

云冈第 9、10 窟列柱风化程度环境磁学无损评价

任建光^{1,2}, 黄继忠^{2,3}, 孟田华⁴, 王旭升⁵, 胡翠凤⁴

(1. 云冈石窟研究院, 山西 大同 037007; 2. 山西大同大学历史与旅游文化学院, 山西 大同 037009;
3. 上海大学文化遗产保护基础科学研究院, 上海 200444; 4. 山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009;
5. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 岩石的风化程度定量评价及无损探测是治理石质文物风化病害的前提和要求。本文在定性观察的基础上, 利用环境磁学便携式磁化率仪对云冈石窟风化砂岩现场进行风化程度的无损探测, 提出了片状风化砂岩风化程度定量分级标准, 并以云冈第 9、10 窟东列柱为对象进行了风化程度定量评价实践。认为云冈石窟片状风化砂岩风化程度可以分为 5 级: 新鲜中粗砂岩, 弱风化砂岩, 中等风化砂岩, 强风化砂岩和全风化砂岩。片状风化砂岩在风化过程中磁化率值具有先升高后降低的特征。云冈第 9、10 窟东列柱柱面朝向控制砂岩的风化程度, 朝北柱面风化程度最小, 属中等风化; 朝东、西柱面风化程度为强风化; 朝南柱面风化程度最大, 属全风化, 其主要受太阳辐射和雨水直接冲刷的影响。恢复修建保护性窟檐是延缓云冈第 9、10 窟列柱风化的最有效方法。

关键词: 云冈石窟; 风化程度; 环境磁学; 无损探测

中图分类号: TU459; P631.2

文献标识码: B

Non-destructive evaluation of weathering degree of columns in No. 9 and 10 cave of Yungang Grottoes with environmental magnetic meter

Ren Jianguang^{1,2}, Huang Jizhong^{2,3}, Meng Tianhua⁴, Wang Xusheng⁵, Hu Cuifeng⁴

(1. Yungang Grottoes Research Institute, Datong 037007, China; 2. Institute of History and Tourism and Culture, Datong University of Shanxi, Datong 037009, China; 3. Institute for Conservation of Cultural Heritage, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
4. Institute of Physics and Electronic Sciences, Datong University of Shanxi, Datong 037009, China;
5. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Quantitative evaluation and non-destructive detection of the weathering degree of rock is the prerequisite and demand to treat the stone relics weathering disease. Based on the qualitative observation, the weathering degree of sandstone of Yungang Grottoes is surveyed with portable magnetic susceptibility meter on site. A quantitative weathering grading standard of Yungang Grottoes is proposed. The quantitative evaluation of No. 9 and 10 cave of Yungang Grottoes is carried out. The weathering degree of Yungang Grottoes sheet weathered sandstone can be divided into five grades, i. e. fresh, weak decomposed, medium decomposed, highly decomposed and completely decomposed. The magnetic susceptibility values of sheet weathered sandstone increases first and then decrease in the weathering process. The weathering degree of sandstone column of No. 9 and 10 cave is controlled by the orientation. The weathering degree of north facing is medium decomposed which is the most slight, the east and west facing is highly decomposed, the south facing is completely decomposed which is mainly affected by the influence of solar radiation and rain erosion directly. The construction of a protective cave is the most effective measure to delay the weathering of the No. 9 and 10 cave columns of Yungang Grottoes.

收稿日期: 2018-11-26; **修订日期:** 2019-01-16

基金项目: 国家文物局文化遗产保护领域科学和技术研究课题 (2013-YB-HT-012); 山西省科技攻关项目 (20130313035-2); 山西省重点研发计划项目 (201803D31014)。

作者简介: 任建光 (1971-), 男 (汉族), 山西阳高人, 硕士, 副研究员。

Key words: Yungang Grottoes; degree of weathering; environmental magnetism; non-destructive detection

0 引言

岩石风化程度评价是研究石质文物风化病害涉及的重要内容,然而多年以来却没有太大的突破。长期以来,工程上对岩石风化程度的划分,国内外的有关规范、规程中都采用宏观地质特征的定性描述方法。虽然这种方法简单,有应用方便等优点,但因缺乏数量指标,标准不易掌握。20世纪70年代,国内外开始应用表征岩石微观特征的指标^[1,2]、岩石物理力学性质的指标^[3]和表征岩石矿物化学成分变化的指标^[4]对风化程度进行定量分级。虽然这些指标作为岩石风化程度定量划分标准,但这些指标不能及时测出,需要现场取样在实验室进行检测。文物是一种不可再生资源,在保护研究中不应该为了研究而对其造成任何损害,所以,前述许多研究方法和划分标准多难以在石质文物保护实际中推广采用,期许便捷、高分辨率的无损探测技术解决石质文物研究中的瓶颈问题。

