

# 基于岩石微相龙门石窟风化病害机理研究

农明艳<sup>1</sup>, 严绍军<sup>\*2</sup>, 陈建平<sup>3</sup>, 马朝龙<sup>3</sup>, 范子龙<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074; 2. 陕西文物保护研究院, 西安 710075;  
3. 龙门石窟研究院, 河南 洛阳 410300)

**摘要:** 石质文物病害的发育受岩石本身的成分、物理特性以及所处环境的控制, 对岩石微相进行分析有助于了解岩石初始状态下的岩性与结构, 为石质文物病害机理分析提供微观视角。本文通过对龙门石窟病害宏观表现的研究, 结合窟区岩石薄片、扫描电镜等资料, 分析岩石矿物成分、微结构及微孔隙在病害发展过程中的控制作用。研究结果表明, 方解石溶蚀速度大于白云石, 这与龙门石窟崖壁保存现状相符; 随着矿物晶粒的增大溶蚀速度逐减, 成分均一性差的碳酸盐岩更易受选择性溶蚀作用的影响; 岩石微孔隙控制着岩石孔隙度与渗透率, 进而影响溶蚀等与水有关的风化作用。

**关键词:** 微相; 石质文物; 病害机理; 龙门石窟; 微观分析  
**中图分类号:** TU45 **文献标识码:** A

## Study on the mechanism of weathering diseases based on rock microfacies in Longmen Grottoes

Nong Mingyan<sup>1</sup>, Yan Shaojun<sup>\*2</sup>, Chen Jianping<sup>3</sup>, Ma Chaolong<sup>3</sup>, Fan Zilong<sup>3</sup>

(1. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Shaanxi Institute of Cultural Relics Protection, Xi'an 710075, China*; 3. *Academy of Longmen Grottoes, Luoyang 410300, China*)

**Abstract:** The disease of stone cultural relics is controlled by the components and physical properties of the rock itself and the environment where it is located. The analysis of rock microfacies is helpful to understand the lithology and structure of the rock in its initial state, and provides a microscopic perspective for the analysis of the disease mechanism of stone cultural relics. In this paper, the macroscopic manifestation of the disease in Longmen Grottoes was studied, and the controlling effects of rock mineral composition, microstructure and micro-pores in the development of the disease are analyzed by combining the rock thin section and scanning electron microscope data. The results show that the dissolution rate of calcite is higher than that of dolomite, which is consistent with the preservation status of Longmen Grottoes. With the increase of mineral grains, the dissolution rate decreases, and the carbonate rocks with poor homogeneity are more susceptible to selective dissolution. The micropores control the porosity and permeability of rocks and thus affect the weathering processes related to the water such as dissolution etc.

**Key words:** microfacies; stone cultural relics; disease mechanism; Longmen Grottoes; micro-analysis

## 0 引言

“微相”这一术语最早由 Brown(1943年)提出, 意指显微镜下薄片上岩石所呈现的鉴别标志。现在“微相”一词已经发展成了一个综合性的术语, 既能描述岩石的物理特征, 也可描述岩石的成岩过程及沉积环境等, 与宏观相相对应。

最有效的微相研究实验技术是薄片与超精细显微镜和矿物学、地球化学联合研究。在考古学中,

微相分析被用于解决古建筑石材原产地、确定工艺品的制作技术、考察古代贸易路线等问题。在石质文物保护中微相分析也早有应用<sup>[1,2]</sup>, 岩石的薄片

**收稿日期:** 2021-06-07; **修订日期:** 2021-08-31

**作者简介:** 农明艳(1996-), 女(壮族), 广西崇左人, 硕士。

**\* 通讯作者:** 严绍军(1973-), 男(汉族), 四川绵竹人, 博士, 副教授。

资料可为岩石定名和确定岩石矿物组成提供依据,借助扫描电镜技术可以观察文物病害部位的微观形貌。但大多数成果更侧重于对比劣化试验前后岩石的力学性质,对于微相实验结果的分析浅尝辄止。

石窟寺通常是依傍山体顺势而建的窟龕、造像等,区域的地质构造与地层岩性对窟龕病害演化趋势框架起主导作用,故微相分析提供的岩石物理特征等微观信息对于石窟病害机理研究具有重大意义。本文以龙门石窟为例,在对凤山组、张夏组、徐庄组地层岩石薄片与扫描电镜资料基础上,结合X射线衍射和化学成分分析等手段,对龙门石窟常见病害的产生机理进行探讨。

## 1 龙门石窟区域自然概况

龙门石窟位于河南省洛阳市,地处龙门山—香山断块,四周被宜阳断裂、草店断裂、郟庄断裂和龙门断裂所切割,此外,在断块内还发育有8条小断层。区域内地层岩性主要为中、晚寒武世的灰岩和白云岩,岩层倾向为 $340\sim 10^\circ$ ,倾角 $20\sim 30^\circ$ 。山体共发育有四组优势节理裂隙:层面裂隙、卸荷裂隙以及两组与边坡走向高角度相交的构造裂隙<sup>[3]</sup>。区内地下水丰富,泉水可达14处,多为 $\text{HCO}_3^- (\text{Ca}+\text{Mg})$ 型水。龙门石窟东西两山隔岸相对,伊河从中穿过。洛阳市属于典型的温带大陆性气候,多年平均降雨量为580mm,夏季平均气温 $27.4^\circ\text{C}$ ,冬季平均 $0.4^\circ\text{C}$ 。

