石窟寺的稳定.

3.3.1 构造结构面 构造结构面作为地质构造运



图3 安岳圆觉洞12号窟顶板沿层理面发生剥落

Fig.3 Roof spalling along the bedding plane of Cave 12 of Yuanjuedong, Anyue

动的产物,破坏了石窟寺岩体的连续性和完整性,易诱发崩塌、滑移、掉块等岩体病害(牟会宠等,2000;李文军和王逢睿,2006).构造结构面对石窟寺的破坏机理可归为以下几点:①构造结构面与其他结构面相互交割,使得部分岩体成为危岩,从而引起岩体坍塌;②构造结构面为风化营力的深入创造了良好条件,加速了岩体的风化破坏;③构造结构面充当了地下水的储存空间和垂直下渗的主要通道,为水岩相互作用提供了便利,对石窟文物产生了广泛且严重的影响(汪东云等,1994;何德伟等,2008;Guo *et al.*, 2009).赵莽等(2016)对花山岩画岩体开裂的机理研究中发现,在结构面相互交叉切割的部位岩体更容易劣化,损坏也更为强烈.

3.3.2 地震 石窟寺作为一种开凿于岩体崖壁的历史文物,其不可移动、长期存在的特点易受到强震活动的直接影响(邵延秀等,2021;刘兴旺等,2021).统计表明,我国近七成的石窟寺分布于地震多发区(秋仁东和石玉成,2006).地震对石窟寺的毁损破坏既包括对崖壁岩体和文物本体造成的可见、可量化的显性破坏,又包括在岩体内部产生的隐微裂面等隐性破坏(宗静婷,2011).对于大型的石窟群,其地震稳定性评价宜采用以动力分析方法为主.拟静力法为辅的双轨制方法(石玉成等,2000).

地震下石窟的稳定性实质上是崖体稳定性问题与石窟洞室围岩稳定性问题的组合(石玉成等,2000).石窟寺岩体的稳定性与其所在山体密切相关,地震后破裂面的形成、软弱面的剪切滑移和岩体结构的松动是一种普遍存在的现象(何燕和李智毅,2000).地震对岩体的破坏机理既包括了地震的惯性力的作用,也包括了岩体中产生的超孔隙水压力作用(祁生文等,2004),两者共同导致石窟崖体的失稳.此外,地震力作用可能导致洞窟围岩局部

形成了压应力、拉应力和剪应力的集中区,窟顶和边角处易出现围岩局部开裂或掉块(石玉成等,2006)。孙博等(2012)通过云冈石窟三维实体模型,模拟出地震作用下洞窟外立面岩体倾斜和坠落,表明石窟岩体在地震动力作用下的破坏模式以剪切为主。

3.4 局部地质环境

3.4.1 地形地貌 石窟寺大多依山傍水,开凿于山谷两岸的山体上,地形地貌特征显著。石窟寺所处的地形地貌类型主要包括河流阶地沟谷地貌、冲沟沟谷地貌、构造剥蚀低山丘陵地貌等,这些地形地貌条件是石窟产生众多不良地质现象的重要原因(石玉成,1997;王金华和陈嘉琦,2018)。关于地形地貌与岩体稳定性关系的研究,学者们已开展了针对性的研究(石玉成等,2003;滕光亮等,2013;杨全城等,2015;强菲等,2015;郭双枫等,2017),表明地形地貌是地质灾害形成的重要影响因素之一,甚至决定着地质灾害的发生类型。地形地貌是地质灾害的形成的基本条件,崩塌、滑坡、泥石流的形成严格受地形地貌条件的制约(张子端等,2006)。总体来讲,山地丘陵区地形地貌条件复杂,边坡岩体容易发生灾害,而地质灾害的发生也与山坡坡度和相对高差等微地貌条件关系极为密切(侯俊琳等,2013)。如,坡度越大、坡高越高,岩体安全系数越小,发生边坡失稳的概率就越大(曾铃等,2013;李智和霍俊杰,2017)。降雨和地震等外在因素进一步诱发了地质灾害的产生,研究表明地震作用下陡峭的边坡容易在中上部发生滑坡(Fan et al., 2019;黄伟亮等,2020),并且边坡体的上部多出现拉破坏,下部则易产生剪切破坏(郑颖人等,2010)。此外,斜坡高度越大、地面横坡越陡峻,地震动放大效应越显著(程强和郑同健,2013)。这些认识均说明了地形地貌会对石窟寺岩体稳定性产生极大的影响,其中以滑坡灾害对石窟寺的破坏最为突出(李文军和王逢睿,2006)。另一方面,地形地貌特征也为岩体的风化和卸荷破坏提供了充分的边界条件(孙进忠等,2008)。刘佑荣等(2009)的研究表明,易引起遗址各种病害的地下水直接受控于遗址区的地形地貌。方云等(2011)研究了云冈石窟危岩的发育成因,指出地形地貌等是危岩发育的内在环境条件,陡崖的高差直接控制岩坡卸荷带的发育规模,也决定着危岩体的致灾能力。

3.4.2 边坡卸荷 石窟寺多开凿在陡峻的岩坡之

上,坡体向临空面变形为岩体中储存的应变能提供了释放空间。随着能量的释放,临空面附近岩体内部的应力应变场产生调整和重分布,导致岩体回弹膨胀、结构松弛,形成了与崖壁近于平行的卸荷裂隙(何德伟等,2008;朱容辰,2010)。这种卸荷裂隙在绝大多数石窟寺岩体中普遍存在,常构成了危岩体的后界。同时,卸荷裂隙与岩体中的构造裂隙、风化裂隙、剪切带、软弱夹层等结构面互相切割,极易产生危岩体,在外营力作用下危岩体易发生滑移、坠落,导致石窟寺岩体边坡的失稳(黄继忠,2003;方云等,2011;王金华和陈嘉琦,2018)。纵观各大石窟所处的陡峭崖面,普遍存在着卸荷裂隙与层面及软弱夹层切割形成的危岩体。由于差异性风化,在岩层层理和交错层理及软弱夹层处易形成岩腔与凹槽,致使上部岩体底部凌空,在卸荷裂隙切割下易形成危岩体,发生倾倒及坠落式破坏(李金龙,2012)。Guo et al.(2009)对莫高窟破坏进行了调查,指出卸荷裂隙在北崖上广泛分布,多呈上宽下窄的V字形,这种裂隙主要穿过洞穴的两个侧壁、拱顶和底部,将一些大块岩体从悬崖的母岩中分离出来,在重力作用下可能沿着裂隙面发生坍塌;唐智亮(2013)在五华洞窟区岩体稳定性病害分析时指出,当危岩体的下部发育软弱夹层时,岩体自重会压碎软弱夹层表层风化岩体,使支点不断内移,倾覆力矩会不断增大,直至发生倾倒破坏。

除了上述危害外,卸荷效应增大了岩体裂隙隙宽,大大提高了边坡岩体的渗透性,使渗流场发生改变(梁宁慧等,2011)。基岩裂隙水和大气降水会沿着卸荷裂隙渗入石窟,这一点已被广泛提及(方云等,2003;李文军和王逢睿,2006;刘祥友等,2014;高丙丽等,2020)。李文军(2006)在对北石窟寺水害的调查时还发现,在构造基础上形成的卸荷裂隙不仅是地表水下渗和运移的通道,也为地下水储存提供了空间,同时增大了窟内的空气湿度。

3.5 小结

石窟寺独特的成岩环境和地质环境决定了岩体病害的类型和发展趋势,这种自然营力作用导致的劣化失稳属于极难抗拒的作用因素,其影响机理复杂(图4)。分析研究区域内地层岩性、岩体结构、局部地质环境、地震活动是石窟寺岩体稳定性研究的基础,其中岩体结构与另外三者的关系密不可分,不仅对岩体稳定性有着重要的影响,而且促进水分在岩体内部的运移,加剧水岩反应。目前,关于

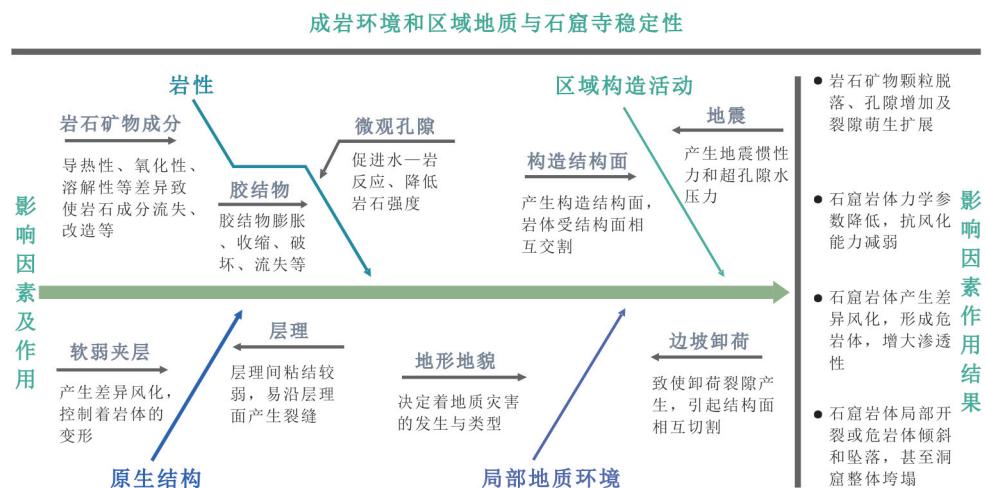


图4 成岩环境与区域稳定性对石窟寺稳定性的影响

Fig.4 Influence of diagenetic environment and regional stability on stability of grotto temple

岩体结构面类型和强度对石窟寺岩体稳定性影响的研究较少。同时,现有的勘察手段难以充分满足石窟寺岩体内部结构无损探测的需求,借鉴其他领域先进的技术是未来的趋势,尤其是近年来红外热成像无损检测技术在金属、混凝土等非绝热性材料中的应用,为石窟寺岩体结构探测提供了一个可借鉴的方法。

4 区域环境演化

石窟寺的安全和稳定还受其所处区域环境的影响,如气候气象环境、人类活动等因素。各种环境因素所引发石窟寺岩体病害的类型及其形成机理各不相同,因此相应的保护和治理措施也各有侧重,不尽相同。

4.1 气候环境

4.1.1 气候条件 石窟寺保存状况与区域气候关系密切。石窟文物相对集中的西南地区和西北地区在自然地理气候条件上形成了鲜明对比。西南地区石窟多开凿于河谷两岸附近的崖壁上,依山傍水,多属于亚热带季风气候,湿热多雨,夏季光照强烈(李文军和王逢睿,2006);而西北地区石窟寺多属干旱、半干旱气候,窟区温差大,降雨量少且集中,蒸发量较大。

气候上显著的差异必然导致差异化的石窟病害。西南地区石窟由于常年高湿度,溶蚀作用、水解作用、水化作用以及生物作用等风化作用强烈,且该区暑夏酷日暴晒,易使石质文物表面产生裂隙,致使造像风化破坏、岩体开裂变形;相对而言,西北

地区石窟寺干燥而寒冷的气候条件,客观上促进了洞窟岩体干湿、冻融灾害的产生,从而造成岩体结构松弛、塑像的开裂、脱落和岩体垮塌(石玉成,1997)。同时,西北地区属于多风地区,强烈的风流为风沙病害的形成提供了条件。风沙对石窟的损害是多重的,一方面,在风运动过程中,气压的波动会在岩石表面和浅表层孔隙中造成压缩和拉伸,导致表面和孔隙附近出现微裂纹(Binal,2019);另一方面,在风力作用下地表的砂粒对崖面或洞壁进行撞击,不仅使岩石矿物颗粒遭受破坏以至脱落,还会使岩体中的裂隙因被砂粒填充而遭受“沙楔”作用(屈建军等,1994)。

4.1.2 洞窟微环境 在自然环境中,窟内微环境的波动是石窟文物岩体病害加剧的重要促进条件。微环境中的温度和湿度直接影响乃至决定一切物理、化学作用,是对文物保存产生重要影响的两个最基本的外部因素(徐方圆等,2012)。温湿度主要通过热力作用和冷凝水引起的岩体表面干湿度变化及可溶盐溶解—结晶来实现对文物的破坏(陈棠茵和朱宝龙,2014)。岩石是热的不良导体,当温度强烈变化时,岩石因内外胀缩差异而产生一个剪应力边界区,若剪应力达到边界区岩石强度,岩石就会发生破裂(Wang et al., 2018)。Liu et al.(2018)对吴哥窟砂岩破坏分析时发现,当相对稳定的温度发生变化时,岩石会产生内应力,导致裂缝的形成,最终破坏砂岩的整体性。温度的变化往往伴生有相对湿度的变化。研究发现,如果空气的相对湿度增大或达到饱和状态,岩石孔隙内即可充满水分,而内部的可溶性盐类就会溶解(王亨通,1990)。Guo et al.(2009)

认为温度和湿度变化容易导致粘土矿物在干湿循环下产生膨胀和收缩,这种反复变化导致岩石胶结结构的破坏,粘聚力下降,甚至诱发石窟崖壁落石和洞窟坍塌。

4.1.3 大气环境 近年来大气环境质量的恶化,也是石质文物损坏的因素之一。大气污染物中对石窟寺影响较大的主要有含硫化合物、氮氧化合物、碳化合物等(徐飞高和高士祥,2008)。这些化合物或导致酸雨的形成,或被岩石所吸收形成酸溶液,使岩石发生表面粉化、溶蚀、脱落等病害(边归国和马荣,1998)。关于酸对岩石的损害机理,综合前人的研究成果可以归纳为以下两点:一是酸与岩石中的胶结物反应生成可溶性盐,使胶结物失去胶结作用,微观结构发生变化,而且也会引起盐蚀破坏;二是岩石中各类长石在酸性条件下水解生成高岭土(冯楠,2011;严绍军等,2013a;谢振斌等,2014;王冲等,2017)。Qin *et al.*(2016)在对云冈石窟砂岩的SO₂劣化循环试验中发现,试验结束后样品的平均孔隙直径增大了约10倍,砂岩的微观结构也因孔隙周围形成盐晶体等物质而发生破坏。严绍军等(2015)和Geng *et al.*(2019)研究表明,在酸溶液的劣化试验中,云冈石窟砂岩颗粒表面出现溶蚀裂缝,粒间胶结物结构疏松,导致砂岩孔隙率增加,并且出现长石高岭土化现象。除此之外,大气中的颗粒污染物对石窟的损害作用也不容忽视。石美风(2011)认为覆盖在石质文物表面的颗粒物会吸收空气中的水分和气体,导致其中的可溶性盐类与基底石质中的可溶性矿物溶解,从而发生离子的迁移与交换,使文物表面产生粉尘性黑垢并进一步发生破坏。

4.2 人类活动

4.2.1 开凿与卸荷 洞窟开凿后,改变了石窟崖体的应力分布状态,降低岩体质量(Bao *et al.*, 2020),使得某些处于临空面上的不稳定块体失去原始静力平衡,在地震、降雨等外在因素的诱发下沿结构面滑移、失稳(方云等,2011)。同时,因岩壁开凿窟龛,龛内顶板、侧壁和后壁形成临空面,在岩体残余应力作用下发生应力释放,形成各种方向的卸荷裂隙,使得岩体力学力学性质呈现出明显的各向异性(汪东云等,1993a;姜怀英和冯丽娟,1993)。

关于卸荷裂隙对石窟稳定性的影响机理已在前文进行了部分讨论。与地形地貌作用下产生的卸荷裂隙不同的是,人工开凿洞窟出现的卸荷裂隙尺寸较小,多造成龛窟顶板、壁面、棱边的开裂变形,