环境磁学是20世纪80年代发展起来的一门介于地球科学、环境科学和磁学之间的新兴学科。它通过研究环境物质的磁性特征,探索磁性矿物在环境系统中的迁移、转化和组合规律,利用物质在磁性特征上的联系及其所反映的环境内涵,研究不同时空尺度的环境问题、环境过程和作用机制^[5]。磁学参数磁化率是表征岩石受磁化难易程度的物理量,主要用于土壤学研究^[6]、古气候与古环境变迁^[7]、人类活动影响与环境污染^[8]等研究中,近年来也被应用于与岩石风化相关的研究^[9-11]中。本文在定性观察的基础上,应用环境磁学便携式仪器,现场无损探测了云冈第9、10窟列柱风化砂岩的磁学特征,划分了风化等级,评价了其风化程度,为了解云冈石窟第9、10窟列柱的风化病害提供科学依据,也是石质文物无损探测技术的一次新的有益尝试。

1 云冈第9、10窟列柱的概况及研究区的气候特征

1.1 第9、10窟列柱的概况

云冈石窟第9、10窟是一组双窟,始建于公元484年,由冯太后的阉官王遇负责设计建造。每窟前雕凿两根八角列柱,颇具汉魏以来中国建筑“金楹(金柱)齐列,玉局(柱础)承跋”的遗风,类似于殿堂廊柱式的雕刻形制,却带有明显的印度甚至是希腊、罗马式的建筑风格样式,是当时中西方文化的交流与融合的典范。列柱为露明通顶石

柱,上细下粗,柱面各雕十层佛像,柱下为须弥座,座置于大象柱础上。朝北柱面雕刻保存完好,朝南柱面全部和朝东、西柱面部分雕刻及柱础象头皆已风化殆尽,已不能显示当年的富丽景象。列柱的风化病害类型主要是片状风化,部分已经起壳、片状剥落,详见图1、图2。

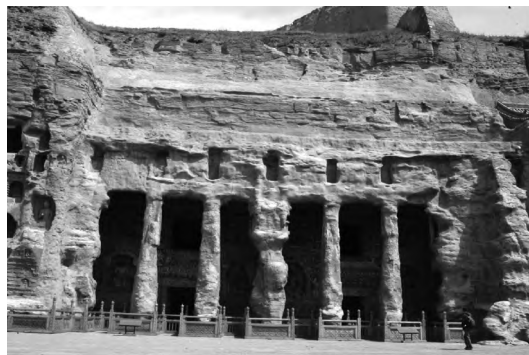


图1 云冈第9、10窟

Fig. 1 Cave 9 and cave 10 of Yungang Grottoes

1.2 研究区的气候特征

云冈石窟区域属温带大陆性半干旱气候。年平均气温 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$,1月最冷,月平均气温 -11.4°C ,7月最热,月平均气温 23.1°C ;年平均降水量 432.8mm ,雨季集中在7~9月,月最高降水量达到 100mm 以上;年平均蒸发量 1748mm ,其中6月最大蒸发量为 801.8mm ,12月蒸发量为 74.9mm ;年积雪在 20mm 左右,冻结期为10月下旬至次年4月,平均冻结深度 1.5m ,全年无霜期 120d 。

2 岩石风化程度环境磁学定量分级标准

2.1 理论基础

岩石磁性主要是由岩石所含铁磁性矿物产生的。EDX能谱分析表明,云冈石窟新鲜砂岩中含有丰富的铁元素。对新鲜砂岩及风化砂岩不同深度的化学成分测试表明:不同深度的风化砂岩,铁氧化物的成分、含量会发生变化^[12]。云冈石窟砂岩在风化过程中,伴随着氧化铁及氢氧化铁矿物形成和转变^[13]。

