

云冈石窟砂岩风化速率主控因子分析

索 楠, 徐金明, 卢宝明

Analysis of the main controlling factors of weathering rates in Yungang Grottoes sandstones

SUO Nan, XU Jinming, and LU Baoming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202401042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

陕西安塞城区基岩崩塌主控构造因素分析

Analysis on the main structural factors controlling rockfalls in downtown of Ansai, Shaanxi Province

王虎, 郭怀军, 王益民, 薛强, 王凯, 查显锋, 王晓勇, 孙萍萍, 程秀娟 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(3): 51-60

基于CT影像的砂岩文物结构特征分析

`\${suggestArticle.titleEn}`

王莹莹, 徐金明, 黄继忠 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(1): 127-134

泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39

藏东红层地区断裂对泥石流物源的控制作用

Analysis of the control effect of faults on material sources of debris flows in the red bed region of eastern Tibet: A case study of Waqu middle reaches in Gongjue County, Tibet

高波, 张佳佳, 陈龙, 田尤, 刘建康 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 20-31

基于风化红层泥岩蠕变特性的滑坡时效变形分析

Analysis on time-dependent deformation of landslide based on creep characteristics of weathered red mudstone: A case study of the Luobao landslide in Tianshui of Gansu Province

赵建磊, 王涛, 梁昌玉, 张泽林, 刘甲美, 王浩杰, 辛鹏 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 30-39

降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响

Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example

蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 胡长江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 27-35



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202401042

索楠, 徐金明, 卢宝明. 云冈石窟砂岩风化速率主控因子分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 68-75.

SUO Nan, XU Jinming, LU Baoming. Analysis of the main controlling factors of weathering rates in Yungang Grottoes sandstones[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(3): 68-75.

云冈石窟砂岩风化速率主控因子分析

索楠, 徐金明, 卢宝明

(上海大学土木工程系, 上海 200444)

摘要: 分析岩石风化速率的变化特征与主控因子是进行石质文物保护工作的基础工作。文章以云冈石窟砂岩为研究对象, 将裂隙宽度扩展速率、石窟立柱倾斜角度变化速率、石窟洞门沉降变化速率作为表征石窟砂岩风化速率的定量指标, 使用因子分析方法研究了主要环境因素(壁温、环境温度、环境湿度、气压、风速、积雨量)对石窟砂岩风化速率的影响, 使用多元线性回归方法得到了影响石窟风化速率的主控因子。结果表明: 对裂隙宽度扩展速率来说, 夏季是环境湿度、壁温、积雨量影响最大的季节, 春季是环境温度、风速影响最大的季节, 主控因子是湿度; 对石窟立柱风化速率来说, 夏季时壁温、环境温度、环境湿度、气压、风速、积雨量的影响最大, 其他季节时影响较小, 主控因子是壁温; 对石窟洞门风化速率来说, 夏季时壁温、环境温度、环境湿度、积雨量影响最大, 春季时气压、风速影响最大, 主控因子是环境湿度。文章结果对砂岩风化速率分析与石窟文物保护具有一定的参考价值。

关键词: 云冈石窟; 风化速率; 环境条件; 主控因子

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)03-0068-08

Analysis of the main controlling factors of weathering rates in Yungang Grottoes sandstones

SUO Nan, XU Jinming, LU Baoming

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Analyzing the weathering rates and their main environmental controlling factors is fundamental in conserving rocky relics. In this study, using the sandstones of the Yungang Grottoes as a case study, the rock weathering rates were quantitatively expressed by the expansion rates of crack widths, changes in the column inclination angles and door settlements. Factor analysis was employed to explore the influences of environmental factors, including wall temperature, ambient temperature, ambient humidity, air pressure, wind speed, and accumulated rainfall, on the weathering rates of these sandstones. Multivariate linear regression techniques were subsequently used to identify the main controlling factors affecting these weathering rates. It was found that ambient humidity, wall temperature, and accumulated rainfall have the greatest influences on the expansion rates of crack widths during summer, while ambient temperature and wind speed are more influential in spring, with environmental humidity as the main controlling factor. For the changes in column inclination angles, wall temperature, ambient temperature, ambient humidity, air pressure, wind speed, and accumulated rainfall exert the greatest impacts in the summer, with smaller effects in other seasons, and wall temperature acting as the controlling factor. Regarding the change rates in door settlement,

收稿日期: 2024-01-29; 修订日期: 2024-05-01

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1520500); 山西省重点研发计划项目(201803D31080)

第一作者: 索楠(1997—), 男, 山西大同人, 土木水利专业, 硕士研究生, 从事文物保护机理研究。E-mail: suonan24@163.com

通讯作者: 徐金明(1963—), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质的教学与科研工作。E-mail: xjming@163.com

wall temperature, ambient temperature, ambient humidity, and accumulated rainfall have the most substantial effects in the summer, while air pressure and wind speed are more influential in spring, with environmental humidity again being the main controlling factor. These findings may provide useful references for both the analysis of weathering rates and the conservation of the grottoes.