甚至垮塌(代学明,2018)。此外,这类卸荷裂隙还会发育在造像上,如双眼、鼻等部位(杨天宇和刘于源,2018),会严重影响造像的艺术价值。根据汪东云等(1993a)的研究可以将人工开凿洞窟出现的卸荷裂隙大致分为一下几种类型:①拱顶卸荷裂隙;②平行后壁和垂直两侧岩壁的卸荷裂隙;③沿窟龛后壁周边形成圆拱形卸荷裂隙;④基脚和窟龛间棱边的剥离卸荷裂隙;⑤层间、粒间微细卸荷裂隙。其中比较特殊的一类是洞顶纵张裂隙。纵张裂隙是洞窟开挖后,窟顶岩体缓慢下沉在拱顶部位形成的小型张性裂隙,其规模较小,裂面粗糙(何德伟等,2008)。张明泉等(1997)在分析莫高窟的环境问题中指出,开凿洞窟使洞窟前墙岩体与后部岩体相分离,由此形成了岩体薄弱带,在上部岩体自身重力作用下沿该薄弱带开裂,产生卸荷裂隙;张国军和李最雄(2005)在莫高窟北区崖体病害研究时指出,纵张裂隙沿洞轴线方向展布,沿崖面向上及洞内2~3 m即尖灭消失,规模较小,因此对洞窟稳定性影响不大。

4.2.2 游客影响 在旅游业蓬勃发展的背景下,石窟寺依靠自身独特的文化魅力与艺术价值吸引了越来越多的游客,然而游客数量的增加对石窟文物保护的不利影响也随之而来。游客的参观会导致石窟寺岩体病害的进一步恶化,究其原因主要是由于洞内的相对湿度、温度和二氧化碳产生明显变化,破坏了洞窟内部的微环境平衡。石玉成(1997)表明游客的呼吸作用使窟内温湿度以及CO₂浓度骤然增加,对石窟的微环境造成严重影响;黄志义等(2014)通过对龙门石窟内游客数量及CO₂浓度开展长期监测,发现游客呼出的CO₂气体一天可达4 765.28 L,形成的凝结水对岩壁造成了溶蚀破坏。此外,对于部分顶板很薄的洞窟,游客增加所带来的负荷使顶板处于“疲劳”状态,不可避免成为影响稳定性的潜在因素。Chen *et al.*(2018)采用数值方法分析了游客静荷载作用下的围岩应力分布和变形特征,发现旅游荷载对洞窟应力分布的变化影响不大,对位移的影响相对明显,在洞顶和密集分布的洞穴区域产生较大的垂直位移。为了减少游客荷载对洞窟的影响,参观时可采取“两侧集中式”的站位方式(郭志谦,2018)。

4.2.3 环境振动 人类生活生产活动中的汽车、工程机械等引起的环境振动同样是石窟寺岩体劣化失稳的影响因素(张明泉等,2009;刘鸿琳等,2017)。

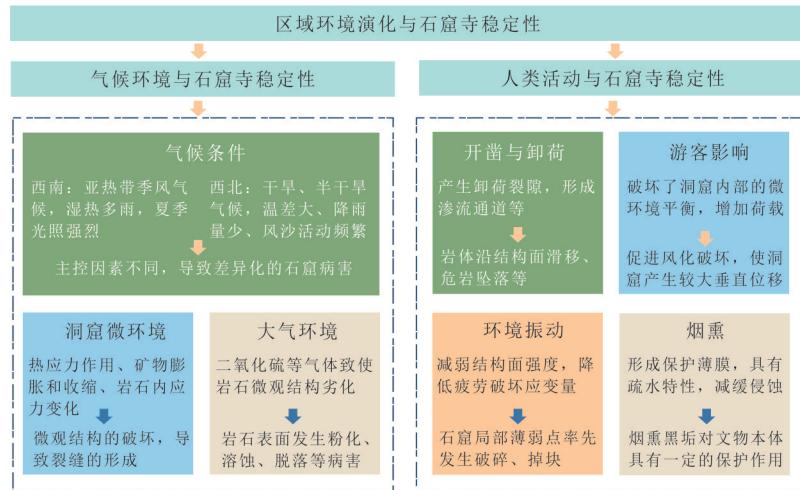


图5 区域环境演化对石窟寺稳定性的影响

Fig.5 Influence of regional environmental evolution on stability of grotto temple

一般而言,石窟周围的振动源对其具有重复作用的特点。随着振动次数的增加,石窟寺岩体发生疲劳破坏时所需的临界应变量降低,裂隙结构面强度缓慢减弱,局部薄弱点可能先于石窟整体达到疲劳破坏的应变量,率先发生破碎、掉块(石玉成,1997;张成渝,2002)。宗静婷(2011)研究了汽车行驶震动对广元千佛崖石窟的影响,表明行驶过程中产生的微震动能够破坏文物或岩体的临界稳定状态,且汽车载重量越大、行驶路面越不平、距石窟越近,对石窟产生的震动量就越高。

4.2.4 烟熏 饥荒和战争时期人们在洞窟里烹饪食物,加之日常香客祭祀祈福等活动,使石窟内壁表面留下大大小小浓淡不均的烟熏黑垢。烟熏黑垢主要是由疏水性的碳质颗粒组成,该物质不仅性质稳定,耐酸腐蚀,且会在岩体表面形成致密的薄膜表层(石美风,2011)。同时,烟熏黑垢中的某些物质还可能会和砂岩基质发生化学反应,产生新的物质形成保护膜。因此,从文物保护的角度来看,这些附着的烟熏黑垢对文物本体有一定的保护作用(刘仁植等,2016;黄继忠等,2018)。Liu *et al.*(2011)和Zhang *et al.*(2013)开展了二氧化硫腐蚀、干湿循环等劣化试验,发现烟熏样品在试验后的劣化程度较低,验证了岩石表面烟熏层的保护作用。

4.3 小结

综上所述可以发现,石窟寺岩体的粉化、溶蚀、落石、坍塌等与稳定性相关的问题都与窟区环境和人类活动密不可分(图5),其失稳机理可以简单地分为物理作用、化学作用和力学作用三大类。大气环境污染在一定程度上改变了石窟寺原有的赋存

环境,加剧了石窟寺岩体已有的欠稳定性问题,具有覆盖面积广、持续时间长、侵蚀作用强的特点。当前,气候环境中温湿度、风沙和降雨对石窟寺岩体稳定性研究已较为全面,人类生活生产所产生的影响也有较多的研究,但大气环境污染仍需要加强关注。尤其是大气污染物中降尘、二氧化硫、二氧化氮、二氧化碳等所产生的耦合作用机理有待进一步深入探究。

5 水环境

石窟是开凿于一定地质环境条件下的人工洞窟,病害的产生难以脱离其地质环境,石窟寺岩体的失稳破坏必然受到水环境的影响。从众多石窟病害的调查来看,水的侵蚀作用不仅对石窟危害大、破坏作用严重,同时又是许多病害产生的根源(张兵峰,2018),可通过降雨、地下水、凝结水等多种形式缓慢地、周期性地作用于石窟寺岩体,导致岩体的强度降低和稳定性变差(周航等,2022)。综合前人的研究成果,可以将水引发石窟寺岩体损害的机制归纳为力学作用、物理作用和化学作用三个方面(严绍军等,2005;谢振斌等,2014;邓华锋等,2018)。

5.1 水对石窟寺岩体的力学作用

水对石窟寺岩体的力学作用包括指孔隙水压力、裂隙水压力以及水流对岩壁的冲刷作用。孔隙水压力的增加不仅会使岩体强度降低,还会造成应力和应变场的重新分布。根据有效应力原理,岩石的颗粒骨架所承担的有效应力随着孔隙水压力的增大而减小,使得其抗剪强度降低。在外界环境影

响下(如地震),还会产生超静孔隙水压力,对岩土体产生切向的推力,导致部分软弱夹层物质被挤出(史绪鑫和张永彬,2014;张娜等,2018)。

当基岩裂隙水沿裂隙赋存并向临空面运移时,可对岩体中倾斜的结构面产生静水压力,形成滑动推力,加速危岩体失稳(刘新荣等,2020)。张成渝(2003)采用岩体力学的基本理论和方法评价了水对龙门石窟洞窟立壁稳定性的影响,表明卸荷裂隙中赋存的水分成为引起卸荷带石窟寺岩体失稳事件产生的重要因素。同时,水在裂隙岩体内渗流过程中还可产生动水压力,改变裂隙岩体中的应力场。从细观断裂力学的角度分析,随着裂缝内水压的增大,裂隙水流渗入到损伤劣化区,当裂隙水流产生的动水压力超过裂强度时,原始裂隙、孔隙扩展将贯通形成新的宏观裂隙(刘得潭等,2018)。

此外,降雨对石窟岩壁的冲刷不仅使松动的岩石颗粒和被切割的块体脱落,还会使裂隙加深加宽,连通性增强(汪东云等,1994)。谢振斌等(2014)在对崖墓石刻的风化研究中发现,常年受到雨水和地表径流机械冲击的部位,岩体表现的损坏程度明显比其他不受水害直接冲刷的部位要高。

5.2 水对石窟寺岩体的物理作用

水可通过软化、润滑、冻融和干湿等作用劣化岩石的物理力学性质(张娜等,2018)。岩石的软化指岩石的强度受水的影响呈现减弱的现象(史绪鑫和张永彬,2014),对于泥钙质胶结岩石主要表现为岩体的膨胀(刘光廷等,2006)。汪东云等(1993b)在研究北山石窟裂隙水病害机理时指出,砂岩中的黏土矿物,遇水后膨胀、崩解,形成功能强度极低的泥质软弱带,使顶部毗连岩石失去支撑。当裂隙受外力作用产生剪切位移时,水分子的结合水膜将裂隙表面隔开而起到润滑作用,降低了裂隙的摩擦力,提高了变形性能(谢振斌等,2014)。而在环境温度变化产生冻融循环时,一方面冻结过程中水分向岩样表部冰晶体迁移,冰晶体得到水分补充后体积扩大,形成冻胀应力破坏颗粒间胶结物,形成微孔裂隙;另一方面,岩样内部产生的温度梯度以及颗粒之间的变形不协调均会产生热应力(刘向峰等,2020;杨鸿锐等,2021)。乔榛等(2019)在研究循环作用对马蹄寺石窟岩石的劣化时,发现了冻融循环造成岩石胶结程度下降和孔隙裂隙增多,甚至贯通形成横向微裂隙,对岩石影响极大。在干湿交替的情况下,岩石的矿物成分、孔隙度、胶结物等均发生改变,促进

次生裂隙产生。这种次生裂隙可以看作是砂岩宏观结构中的大量破缺点,从根本上改变了长石砂岩的整体结构(An *et al.*, 2020)。杨有贞等(2018)在对贺兰山岩画载体砂岩干湿循环试验中发现,随干湿循环进程的不断持续,岩石密实度降低,颗粒空间分布的非均匀性增强,力学参数不断衰减。

5.3 水对石窟寺岩体的化学作用

水岩化学作用改变了岩石的矿物成分与微观结构,进而对岩体的宏观力学性能产生影响,水岩化学作用类型主要包括溶蚀作用、水解作用和水合作用(张娜等,2018)。用于开凿石窟的岩体(如砂岩、砾岩和灰岩)含有许多可溶性成分,如泥质、钙质胶结物等,在水分渗流过程中被溶蚀迁移而流失,增大了岩石空隙,为其他机械破坏作用创造了有利条件(王新录,1992)。Yang *et al.*(2019)研究表明,砂岩中方解石胶结物的溶解可降低岩体的机械强度;方云等(2003)在龙门石窟溶蚀病害研究中指出,溶蚀病害造成了石窟立壁岩体的空架结构,破坏了洞窟立壁和佛像的完整性。水解作用则一直是部分难溶矿物风化溶蚀的主要机制,如硅酸盐在水解作用下会产生新的粘土矿物,长石在酸性条件下水解生成高岭土等。当水中溶有二氧化碳时,还会推动碳酸化作用,加速水解作用进行。翁履谦等(2011)研究指出,长石在酸性条件下水解生成高岭土,高岭土与水结合后具有良好的塑性,大幅降低岩石整体的强度,为岩石的开裂及裂纹的发展提供了内在条件。此外,岩石中的长石和钙质胶结物可在水合作用下吸收水分子形成多种水化物,引起体积膨胀,加速岩石损伤。王新录(1992)探究了钟山石窟的风化,发现长石水合作用生成的水云母改变了矿物的原有构造,而且其硬度通常低于无水矿物,从而削弱了这种岩石抗风化作用的能力。

5.4 小结

水环境对石窟寺岩体的劣化失稳影响较大,作用机理复杂,以物理、力学和化学作用为主导(图6)。根据上述讨论内容,可将其作用机理简单总结为石窟岩石矿物成分的改变、胶结物的流失、矿物颗粒物理力学性质的变化、水分子产生的冻胀应力、水压力以及冲刷作用。现有的研究一部分是以现场调查为基础的定性分析,另一部分则是针对石窟寺水害开展的劣化模拟试验,主要以干湿循环和冻融循环为主,涉及范围较窄。

从某种意义上讲,物理风化是化学风化的前



图6 水岩作用下石窟寺岩体的劣化破坏机理

Fig.6 Deterioration and failure mechanism of grotto rock mass under water-rock interaction

奏,因为物理风化使岩石或矿物变成碎屑,增加了水溶液与岩石及矿物的接触面积,使化学风化得以深入进行(王新录,1992).因此,可对不同岩性石窟岩石材料的劣化阶段进行详细划分,分析物理、化学作用在不同阶段所起的主导作用.最后,根据不同地区水害的影响程度,将我国石窟寺进行区域划分,针对侵蚀严重的地区加强水害治理工作.

6 可溶盐

石窟寺盐害现象普遍,主要是由可溶盐引起的盐析、表面酥粉、砂化及脱落等病害,是导致石窟寺风化破坏的重要不利因素(靳治良等,2009,2017;曾行娇,2018).可溶盐对石窟寺岩体的风化破坏包括两种类型:盐类矿物结晶所致的物理风化与盐类矿物水合作用下的化学风化(徐叔鹰,1993).

6.1 可溶盐对石窟寺岩体的物理风化破坏

可溶盐对石窟寺的影响主要体现在其反复结晶与溶解的过程中.一方面,盐结晶会在岩石的孔隙中生长,当孔隙被填满时将产生巨大的结晶压力(La Iglesia *et al.*, 1994; Theoulakis and Moropoulou, 1997).这种结晶压力主要取决于结晶温度和浓度,温度越高、浓度越大,结晶压力也就越大,且结晶盐

在受热膨胀过程中也会产生部分压力(李黎等,2008; Angeli *et al.*, 2010).当压应力超越岩石的抗拉强度时,会产生次生孔隙和微裂缝,进一步促进了盐分的富集,形成了恶性循环,导致岩石疏松膨胀,抗风化能力减弱.另一方面,当可溶盐在岩体结构面富集时,也会产生挤压作用,促使裂隙的拓展发育,加速危岩体的失稳进程(An *et al.*, 2020).严绍军等(2013a)发现岩体结构在可溶盐的作用下刚度与强度有明显的降低,可诱发云冈石窟顶板、侧壁等部位的局部破坏.

6.2 可溶盐对石窟寺岩体的化学风化破坏

含盐矿物发生水合作用时,原有矿物的分子结构会发生变化,形成新的矿物,表现出硬度和密度降低的特性.新矿物体积发生膨胀,对孔隙或裂隙内壁产生膨胀压力,即水合压力(徐叔鹰,1993).Mortensen(1933)推导了盐分水合压力的计算公式(公式2),该方程具有较好的普适性:

$$p = [nRT/(V_h - V_a)] \ln(p_w/p'_w), \quad (2)$$

式中: p 为水合压力(atm), n 为水的摩尔数, R 为理想气体常数($1\text{ atm/mol}^\circ\text{K}$), T 为温度 $^\circ\text{K}$, V_h 为水合的摩尔体积(L/mol), V_a 为盐的摩尔体积(L/mol), p_w 为固定温度下的水蒸气压力, p'_w 为固定温度下水合盐的蒸汽压.