2.2 SM-30 便携式磁化率仪

现场测试使用的是捷克产SM-30便携式磁化率仪,在地理和地质方面用途广泛,由于具有高敏感度,达到 $1\times 10^{-7}\text{SI}$,能精确地测出顺磁性、反磁性、铁磁性岩石的磁化率。尺寸为 $100\text{mm}\times 65\text{mm}\times 25\text{mm}$,重量 180g 。6个测量模式,传感器直径 50mm ,在 20mm 范围内可获取90%的信号;自动调整测量,操



图 2 云冈第 9、10 窟立柱

Fig. 2 Cave 9, 10 columns of Yungang Grottoes

作简单。打开开关后, 凭借复杂的信号处理系统, 在几秒内就能显示出精确的测量数值, 同时它能有效地减少外部的电磁干扰和电子设备的噪音影响。具有体积小、重量轻、快速、成本低、对被测物体无破坏性的特点, 是非常理想的野外无损磁测仪器。

2.3 定量分级标准

云冈石窟开凿于中侏罗统上部云冈组 (J_2y) 砂岩透镜体上^[14], 岩性以中粗粒长石石英砂岩为主。根据云冈石窟风化岩石颜色光泽、岩体组织结构的变化及破碎情况、矿物成分的变化情况、物理力学特征的变化和锤击声等定性划分为五类: 新鲜砂岩, 弱风化砂岩, 中等风化砂岩, 强风化砂岩, 全风化砂岩。利用 SM-30 便携式磁化率仪现场对云冈石窟新鲜中粗砂岩、片状风化砂岩进行测试。使用 EXCEL2003 软件进行数据分析统计。图 3 中, 不同风化程度片状风化砂岩磁化率值频率分布曲线呈偏正态分布, 根据正态曲线在区间 ($\mu-2\sigma$, $\mu+2\sigma$) 内取值的概率为 95.4%, 以及与相邻磁化率

值频率分布曲线相交点数值, 对片状风化砂岩的风化程度进行划分, 结果见表 1。

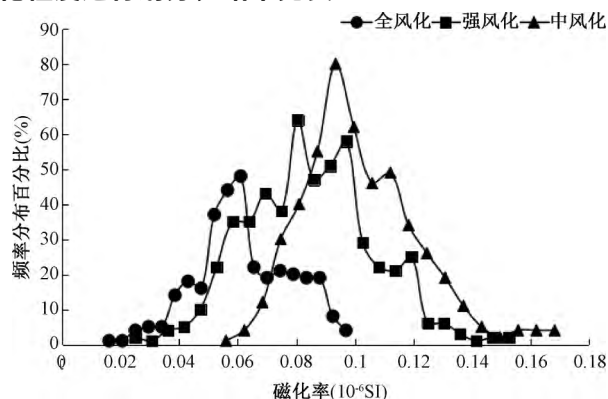


图 3 云冈石窟片状风化砂岩现场无损测试磁化率频率分布曲线图

Fig. 3 Frequency distribution curves of magnetic susceptibility for in-situ non-destructive testing of sheet weathered sandstone in Yungang Grottoes

表 1 云冈石窟片状风化砂岩现场无损测试磁化率值统计表

Table 1 Statistics of Yungang Grottoes sheet weathered sandstone non-destructive testing magnetic susceptibility values

风化程度	平均值 μ ($10^{-6}SI$)	有效值范围 ($10^{-6}SI$)	标准方差 σ ($10^{-6}SI$)	最大值 ($10^{-6}SI$)	最小值 ($10^{-6}SI$)	个数
新鲜砂岩	0.056			0.107	0.004	287
弱风化	0.051	0.035~0.066	0.016	0.117	0.005	140
中等风化	0.099	0.086~0.121	0.022	0.196	0.056	503
强风化	0.082	0.066~0.086	0.022	0.154	0.025	540
全风化	0.060	0.044~0.070	0.016	0.097	0.016	325

总体上看, 云冈石窟片状风化砂岩在风化过程中磁化率值具有先升高后降低的特征, 这种趋势

为: 弱风化阶段, 磁化率低; 中等风化阶段, 磁化率最高; 强风化阶段, 磁化率高, 较中等风化略有

下降;全风化阶段,磁化率较低。

3 云冈第9、10窟东列柱风化程度环境磁学无损评价

对于云冈第9、10窟东列柱,选取离地面2m高相对平坦表面作为现场测试位置,从列柱的西北角起,记为0起点,软皮尺沿水平线环绕一周,拉紧后用木质夹子固定,以此来标示测试点位置。利用SM-30便携式磁化率仪按西→南→东→北逆时针方向一周,每隔3cm进行测试。将现场所测试的数据,使用EXCEL2003软件制作出云冈第9、10窟东列柱测试点磁化率值随位置的变化曲线图。