Keywords: Yungang Grottoes; weathering rate; environmental conditions; main controlling factors

0 引言

石质文物是人类文明的重要遗产,具有极高的历史、艺术和文化价值。但是,石质文物通常因风化作用影响而出现不同程度的破坏。因此,研究石质文物风化作用特征、分析风化速率及其与环境因子的关系,是进行石质文物保护的基础工作。

目前,石质文物风化作用的特征及其与环境因素的关系,已经使用现场监测、室内试验、数值模拟等方法进行了大量研究。基于现场监测数据,张博等^[1]使用统计学方法分析了山西大同云冈石窟不同洞窟温湿度的变化特征;Wang等^[2]探讨了云冈石窟洞窟内温湿度的空间分布特征及变化趋势,认为凝结水会引起石窟内砂岩的盐析出与性能劣化;汪军等^[3]、王莹莹等^[4]分别分析了不同风化程度云冈石窟砂岩电子扫描图像和计算机层析摄影图像的主要特征,认为砂岩风化程度与微观特征密切相关;刘逸堃等^[5]结合时间序列数据分析,探讨了河南洛阳奉先寺石窟本体表面温度、表面-环境温差、环境相对湿度、风向、风速等参数的日变化特征;Zheng等^[6]结合灰色关联分析,研究了河南洛阳龙门石窟裂缝病害与区域环境参数的关系;Li等^[7]探讨了完全封闭情况下甘肃敦煌莫高窟围岩状态变化的水分来源及驱动力;王彦武等^[8]研究了甘肃庆阳北石窟寺降雨量、周围泉水水位和流量等因素对石窟文物风化作用的影响;Sankey等^[9]使用地表侵蚀量来定量表征美国Glen峡谷大坝施工对附近文物风化作用的影响;Grøntoft和Cassar^[10]使用蚀变变化量,阐述了不同环境因素作用下马耳他石灰岩庙宇随时间的变化过程;Waragai和Hiki^[11]分析了柬埔寨吴哥寺砂岩立柱蚀痕深度随时间的变化过程。使用室内试验,Li等^[12]分析了莫高窟不同类型洞窟壁画含水量与环境温湿度的关系;Liu等^[13]结合无损检测结果,探讨了降雨入渗对莫高窟壁画病害的影响;刘兵等^[14]分析了不同冻融循环次数下砂岩变形破坏过程中声发射特征参数的变化情况。结合数值模拟结果与现场监测数据,周宝发等^[15]分析了强降雨条件下洞窟结构内外环境温湿度差-洞窟通风条件的关系;D'agostino等^[16]认为,环境温度和风速对岩石类文物风

化作用影响最大。同时,石质文物风化速率研究也有一些成果:比如,汤永净等^[17]以石刻表面有效面积减少作为风化速率的评估指标,利用图像处理软件得到了江西赣州通天岩摩崖“同济”石刻的剥落速率。

总的来说,石质文物风化作用特征及其与环境关系已经获得了大量成果,但对石质文物风化速率(尤其是文物本体岩石风化速率)的定量表征还不太多,风化速率的主控因子也没有达成共识。考虑到文物保护的特殊性,使用常规质量平衡或元素平衡方法来研究石质文物风化速率(如高文浩等^[18]、彭弋倪等^[19]、张鸿等^[20]所做的工作),还有些困难。因此,本文拟根据山西大同云冈石窟的现场监测资料,以裂隙宽度扩展速率、石窟立柱倾斜角度和洞门沉降变化速率来分别定量表征石窟基体砂岩和本体砂岩的风化速率,使用因子分析方法和多元线性回归分析方法研究环境因子对风化速率的影响、确定石窟风化的主控因子。

1 云冈石窟与现场监测概况

1.1 云冈石窟概况

云冈石窟位于山西省大同市西部武周山南侧、距离大同市中心约16 km。石窟依山开凿,走向东西、长约1 km,最早开凿于北魏时期、历时60余年,现存主要洞窟45个、佛像51 000余尊。

在人为和环境等因素作用下,云冈石窟出现了结构松软、粉化脱落、片状剥落、盐析出等较为严重的风化作用,对石窟本体稳定性和文物艺术价值都产生了不利影响。为了减缓石窟文物本体的破坏,需要定量确定石窟砂岩和石窟本体的风化速率、确定影响风化速率的主控因子、为合理确定石窟文物的保护措施提供基础资料。

1.2 现场监测概况

根据云冈石窟的特殊性,裂隙宽度、温度和湿度、壁面温度分别采用BGK-4 420型振弦式裂隙计、无线温湿度传感器、壁面温度传感器进行量测,立柱倾斜角度和洞门沉降采用激光测距仪进行量测。数据采集频率为每天1次,监测时段为2017年3月10日15点—2019年3月17日5点。考虑到监测数据的可比性,本