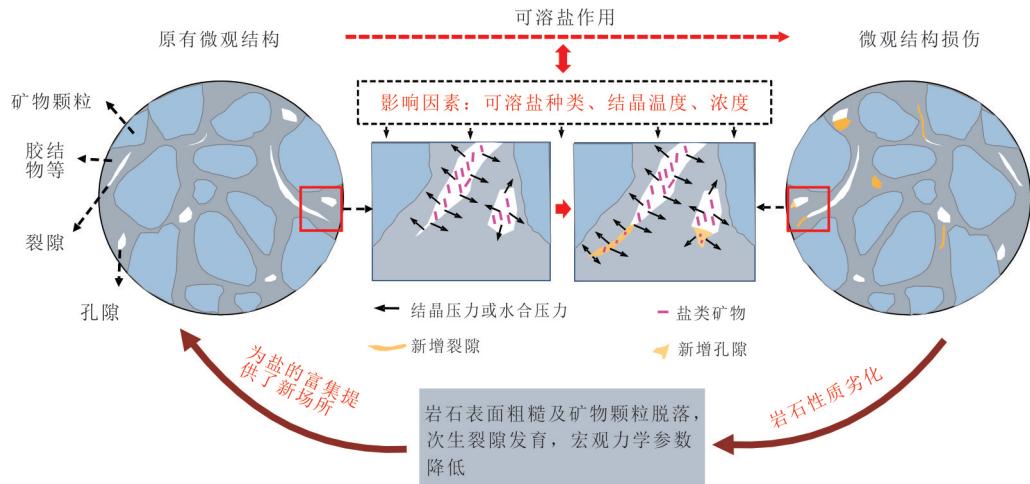


图 7 可溶盐对岩石微观结构破坏示意图

Fig.7 Schematic diagram of rock microstructure damage by soluble salt

温湿度的交替变化,促使盐类矿物处于与水分结合—脱落的循环之中,导致体积反复膨胀。水合压力作用下岩石所受应力反复变化,经过多次循环作用后致使岩石表层疏松、脱落和垮塌(王冲等,2017)。张赞勋等(1993)和谢振斌等(2014)研究发现,硬石膏吸水条件下变成石膏,体积可增大31%,矿物水化膨胀可产生0.15 MPa压力,对于粒间联结力较弱的脆弱部位,极易把岩石胀裂,形成片状剥落或粉末状脱落。

除此之外,屈建军等(1995)研究指出,地层中的NaCl、MgSO₄和KCl等盐类矿物由于温湿度的变化相互作用,干旱条件下新生成物的体积只有原矿物体积的四分之一,这种体积收缩同样可破坏粒间的联结。

6.3 小结

关于可溶盐对石窟寺岩体的劣化机理,学者们开展了丰富的室内劣化模拟试验,研究类型以Na₂SO₄和NaCl为主,集中在可溶盐的风化速度、风化产物、风化机理、岩石的物理力学特性等方面。研究结果普遍认为硫酸盐具有较强的风化能力,其结晶和水化是极易引起石窟寺岩体的风化破坏。同时,盐风化是一种包含有物理风化和化学风化的特殊风化类型,以化学过程为机制,以物理过程为结果,主要由矿物结晶膨胀和矿物水合膨胀两种机制共同作用(图7)。且结晶压力与水合压力密不可分,时常伴生出现(靳治良等,2017)。目前,关于盐风化的微观机理仍需要进一步研究,如盐结晶在岩石不同尺寸孔隙中的生长顺序、盐结晶的运移等。

7 生物作用

我国石质文物资源十分丰富,因长期在自然界中暴露,易受到生物因素的侵害(Prieto and Silva, 2005)。近年来,石质文物的生物风化病害越来越严重,受到专家学者们的重要关注。生物风化是指岩石矿物受生物生长及活动影响而发生的风化作用,生物生命的整个过程都能对它周围的岩石产生破坏(宋金凤等,2019)。根据生物破坏的作用机理,石质文物的生物风化作用可分为生物化学风化和生物物理风化(图8)。

7.1 生物的物理风化作用

生物生命活动对岩石产生的物理破坏较为显著,其中植物根系和微生物菌丝产生破坏作用最受关注(王翀,2015)。由于根系径向比横向具有更大的有效面积,当植物根系在生长过程中受到外部阻力时,在径向压力的主导下必然会对岩体形成一个很大的楔形力。若根系发育处岩体不存在凌空面或周边约束力较大时,随着植物根系不断生长发育,根系与岩体接触时产生的作用力也逐渐增大(樊维,2016)。就卸荷带石窟寺而言,由于植物根系的发育往往避开完好的岩体,在阻力较低的区域内富集。因此,裂隙为植物的生长提供了空间,在植物根系的挤压作用下,岩体被劈裂,裂隙张开度增加,致使根系进一步发育,并可能最终引起岩体崩落(丁梧秀等,2004)。李中翔(2003)在对鸿庆寺石窟保护的研究中发现,第一窟南壁节理中存在直径约10 cm柏树根系,沿节理向下不断生长,发生“V”字状破裂,并形成一定宽度的岩体破碎带;杨华南(2003)

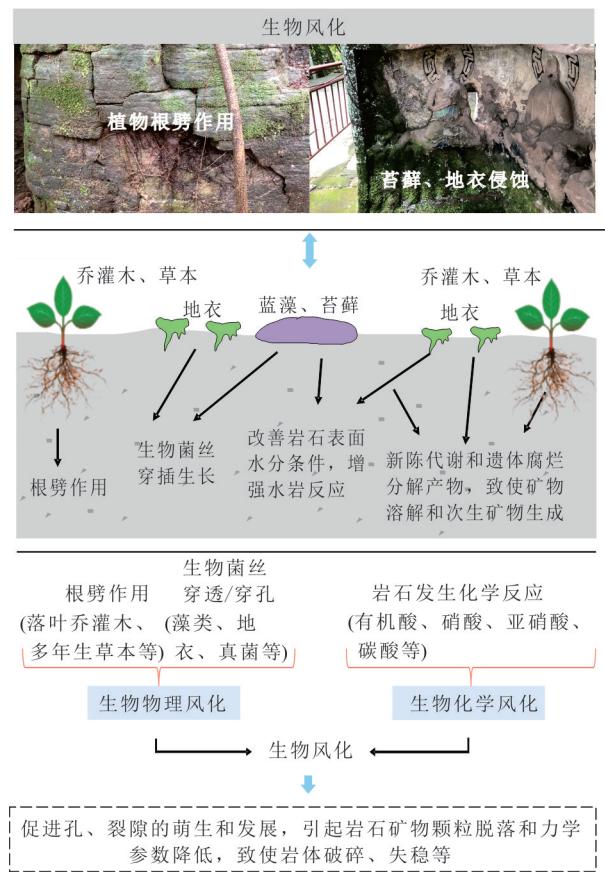


图8 生物活动对岩体的影响机制

Fig.8 Influence mechanism of biological activities on rock mass

在浚县千佛寺石窟病害调查时同样表明,岩体破碎带中的植物根系造成了裂隙附近部分岩石破碎,露在外的根茎最粗可达5 cm.

生物菌丝的穿插生长对岩石的破坏作用也不可小觑,这种菌丝能穿透岩石而到达植物根系无法到达的部位(van Breemen *et al.*, 2000).生物菌丝的生长或穿透了石质文物矿物颗粒进入微观孔隙(Duane, 2006),或沿原有微观孔、裂隙进一步生长扩张,引发岩石表层破碎和矿物颗粒脱落.这种现象对于保水能力好的岩石更为显著,其生物接受能力更高(Prieto and Silva, 2005).张永等(2019)以地衣为主线,综述了生物菌丝作用下的石质文物风化,讨论了菌体在岩石中的穿透能力和菌丝在岩石内的分布方式和穿透深度,为开展石窟寺的生物风化防治提供了依据.

7.2 生物的化学风化作用

生物不仅可以通过新陈代谢和遗体腐烂分解释放有机酸、硝酸、亚硝酸、碳酸等直接与岩石发生化学反应(Machill *et al.*, 1997; Uchida *et al.*, 2000;

Duane, 2006),还可以通过自身的保水作用间接促进岩石的化学风化,其最终的结果是使石窟寺岩体出现疏松、破裂、粉化等现象(陈骏等, 2004; 王翀等, 2015).岩生植物(地衣、苔藓等),通过多种机制显著促进岩石矿物的生物风化进程(杨琳璐等, 2012).一方面,生物根系生长过程中分泌有机酸及产生的CO₂溶于水后形成碳酸等物质会直接溶解矿物,并在遇水后形成酸溶液,降低微域环境的pH值,同时电离出的H⁺可与岩石矿物中的Na⁺、K⁺、Ca²⁺等产生交换从而促进岩石矿物溶解,加速矿质基质的流失(陈杰等, 2000; 连宾等, 2008; 周跃飞等, 2008).另一方面,酸与岩石矿物反应生成新的结晶盐类,从而对岩石产生机械破坏,这也早有报道(Sand, 1997),并在前面小节已经论述.丁梧秀等(2004)研究表明,有机质分解过程中产生的大量CO₂维持了该地区的碳酸平衡,不断促进岩体的溶蚀,增大了岩石的孔隙率,在渗流作用下易溶矿物被带出裂隙,富集于岩壁和雕刻体的表层,遮盖了文物本体的原貌,降低了艺术价值.

此外,蓝藻、地衣和苔藓等附着于岩石表面的生物,为岩石表面风化反应提供了有利的水环境(曹建华等, 2001).降雨过后,生物体可使岩石表面保持一层水膜,干旱时又可从空气中吸收一定水分使岩石表层维持较为湿润的环境,通过水分条件的改善延续了水岩反应的时间.曹建华和袁道先(1999)研究发现,当岩石表面有苔藓植物时,与裸岩相比水分的蒸发流失时间延长了48%,吸水时间增长了57%,持水量提高了16.6倍,认为苔藓植物可以延缓岩面水分蒸发时间,并增加岩石水化学作用时间.

7.3 小结

影响石窟寺岩体稳定性产生的生物既包括微生物(真菌、地衣等),还包括较高级的生物,如植物、昆虫、鸟类等.影响较大的为植物和微生物,其作用机制主要为菌丝的钻孔作用、根劈作用和形成代谢产物对岩石的腐蚀.基于洞窟区域内的生物种类和数量的调查,开展多类型生物综合作用下的石窟寺岩体劣化的系统性研究工作,量化和评估生物侵蚀的程度具有一定意义.此外,由于生物活动对岩石的劣化是一个缓慢的进程,难以开展长时序的劣化模拟试验.因此,可考虑不同地区生物病害与环境的相关性,通过大量实际案例调查,结合室内试验分析,明晰生物对岩石的损伤破坏机制,对石

窟生物病害的发生发展趋势进行预判。

8 洞窟形制

石窟艺术经由印度传入我国后,结合中国传统文化及区域工程地质环境形成了多样的洞窟形制,如莫高窟的平顶、人字坡顶、复合人字坡顶、覆斗顶、拱顶和龟兹石窟的中心柱窟(马世长,2006;杨赫赫,2017)。洞窟形制不仅影响着石窟寺的尺寸设计和观感体验,更为重要的是影响着石窟寺的长久稳定性。

首先,从受力情况来看,人字披、拱顶式及覆斗式在崖体重力的长期作用下均会产生弧形变化的趋势,而中心柱式石窟寺由于岩柱的支撑稳固作用,洞窟更加稳定,产生的位移较小(王茜,2020)。杨赫赫和王其亨(2022)对不同形制石窟模型的受力特征进行了分析,发现自重应力环境下,不同形制洞窟窟顶所受最大拉应力大小顺序约为:平顶窟>拱顶窟或人字坡顶窟>覆斗顶窟(平顶中心窟受压应力)。其次,洞室开挖后,洞室周边(围岩范围内)具有最为不利的应力条件。若洞壁所受的应力超过岩体破坏的临界值,围岩将因洞窟形制的不同产生差异化破坏。具体来讲,对于圆形和正方形窟顶,其各方向受力均衡,破坏从窟顶的中心开始,呈同心圆状;而对于长方形或椭圆形窟顶,窟顶的同一点各方向受力不均衡,长轴方向应力小,短轴方向应力大,所以窟顶的破坏首先沿长轴方向产生一条纵向张性裂缝或使原有的纵向裂缝迅速扩展,然后裂缝两侧的岩体逐渐塌落,最终形成长方形或椭圆形塌落凹槽(李文军和王逢睿,2006)。因此,合理的洞窟形制对石窟寺的稳定有着极其重要的意义。王旭东等(2018)利用FLAC^{3D}研究了静力与地震荷载条件下各形制洞窟的稳定性,计算结果表明静力条件下中心塔柱窟与殿堂窟的最大位移较其他形制洞窟更小。

可以看出,石窟寺洞窟形制的差异性不仅造就了石窟复杂的应力环境,而且还影响着岩体的破坏模式和失稳规模。现阶段,学者们普遍认为中心柱石窟拥有的结构力学性能较为稳定,而平顶型石窟的自稳能力较差,窟顶易发生塌落破坏。从文献调研来看,所开展的工作多为单个洞窟的简单应力、位移分析,研究依然较为薄弱,应关注静、动荷载下不同形制洞窟的应力状态,加强密集洞窟群的整体稳定性研究。

9 多因素耦合

单一因素的分析虽易于厘清某一因素对石窟寺岩体的劣化机理,但石窟文物的失稳破坏往往是多因素耦合作用引起的(图9)。割裂各因素之间的耦合关系无法准确地解释和模拟石窟寺岩体病害的发生和发展过程,甚至在机理研究过程中会出现前后矛盾的现象(王旭东等,2015)。因此,学者们也开展了不同因素组合下的劣化试验,以期更好地厘清失稳机理。目前,研究多以两个因素耦合产生的影响为主,如温度与可溶盐(严绍军等,2015)、CO₂与水(张傲等,2012)、温度和酸(严绍军等,2018)等对石窟寺岩体的破坏。丁梧秀等(2015)表明水化学溶液和冻融耦合侵蚀作用对龙门石窟灰岩的强度损伤较大,岩石的细观结构损伤及力学性能劣化显著,溶液中凝结核的丰度和溶液的pH值是影响灰岩损伤程度的重要因素;方云等(2015)研究了CO₂龙门石窟碳酸盐岩体的劣化机理,发现CO₂气体加剧凝结水对龙门石窟赋存岩体的劣化过程,劣化作用受晶体习性与解理面结构控制,定量评价了CO₂的侵蚀效果;刘海康等(2017)研究了不同含水率状态下砂岩的冻融试验,通过对比试验前后云冈石窟砂岩吸水率、纵波波速、单轴抗压强度等参数,发现砂岩饱和度小于30%时参数基本不受冻融作用影响,确定了云冈石窟砂岩冻融损伤的“阈值”。此外,开展多场耦合条件下的环境模拟技术研究也具有重大意义。王旭东等(2015)首次研发了基于多场耦合下的石窟围岩风化机理模拟试验系统装置,为石窟围岩劣化机理的研究提供了高技术环境仿真试验平台。