裸露的地层由新到老为凤山组、长山组、崱山组、张夏组、徐庄组、毛庄组、馒头组。石窟中的潜溪寺、宾阳三洞、摩崖三佛开凿于凤山组的细晶白云岩中;西山的万佛洞、奉先寺、古阳洞、药方洞和东山的看经寺等石窟开凿于张夏组的鲕粒灰岩中;极南洞和擂鼓台等开凿于徐庄组的泥质条带灰岩中<sup>[4]</sup>。

## 2 窟区病害现状

龙门石窟岩体为碳酸盐岩,整体风化病害严重,受地质特征的影响,自北向南(地层自新到老)风化程度逐渐加重。

### 2.1 裂隙病害

裂隙病害是指石窟所在立壁岩体、石窟围岩和雕刻品因裂隙交切而造成立壁边坡失稳、洞窟围岩崩落、佛像和雕刻品掉块等破坏现象<sup>[5]</sup>。裂隙可分为构造裂隙、浅表性裂隙和机械裂隙<sup>[6]</sup>。

构造裂隙规模较大,通常由上至下贯穿岩体,容易汇聚雨水,部分张开的构造裂隙受强烈的雨水

冲刷,在坡面形成冲沟,见图1。此类冲沟在古阳洞以南较集中,可能是由于靠近草店断裂,构造裂隙较发育的缘故。此外,还有南北向延伸的层面裂隙,也是常见的构造裂隙。裂隙除了造成围岩崩落、造像缺失等机械性破坏之外,还为雨水、岩溶水等暂时性流水提供了渗水通道,造成窟内渗水,加剧了造像的溶蚀病害。卸荷裂隙是窟区普遍存在的机械裂隙,与层面裂隙共同构成洞窟的主要渗水通道。据统计<sup>[4]</sup>,龙门石窟的各大中型窟龕中,平均每个窟龕有9条暂时性渗水裂隙,渗水严重的双窟,洞内有20多条渗水裂隙,出水点50余个。

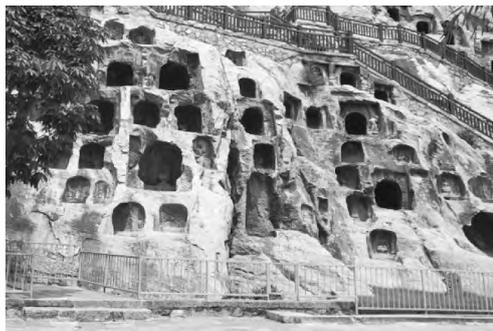


图1 构造裂隙

Fig. 1 Structural fracture

### 2.2 溶蚀病害

碳酸盐岩系可溶岩,在水的参与下易与空气中的 $\text{CO}_2$ 发生反应,岩石因碳酸化作用而被溶蚀。溶蚀病害可分为两类:一是由于地质和现代溶蚀作用在洞窟岩石中形成的溶洞、溶沟或溶孔等溶蚀形态<sup>[7]</sup>;二是裂隙水流经之处留下的钙质沉积物覆盖层,见图2。



图2 洞窟沉淀物堆积

Fig. 2 Deposit on the cave

钙质沉积物的存在直接影响着造像的观赏价值,并且由于其与石材表面黏附较紧密,剔除覆盖层容易导致文物本体被破坏。在方云等<sup>[7]</sup>的调查中,龙门石窟的钙质沉淀覆盖率为 $10\%\sim 30\%$ 。在路洞的洞顶,岩溶沉淀物覆盖率高达 $76.2\%$ 。在更

早的调查中<sup>[4]</sup>,半数以上的龛窟洞内沉淀物覆盖面积均超 50%。由于地层总体向北倾,沉淀物的分布具有洞窟南壁多于北壁,较集中于窟顶的特点。其中的潜溪寺壁面有大面积的灰绿色和灰白色钙质沉淀,在南壁形成石钟乳,具网纹状结构,质地坚硬,风化后的沉淀物呈褐黄色,质地较为松散,洞窟内沉淀物主要化学成分为  $\text{CaCO}_3$ , 少部分含  $\text{CaSO}_4$ <sup>[8]</sup>。

### 2.3 表面风化

窟区岩体表面风化形态多样,多个洞窟内壁及造像常见片状风化、起壳、鼓离等病害。688 号窟右壁及正壁和 689 号窟佛头及佛身腰部表面均出现片状风化,参见图 3 和图 4,局部起壳脱落,伴有盐碱病害。取 688 号窟墙面片状风化样进行化学成分分析,其主要矿物成分为方解石( $\text{CaCO}_3$ )、石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )。石窟中奉先寺以南岩体多为含泥质条带夹层的石膏化微晶灰岩,微裂隙及其发育,表面岩体破碎,顺层理风化差异明显,大范围呈现出条带状风化,见图 5。张夏组灰岩鲕粒含量高,通常抗风化能力较弱的灰岩胶结物首先风化破坏,导致鲕粒凸出或因失去支撑而脱落,形成孔洞,见图 6。