3.1 云冈第9窟东列柱无损检测磁化率特征

从图4中可知,云冈第9窟东列柱朝东、西柱面磁化率值变化幅度比较大,朝南、北柱面磁化率值比较平稳,但朝北柱面的磁化率值高于朝南柱面。根据云冈石窟片状风化砂岩风化程度分级标准(见表1)可知,云冈第9窟东列柱各柱面测试点的风化情况为:朝西柱面测量区磁化率值变化范围($0.05 \sim 0.117$) $\times 10^{-6}$ SI,平均值为 0.0831×10^{-6} SI,为强风化砂岩;朝南柱面测量区磁化率值变化范围($0.05 \sim 0.074$) $\times 10^{-6}$ SI,平均值为 0.0629×10^{-6} SI,为全风化砂岩;朝东柱面个别磁化率值异常,是因为该测试点所处位置有残留裂隙加固过的痕迹,除去异常点后,磁化率值变化范围($0.058 \sim 0.117$) $\times 10^{-6}$ SI,平均值为 0.085×10^{-6} SI,为强风化砂岩;朝北柱面磁化率值变化范围($0.089 \sim 0.124$) $\times 10^{-6}$ SI,平均值为 0.1053×10^{-6} SI,为中等风化砂岩。

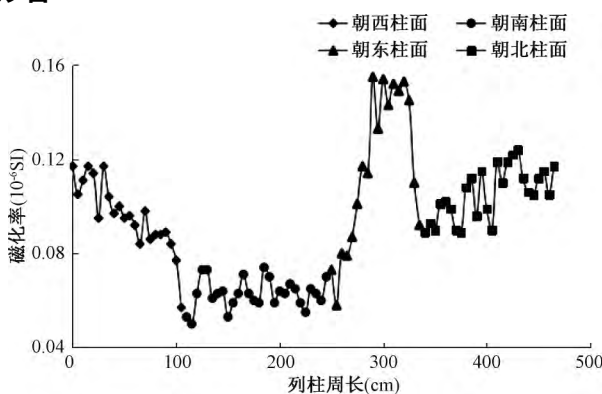


图4 云冈第9窟东列柱现场无损测试磁化率值曲线图
Fig. 4 On-site non-destructive magnetic susceptibility curve of cave 9 east column of Yungang Grottoes

3.2 云冈第10窟东列柱无损检测磁化率特征

从图5中可以看出,个别磁化率值大于 0.2×10^{-6} SI,是因为该测试点所处位置有残留裂隙加固

过的痕迹,除去异常点后,曲线图变为图6。从图6中可知,云冈第10窟东列柱朝东、西柱面磁化率值变化幅度比较大,朝南柱面、北柱面磁化率值比较平稳,变化幅度小,但朝北柱面的磁化率值高于朝南柱面。云冈第10窟东列柱的风化情况为:朝西柱面磁化率值变化范围($0.058 \sim 0.122$) $\times 10^{-6}$ SI,平均值为 0.082×10^{-6} SI,为强风化砂岩;朝南柱面磁化率值变化范围($0.053 \sim 0.071$) $\times 10^{-6}$ SI,平均值为 0.062×10^{-6} SI,为全风化砂岩;朝东柱面磁化率值变化范围($0.065 \sim 0.123$) $\times 10^{-6}$ SI,平均值为 0.084×10^{-6} SI,为强风化砂岩;朝北柱面磁化率值变化范围($0.092 \sim 0.168$) $\times 10^{-6}$ SI,平均值为 0.116×10^{-6} SI,为中等风化砂岩。