综合前人的研究可知,多因素耦合作用下石窟围岩劣化模拟试验主要围绕水因素开展,侧重点不尽相同。然而影响石窟寺岩体劣化失稳的因素有多种,作用机制不同,因此产生的相互耦合作用关系也具有多样性。由此可见,目前在多因素耦合方面的研究工作尚有待进一步加强,并且从多因素耦合角度破解石窟寺岩体劣化失稳机理,并开发针对性的保护措施,也是当前石窟文物保护的重要需求。

10 结语

我国石窟寺分布广泛、规模宏大,是我国文化遗产的重要组成部分。但在岁月流逝下稳定性逐渐减弱,其长久保存问题异常突出,且不同地区病害

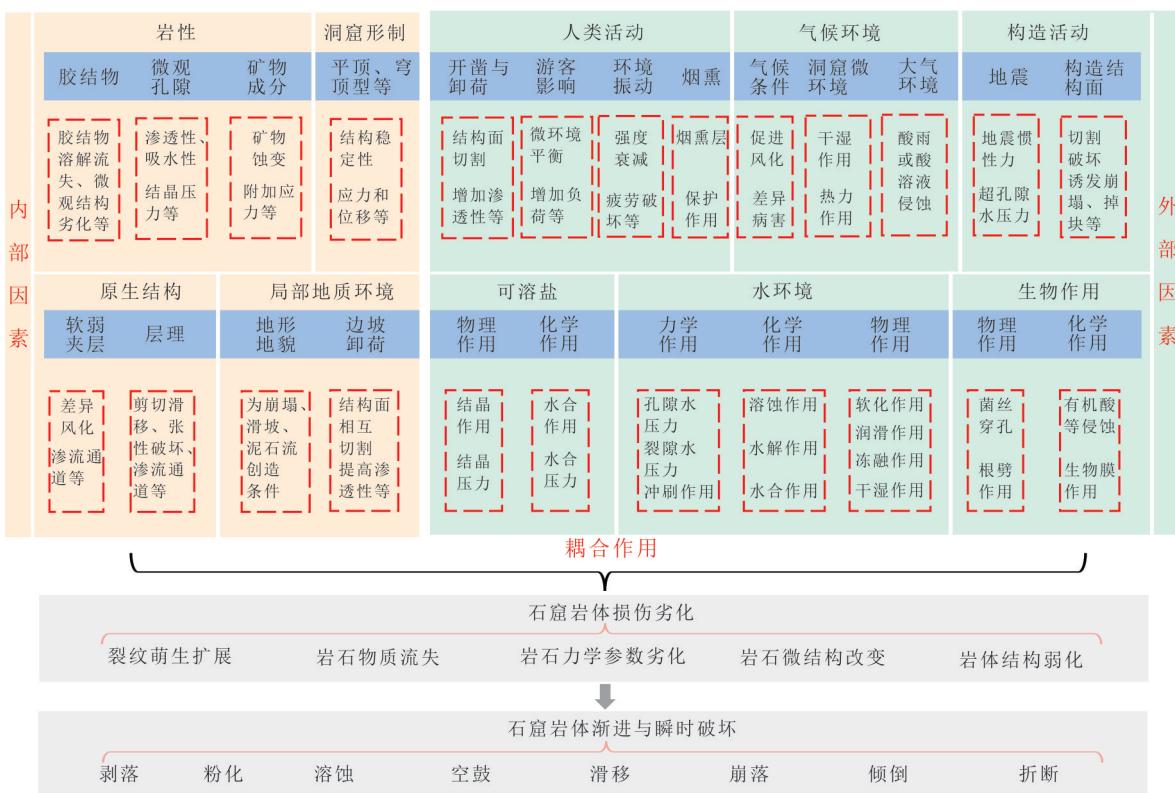


Fig.9 Schematic diagram of degradation and failure mechanism of rock mass in grotto temple

呈现差异性。以西北地区及川渝地区石窟为例,西北地区石窟多以砂岩、砂砾岩为主,岩体疏松、胶结程度差,且地处干旱、半干旱气候,主要存在风化病害(粉状剥落居多)、风沙病害、水害、盐类病害(严重)及岩体失稳等问题。同时,西北地区构造活动频繁,地震对石窟寺的毁损破坏较为严重。而川渝地区石窟多以砂岩为主,结构较为致密,粒间孔隙较少,且该地区雨量充沛、气候温湿,主要存在生物病害、水害(严重)、风化病害(片状剥落较多)、盐类病害及岩体失稳等问题。此外,川渝地区工业较为发达,大气环境污染引起的酸雨、粉尘病害对石窟寺岩体的影响也不可小觑。

本文针对卸荷带石窟寺保护中关注的岩体劣化失稳坏问题,详细分析了石窟寺岩体劣化失稳破坏形成的内部和外部作用因素,从多个方面综述了其影响机理,可以看出:

(1)石窟寺岩体劣化失稳的原因十分复杂。根本原因是多因素引起的力学作用、物理作用、化学作用、生物作用耦合的结果,实质为岩体内部微结构产生—拓展—贯通—成网的演化过程,而各类多尺度裂隙的发育是石窟劣化失稳的关键。

(2)内外因素致使石窟寺发生累积性和瞬时性破坏。岩性、岩体结构、地形地貌和洞窟形制4个内部因素是影响石窟寺岩体稳定性的物质基础,区域环境演化、区域稳定性、可溶盐、水环境及生物作用5个外部因素则为失稳破坏创造了诱发条件。内外营力耦合作用下表现为两种破坏模式,即累积性破坏和瞬时性破坏。

(3)石窟寺岩体劣化失稳问题存在地域差异性,然而在研究思路上却可相互借鉴。不同地区石窟赋存环境存在差异,同一地区不同石窟的微环境也有所不同,因此影响石窟劣化失稳的主控因素有所不同,但均可从力学、物理、化学、生物的角度对各类因素的影响机理进行分析。

基于以上认识,本文梳理了对石窟寺岩体劣化失稳未来研究工作的展望。

(1)需要进一步开展石窟寺多因素耦合劣化失稳研究。多因素耦合作用下石窟寺岩体的劣化机理复杂,耦合关系多样。应推动石窟寺岩体多场耦合作用下卸荷带发育规律、岩体强度与损伤变形的时效性和空间异质性演化规律的研究。

(2)加强石窟寺岩体结构分析。石窟寺赋存岩

体内不同成因类型裂隙极其发育,构成了复杂的裂隙网络,应厘清石窟寺岩体不同尺度结构面分布信息,探明多尺度结构所产生的力学效应,构建反映石窟寺岩体裂隙、孔隙信息的三维数值模型。

(3) 加强石窟寺岩体劣化机理的研究,采取现场和室内试验结合的手段,聚焦宏观、微观层次进行综合分析,建立定量化评价指标。同时,深入开展石窟寺岩体失稳破坏分类体系研究,采取科学的划分依据,形成规范文件。

(4) 针对不同地域的石窟寺在岩体劣化失稳机制方面所存在的差异,开展多区域联合研究,促进相关研究和保护工作系统性、综合性和平衡性发展。

References

- An, W.B., Wang, L.G., Chen, H., 2020. Mechanical Properties of Weathered Feldspar Sandstone after Experiencing Dry-Wet Cycles. *Advances in Materials Science and Engineering*, 6268945. <https://doi.org/10.1155/2020/6268945>
- Angeli, M., Hébert, R., Menéndez, B., et al., 2010. Influence of Temperature and Salt Concentration on the Salt Weathering of a Sedimentary Stone with Sodium Sulphate. *Engineering Geology*, 115(3/4): 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.001>
- Bao, H., Chang, J.Y., Wu, F.Q., et al., 2015. Analysis of Strength Characteristics of Rock Mass Based on Statistical Mechanics of Rock Mass. *Rock and Soil Mechanics*, 36(8): 2361–2369 (in Chinese with English abstract).
- Bao, H., Wu, F.Q., Xi, P.C., 2016. Analysis of Characteristics and Influencing Factors of Elastic Modulus of Jointed Rock Mass Based on Statistical Constitutive Relation. *Rock and Soil Mechanics*, 37(9): 2505–2512, 2520 (in Chinese with English abstract).
- Bao, H., Zhang, K. K., Yan, C. G., et al., 2020. Excavation Damaged Zone Division and Time-Dependency Deformation Prediction: A Case Study of Excavated Rock Mass at Xiaowan Hydropower Station. *Engineering Geology*, 272: 105668. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105668>
- Bian, G.G., Ma, R., 1998. Relic Corrosion by Air Pollution. *Research of Environmental Sciences*, 11(5): 22–25 (in Chinese with English abstract).
- Binal, A., 2019. The Effect of Wind Pressure on Surface Erosion of Soft Rocks in Arid Regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3): 1565–1574. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1218-x>
- Bobyleva, T. N., Shamaev, A. S., 2017. An Efficient Algorithm for Calculating Rheological Parameters of Layered Soil Media Composed from Elastic-Creeping Materials. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54(4): 224–230. <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9462-4>
- Cao, J.H., Yuan, D.X., 1999. Relationship between Water Holding of Carbonate Rock and Sasicolous Algae, Lichen and Moss and Its Ecological Significance. *Geochimica*, 28(3): 248–256 (in Chinese with English abstract).
- Cao, J.H., Yuan, D.X., Pan, G.X., et al., 2001. Preliminary Study on Biological Action in Karst Dynamic System. *Earth Science Frontiers*, 8(1): 203–209 (in Chinese with English abstract).
- Cardell, C., Rivas, T., Mosquera, M. J., et al., 2003. Patterns of Damage in Igneous and Sedimentary Rocks under Conditions Simulating Sea-Salt Weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(1): 1–14. <https://doi.org/10.1002/esp.408>
- Chen, H.K., Wang, R., Tang, H.M., 2003. Review on Current Situation to Study and Trend of Dangerous Rock Mass. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 22(3): 18–22 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Gong, Z.T., Blume, H., et al., 2000. Biodeterioration of Constructions Induced by Lichens. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, (2): 65–74 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Yao, S.P., Ji, J.F., et al., 2004. The History and Advances of Microbial Geochemistry. *Geological Review*, 50(6): 620–632 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S.H., Peng, G.R., Zhang, L., et al., 2022. Quantitative Prediction of Permeability of High Variable Ceanothermal Gradient Sandstone in Baiyun Deep Water Area of Northern South China Sea. *Earth Science*, 47(7): 2468–2480 (in Chinese with English abstract).
- Chen, T.Y., Zhu, B.L., 2014. Experimental Study of Physical Properties of Sandstone under the Cycling Conditions of Temperature and Humidity. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 41(1): 74–78, 95 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W. W., Guo, Z. Q., Zhang, J. K., et al., 2018. Evaluation of Long-Term Stability of Mogao Grottoes Caves under Enhanced Loading Conditions of Tourists. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(4): 04018048. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001190](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001190)
- Chen, W.C., Li, L., Shao, M.S., et al., 2017. Experimental Study on Carbonate Dissolution and Erosion Effect

- under Attack of Simulated Sulphuric Acid Rain. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(11): 2058—2067(in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q., Zheng, T.J., 2013. Comprehensive Index Method for Predicting Earthquake-Induced Collapse Based on the Wenchuan Earthquake Experience. *Journal of Natural Disasters*, 22(6): 96—103 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y.X., 2010. Cave Temple: The Signpost of the Eastward Spread of Buddhism on the Silk Road. *Relics and Museology*, (3): 65—67 (in Chinese).
- Dai, X.M., 2018. A Research on the Investigation and Protection of the Situation of Xumishan Grottoes. *Studies of the Cave Temples*, (1): 390—403 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H.F., Zhang, H.B., Li, J.L., et al., 2018. Effect of Water-Rock Interaction on Unloading Mechanical Properties and Microstructure of Sandstone. *Rock and Soil Mechanics*, 39(7): 2344—2352 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Y., Wang, J.H., 2019. Study on Weathering Characteristics and Weathering Products of Yungang Grottoes. *Research on Heritages and Preservation*, 4(3): 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W.X., Chen, J.P., Feng, X.T., et al., 2004. Study on Weathering Characteristics of Surrounding Rock in Longmen Cavern. *Rock and Soil Mechanics*, 25(1): 145—148 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W.X., Xu, T., Wang, H.Y., et al., 2015. Experimental Study of Mechanical Property of Limestone under Coupled Chemical Solution and Freezing-Thawing Process. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(5): 979—985 (in Chinese with English abstract).
- Duane, M. J., 2006. Coeval Biochemical and Biophysical Weathering Processes on Quaternary Sandstone Terraces South of Rabat (Temara), Northwest Morocco. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(9): 1115—1128. <https://doi.org/10.1002/esp.1313>
- Fan, W., 2016. The Mechanism Study of Rock-Broken Process by Root-Growth of Plant in Fractured Rock(Dissertation). Chongqing Jiaotong University, Chongqing(in Chinese with English abstract).
- Fan, X. M., Scaringi, G., Korup, O., et al., 2019. Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts. *Reviews of Geophysics*, 57(2): 421—503. <https://doi.org/10.1029/2018rg000626>
- Fang, Y., Chen, X., Liu, J.H., et al., 2011. Analysis on Causes of Perilous Rocks in Yungang Grottoes. *Geoscience*, 25(1): 137—141 (in Chinese with English abstract).
- Fang, Y., Deng, C.Q., Li, H.S., 2001. Environment Geological Problems in Prevention and Cure of Weathering Diseases of Carved Stone Relics. *Geoscience*, 15(4): 458—461 (in Chinese with English abstract).
- Fang, Y., Gu, C.Q., Yan, S.J., et al., 2003. Research on the Karst Diseases of the Longmen Grottoes in Luoyang, Henan Province. *Geoscience*, 17(4): 479—482 (in Chinese with English abstract).
- Fang, Y., Huang, Z.Y., Zhang, X.P., et al., 2015. Simulation Experimental Study on CO₂ Corroding Carbonate in Longmen Grottoes. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(7): 2626—2634 (in Chinese with English abstract).
- Feng, N., 2011. Study on Deterioration Mechanism and the Conservation of Typical Brick and Stone Cultural Heritage in Moisture Circumstances(Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Gao, B.L., Zhang, H.X., Yang, Z.F., 2020. Crack Development Mechanism and Reinforcement Support of the Rock Roof of No. 3 Cavern in Longyou Grottoes. *Journal of Engineering Geology*, 28(3): 565—573 (in Chinese with English abstract).
- Geng, H., Zhang, S. J., Zhi, J. H., et al., 2019. Acid Solution Decreases the Compressional Wave Velocity of Sandstone from the Yungang Grottoes, Datong, China. *Heritage Science*, 7(1): 1—11. <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0245-2>
- Guo, Q. L., Wang, X. D., Zhang, H. Y., et al., 2009. Damage and Conservation of the High Cliff on the Northern Area of Dunhuang Mogao Grottoes, China. *Landslides*, 6(2): 89—100. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0152-9>
- Guo, S.F., Li, N., Yao, X.C., et al., 2017. Study on Factors and Precision Affecting the Stability of Layered Rock Slopes. *China Earthquake Engineering Journal*, 39(2): 362—368 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z.Q., 2018. Stability Analysis of Dense Caves and Risk Assessment of the Dangerous Rock Body at the Southern Area of Mogao Grottoes, Dunhuang(Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou(in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. Q., Chen, W. W., Zhang, J. K., et al., 2021. Seismic Responses of the Densely Distributed Caves of the Mogao Grottoes in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2): 1335—1349. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02025-0>