图 3 墙面片状风化

Fig. 3 Fragmentation of limestone on the cave wall



图 4 佛头片状风化

Fig. 4 Fragmentation of limestone on the buddha head

### 2.4 生物侵蚀

生物侵蚀指包括高等植物、微生物及藻类等生

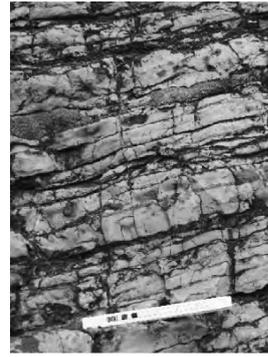


图 5 条带状风化

Fig. 5 Banded weathering



图 6 张夏组鲕粒差异风化

Fig. 6 Differential weathering of the oolitic limestone from Zhangxia Formation

物活动对岩石表面造成的侵蚀。其中植物根系的生长会对岩体裂隙施加压力,使石窟围岩裂隙不断扩大,劈裂岩体。而微生物繁殖代谢产生的有机酸会腐蚀石材,同时会使石材染上黑色、黛青色或紫色等斑块。

## 3 窟区碳酸盐岩微相分析

### 3.1 物质组成

为查明区域内岩石的物质组成,将龙门石窟区域内的凤山组划分为 10 段,张夏组划分为 13 段,徐庄组划分为 6 段,在各段岩层上取样并进行了岩石全化学分析、X 射线矿物成分分析及薄片鉴定等试验。

纯石灰岩的理论化学成分中  $\text{CaO}$  为 56%,  $\text{CO}_2$  为 44%; 纯白云岩的理论化学成分  $\text{CaO}$  为 30.4%,  $\text{MgO}$  为 21.7%,  $\text{CO}_2$  为 47.9%, 但一般自然界中的碳酸盐岩另含有其他氧化物和一些微量元素<sup>[9]</sup>。烧失量主要代表了碳酸盐岩  $\text{CO}_2$  含量。由化学成分分析结果(表 1)可知,凤山组白云岩的  $\text{CaO}$  与  $\text{MgO}$  含量比接近 3:2, 岩石纯度较高; 张夏组灰岩具有不同程度的白云石化现象, 部分质纯的灰岩更易溶蚀; 徐庄组灰岩与张夏组灰岩相比, 灰岩纯度较

低, CaO 含量较少, 含有更多的 SiO<sub>2</sub>, 即可能含有更多的石英或泥质等陆源碎屑。另外, 碳酸盐岩的酸不溶物的主要成分黏土矿物和碎屑石英, 在一定程度上影响碳酸盐岩的溶蚀能力。从表 1 看, 酸不溶物含量恰好与 SiO<sub>2</sub> 含量成正比。表 2 为窟区岩石的 X 射线矿物成分分析结果。

3.2 微观结构

从龙门石窟岩体的薄片鉴定与扫描电镜结果上看, 不同地层岩石的微观结构和矿物成分表现出一定的规律性与差别, 因篇幅有限, 仅列举部分代表性图片加以说明。

(1) 凤山组

根据凤山组岩石薄片(图 7(e)、(f)) 可定名为

表 1 龙门石窟区域岩石化学成分分析结果

Table 1 Results of chemical composition analysis in Longmen Grottoes area

化学成分	百分含量 (%)		
	凤山组白云岩	张夏组灰岩	徐庄组灰岩
SiO <sub>2</sub>	0.3~14.4	0~2.95	2.11~15.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22~4.08	0.2~1.06	0.73~5.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42~1.37	0.15~0.96	0.36~2.21
MgO	18.44~24.04	1.21~12.72	1.16~7.9
CaO	22.3~29.14	40.57~53.49	32.68~51.74
Na <sub>2</sub> O	0~0.08	0.02~0.08	0.07~0.13
K <sub>2</sub> O	0.1~2.19	0.07~0.27	0.17~1.66
MnO	0.01~0.03	0.01~0.02	0.02~0.04
TiO <sub>2</sub>	0.01~0.11	0.01~0.05	0.04~0.18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01~0.03	0.01~0.03	0.01~0.05
烧失量	36.82~46.03	42.23~44.95	34.3~42.75
酸不溶物	2~24	1~8	5~26

表 2 龙门石窟区域岩石矿物组成 X 衍射分析结果 (%)

Table 2 Results of mineral composition by X diffraction in Longmen Grottoes area (%)

岩性	方解石	白云石	长石	石英	其他
凤山组白云岩	0~1.87	73.13~98.74	3.36~14.14	0.55~1.94	0.88~2.99
张夏组鲕粒灰岩	66.15~94.77	9.57~28.79	0~11.35	0.21~6.45	0~5.63
徐庄组灰岩	50.47~91.14	10.8~33.47	0~9.74	0~6.35	0~2.87