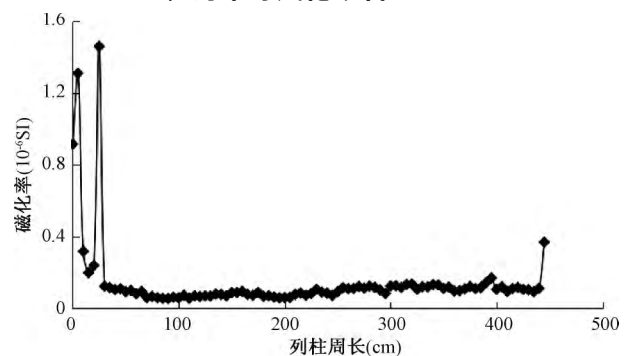


图5 云冈第10窟东列柱无损测试磁化率值曲线图
Fig. 5 On-site non-destructive magnetic susceptibility curve of cave 10 east column of Yungang Grottoes

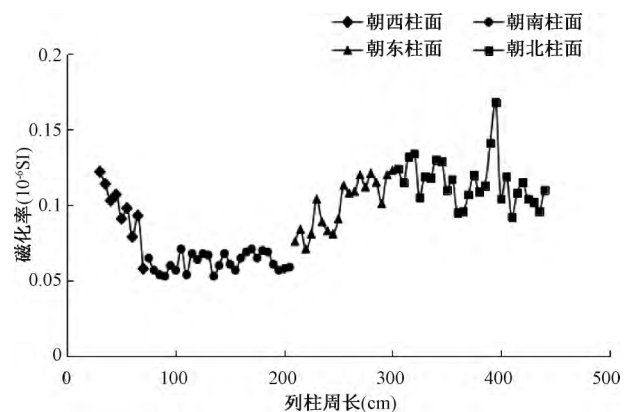


图6 云冈第10窟东列柱无损测试去噪后磁化率值曲线图
Fig. 6 On-site non-destructive testing denoising magnetic susceptibility curve of cave 10 east column of Yungang Grottoes

将云冈第9、10窟东列柱4个朝向柱面的磁化率平均值、最大与最小值以及相应的风化程度整理为表2,由表2可知,不同朝向柱面的测量区风化程度差异较大,朝向相同的柱面测量区风化程度相同。相比较而言,列柱面朝北的测量区风

化程度最小,属中等风化,朝东、西的测量区风化程度为强风化,朝南的测量区风化程度最大,属全风化。可知,对于风化程度而言,朝南>朝西≈朝东>朝北。

表2 云冈第9、10窟前东列柱现场无损测试磁化率值统计表

Table 2 Non-destructive testing magnetic susceptibility values of cave 9, 10 east columns of Yungang Grottoes

名称	柱面朝向	平均值 (10^{-6}SI)	最大值 (10^{-6}SI)	最小值 (10^{-6}SI)	风化程度
9窟东列柱	西	0.083	0.117	0.05	强风化
	南	0.063	0.074	0.05	全风化
	东	0.085	0.117	0.058	强风化
	北	0.105	0.124	0.089	中等风化
10窟东列柱	西	0.082	0.122	0.058	强风化
	南	0.062	0.071	0.053	全风化
	东	0.084	0.123	0.065	强风化
	北	0.116	0.168	0.092	中等风化

3.3 结果分析

利用环境磁学便携式 SM-30 磁化率仪器无损评价风化砂岩的风化程度是可行的,与传统的超声波^[1]检测石质文物风化程度技术相比,SM-30 便携式磁化率仪也可以评价岩石表面约 2cm 的风化程度,而且精度高,在现场能直接读取数据进行直观评价,避免了由于使用耦合剂对文物造成不必要的污染。因此,可为石质文物保护者制定合理的防风化措施提供可靠的基础数据,具有重要的参考价值。

通过对云冈第9、10窟东列柱风化程度进行研究发现,朝向对此处砂岩的风化具有控制作用。岩石的风化是在自身(如岩石的结构、物质组成及含量、胶结物类型等)和岩石所处的风化环境(如日照、风、降水和大气中的有害气体等)双重作用之下进行的。对于同一类岩石来说,风化程度主要受控于岩石所处的风化环境。而对处于半干旱环境下的云冈石窟来说,第9、10窟东列柱的风化程度主要受太阳辐射和雨水直接冲刷的影响,而朝向决定了受太阳辐射和雨水直接冲刷程度的大小。一般而言,朝南柱面、朝东西柱面受到的太阳辐射和雨水直接冲刷高于朝北柱面;其中南面太阳照射时间最长,西面次之,然后是东面,北面不照射。