- He, D.W., Ma, D.T., Wu, Y., 2008. Variations and Deformations of Rock Masses at Northern Mogao Grottoes in Dunhuang and Their Reinforcement Countermeasures. *Journal of Engineering Geology*, 16(2): 283—288(in Chinese with English abstract).
- He, J., Wang, H., Garzanti, E., 2020. Petrographic Analysis and Classification of Sand and Sandstone. *Earth Science*, 45(6): 2186—2198(in Chinese with English abstract).
- He, Y., Li, Z.Y., 2000. A Study of Geological Disease Analyses and Renovation Methods in Lingquan Temple Grotto of Henan, China. *Rock and Soil Mechanics*, 21(1): 56—59 (in Chinese with English abstract).
- He, Y., Li, Z.Y., Yang, Z.F., et al., 2001. Engineering Geology Study of Lingquansi Cave Temple, People's Republic of China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(1): 43—57. <https://doi.org/10.1007/s100640000085>
- Hou, J.L., Zhuang, X.L., Liu, Y.M., 2013. Analysis on Relationship between Geological Hazards and Geological Environment in Inner Mongolia Autonomous Region. *Journal of Catastrophology*, 28(3): 66—72 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X.S., Zhao, F.S., 2005. Simulation of Deformation and Failure of Surrounding Rock Masses of Underground Cavern in Low Ground Stress Regions with Finite Element Method. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(10): 1708—1714 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J.Z., 2003. Main Damages and Preservation of the Yungang Grottoes. *Journal of Yanbei Normal University*, 19(5): 57—59(in Chinese with English abstract).
- Huang, J.Z., Wang, J.H., Gao, F., et al., 2018. Recent Progresses in Sandstone Cave Temples Conservation: A Case Study of Yungang Grottoes. *Southeast Culture*, (1): 15—19 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J.Z., Zheng, Y., Zhang, Y., et al., 2021. The Water Vapor Diffusion Characteristics of Sandstone in Yungang Grottoes. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 51(3): 370—378 (in Chinese with English abstract).
- Huang, K.Z., 1998. Protection of Geotechnical Heritage Buildings. China Architecture & Building Press, Beijing (in Chinese).
- Huang, W.L., Yang, Q.H., Lü, Y., et al., 2020. Relationship between Distribution Characteristics of Prehistoric Landslides and Seismic Activity along Qinling Piedmont Fault. *Journal of Engineering Geology*, 28(6): 1259—1271(in Chinese with English abstract).
- Huang, Z.Y., Fang, Y., Wang, K., et al., 2014. Study on Dynamics about Carbon Dioxide Concentration and Visitors in Longmen Grottoes. *Science Technology and Engineering*, 14(14): 303—306 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, G. H., Guo, F., Polk, J. S., 2015. Salt Transport and Weathering Processes in a Sandstone Cultural Relic, North China. *Carbonates and Evaporites*, 30(1): 69—76. <https://doi.org/10.1007/s13146-014-0202-9>
- Jiang, H.Y., Feng, L.J., 1993. Main Diseases and Their Curing Methods of the Grottoes in Xinjiang Autonomous Region. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 5(2): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.L., Chen, G.Q., Qian, L., et al., 2009. Study on the Mechanism of Salt Damages on the Mural Paintings of Mogao Grottoes. *Chemical Research and Application*, 21(4): 450—454 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.L., Liu, D.D., Zhang, Y.K., et al., 2017. Salt Migrations and Damage Mechanism in Cultural Heritage Objects. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 29(5): 102—116 (in Chinese with English abstract).
- La Iglesia, A., Garcia del Cura, M. A., Ordoñez, S., 1994. The Physicochemical Weathering of Monumental Dolostones, Granites and Limestones; Dimension Stones of the Cathedral of Toledo (Spain). *Science of the Total Environment*, 152(2): 179—188. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90498-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90498-7)
- Lan, H. X., Martin, C. D., Andersson, J. C., 2013. Evolution of In Situ Rock Mass Damage Induced by Mechanical-Thermal Loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(1): 153—168. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0248-8>
- Lan, H. X., Martin, C. D., Hu, B., 2010. Effect of Heterogeneity of Brittle Rock on Micromechanical Extensile Behavior during Compression Loading. *Journal of Geophysical Research*, 115(B1): B01202. <https://doi.org/10.1029/2009jb006496>
- Lan, H.X., Bao, H., Sun, W.F., et al., 2022. Multi-Scale Heterogeneity of Rock Mass and Its Mechanical Behavior. *Journal of Engineering Geology*, 30(1): 37—52 (in Chinese with English abstract).
- Li, H.M., Liang, Y.F., Chen, J.F., et al., 2018. Relationship between Pore Structural Characteristics and Physical-Mechanical Properties of Sandstone in Shendong Mining Area. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 37(4): 9—16(in Chinese with English abstract).

- Li, H.S., 2011. Character and Evaluation Method of Historical Rock Deterioration (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Li, H. S., Wang, W. F., Zhan, H. T., et al., 2015. Water in the Mogao Grottoes, China: Where It Comes from and How It is Driven. *Journal of Arid Land*, 7(1): 37–45. <https://doi.org/10.1007/s40333-014-0072-y>
- Li, J. L., 2012. The Study of Stability and Reinforcement Measures on the Rock Mass of Jinta Grottos (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou(in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., 1993. Some Opinions on Classification of Weathering Resistance of Fresh Rocks. *Railway Standard Design*, 37(5): 31–33(in Chinese with English abstract).
- Li, L., Tanimoto, C., 2005. Research on the Argillaceous Cement of Sandstone at Longyou Grottoes. *Journal of Engineering Geology*, 13(2): 189–194(in Chinese with English abstract).
- Li, L., Wang, S.J., Tanimoto, C., 2008. Study of Weathering Characteristics of Sandstone at Longyou Grottoes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(6): 1217–1222 (in Chinese with English abstract).
- Li, L.H., Yang, Z.F., Liu, J.J., 2010. The Influences of Full Filling with Water in Longyou Large Underground Caverns on the Long-Term Stability of Them. *Journal of Engineering Geology*, 18(Suppl. 1): 120–125(in Chinese with English abstract).
- Li, L.H., Yang, Z.F., Yue, Z.Q., et al., 2005. Deformation and Failure Modes and Reinforcement Methods of Ancient Cavern Group in Longyou County. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(12): 2018–2028 (in Chinese with English abstract).
- Li, W.J., 2006. The Relationship between Groundwater in Beigrotto Temple and the Damp Seepage of Grotto Rock Mass and the Groundwater Control Measures. *Dunhuang Research*, (4): 109–114, 126(in Chinese).
- Li, W.J., Wang, F.R., 2006. Treatment Technology of Rock Mass Diseases in Chinese Grottoes. Lanzhou University Press, Lanzhou(in Chinese).
- Li, X.P., Zhu, R.G., Zhu, W.S., 1995. The Damage Fracture Theory and Its Application in Jointed Rock Mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 14(3): 236–245 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Huo, J.J., 2017. Relationship between Topography and Geological Disaster Distribution in Shanxi, Dingxiang. *China Population, Resources and Environment*, 27(S2): 189–192 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., 2002. The Rock Features of the Grottoes along the Old Silk Road and Its Consolidation in Conservation. *Dunhuang Research*, (4): 73–83, 112–119 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., 2003. Study on the Protection of Hongqing Temple Grottoes. *Cultural Relics of Central China*, (1): 70–76 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Y., Zhang, X. G., Li, H.S., 1995. A Study on the Weathering Disease of Stone Cultural Relics in Zhongxian, Sichuan. *Earth Science*, 20(4): 378–382 (in Chinese with English abstract).
- Lian, B., Chen, Y., Zhu, L.J., et al., 2008. Progress in the Study of the Weathering of Carbonate Rock by Microbes. *Earth Science Frontiers*, 15(6): 90–99 (in Chinese with English abstract).
- Liang, N.H., Liu, X.R., Ai, W.M., et al., 2011. Experiment Study on the Permeability of Fractured Rock under Unloading. *China Civil Engineering Journal*, 44(1): 88–92 (in Chinese with English abstract).
- Ling, J.M., 1994. Some Problems on Damage Mechanics of Jointed Rock Mass. *Advances in Mechanics*, 24(2): 257–264 (in Chinese with English abstract).
- Ling, J.M., Jiang, J.G., Fu, Y.S., 1992. Study on the Mechanical Characteristics of Intermittently Cracked Rock Masses with Damage Mechanics. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 11(4): 373–383 (in Chinese with English abstract).
- Ling, J.M., Sun, J., 1993. On Mesocrack Damage of Brittle Rocks and Its Time-Dependent Characteristics. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 12(4): 304–312 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. L., Peng, W. Y., Li, H. D., et al., 2020. Increase of Moisture Content in Mogao Grottoes from Artificial Sources Based on Numerical Simulations. *Journal of Cultural Heritage*, 45: 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.004>
- Liu, D.T., Shen, Z.Z., Xu, L.Q., et al., 2018. Experimental Studies on Influence Factors and Mechanism of Critical Water Pressure of Hydraulic Splitting in Rock Mass. *Hydro-Science and Engineering*, (4): 30–37 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. T., Hu, Y., Li, P. H., 2006. Behavior of Soaking Rock and Its Effects on Design of Arch Dam. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(9): 1729–1734 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.K., Zhang, S.Y., Zhang, X.X., 2017. Experimental Study of Freeze-Thaw Deterioration Specialty of Sand-

- stone in Different Initial Moisture Content. *Science Technology and Engineering*, 17(26): 322—327 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.L., Wang, F., Liu, Z.J., 2017. Test and Analysis of Effects of Heavy Traffic Load-Induced Vibration on Surrounding Ancient Grottoes Architecture. *China Science-paper*, 12(13): 1472—1476, 1487 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.S., Wei, L., Lei, G.F., et al., 2018. Experimental Study on Damage Strength of Crack Initiation and Evaluation of Brittle Parameters of Sandstone. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(10): 1782—1789 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.S., Wei, L., Liu, X.W., et al., 2017. A Revised Empirical Method for Predicting Crack Initiation Based on Griffith Strength Criterion. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(7): 1561—1569 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R.Z., Zhang, B.J., Wei, G.F., et al., 2016. Research and Study of Diseases at the Yungang Grottoes. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 28(2): 101—110 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R.Z., Zhang, B.J., Zhang, H., et al., 2011. Deterioration of Yungang Grottoes: Diagnosis and Research. *Journal of Cultural Heritage*, 12(4): 494—499. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.03.008>
- Liu, S.J., Lan, H.X., Bao, H., et al., 2022. Classification System of Typical Engineering Geological Deformation and Failure Modes in Grottoes. *Earth Science* (in Press) (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.B., Meng, H., Wang, Y.L., et al., 2018. Water is a Critical Factor in Evaluating and Assessing Microbial Colonization and Destruction of Angkor Sandstone Monuments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 133: 9—16. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.05.011>
- Liu, X.F., Guo, Z.Y., Wang, L.G., et al., 2020. Experimental Study on Physical and Mechanical Property Damage of Grotto Sandstone in Freeze-Thaw Cycle. *Journal of Experimental Mechanics*, 35(5): 943—954 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.R., Xiong, F., Li, B., et al., 2020. Current Situation of Research on Failure Mechanism and Stability of Rock Slopes under Hydraulic Action. *Carsologica Sinica*, 39(4): 547—558 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.W., Liu, Q.S., Liu, J.P., et al., 2016. Experimental Study on Mechanism for Fracture Network Initiation under Complex Stress Conditions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(S2): 3662—3670 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.W., Wu, Z., Liang, M.J., et al., 2021. Paleoearthquake Characteristics of Jiayuguan Fault and Its Seismic Risk. *Earth Science*, 46(10): 3796—3806 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.Y., Zhai, G.L., Fang, Y., et al., 2014. Impermeable Grouting Mechanism and Parameter Analysis of Fracture Rock in Longmen Grottoes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(S2): 3941—3947 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.R., Chen, Z.X., Zhou, L.Z., 2009. Research on Prevention Countermeasure and Main Geoenvironmental Cause of Large-Scale Ancient Sites in South China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28 (S2): 3795—3800 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S.C., 2006. Types and Shape Characteristics of Buddhist Grottoes in China—Focusing on Qiuci and Dunhuang. *Dunhuang Research*, (6): 43—53 (in Chinese).
- Ma, Z.P., Huang, J.Z., Zhang, H., 2005. Chemical Weathering of Carbonate Cement in Sandstone and the Related Cultural Relic Diseases in Yungang Grottoes. *Carsologica Sinica*, 24(1): 71—76, 82 (in Chinese with English abstract).
- Machill, S., Althaus, K., Krumbein, W.E., et al., 1997. Identification of Organic Compounds Extracted from Black Weathered Surfaces of Saxonean Sandstones, Correlation with Atmospheric Input and Rock Inhabiting Microflora. *Organic Geochemistry*, 27(1/2): 79—97. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(97\)00041-7](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(97)00041-7)
- Man, J., Chen, W.W., Sun, G.J., 2009. Study on the New Reinforcement Measure Used for Reinforcing Folium on the Top of Grottoes. *Dunhuang Research*, (6): 21—25, 121, 127 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Z.G., He, M.C., Tao, Z.G., et al., 2020. Three-Dimensional Numerical Modeling and Roof Deformation Analysis of Yuanjue Cave Based on Point Cloud Data. *Advances in Civil Engineering*, (4): 1—13. <https://doi.org/10.1155/2020/8825015>
- Meng, Z.P., Lu, P.Q., He, X.H., 2009. Depositinal Structure Planes and Their Influence on the Mechanical Properties of Sedimentary Rock Mass. *Coal Geology & Exploration*, 37(1): 33—37 (in Chinese with English abstract).
- Mortensen, H., 1933. Die Salzsprengung und Ihre Bedeutung für Die Regionalklimatische Gliederung Der Wüsten. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 79:130—135.
- Mou, H.C., Yang, Z.F., Wu, F.Q., 2000. Study on Engineering Geomechanics for Preservation of Rocky Historical Relics. Seismological Press, Beijing, 1—20 (in Chinese).