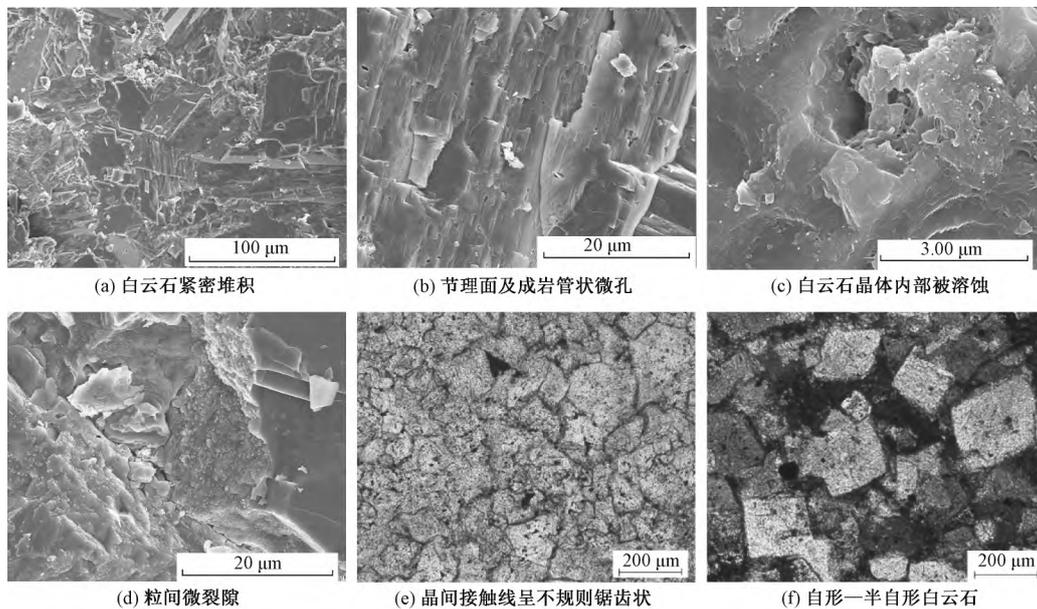


图 7 凤山组白云岩扫描电镜与薄片

Fig. 7 Results of scanning electron microscopy and section identification of dolomite from Fengshan Formation

白云岩, 细晶变晶结构, 白云石为岩石主体, 多不规则粒状, 少量半自形, 粒度多小于 0.1mm, 白云石粒间被变余泥晶白云石充填。从扫描电镜图(图 7(a)~(d)) 可以看出, 白云石胶结紧密, 孔隙由粒内孔、溶蚀孔、粒间成岩缝组成。

(2) 张夏组

根据张夏组岩石薄片(图 8(d)、(e)、(f)) 定名为鲕粒白云质灰岩, 主要由鲕粒、方解石、白云

石组成, 白云石化强烈。鲕粒形态多为圆粒状, 隐约见圈层结构或放射状结构, 粒度多为 0.2~0.8mm, 成分为重结晶的方解石或白云石, 含量为 25%~65%。方解石基质粒径多为粉晶级、细晶级, 多为不规则粒状。白云石多为粉晶, 较方解石自形, 胶结方式为孔隙式—基底式。扫描电镜中可看到, 鲕粒与基质的接触缝(图 8(a))、方解石基质的溶蚀孔(图 8(b)) 以及粒内孔(图 8(c))。

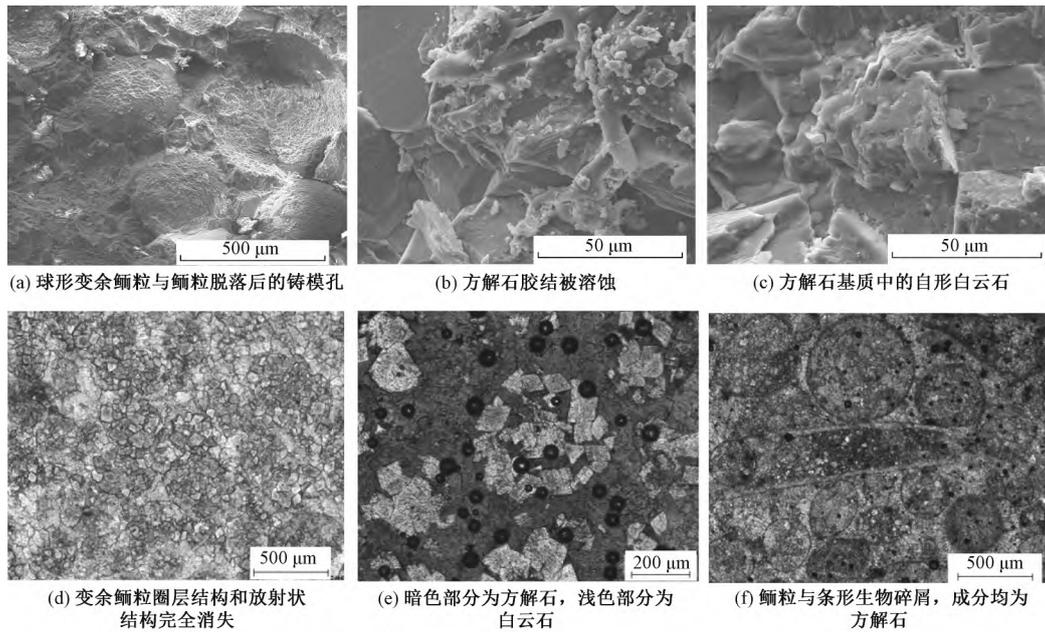


图 8 张夏组灰岩扫描电镜与薄片

Fig. 8 Results of scanning electron microscopy and section identification of limestone from Zhangxia Formation