岩石是由多种矿物组成,各矿物的热膨胀系数不一致。温差使岩石内部产生了热应力,热应力达到一定程度便可破坏岩石颗粒之间的连接。于是,南面和东西面的岩石的风化程度较大。热应力引起的岩石风化多呈片状剥落风化^[14],这与现场观察到的一致。另外,因为太阳辐射的影响,南面和东

西面的砂岩发生干湿循环和盐析风化的频率更大^[1]。

雨水对列柱的直接冲刷不仅使松动的岩石颗粒和切割体脱落,沿裂隙贯入发生机械潜蚀,雨水还浸湿软化岩壁的泥质物,造成岩体胶结力下降,使大片风化层脱落,且导致岩体体积膨胀、直至胀裂。2003年7月云冈石窟总降雨量为115.1mm,第9窟两列柱风化脱落砂量分别为739.2g、490.0g。云冈石窟周围分布着许多煤矿及生活区,生产和生活中发出大量含有 SO_2 、 NO_2 、 NH_4^+ 和 F^- 等气体污染物,当 SO_2 、 NO_2 与 H_2O 作用后,氧化成 SO_4^{2-} 、 NO_3^- ,使窟区雨(雪)水成分复杂,pH值呈酸性,对石窟石雕有强烈的腐蚀作用^[13]。历经千百年雨水冲刷使列柱风化破坏不断积累加剧,必然会造成列柱的失稳,危及洞窟的安全。

自北魏开凿石窟时,古先民们即已认识到太阳辐射和雨水直接冲刷对石窟保存的影响,在第13窟顶部还残留雕凿石檐的遗迹,辽代的“十寺”和清代的第5、6、7、8窟窟檐等木结构建筑,对石窟起到了一定的保护作用。另外,窟檐还可以隔离风沙、保持洞窟内温湿度的相对稳定。因此,为云冈第9、10窟修建保护性窟檐是延缓列柱风化的最有效方法^[12,18]。

4 结论

(1) 利用环境磁学便携式 SM-30 磁化率仪器无损检测结果评价风化砂岩的风化程度是可行的,可为石质文物保护者制定合理的防风化措施提供基础数据,具有重要的科学意义。

(2) 云冈石窟片状风化砂岩风化程度分为5级。云冈石窟片状风化砂岩在风化过程中磁化率值具有先升高后降低的特征。

(3) 云冈第9、10窟东列柱柱面朝向相同测量区风化程度相同,而不同朝向的柱面的测量区的风化砂岩的风化程度有较大的差异。相比较而言,列柱面朝向北的测量区风化程度最小,属中等风化,朝向东、西的测量区风化程度为强风化,朝南的测量区风化程度最大,属全风化。在当地风化环境下,云冈第9、10窟列柱的风化程度受朝向控制:朝南>朝西≈朝东>朝北。