- Muthu, O., Bobet, A., 2005. Slip Initiation on Frictional Fractures. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(5): 729–747. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.06.003>
- Pan, B.T., Huang, K.Z., 1992. Cultural Relics Protection and Environmental Geology. China University of Geosciences Press, Wuhan(in Chinese).
- Peng, N. B., Yan, Z. X., Sun, B., et al., 2013. Dynamic Responses of a Grotto under Strong Earthquake, Yungang Grottoes, Shanxi Province, China. *AIP Conference Proceedings*, 1558(1): 2305–2308. <https://doi.org/10.1063/1.4826001>
- Prieto, B., Silva, B., 2005. Estimation of the Potential Bioreceptivity of Granitic Rocks from Their Intrinsic Properties. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 56(4): 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.08.001>
- Qi, G., Yang, G.X., Li, B., 2011. Patterns and Mechanisms of Deformation and Failure and Strengthening Countermeasures of the Guge Kingdom Ruins Caverns in Tibet. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1494–1503 (in Chinese with English abstract).
- Qi, S.W., Wu, F.Q., Liu, C.L., et al., 2004. Engineering Geology Analysis on Stability of Slope under Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(16): 2792–2797 (in Chinese with English abstract).
- Qian, S.F., 2003. Roof Caving Mechanism and Supporting Countermeasures in Working Face. *Ground Pressure and Strata Control*, 20(2): 95–96 (in Chinese with English abstract).
- Qiang, F., Zhao, F.S., Dang, Y.Q., 2015. Correlation Analysis between Geological Hazards and Impact Factors in Qinling–Daba Mountains of South Shaanxi Province. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 13(3): 557–562 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, Z., Wang, F.R., Wang, J., et al., 2019. Cycling Effect on Rock Mass Properties of Mati Temple Grottoes. *Science Technology and Engineering*, 19(28): 64–70 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Wang, Y.H., Li, L.L., et al., 2016. Experimental Weathering of Weak Sandstone without Direct Water Participation by Using Sandstone from the Yungang Grottoes in Datong, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(11): 4473–4478. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1003-3>
- Qiu, R.D., Shi, Y.C., 2006. Characteristics of Seismic Disaster of Grottoes under Seismic Loading and Seismic Reinforcement. *Journal of Catastrophology*, 21(1): 38–42 (in Chinese with English abstract).
- Qu, J.J., Zhang, M.Q., Zhang, W.M., et al., 1995. A Preliminary Study on Weathering Process of Salt in Rock Body at Mogao Grottoes, Dunhuang. *Scientia Geographica Sinica*, 15(2): 182–187, 200 (in Chinese with English abstract).
- Qu, J.J., Zhang, W.M., Wang, Y.P., et al., 1994. Deflation Mechanism of Mogao Grotto Rock Bodies and Their Protective Strategies. *Journal of Desert Research*, 14(2): 18–23 (in Chinese with English abstract).
- Sahouryeh, E., Dyskin, A. V., Germanovich, L. N., 2002. Crack Growth under Biaxial Compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(18): 2187–2198. [https://doi.org/10.1016/s0013-7944\(02\)00015-2](https://doi.org/10.1016/s0013-7944(02)00015-2)
- Sand, W., 1997. Microbial Mechanisms of Deterioration of Inorganic Substrates—A General Mechanistic Overview. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 40(2–4): 183–190. [https://doi.org/10.1016/s0964-8305\(97\)00048-6](https://doi.org/10.1016/s0964-8305(97)00048-6)
- Scotti, R., Crosta, G. B., Villa, A., 2017. Destabilisation of Creeping Permafrost: The Plator Rock Glacier Case Study (Central Italian Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(1): 224–236. <https://doi.org/10.1002/ppp.1917>
- Shao, Y.X., Zou, X.B., Yuan, D.Y., et al., 2021. Late Quaternary Slip along Yangguan Fault at Northeastern Section of Altyn Tagh Fault and Implications for Seismic Risk. *Earth Science*, 46(2): 683–696 (in Chinese with English abstract).
- Shi, M. F., 2011. Study on the Function and Removal of Black Scale on the Stone Carving Surface of Yungang Grottoes (Dissertation). Fudan University, Shanghai (in Chinese with English abstract).
- Shi, X.X., Zhang, Y.B., 2014. Influence of Rainfall Infiltration on Fractured Rock Slope Stability. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 28(6): 429–433 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y.C., 1997. Genetic Analysis and Countermeasures for Main Diseases of Grottoes. *Journal of Natural Disasters*, 6(1): 104–110 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y.C., Cai, H.W., Xu, H.P., 2003. Seismic Safety Evaluation Methods for Grottoes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(S2): 2804–2808 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y.C., Cai, H.W., Xu, H.P., et al., 2000. Methods for the Seismic Stability Evaluation of Surrounding Rock and Auxiliary Structures of Grottoes. *Northwestern Seis-*

- mological Journal*, 22(1): 83—89(in Chinese with English abstract).
- Shi, Y.C., Fu, C.H., Wang, L.M., 2006. Numerical Simulation Analysis of Mechanism of Seismic Deformation Damage of Country Rock of Grottoes. *Rock and Soil Mechanics*, 27(4): 543—548(in Chinese with English abstract).
- Song, J.F., Ru, J.X., Zhang, H.G., et al., 2019. Research Progress on Lichens, Lichenic Acids, Rock and Mineral Weathering and Its Mechanisms. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 43(4): 169—177(in Chinese with English abstract).
- Sun, B., Peng, N.B., Wang, F.R., 2012. Seismic Dynamic Responses of No. 19 Grotto's West Side Cave of Yungang Grottoes. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 47(4): 573—579(in Chinese with English abstract).
- Sun, J.Z., Tian, X.F., Guan, X.D., et al., 2008. Stability Analysis for Loosened Rock Slope of Jinyang Grand Buddha in Taiyuan, China. *Earth Science Frontiers*, 15 (4): 227—238(in Chinese with English abstract).
- Tang, Z.L., 2013. Consolidation Grouting Stone in the Protection of Cultural Heritage Sites of Yungang Grottoes Research (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Teng, G.L., Chen, Y.M., Shi, Y.C., et al., 2013. A Study on the Influencing Factors of Joint Rock Slope Stability under Earthquake Activity. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(1): 119—125 (in Chinese with English abstract).
- Theoulakis, P., Moropoulou, A., 1997. Microstructural and Mechanical Parameters Determining the Susceptibility of Porous Building Stones to Salt Decay. *Construction and Building Materials*, 11(1): 65—71. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(96\)00029-3](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(96)00029-3)
- Tian, X.F., Sun, J.Z., Jiang, J., et al., 2007. Seismic Stability of Loosened Rock Slope of Grand Buddha Rock Mass in West Jinyang Mountain in Taiyuan. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(S1): 3432—3437 (in Chinese with English abstract).
- Tian, X.F., Sun, J.Z., Liu, Y.Q., 2010. Rock Mass Weathering Grading of Jinyang Grand Buddha. *Geology and Exploration*, 46(4): 722—727 (in Chinese with English abstract).
- Uchida, E., Ogawa, Y., Maeda, N., et al., 2000. Deterioration of Stone Materials in the Angkor Monuments, Cambodia. *Engineering Geology*, 55(1/2): 101—112. [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(99\)00110-6](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(99)00110-6)
- van Breemen, N., Finlay, R., Lundström, U., et al., 2000. Mycorrhizal Weathering: A True Case of Mineral Plant Nutrition? *Biogeochemistry*, 49(1): 53—67. <https://doi.org/10.1023/A:1006256231670>
- Wang, C., Wang, M.P., Bai, C.B., et al., 2015. The New Developments of the Researches on the Biological Weathering of the Open-Air Stone Cultural Relics. *Relics and Museology*, (2): 86—91 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Xie, Z.B., Guo, J.B., et al., 2017. Research on the Weathering Mechanism of Stone Carvings on Leshan Mahao Cliff Tomb. *Dunhuang Research*, (6): 172—181 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.Y., Fu, L.S., Yao, J.S., et al., 1993a. Weathering Status and Controlling Factors of Rock Mass in Beishan Grottoes. *Journal of Chongqing Architecture University*, 15(1): 81—86(in Chinese).
- Wang, D.Y., Zhang, Z.X., Fu, L.S., et al., 1993b. The Characteristics of Water Seepage and Its Destructive Effect to the Statue Rockmass in Bei Shan Grotto, Dazu, Sichuan. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 20 (6): 39—44 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.Y., Zhang, Z.X., Fu, L.S., et al., 1994. Analyses of Factors Affecting Destruction of Rockmass by Weathering in Baodingshan Grotto. *Journal of Engineering Geology*, 2(2): 54—65 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F.R., Cui, H.P., Sun, B., et al., 2017. Study on Variation of Rainfall and Relative Humidity of Caves in the Beishiku Cave Temple. *Science Technology and Engineering*, 17(15): 176—180 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F.R., Xiao, B., 2011. Stability Study of the Rock from Cave 165 in the Beishiku Cave Temple. *Dunhuang Research*, (6): 65—69, 127 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.J., Ma, L., 2019. Study on Sediment Environment and Rock Mechanics Characteristics of the Delta Plain of Jurassic Coalfield in Northern Shaanxi. *Coal Geology & Exploration*, 47(3): 61—69 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.T., 1990. Influence of Temperature Difference on Binglingsi Grottoes. *Journal of Dunhuang Studies*, (2): 106—111 (in Chinese).
- Wang, J., Li, Y., Song, W.D., et al., 2019. Analysis of Damage Evolution Characteristics of Jointed Rock Mass with Different Joint Dip Angles. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 51(8): 143—150 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.H., Chen, J.Q., 2018. Current Status and Future Development of Cave Temples Protection in China. *Southeast Culture*, (1): 6—14, 127 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Wang, J.H., Huo, X.T., 2021. A Discussion on the Key Scientific and Technological Issues in Cave Temples Protection. *Southeast Culture*, (1): 6—13 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.H., Yan,S.J., Ren, W.Z., et al., 2013. Study on Stability Analysis and Evaluation System of Grotto Rock Mass Structure. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Wang, K. P., Xu, G. L., Li, S. T., et al., 2018. Geo-Environmental Characteristics of Weathering Deterioration of Red Sandstone Relics: A Case Study in Tongtianyan Grottoes, Southern China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4): 1515—1527. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1128-y>
- Wang, W. F., Dong, Z. B., Wang, T., et al., 2006. The Equilibrium Gravel Coverage of the Deflated Gobi above the Mogao Grottoes of Dunhuang, China. *Environmental Geology*, 50(7): 1077—1083. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0281-6>
- Wang, X., 2020. Damage Mechanism and Stability Analysis of Grottoes(Dissertation). Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.D., 2007. The Condition and Tasks about the Conservation of Grottoes and Earthen Architecture Sites at Northwest China. *Dunhuang Research*, (5): 6—11, 112 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.D., Guo, Q.L., Fan, Y.Q., et al., 2015. Multi-Field Coupling Equipment for Research on the Weathering Mechanism of Rock and Earthen Relics. *Dunhuang Research*, (5): 103—110(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.D., Zhang, J.K., Sun, M.L., et al., 2018. Study on the Ancient Wisdom in the Excavation of Caves in the South Area of Mogao Grottoes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(S2): 4207—4220 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., 1992. Preliminary Study on Weathering and Protection of Zhongshan Grottoes. *Relics and Museology*, (1): 86—90(in Chinese with English abstract).
- Weng, L.Q., Yang, H.F., Wang, F.R., et al., 2011. Research on Characterization of Sandstone Weathering of Yungang Grottoes. *Materials Review*, 25(S2): 425—428 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. Q., 1999. Groundwater Flow and Geological Hazards. *Underground Space*, 19(4): 303—310, 316—339 (in Chinese with English abstract).
- Xie, L. N., Zhang, B. J., 2020. An Inorganic Magnesium-Based Consolidant for the Consolidation of Silica Sand (a Substitute for Weathered Sandstone): A Preliminary Exploration. *Studies in Conservation*, 65(7): 424—436. <https://doi.org/10.1080/00393630.2019.1682269>
- Xie, Z. B., Guo, J. B., Chen, X. D., 2014. Experimental Study on the Influence of External Factors on the Weathering of Cliff Tomb Stone Carvings. *Sichuan Cultural Relics*, (1): 54—62(in Chinese with English abstract).
- Xu, F.G., Gao, S.X., 2008. Effect of Air Pollution on Calcareous Cultural Relics and New Defending Materials. *Environmental Science & Technology*, 31(3): 35—38(in Chinese with English abstract).
- Xu, F. Y., Wu, L. M., Xie, Y. L., et al., 2012. Study of Methods for Temperature and Humidity Evaluation in Museum Environments. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 24(S1): 6—12(in Chinese with English abstract).
- Xu, S. Y., 1993. Preliminary Study on the Salt Weathering Process in Arid Area. *Arid Land Geography*, 16(2): 14—20(in Chinese with English abstract).
- Yan, S.J., Chen, J.Q., Dou, Y., et al., 2015. Characteristics of Yungang Grottoes Sandstone and Weathering Simulation Tests. *Geoscience*, 29(2): 442—447(in Chinese with English abstract).
- Yan, S.J., Fang, Y., Liu, J.H., et al., 2013a. Deterioration Experiment with Soluble Salt on Sandstone of Yungang Grottoes and Its Model Creation. *Rock and Soil Mechanics*, 34(12): 3410—3416(in Chinese with English abstract).
- Yan, S.J., Tan, S.E., Liu, J.H., et al., 2013b. Acid-Induced Degradation of Sand Rock in Yungang Grottoes. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 30(9): 64—68(in Chinese with English abstract).
- Yan, S.J., Fang, Y., Sun, B., et al., 2005. Influence of Water Permeation and Analysis of Treatment for the Longmen Grottoes. *Geoscience*, 19(3): 475—478(in Chinese with English abstract).
- Yan, S.J., Tian, S.Y., Chen, J.P., et al., 2018. Deterioration Experiments for Oolitic Limestone of the Longmen Grottoes. *Dunhuang Research*, (3): 38—43(in Chinese with English abstract).
- Yang, H.H., 2017. On the Evolution and Characteristics of Architectural Forms of Mogao Caves at Dunhuang. *Journal of Shihezi University (Philosophy and Social Sciences)*, 31(3): 68—75(in Chinese with English abstract).
- Yang, H. H., Wang, Q. H., 2022. The Architectural Form and Structural Characteristics of Dunhuang Mogao Grottoes. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 52(2): 199—212(in Chinese with English abstract).

- stract).
- Yang, H. M., Qiu, J. T., Yu, L., et al., 2019. Spectral Characteristics of Chemically Weathered Sandstones in the Yungang Grottoes, China. *Studies in Conservation*, 64(2): 63–72. <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1482707>
- Yang, H.N., 2003. Preliminary Study on Disease Causes and Protection Measures of Qianfo Temple Grottoes in Xun County. *Cultural Relics of Central China*, (5):82–84(in Chinese with English abstract).
- Yang, H. Q., Liu, J. F., Liu, B. L., 2018. Investigation on the Cracking Character of Jointed Rock Mass beneath TBM Disc Cutter. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(4): 1263–1277. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1395-8>
- Yang, H.R., Liu, P., Sun, B., et al., 2021. Study on Damage Mechanisms of the Microstructure of Sandy Conglomerate at Maijishan Grottoes under Freeze–Thaw Cycles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(3): 545–555(in Chinese with English abstract).
- Yang, L. L., Wang, Z. S., Zhou, L. Y., et al., 2012. Response and Bioindicator of Bryophyte and Lichen as Cryptogamae Plants to Environmental Change. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 36(3): 137–143(in Chinese with English abstract).
- Yang, Q.C., Yao, C.M., Liu, S.J., et al., 2015. Correlation Analysis of Geological Hazards and Topography in Hilly Areas in Shandong Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 26(2): 93–96(in Chinese with English abstract).
- Yang, S.Q., Liu, X.R., Li, Y.S., 2012. Experimental Analysis of Mechanical Behavior of Sandstone Containing Hole and Fissure under Uniaxial Compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(S2): 3539–3546(in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Q., Lü, C. H., Qu, T., 2009. Investigations of Crack Expansion in Marble Having a Single Pre-existing Hole: Experiment and Simulations. *Journal of China University of Mining & Technology*, 38(6): 774–781(in Chinese with English abstract).
- Yang, T. Y., Liu, Y. Y., 2018. The Rock Mass Unloading Cracks of Leshan Giant Buddha and Their Influence. *Journal of Ezhou University*, 25(2): 106–109(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.Z., He, X.Y., Kang, Y.M., et al., 2018. Weathering Characteristics of the Sandstone of Rock Painting in Helan Mountain by Dry-Wet Cycles. *Science Technology and Engineering*, 18(7): 31–37(in Chinese with English abstract).
- Yuan, J.X., 1993. Rock Damage Problems. *Rock and Soil Mechanics*, 14(1):1–31(in Chinese with English abstract).
- Zeng, L., Fu, H.Y., He, W., et al., 2013. Effects of Rainfall Infiltration Factors on Stability of Carbonaceous Mudstone Embankment Slope. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 30(3): 39–44, 58 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, X.J., 2018. Laboratory Evaluation and Research on Desalination Effect of Sandstone Stone Cultural Relics Materials (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Zhang, A., Fang, Y., Xu, M., et al., 2012. Simulation Experiment for Weathering of Culture Relic on Carbonate Rock Palisades in Longmen Grottoes. *Carsologica Sinica*, 31(3): 227–233(in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.F., 2018. Study on the Mechanism of Fissure Water Disease in Sichuan Grottoes: A Case Study of the Buddha-Lying Area in Dafo Bay of Dazu Stone Carving. *China Cultural Heritage*, (4): 27–34(in Chinese).
- Zhang, C.Y., 2002. The Analysis of Rock Mass Fatigue Effect under Vibration Environment in Luoyang Longmen Grottoes. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 38(6): 809–816(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. Y., 2003. The Effect on the Rock Mass Stability Due to Hydro-Occurrence Environment in Longmen Grottoes of Luoyang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 39(6): 829–834(in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.J., Li, Z.X., 2005. The Threats of the Precipice Body of the Northern Area of Mogao Grottoes. *Dunhuang Research*, (4): 71–74, 116(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Shi, M. F., Shen, W., et al., 2013. Damage or Protection? The Role of Smoked Crust on Sandstones from Yungang Grottoes. *Journal of Archaeological Science*, 40(2): 935–942. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.09.031>
- Zhang, J.F., 2008. Decay Mechanism of Stone Monuments. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 20(2): 60–67(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.K., Liang, X.Z., Ye, F., et al., 2018. Study on Weathering Characteristics of Rock Mass along Depth Direction of Cliff Located at North of Dunhuang Mogao Grottoes. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 1499–1507(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.K., Zhang, L.X., Guo, Q.L., et al., 2021. The