(3) 徐庄组

徐庄组岩石岩性具有不均一性，第二段为含泥晶灰岩条带的灰质白云岩，第三、四、七段主要为变晶灰岩，方解石粒度在微晶到粉晶范围内变化，第五段为鲕粒灰岩，灰岩的方解石含量大多数在 85% 以上。在薄片可观察到不同岩性交界处有明

显的缝合线(图 9 (d)、(e)、(f))，野外考察发现，岩体常沿缝合线处开裂形成顺层节理裂隙。从扫描电镜结果(图 9 (a)、(b)、(c))看，徐庄组灰岩的方解石基质粒度多小于张夏组，晶体粒内孔隙不发育，方解石与白云石胶结紧密，方解石基质之间具有微小粒间孔隙。

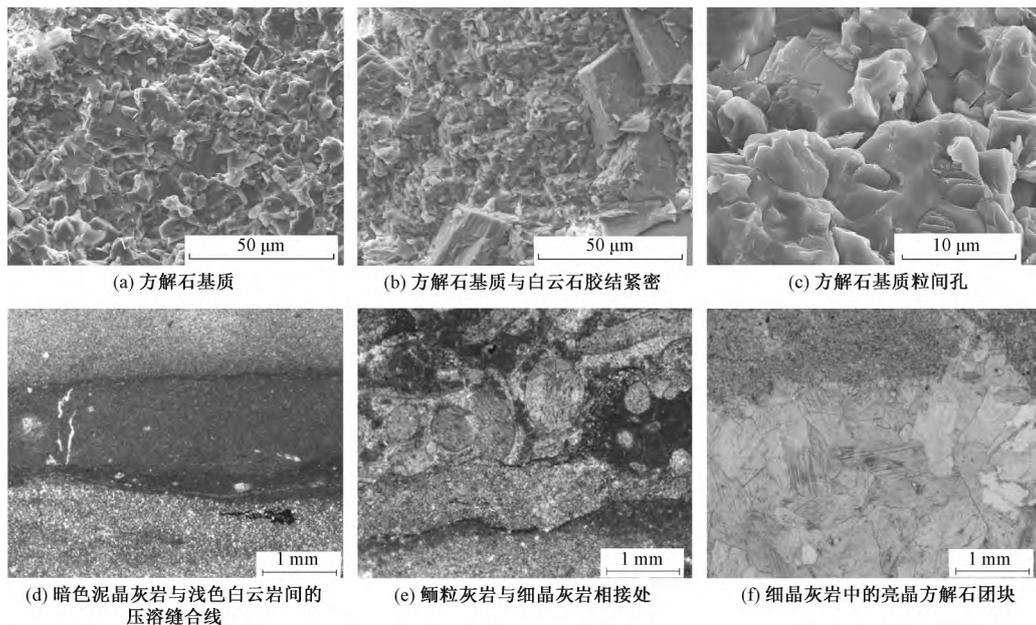


图 9 徐庄组灰岩扫描电镜与薄片

Fig. 9 Results of scanning electron microscopy and section identification of limestone from Xuzhuang Formation

4 岩石微相对石窟病害发展的控制

岩石微相与岩石的密度、孔隙度、渗透率、硬度

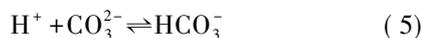
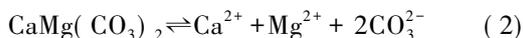
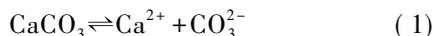
和抗压强度等物理性质密切相关，进一步影响着岩石的抗风化能力。窟区内龛窟造像主要开凿于三种不同地层的碳酸盐岩上，其病害发育程度具有明显

的差异,整体风化程度由小到大为:凤山组、张夏组、徐庄组。通过分析、总结不同地层岩石的矿物组成、微观结构等微相特征的规律,认为岩石微相对石窟病害发展的控制主要表现在以下几个方面。

### (1) 矿物成分

龙门石窟区域内均为可溶性碳酸盐岩,主要由方解石、白云石等碳酸盐组分以及非碳酸盐组成,对大气中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 等酸性气体含量的变化敏感,造像表面溶蚀病害发育。

凤山组主要为白云岩,矿物成分以白云石为主;张夏组主要为鲕粒白云质灰岩,以方解石为主;徐庄组主要为微晶、粉晶灰岩,夹杂有条带状灰质白云岩与鲕粒灰岩,主要成分为方解石。三组地层的主要矿物均在85%以上,质纯,有利于溶蚀作用。方解石( $\text{CaCO}_3$ )与白云石( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )遭受 $\text{CO}_2$ 溶蚀作用的主要化学反应式如下:



$\text{Mg}^{2+}$ 的半径比 $\text{Ca}^{2+}$ 小, $\text{Mg}-\text{O}$ 键能比 $\text{Ca}-\text{O}$ 大,因此,白云石的矿物晶格能比方解石要大,晶体稳定性好。故在相同的外界因素作用下,方解石的溶解性比白云石强,近地表环境中方解石比白云石更容易风化<sup>[10]</sup>。聂跃平<sup>[11]</sup>和翁金桃<sup>[12]</sup>的研究表明,碳酸盐岩的比溶解度和比溶蚀度与岩石中方解石、 $\text{CaO}$ 呈良好的相关性,比溶蚀度随 $\text{MgO}$ 含量的增加而降低,灰岩的溶蚀量几乎是白云岩的一倍。龙门石窟不同地层风化程度的差异也支持了这一结论:开凿于凤山组白云岩上的大型造像数量较多,完整度较高,张夏组白云质灰岩次之,徐庄组灰岩上多小型龛窟,围岩破碎,风化严重。天然状态下的碳酸盐岩溶解是一个复杂的物理化学反应,除矿物成分外,碳酸盐岩的溶蚀也受水中 $\text{CO}_2$ 含量、温度、 $\text{pH}$ 值、离子浓度以及水动力条件和扩散作用等因素的影响。

非碳酸盐物质主要为黏土矿物和碎屑石英,这些矿物一般在层面和层理面上富集,随着黏土矿物含量增加,岩石的冰劈作用将会增强,同时抗干湿循环能力降低。徐庄组灰岩泥质含量较多,受冰劈作用、曝晒脱水等的影响可能更显著。

龙门石窟的鲕粒表现出明显的差异风化(参见图6),鲕粒抗风化能力显著好于基质,这可能与鲕粒含有难溶物质有关。根据对张夏组鲕粒灰岩的能

谱分析结果<sup>[12]</sup>,鲕粒比基质含有较多的 $\text{Mg}$ 和 $\text{Si}$ 元素,因此方解石基质被选择性溶蚀而低凹,造成难溶的鲕粒突出,从而形成了凹凸不平的粗糙表面。

### (2) 微结构

研究发现,随着晶粒的增大溶蚀速度逐减,通常认为颗粒支撑结构抗风化能力强于灰泥支撑结构,亮晶质强于泥晶质,因为细粒灰岩具有更高的比表面。龙门石窟碳酸盐岩结构较为复杂,区域内原岩主要为泥晶结构,经历区域浅变质后,大多数重结晶为粉晶、细晶变晶结构及变余鲕粒结构。研究区域内地层岩石结构未表现出明显的规律性,但总体上可以认为,凤山组白云岩基质粒度大于张夏组灰岩,而徐庄组灰岩基质粒度最小,这一规律与龙门石窟风化趋势一致。

在粒度分布方面,凤山组中白云石晶体颗粒大小较为均匀,矿物成分单一,胶结紧密;张夏组中的鲕粒基本由重结晶的方解石和白云石组成,与基质粒度差异较大,含有较多的生物碎屑,内部结构均匀性一般;徐庄组沉积分层明显,含鲕粒层、亮晶方解石团块、泥晶灰岩条带等,矿物成分与粒度非均质性较强,含泥量较高。物质组成的均一性影响着侵蚀性水的选择性溶蚀作用,对于成分相对均一的岩石或单矿物,优先溶蚀矿物晶体节理交汇处、边缘尖角处等离子及分子联系力薄弱部位,形成微孔。从扫描电镜图中可以看出,大多数晶体边缘被溶蚀,钝感较重。非均质的碳酸盐岩中,低晶格能的矿物与水分子形成的电位差较大,将首先遭到溶解破坏;当可溶质与非可溶质并存时,在其交界处可溶质一侧是选择性溶蚀的优势部位,其原因在于交界面处与侵蚀性水分子形成的电位差产生突变<sup>[13]</sup>。在白云质灰岩中,白云石晶体散布于方解石基质(图9(b)),加快了差异溶蚀的进程;在鲕粒灰岩中,鲕粒的成分、结构与胶结物存在差异,加速了胶结物的溶蚀,最终鲕粒突出然后脱落,岩石结构遭到破坏(图6)。

### (3) 微孔隙

岩石的微孔隙包括原生孔隙和次生孔隙,在薄片能够识别的常见孔隙有粒间孔、粒内孔、铸模孔隙等。微孔隙的几何特征与含量影响着岩石的孔隙度和渗透率,决定了与水有关的风化作用的难易程度。孔隙的大小及其分布决定着岩石的水饱和度和,是岩石坚固度和耐崩解性的重要控制因素<sup>[14]</sup>。

表3列出了龙门石窟岩石物理性质指标,分析表3可知,凤山组白云岩与徐庄组灰岩孔隙率和吸水率相近,张夏组鲕粒灰岩孔隙率极高,大约为其

表3 龙门石窟岩石物理性质<sup>[4]</sup>  
Table 3 Physical properties of rock<sup>[4]</sup>

岩性	天然容重 (g/cm <sup>3</sup> )	比重	孔隙率	含水率	吸水率	备注
细、极细白云岩	2.72	2.68	2.92	0.487	0.408	宾阳洞、潜溪寺 (凤山组)
亮晶鲕粒灰岩	2.70	2.71	9.3	0.095	0.034	万佛洞、奉先寺 (张夏组)
去膏化微晶灰岩	2.76	2.60	2.40	0.300	0.775	极南洞 (徐庄组)