(4) 太阳照射和雨水直接冲刷是云冈第9、10窟列柱风化的主要外部因素,修建保护性窟檐是延缓列柱风化的最有效办法。

参 考 文 献

- [1] 胡瑞林,岳中琦,王立朝等.斜长石溶蚀度:一种评价花

- 岗质岩石风化度的新指标 [J]. 地质论评, 2005, 51 (6): 649~655.
- Hu Ruilin, Yue Zhongqi, Wang Lichao et al. Plagioclase dissolution degrees: An evaluation granitic rock weathering degree of the new index [J]. Geological Review, 2005, 51 (6): 649~655. (in Chinese)
- [2] 尚彦军, 王思敬, 岳中琦等. 全风化花岗岩孔径分布—颗粒组成—矿物成分变化特征及指标相关性分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (10): 1545~1550.
- Shang Yanjun, Wang Sijing, Yue Zhongqi et al. Variation features of pore radius and particle diameter distributions and mineral content of completely decomposed granite and correlation of parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (10): 1545~1550. (in Chinese)
- [3] 陈洪江, 崔冠英. 风化花岗岩物理力学指标的统计分析 [J]. 港工技术, 1999, (4): 49~53.
- Chen Hongjiang, Cui Guanying. Statistical analysis for mechanical parameters of weathering granite [J]. Port Engineering Technology, 1999, (4): 49~53. (in Chinese)
- [4] 陈旭, 许模, 康小兵等. 玄武岩风化程度化学指标及微观特征研究 [J]. 人民长江, 2008, 39 (16): 32~34.
- Chen Xu, Xu Mo, Kang Xiaobing et al. Study on chemical index and microscopic characteristics of weathering degree of basalt [J]. Yangtze River, 2008, 39 (16): 32~34. (in Chinese)
- [5] Maher B. A.. Characterization of soils by mineral magnetic measurements [J]. Phys. Earth Planet. Inter., 1986, 42 (1~2): 76~92.
- [6] 俞劲炎等. 土壤磁学 [M]. 南昌: 江西科技出版社, 1991.
- Yu Jinyan et al. Soil magnetism [M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1991. (in Chinese)
- [7] Heller F, Liu S T. Palaeoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in china. Geophys. Res. Letter, 1986, 13 (11): 1085~1189.
- [8] 旺罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征 [J]. 科学通报, 2000, 45 (10): 1091~1094.
- Luo Wang, Liu Dongsheng, Lyu Houyuan. Characteristics of magnetic susceptibility of contaminated soil [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 41 (10): 1091~1094. (in Chinese)
- [9] 郎元强, 胡大千, 刘畅. 南海北部陆区岩石磁化率的矿物学研究 [J]. 地球物理学报, 2011, 54 (2): 573~587.
- Lang Yuanqiang, Hu Daqian, Liu Chang. Mineralogy study of magnetic susceptibility of rocks along the coast of the northern South China Sea [J]. Journal of Geophysics, 2011, 54 (2): 573~587. (in Chinese)
- [10] 徐海军, 金振民, 欧新功等. 超高压榴辉岩退变质作用对岩石磁化率的影响 [J]. 地球科学, 2004, 29 (6): 674~683.
- Xun Haijun, Jin Zhenmin, Ou Xingong et al. Effects of retrogression of ultrahigh - pressure eclogites on magnetic susceptibility and anisotropy [J]. Earth Science, 2004, 29 (6): 674~683. (in Chinese)
- [11] 任建光, 黄继忠, 王旭升. 云冈石窟龙王庙沟风化砂岩风化深度与风化速度环境磁学无损探测 [J]. 工程勘察, 2013, (9): 69~74.
- Ren Jianguang, Huang Jizhong, Wang Xusheng. Environmental magnetism nondestructive detection of weathering depth and velocity of sandstone in Longwangmiao valley of Yungang Grottoes [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, (9): 69~74. (in Chinese)
- [12] 黄克忠. 云冈石窟砂岩石雕的风化问题 [J]. 水文地质与工程地质, 1984, (3): 32~35.
- Huang Kezhong. Weathering of sandstone carvings in Yungang Grottoes [J]. Hydrogeological and Engineering Geology, 1984, (3): 32~35. (in Chinese)
- [13] 黄继忠, 袁道先, 万力等. 水岩作用对云冈石窟石雕风化破坏的化学效应研究 [J]. 敦煌研究, 2010, (6): 59~63.
- Huang Jizhong, Yuan Daoxian, Wan Li et al. A study on chemical effect on the water-rock interaction on the weathering of stone sculpture Yungang Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2010, (6): 59~63. (in Chinese)
- [14] 黄继忠. 云冈石窟地质特征研究 [J]. 东南文化, 2003, (5): 91~93.
- Huang Jizhong. Study on geological characteristics of Yungang Grottoes [J]. Southeast Culture, 2003, (5): 91~93. (in Chinese)
- [15] 孙进忠, 陈祥, 袁加贝. 石质文物风化程度超声波检测方法探讨 [J]. 科技导报, 2006, 24 (8): 19~24.
- Sun Jinzhong, Chen Xiang, Yuan Jiabei. Test methods for detecting weathering degrees of stone cultural relics [J]. Science & Technology Review, 2006, 24 (8): 19~24. (in Chinese)
- [16] Turkington A V, Paradise T R. Sandstone weathering: A century of research and innovation [J]. Geomorphology, 2005, 67 (1~2): 229~253.
- [17] Sancho C, Benito G. Factors controlling tafoni weathering in the Ebro Basin (NE Spain) Z [J]. Geomorphology, 1990, 34 (2): 165~177.
- [18] 任建光, 王旭升, 黄继忠等. 云冈石窟建造特征与水患的关系 [J]. 工程勘察, 2012, (11): 17~21.
- Ren Jianguang, Wang Xusheng, Huang Jizhong et al. The relationship between constructive characteristics and moisture induced diseases of Yungang Grottoes [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, (11): 17~21. (in Chinese)