- Relationship between Weathering Characteristics of the Sandstone Surface and Lithology of the North Grottoes at Qingsyang. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 51(3): 344—352(in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.Q., Wen, L.L., Wang, X.D., et al., 2009. Impact of Construction Vibration on Mogao Grottoes in Dunhuang. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(S2): 3762—3768(in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.Q., Zhang, H.Y., Zeng, Z.Z., et al., 1997. Analyses of the Main Environment Problems in Preservation of Mogao, Grottoes Dunhuang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 11(1): 34—38(in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.T., Wang, E.D., Li, B., et al., 2021. Study on the Geological Damage Mechanism of the Stone Cultural Relics in Yungang Grottoes. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 40(3): 220—224(in Chinese with English abstract).
- Zhang, N., Wang, S.B., Zhao, F.F., et al., 2018. Review on Study of Interaction between Soft Rock and Water. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 49(7): 1—7(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q.Z., Shen, M.R., Jang, B.A., et al., 2016. Creep Behavior of Rocks with Rough Surfaces. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9):04016063. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001557](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001557)
- Zhang, Y., Wu, F.S., Su, M., et al., 2019. Research Progress on the Biowearhoring and Controlling of Stone Cultural Relics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(11): 3980—3990(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.D., Wang, J.L., He, X., et al., 2006. Discussion on the Forming Conditions and Countermeasures of Geological Hazards in Shaanxi Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 34(22): 5951—5953(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.X., Wang, D.Y., Fu, L.S., et al., 1993. Formation of Weathered Product and Destroying Effect of an Ancient Grotto in Beishan. *Journal of Chongqing Architecture University*, 15(3): 67—75(in Chinese with English abstract).
- Zhao, M., Fang, Y., Cheng, B., et al., 2016. Statistical Analysis on the Mechanism of Cracking of the Huashan Rock Paintings. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 28(2): 24—31(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.B., Tan, S.E., 2012. Study on Engineering Geological Characteristics of Sandstone in Kutula Grottoes. *Yangtze River*, 43(S1): 58—59(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.X., Wang, A.J., Zhang, J., et al., 2002. Study on the Characteristics of and Effect on the Stone-Carvings of Nanxiangtang Grotto. *Research of Environmental Sciences*, 15(6): 12—16(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.R., Ye, H.L., Huang, R.Q., et al., 2010. Study on the Seismic Stability Analysis of a Slope. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 30(2): 173—180(in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Liao, X., Chen, S.K., et al., 2022. Rockburst Risk Assessment of Deep Lying Tunnels Based on Combination Weight and Unascertained Measure Theory: A Case Study of Sangzhuling Tunnel on Sichuan-Tibet Traffic Corridor. *Earth Science*, 47(6): 2130—2148(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y.F., Lu, X.C., Wang, R.C., et al., 2008. Recent Progress in the Study of Microbiomineralogy of Feldspar. *Advances in Earth Science*, 23(1): 17—23(in Chinese with English abstract).
- Zhu, J.W., Chang, Z.H., Liu, E.C., et al., 2009. Failure Causes and Reinforcement Countermeasures for No. 1 Grotto of Longyou Grottoes. *Journal of Engineering Geology*, 17(1): 126—132(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Q.Z., Kondo, D., Shao, J.F., et al., 2008. Micro-mechanical Modelling of Anisotropic Damage in Brittle Rocks and Application. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(4): 467—477. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.07.014>
- Zhu, R.C., 2010. A Quantitative Study on Classification of Unload Zones along Rock Mass Side Slope. *Railway Investigation and Surveying*, 36(5): 46—50(in Chinese with English abstract).
- Zong, J.T., 2011. Study on Environmental Geological Problems of the Protection of Stone Cultural Relics on the Cliff of Thousand Buddha Cliffs in Guangyuan (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包含, 常金源, 伍法权, 等, 2015. 基于统计岩体力学的岩体强度特征分析. 岩土力学, 36(8): 2361—2369.
- 包含, 伍法权, 鄢鹏程, 2016. 基于统计本构关系的岩体弹性模量特征及影响因素分析. 岩土力学, 37(9): 2505—2512, 2520.
- 边归国, 马荣, 1998. 大气环境污染对文物古迹的影响. 环境科学研究, 11(5): 22—25.
- 曹建华, 袁道先, 1999. 石生藻类、地衣、苔藓与碳酸盐岩持

- 水性及生态意义. 地球化学, 28(3): 248—256.
- 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 等, 2001. 岩溶动力系统中的生物作用机理初探. 地学前缘, 8(1): 203—209.
- 陈洪凯, 王蓉, 唐红梅, 2003. 危岩研究现状及趋势综述. 重庆交通大学学报, 22(3): 18—22.
- 陈杰, 龚子同, Hans-Peter Blume, 等, 2000. 地衣对建筑物的生物破坏作用. 环境污染治理技术与设备, 1(2): 65—74.
- 陈骏, 姚素平, 季峻峰, 等, 2004. 微生物地球化学及其研究进展. 地质论评, 50(6): 620—632.
- 陈淑慧, 彭光荣, 张丽, 等, 2022. 南海北部白云深水区高变地温梯度砂岩渗透率定量预测. 地球科学, 47(7): 2468—2480.
- 陈棠茵, 朱宝龙, 2014. 温度、湿度循环条件下砂岩物理特性试验研究. 水文地质工程地质, 41(1): 74—78, 95.
- 陈卫昌, 李黎, 邵明申, 等, 2017. 酸雨作用下碳酸盐岩类文物的溶蚀过程与机理. 岩土工程学报, 39(11): 2058—2067.
- 程强, 郑同健, 2013. 基于汶川地震经验的地震崩塌失稳预测综合指标法. 自然灾害学报, 22(6): 96—103.
- 程云霞, 2010. 石窟寺: 丝绸之路佛教东传的路标. 文博, (3): 65—67.
- 代学明, 2018. 颁弥山石窟文物现状调查及保护初探. 石窟寺研究, (1): 390—403.
- 邓华锋, 张恒宾, 李建林, 等, 2018. 水—岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响. 岩土力学, 39(7): 2344—2352.
- 邓云, 王金华, 2019. 云冈石窟风化特征与风化产物研究. 遗产与保护研究, 4(3): 1—5.
- 丁梧秀, 陈建平, 冯夏庭, 等, 2004. 洛阳龙门石窟围岩风化特征研究. 岩土力学, 25(1): 145—148.
- 丁梧秀, 徐桃, 王鸿毅, 等, 2015. 水化学溶液及冻融耦合作用下灰岩力学特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 34(5): 979—985.
- 樊维, 2016. 裂隙岩体植物根劈作用机理研究(硕士学位论文). 重庆: 重庆交通大学.
- 方云, 陈星, 刘俊红, 等, 2011. 云冈石窟危岩发育的成因分析. 现代地质, 25(1): 137—141.
- 方云, 邓长青, 李宏松, 2001. 石质文物风化病害防治的环境地质问题. 现代地质, 15(4): 458—461.
- 方云, 顾成权, 严绍军, 等, 2003. 河南洛阳龙门石窟溶蚀病害机理的研究. 现代地质, 17(4): 479—482.
- 方云, 黄志义, 张新鹏, 等, 2015. CO₂劣化龙门石窟碳酸盐岩的机理模拟试验研究. 中南大学学报(自然科学版), 46(7): 2626—2634.
- 冯楠, 2011. 潮湿环境下砖石类文物风化机理与保护方法研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 高丙丽, 张海祥, 杨志法, 2020. 龙游石窟 3 号洞窟顶板裂缝发育机理及加固支护研究. 工程地质学报, 28(3): 565—573.
- 郭双枫, 李宁, 姚显春, 等, 2017. 层状岩质边坡稳定性影响因素及精度问题研究. 地震工程学报, 39(2): 362—368.
- 郭志谦, 2018. 敦煌莫高窟南区密集洞窟群稳定性及危岩体风险评估(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 何德伟, 马东涛, 吴杨, 2008. 敦煌莫高窟北区岩体变异变形及修复对策. 工程地质学报, 16(2): 283—288.
- 何杰, 王华, Eduardo Garzanti, 2020. 砂岩(砂)的岩相分析和分类标准. 地球科学, 45(6): 2186—2198.
- 何燕, 李智毅, 2000. 关于河南灵泉寺石窟地质病害及整治方法的研究. 岩土力学, 21(1): 56—59.
- 侯俊琳, 庄晓玲, 刘怡敏, 2013. 内蒙古自治区地质灾害与地质环境的关系分析. 灾害学, 28(3): 66—72.
- 胡夏嵩, 赵法锁, 2005. 低地应力区地下洞室围岩变形破坏有限元数值模拟研究. 岩石力学与工程学报, 24(10): 1708—1714.
- 黄继忠, 2003. 云冈石窟主要病害及治理. 雁北师范学院学报, 19(5): 57—59.
- 黄继忠, 王金华, 高峰, 等, 2018. 砂岩类石窟寺保护新进展: 以云冈石窟保护研究新成果为例. 东南文化, (1): 15—19.
- 黄继忠, 郑伊, 张悦, 等, 2021. 云冈石窟砂岩水汽扩散特性研究. 西北大学学报(自然科学版), 51(3): 370—378.
- 黄克忠, 1998. 岩土文物建筑的保护. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 黄伟亮, 杨虔灏, 吕艳, 等, 2020. 秦岭北麓古滑坡分布特征与地震活动关系研究. 工程地质学报, 28(6): 1259—1271.
- 黄志义, 方云, 王凯, 等, 2014. 龙门石窟游客数量与二氧化碳浓度动态变化规律研究. 科学技术与工程, 14(14): 303—306.
- 姜怀英, 冯丽娟, 1993. 新疆石窟的主要病害及其治理方针. 文物保护与考古科学, 5(2): 41—48.
- 靳治良, 陈港泉, 钱玲, 等, 2009. 基于莫高窟成盐元素相关系探究壁画盐害作用机理. 化学研究与应用, 21(4): 450—454.
- 靳治良, 刘端端, 张永科, 等, 2017. 盐分在文物本体中的迁移及毁损机理. 文物保护与考古科学, 29(5): 102—116.
- 兰恒星, 包含, 孙巍峰, 等, 2022. 岩体多尺度异质性及其力学行为. 工程地质学报, 30(1): 37—52.
- 李宏松, 2011. 文物岩石材料劣化特征及评价方法(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 李化敏, 梁亚飞, 陈江峰, 等, 2018. 神东矿区砂岩孔隙结构特征及与其物理力学性质的关系. 河南理工大学学报(自然科学版), 37(4): 9—16.
- 李家钰, 1993. 新鲜岩石抗风化能力分级若干意见. 铁道标准设计, 37(5): 31—33.
- 李金龙, 2012. 金塔寺石窟寺岩体稳定性分析与加固措施(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.

- 李黎,谷本親伯,2005.龙游石窟砂岩的泥质胶结物研究.工程地质学报,13(2): 189—194.
- 李黎,王思敬,谷本親伯,2008.龙游石窟砂岩风化特征研究.岩石力学与工程学报,27(6): 1217—1222.
- 李丽慧,杨志法,刘建立,2010.充水对龙游大型古地下洞室群长期稳定性影响的研究.工程地质学报,18(增刊1): 120—125.
- 李丽慧,杨志法,岳中琦,等,2005.龙游大型古洞室群变形破坏方式及加固方法研究.岩石力学与工程学报,24(12): 2018—2028.
- 李文军,2006.北石窟寺地下水与石窟寺岩体潮湿渗水的关系及地下水治理措施.敦煌研究,(4): 109—114, 126.
- 李文军,王逢睿,2006.中国石窟寺岩体病害治理技术.兰州:兰州大学出版社.
- 李新平,朱瑞赓,朱维申,1995.裂隙岩体的损伤断裂理论与应用.岩石力学与工程学报,14(3): 236—245.
- 李智,霍俊杰,2017.山西定襄县地形地貌与地质灾害分布关系分析.中国人口·资源与环境,27(增刊2): 189—192.
- 李智毅,张咸恭,李宏松,1995.忠县地面石质文物的风化病害研究.地球科学,20(4): 378—382.
- 李中翔,2003.鸿庆寺石窟保护研究.中原文物,(1): 70—76.
- 李最雄,2002.丝绸之路石窟的岩石特征及加固.敦煌研究,(4): 73—83, 112—119.
- 连宾,陈烨,朱立军,等,2008.微生物对碳酸盐岩的风化作用.地学前缘,15(6): 90—99.
- 梁宁慧,刘新荣,艾万民,等,2011.裂隙岩体卸荷渗透规律试验研究.土木工程学报,44(1): 88—92.
- 凌建明,1994.节理裂隙岩体损伤力学研究中的若干问题.力学进展,24(2): 257—264.
- 凌建明,蒋爵光,傅永胜,1992.非贯通裂隙岩体力学特性的损伤力学分析.岩石力学与工程学报,11(4): 373—383.
- 凌建明,孙钧,1993.脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征.岩石力学与工程学报,12(4): 304—312.
- 刘得潭,沈振中,徐力群,等,2018.岩体水力劈裂临界水压影响因素及机理研究.水利水运工程学报,(4): 30—37.
- 刘光廷,胡昱,李鹏辉,2006.软岩遇水软化膨胀特性及其对拱坝的影响.岩石力学与工程学报,25(9): 1729—1734.
- 刘海康,张思渊,张鑫鑫,2017.不同初始含水率下砂岩冻融劣化特性试验研究.科学技术与工程,17(26): 322—327.
- 刘鸿琳,汪峰,刘章军,2017.危桥车辆振动对邻近景观石窟动力影响测试分析.中国科技论文,12(13): 1472—1476, 1487.
- 刘泉声,魏莱,雷广峰,等,2018.砂岩裂纹起裂损伤强度及脆性参数演化试验研究.岩土工程学报,40(10): 1782—1789.
- 刘泉声,魏莱,刘学伟,等,2017.基于Griffith强度理论的岩石裂纹起裂经验预测方法研究.岩石力学与工程学报,36(7): 1561—1569.
- 刘仁植,张秉坚,魏国锋,等,2016.云冈石窟的污染物病害调查研究.文物保护与考古科学,28(2): 101—110.
- 刘世杰,兰恒星,包含,等,2022.石窟寺典型工程地质变形破坏模式及分类体系.地球科学(待刊).
- 刘向峰,郭子钰,王来贵,等,2020.冻融循环作用下石窟砂岩物理力学性质损伤规律研究.实验力学,35(5): 943—954.
- 刘祥友,翟国林,方云,等,2014.龙门石窟寺岩体裂隙防渗注浆机制及参数分析.岩石力学与工程学报,33(S2): 3941—3947.
- 刘新荣,熊飞,李滨,等,2020.水力作用下岩质斜坡破坏机制和稳定性分析研究现状.中国岩溶,39(4): 547—558.
- 刘兴旺,吴赵,梁明剑,等,2021.嘉峪关断裂古地震活动特征及其强震危险性影响.地球科学,46(10): 3796—3806.
- 刘学伟,刘泉声,刘建平,等,2016.复杂应力条件下裂隙网络扩展机制试验研究.岩石力学与工程学报,35(增刊2): 3662—3670.
- 刘佑荣,陈中行,周丽珍,2009.中国南方大型古遗址主要环境地质病害及其防治对策研究.岩石力学与工程学报,28(增刊2): 3795—3800.
- 马世长,2006.中国佛教石窟的类型和形制特征:以龟兹和敦煌为中心.敦煌研究,(6): 43—53.
- 马在平,黄继忠,张洪,2005.云冈石窟砂岩中碳酸盐胶结物化学风化及相关文物病害研究.中国岩溶,24(1): 71—76, 82.
- 满君,谌文武,孙光吉,2009.濒危薄型窟顶石窟加固新技术的应用研究.敦煌研究,(6): 21—25, 121, 127.
- 孟召平,陆鹏庆,贺小黑,2009.沉积结构面及其对岩体力学性质的影响.煤田地质与勘探,37(1): 33—37.
- 牟会宠,杨志法,伍法权,2000.石质文物保护的工程地质力学研究.北京:地震出版社.
- 潘别桐,黄克忠,1992.文物保护与环境地质.武汉:中国地质大学出版社.
- 齐干,杨国兴,李兵,2011.西藏古格王国遗址洞窟变形破坏模式、机制及加固对策.吉林大学学报(地球科学版),41(5): 1494—1503.
- 祁生文,伍法权,刘春玲,等,2004.地震边坡稳定性的工程地质分析.岩石力学与工程学报,23(16): 2792—2797.
- 钱四发,2003.回采工作面顶板冒落机理与支护对策.矿山压力与顶板管理,20(2): 95—96.
- 强菲,赵法锁,党亚倩,2015.陕南秦巴山区地质灾害与影响因素的相关性分析.南水北调与水利科技,13(3): 557—562.