余两组的3倍,吸水率反而最低,比其余两组低了一个数量级,孔隙率与吸水率不成正比。出现该结果可能是由于鲕粒脱落导致孔隙体积增大,孔隙率增大,但由于鲕粒脱落留下的溶蚀孔相对独立,互不连通,故吸水率低。徐庄组灰岩的吸水率相对较高,故可能含有较多的开放、连通孔隙,更易受与水有关的风化作用的影响。

酸介质对碳酸盐岩的腐蚀会形成海绵状—网格状溶蚀孔(图7(c)、图8(b)),从而增大水岩接触面积与作用时间,使水进一步溶蚀矿物内部,加深溶蚀深度,甚至导致残片脱落。

岩体的风化特性是由微观组构和宏观性质共同决定的,自然条件下的碳酸盐岩风化不仅受岩石矿物组分、微观结构和微孔隙的影响,岩石的构造与自然环境等也是研究岩石风化机理不可忽视的重要部分。例如徐庄组灰岩单从矿物成分看,易溶的方解石含量较少,酸不溶物含量高,其抗风化能力似乎更强,但实际上其岩石风化程度较高,因为徐庄组灰岩构造裂隙发育,并有明显的层状沉积韵律,此时,宏观差异性在风化作用上表现出更强的控制作用。因此,不应完全孤立地从微观层面进行研究,要结合岩石宏观性质对微观分析进行补充,才有可能还原岩石复杂的风化过程。

## 5 结论和建议

本文梳理了龙门石窟区域内病害现状,并基于窟区岩石薄片和扫描电镜等资料,分析岩石微相对石窟病害发展的控制作用,得出以下结论。

(1) 研究区域内整体病害较严重,石窟区内裂隙发育众多,导致渗水严重,溶蚀病害突出,岩溶沉淀物覆盖率高,龛窟造像表面风化严重,片状剥落、鲕粒差异风化、条带状风化普遍。

(2) 窟区主要开凿在凤山组白云岩、张夏组鲕粒灰岩、徐庄组灰岩上。凤山组白云岩白云石含量高,结构致密;张夏组鲕粒灰岩主要由方解石和白云石组成,鲕粒多由重结晶白云石或方解石组成;

徐庄组灰岩主要由方解石和白云石组成,具沉积层微构造,含鲕粒层、泥晶灰岩条带、亮晶方解石团块等,成分不均。

(3) 方解石较白云石易溶蚀,非碳酸盐组分对碳酸盐岩溶蚀具有重要影响。

(4) 晶粒小的矿物具有更大的比表面积,随晶粒增大溶蚀速度逐渐减小;成分均一性差的碳酸盐岩更容易受选择性溶蚀作用的影响,当可溶质与非可溶质并存时,可溶质的溶蚀速度加快。

(5) 岩石中的孔隙的大小和分布影响岩石孔隙度、渗透率,进而影响与水有关的风化作用。

龙门石窟是宝贵的历史遗产,为减少对文物的扰动,应把对环境的治理放在首位,加强环境监测,严格管制石窟周边工厂、汽车等污染气体的排放,制定相关的规章制度。旅游高峰期,可采取限流的方式降低窟内CO<sub>2</sub>浓度。另外,可沿龛窟修建排水沟、龛檐等,减少降水对石窟的冲刷破坏,同时通过降低窟内湿气来减少岩壁凝结水生成。

## 参 考 文 献

- [1] 张涛,黎冬青,张中俭.北京汉白玉石质文物的病害类型及病害机理研究[J].工程勘察,2016,44(11):7~13. Zhang Tao, Li Dongqing, Zhang Zhongjian. Damage categories and deterioration mechanism of stone cultural relics of white marble in Beijing [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44 (11): 7~13. (in Chinese)
- [2] 侯志鑫,者瑞,张中俭.砂岩质文物风化机理研究——以云冈石窟为例[J].工程勘察,2020,48(9):1~5. Hou Zhixin, Zhe Rui, Zhang Zhongjian. Experimental study on the weathering mechanism of sandstone cultural relics: A case study of Yungang Grottoes [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48 (9): 1~5. (in Chinese)
- [3] 张成渝.洛阳龙门石窟水的赋存对岩体稳定性的影响[J].北京大学学报(自然科学版),2003,(6):829~834. Zhang Chengyu. The effect on the rock mass stability due to hydro-occurrence environment in Longmen Grottoes of Luoyang [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2003, (6): 829~834. (in Chinese)
- [4] 刘景龙.龙门石窟保护[M].北京:中国科学技术出版社,1993,139~142. Liu Jinglong. Protection of the Longmen Grottoes [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993, 139~142. (in Chinese)
- [5] 潘别桐,黄克忠.文物保护与环境地质[M].武汉:中国地质大学出版社,1992,13~15. Pan Bietong, Huang Kezhong. Heritage conservation and environmental geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992, 13~15. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国行业标准.石质文物病害分类与图示(WW/T 0002-2007) [S].北京:文物出版社,2008,1~2.