- 乔榛, 王逢睿, 王捷, 等, 2019. 循环作用对马蹄寺石窟群岩体性能的影响. 科学技术与工程, 19(28): 64—70.
- 秋仁东, 石玉成, 2006. 地震荷载作用下石窟的震害特征及抗震加固. 灾害学, 21(1): 38—42.
- 屈建军, 张明泉, 张伟民, 等, 1995. 敦煌莫高窟岩体盐风化过程的初步研究. 地理科学, 15(2): 182—187, 200.
- 屈建军, 张伟民, 王远萍, 等, 1994. 敦煌莫高窟岩体风蚀机理及其防护对策的研究. 中国沙漠, 14(2): 18—23.
- 邵延秀, 邹小波, 袁道阳, 等, 2021. 阿尔金断裂东北段敦煌阳关断裂晚第四纪活动性及其强震危险性影响分析. 地球科学, 46(2): 683—696.
- 石美风, 2011. 云冈石窟石雕表面黑垢的作用及其清除研究(硕士学位论文). 上海: 复旦大学.
- 石玉成, 1997. 石窟文物病害成因分析及其对策研究. 自然灾害学报, 6(1): 104—110.
- 石玉成, 蔡红卫, 徐晖平, 2003. 石窟文物抗震安全评价方法研究. 岩石力学与工程学报, 22(增刊2): 2804—2808.
- 石玉成, 蔡红卫, 徐晖平, 等, 2000. 石窟围岩及其附属构筑物地震稳定性评价方法研究. 西北地震学报, 22(1): 83—89.
- 石玉成, 付长华, 王兰民, 2006. 石窟围岩地震变形破坏机制的数值模拟分析. 岩土力学, 27(4): 543—548.
- 史绪鑫, 张永彬, 2014. 降雨入渗对裂隙岩质边坡稳定性的影响. 济南大学学报(自然科学版), 28(6): 429—433.
- 宋金凤, 汝佳鑫, 张红光, 等, 2019. 地衣和地衣酸与岩石矿物风化及其机制研究进展. 南京林业大学学报(自然科学版), 43(4): 169—177.
- 孙博, 彭宁波, 王逢睿, 2012. 云冈石窟第19窟西耳窟地震动力响应. 西南交通大学学报, 47(4): 573—579.
- 孙进忠, 田小甫, 管旭东, 等, 2008. 太原西山大佛松动岩体边坡稳定性分析. 地学前缘, 15(4): 227—238.
- 唐智亮, 2013. 固结灌浆在保护云岗石窟石质文物遗址的应用研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 滕光亮, 陈永明, 石玉成, 等, 2013. 地震作用下节理岩质边坡稳定性影响因素研究. 地震工程学报, 35(1): 119—125.
- 田小甫, 孙进忠, 江进, 等, 2007. 太原晋阳西山大佛松动岩体边坡地震稳定性研究. 岩石力学与工程学报, 26(增刊1): 3432—3437.
- 田小甫, 孙进忠, 柳亚千, 2010. 晋阳大佛边坡岩体风化分级研究. 地质与勘探, 46(4): 722—727.
- 汪东云, 付林森, 姚金石, 等, 1993a. 北山石窟寺岩体风化现状及控制因素. 重庆建筑工程学院学报, 15(1): 81—86.
- 汪东云, 张赞勋, 付林森, 等, 1993b. 北山石窟渗水特征及其对造像岩体的破坏作用. 水文地质工程地质, 20(6): 39—44.
- 汪东云, 张赞勋, 付林森, 等, 1994. 宝顶山石窟寺岩体风化破坏的作用因素分析. 工程地质学报, 2(2): 54—65.
- 王翀, 王明鹏, 白崇斌, 等, 2015. 露天石质文物生物风化研究进展. 文博, (2): 86—91.
- 王冲, 谢振斌, 郭建波, 等, 2017. 乐山麻浩崖墓石刻风化机理研究. 敦煌研究, (6): 172—181.
- 王逢睿, 崔惠萍, 孙博, 等, 2017. 北石窟寺降雨与洞窟相对湿度变化规律研究. 科学技术与工程, 17(15): 176—180.
- 王逢睿, 肖碧, 2011. 甘肃北石窟寺第165窟岩体稳定性分析研究. 敦煌研究, (6): 65—69, 127.
- 王海军, 马良, 2019. 陕北侏罗纪煤田三角洲平原沉积环境及其岩石力学特征. 煤田地质与勘探, 47(3): 61—69.
- 王亨通, 1990. 温差变化对炳灵寺石窟的影响. 敦煌学辑刊, (2): 106—111.
- 汪杰, 李杨, 宋卫东, 等, 2019. 不同倾角节理岩体损伤演化特征分析. 哈尔滨工业大学学报, 51(8): 143—150.
- 王金华, 陈嘉琦, 2018. 我国石窟寺保护现状及发展探析. 东南文化, (1): 6—14, 127.
- 王金华, 霍晓彤, 2021. 石窟寺保护关键科学问题及关键技术探讨. 东南文化, (1): 6—13.
- 王金华, 严绍军, 任伟中, 等, 2013. 石窟寺岩体结构稳定性分析评价系统研究. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 王茜, 2020. 石窟寺窟体破坏机理及稳定性分析(硕士学位论文). 西安: 西安建筑科技大学.
- 王新录, 1992. 钟山石窟的风化及保护初探. 文博, (1): 86—90.
- 王旭东, 2007. 西北地区石窟与土建筑遗址保护研究的现状与任务. 敦煌研究, (5): 6—11, 112.
- 王旭东, 郭青林, 范宇权, 等, 2015. 多场耦合下岩土质文物风化机理试验装置研究. 敦煌研究, (5): 103—110.
- 王旭东, 张景科, 孙满利, 等, 2018. 莫高窟南区洞窟古人开凿智慧初探. 岩石力学与工程学报, 37(增刊2): 4207—4220.
- 翁履谦, 杨海峰, 王逢睿, 等, 2011. 云冈石窟砂岩微观风化特征研究. 材料导报, 25(增刊2): 425—428.
- 仵彦卿, 1999. 地下水与地质灾害. 地下空间, (4): 303—310, 316.
- 谢振斌, 郭建波, 陈显丹, 2014. 外界因素对崖墓石刻风化影响的实验研究. 四川文物, (1): 54—62.
- 徐方圆, 吴来明, 解玉林, 等, 2012. 文物保存环境中温湿度评估方法研究. 文物保护与考古科学, 24(S1): 6—12.
- 徐飞高, 高士祥, 2008. 大气污染对石灰质文物的风化影响及防护新材料. 环境科学与技术, 31(3): 35—38.
- 徐叔鹰, 1993. 干旱区盐风化过程的初步研究. 干旱区地理, 16(2): 14—20.
- 严绍军, 陈嘉琦, 窦彦, 等, 2015. 云冈石窟砂岩特性与岩石风化试验. 现代地质, 29(2): 442—447.
- 严绍军, 方云, 刘俊红, 等, 2013a. 可溶盐对云冈石窟砂岩劣化试验及模型建立. 岩土力学, 34(12): 3410—3416.
- 严绍军, 谭松娥, 刘俊红, 等, 2013b. 酸对云冈石窟砂岩的

- 劣化作用试验研究. 长江科学院院报, 30(9): 64—68.
- 严绍军, 方云, 孙兵, 等, 2005. 渗水对龙门石窟的影响及治理分析. 现代地质, 19(3): 475—478.
- 严绍军, 田世瑶, 陈建平, 等, 2018. 龙门石窟颗粒灰岩劣化试验. 敦煌研究, (3): 38—43.
- 杨赫赫, 2017. 敦煌莫高窟石窟建筑形制演化与特征探析. 石河子大学学报(哲学社会科学版), 31(3): 68—75.
- 杨赫赫, 王其亨, 2022. 敦煌莫高窟石窟建筑形制与结构特征探析. 西北大学学报(自然科学版), 52(2): 199—212.
- 杨鸿锐, 刘平, 孙博, 等, 2021. 冻融循环对麦积山石窟砂砾岩微观结构损伤机制研究. 岩石力学与工程学报, 40(3): 545—555.
- 杨华南, 2003. 涇县千佛寺石窟病害原因及保护措施初探. 中原文物, (5): 82—84.
- 杨琳璐, 王中生, 周灵燕, 等, 2012. 苔藓和地衣对环境变化的响应和指示作用. 南京林业大学学报(自然科学版), 36(3): 137—143.
- 杨全城, 姚春梅, 刘善军, 等, 2015. 山东省山丘区地质灾害发育与地形地貌相关性分析. 中国地质灾害与防治学报, 26(2): 93—96.
- 杨圣奇, 刘相如, 李玉寿, 2012. 单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析. 岩石力学与工程学报, 31(S2): 3539—3546.
- 杨圣奇, 吕朝辉, 渠涛, 2009. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验和模拟. 中国矿业大学学报, 38(6): 774—781.
- 杨天宇, 刘于源, 2018. 乐山大佛岩体卸荷裂隙及影响初探. 鄂州大学学报, 25(2): 106—109.
- 杨有贞, 何贤元, 康亚明, 等, 2018. 干湿循环作用下贺兰山岩画载体砂岩风化特征. 科学技术与工程, 18(7): 31—37.
- 袁建新, 1993. 岩体损伤问题. 岩土力学, 14(1): 1—31.
- 张傲, 方云, 徐敏, 等, 2012. 龙门石窟碳酸盐岩体文物风化作用模拟试验研究. 中国岩溶, 31(3): 227—233.
- 张兵峰, 2018. 川渝石窟裂隙水病害机理研究: 以大足石刻大佛湾卧佛区域为例. 中国文化遗产, (4): 27—34.
- 张成渝, 2002. 洛阳龙门石窟寺岩体振动疲劳效应初析. 北京大学学报(自然科学版), 38(6): 809—816.
- 张成渝, 2003. 洛阳龙门石窟水的赋存对岩体稳定性的影响. 北京大学学报(自然科学版), 39(6): 829—834.
- 张国军, 李最雄, 2005. 莫高窟北区崖体病害. 敦煌研究, (4): 71—74, 116.
- 张金风, 2008. 石质文物病害机理研究. 文物保护与考古科学, 20(2): 60—67.
- 张景科, 梁行洲, 叶飞, 等, 2018. 敦煌莫高窟北区崖体沿纵深方向风化特征研究. 工程地质学报, 26(6): 1499—1507.
- 张景科, 张理想, 郭青林, 等, 2021. 庆阳北石窟寺砂岩表层风化特征与地层岩性的关系研究. 西北大学学报(自然科学版), 51(3): 344—352.
- 张梦婷, 王恩德, 李斌, 等, 2021. 云冈石窟石质类文物地质损伤机制研究. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 40(3): 220—224.
- 张明泉, 温玲丽, 王旭东, 等, 2009. 敦煌莫高窟保护工程施工振动对洞窟文物的影响. 岩石力学与工程学报, 28(增刊2): 3762—3768.
- 张明泉, 张虎元, 曾正中, 等, 1997. 敦煌莫高窟保护中的主要环境问题分析. 干旱区资源与环境, 11(1): 34—38.
- 张娜, 王水兵, 赵方方, 等, 2018. 软岩与水相互作用研究综述. 水利水电技术, 49(7): 1—7.
- 张永, 武发思, 苏敏, 等, 2019. 石质文物的生物风化及其防治研究进展. 应用生态学报, 30(11): 3980—3990.
- 张赞助, 汪东云, 付林森, 等, 1993. 北山石窟寺岩体风化产物的形成及其破坏作用. 重庆建筑工程学院学报, 15(3): 67—75.
- 张子端, 王建力, 何潇, 等, 2006. 陕西地质灾害形成条件与对策探讨. 安徽农业科学, 34(22): 5951—5953.
- 赵莽, 方云, 程邦, 等, 2016. 花山岩画岩体开裂机理统计分析. 文物保护与考古科学, 28(2): 24—31.
- 赵以辛, 王安建, 张军, 等, 2002. 南响堂石窟表面粉尘特征及对石雕影响的研究. 环境科学研究, 15(6): 12—16.
- 赵玉波, 谭松娥, 2012. 库木吐喇石窟砂岩工程地质特征研究. 人民长江, 43(增刊1): 58—59.
- 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等, 2010. 边坡地震稳定性分析探讨. 地震工程与工程振动, 30(2): 173—180.
- 曾钤, 付宏渊, 贺炜, 等, 2013. 降雨入渗因素对炭质泥岩路堤边坡稳定性的影响. 公路交通科技, 30(3): 39—44, 58.
- 曾行娇, 2018. 砂岩类石质文物脱盐材料效果实验室评估研究(硕士学位论文). 西安: 西北大学.
- 周航, 廖昕, 陈仕阔, 等, 2022. 基于组合赋权和未确知测度的深埋隧道岩爆危险性评价——以川藏交通廊道桑珠岭隧道为例. 地球科学, 47(6): 2130—2148.
- 周跃飞, 陆现彩, 王汝成, 等, 2008. 长石微生物风化作用的研究现状与展望. 地球科学进展, 23(1): 17—23.
- 祝介旺, 常中华, 刘恩聪, 等, 2009. 龙游石窟1号洞破坏成因及加固对策研究. 工程地质学报, 17(1): 126—132.
- 朱容辰, 2010. 边坡岩体卸荷分带性研究. 铁道勘察, 36(5): 46—50.
- 宗静婷, 2011. 广元千佛崖摩崖石质文物保护的环境地质问题研究(硕士学位论文). 西安: 西北大学.