- The Professional Standards of the People's Republic of China. Classification and legend on the deterioration of ancient stone objects (WW/T 0002-2007) [S]. Beijing: Cultural Heritage Press, 2008, 1~2. (in Chinese)
- [7] 方云, 顾成权, 严绍军等. 河南洛阳龙门石窟溶蚀病害机理的研究 [J]. 现代地质, 2003, (4): 479~482.  
Fang Yun, Gu Chengquan, Yan Shaojun et al. Research on the karst diseases of the Longmen Grottoes in Luoyang, Henan Province [J]. *Geoscience*, 2003, (4): 479~482. (in Chinese)
- [8] 朱博雅, 胡东波. 龙门石窟潜溪寺石刻造像表面清洗研究 [J]. 石窟寺研究, 2010, (1): 244~267.  
Zhu Boya, Hu Dongbo. The research on the cleaning of stone sculptures in Qianxisi cave at Longmen Grottoes [J]. *Study on the Cave Temples*, 2010, (1): 244~267. (in Chinese)
- [9] 邱家骧, 林景仟. 岩石化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1991, 243~246.  
Qiu Jiexiang, Lin Jingqian. *Petrochemistry* [M]. Beijing: Geological Press, 1991, 243~246. (in Chinese)
- [10] 孙强, 秦四清, 孙天明等. 岩石风化工程地质效应 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013, 100~101.  
Sun Qiang, Qin Siqing, Sun Tianming et al. *Engineering geological effects of rock weathering* [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2013, 100~101. (in Chinese)
- [11] 聂跃平. 碳酸盐岩性因素控制下喀斯特发育特征——以黔中南为例 [J]. 中国岩溶, 1994, (1): 31~36.  
Nie Yueping. Karst development characteristics under the lithologic control of carbonate rocks——case study in south-central Guizhou [J]. *Carsologica Sinica*, 1994, (1): 31~36. (in Chinese)
- [12] 翁金桃. 方解石和白云石的差异溶蚀作用 [J]. 中国岩溶, 1984, (1): 29~38.  
Weng Jintao. The differential corrosion of calcites and dolomites [J]. *Carsologica Sinica*, 1984, (1): 29~38. (in Chinese)
- [13] 窦彦. 龙门石窟龕粒灰岩风化机理研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017.  
Dou Yan. Weathering mechanism study on oolitic limestone of Zhangxia Formation in the Longmen Grottoes [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2017. (in Chinese)
- [14] 韩宝平. 微观喀斯特作用机理研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1998, 29~30.  
Han Baoping. Study on micro karstification mechanism [M]. Beijing: Geological Press, 1998, 29~30. (in Chinese)
- [15] Fluger E. 碳酸盐岩微相——分析, 解释及应用 [M]. 马永生译. 北京: 地质出版社, 2006, 802~803.  
Erick Fluger. *Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application* [M]. Translated by Ma Yongsheng. Beijing: Geological Press, 2006, 802~803. (in Chinese)

## (上接第29页)

- [2] 沙鹏, 伍法权, 李响等. 深埋隧道结构型围岩变形机理及控制研究 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (3): 112~120.  
Sha Peng, Wu Faquan, Li Xiang et al. Controlling structural deformation of surrounding rock passed by a deep-buried tunnel [J]. *Modern Tunneling Technology*, 2018, 55 (3): 112~120. (in Chinese)
- [3] 王梦恕, 谭忠盛. 中国隧道及地下工程修建技术 [J]. 中国工程科学, 2010, 12 (12): 4~10.  
Wang Mengshu, Tan Zhongsheng. The construction technology of tunnel and underground engineering in China [J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12 (12): 4~10. (in Chinese)
- [4] 熊造. 基于数值模拟的浅埋软弱围岩大断面隧道施工工法对比研究 [J]. 公路工程, 2016, 41 (4): 150~151.  
Xiong Zao. A comparative study of construction method of shallow tunnel with large section in weak surrounding rock based on numerical simulation [J]. *Highway Engineering*, 2016, 41 (4): 150~151. (in Chinese)
- [5] 王维富, 梅竹. 台阶法在超大断面浅埋偏压隧道中的应用研究 [J]. 隧道建设, 2017, 37 (12): 1578~1583.  
Wang Weifu, Mei Zhu. Study of application of bench method to shallow-buried asymmetrically-pressured railway tunnel of super-large cross-section [J]. *Tunnel Construction*, 2017, 37 (12): 1578~1583. (in Chinese)
- [6] 王鑫, 张泉, 徐亚利. 大断面土质隧道施工方法的选择与施工期监测结果分析 [J]. 工程勘察, 2010, 38 (2): 19~24.  
Wang Xin, Zhang Quan, Xu Yali. Selection of construction method for large section tunnel in soil and analysis of monitoring results during construction period [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, 38 (2): 19~24. (in Chinese)
- [7] 丁祖德, 彭立敏, 陈松洁等. 浅埋暗挖地铁隧道初期支护大变形分析及处理 [J]. 工程勘察, 2010, 38 (10): 9~13.  
Ding Zude, Peng Limin, Chen Songjie et al. Analysis on large deformation and engineering treatment of the primary retaining structure for shallow-embedded metro tunnel [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, 38 (10): 9~13. (in Chinese)
- [8] 王会霞. 监控量测在隧道初期支护施工中的作用 [J]. 工程勘察, 2013, 41 (6): 87~91.  
Wang Huixia. The function of monitoring and measurement in the construction of tunnel preliminary bracing [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2013, 41 (6): 87~91. (in Chinese)