文选取第 9、10、12、13、25 窟在 2019 年 1 月 1 日—12 月 31 日的监测数据进行分析。

图 1 是壁温与区域温度测试的外观情况。



图 1 壁温测试与区域温度监测的外观情况

Fig. 1 Appearance of wall temperature and regional temperature monitoring

本次研究以壁温、环境温度、环境湿度、气压、风速、积雨量等 6 个环境因素作为环境因子,以裂隙宽度扩展速率、立柱倾斜角度变化速率、洞门沉降变化速率分别定量表征石窟风化速率。其中,裂隙宽度扩展速率取裂隙宽度相邻 2 d 监测值的差值,立柱倾斜角度变化

速率取柱顶倾斜角度相邻 2 d 监测值的差值,石窟洞门沉降变化速率取洞门沉降相邻 2 d 监测值的差值。

1.3 监测数据预处理

裂隙宽度、立柱倾斜角度、洞门沉降监测数据存在离群值、非等间隔分布、量纲影响等方面的不足。为后续研究方便,将少量离群值删除、对应数值采用线性内插处理。对非等间隔分布数据采用线性插值方法,获得等间隔数据。为了消除量纲对回归效果的影响,对这些等间隔数据采用极差标准化法进行无量纲处理:

$$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

式中, X ——监测对象(裂隙宽度、立柱倾斜角度、洞门沉降)的等间隔数据监测值;

$X_{\min}$ ——监测值中的最小值;

$X_{\max}$ ——监测值中的最大值;

X' ——标准化后的监测数据。

2 裂隙宽度扩展速率变化特征与主控因子

2.1 裂隙宽度扩展速率的变化特征

不同石窟裂隙的宽度扩展速率监测结果如图 2 所示。图中数值是极差标准化后的结果。

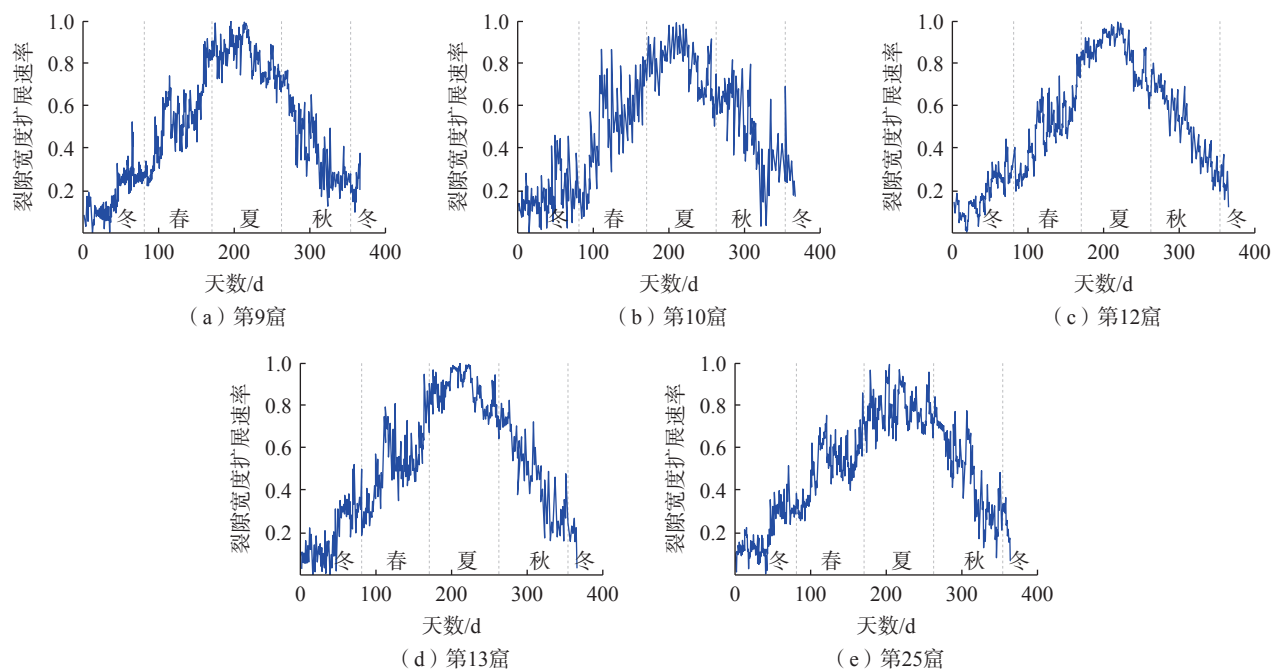


图 2 不同石窟裂隙宽度扩展速率随时间的变化

Fig. 2 Temporal changes in the expansion rates of fissure widths in different caves

由图 2 可知,裂隙宽度扩展速率表现为先逐渐增大、后逐渐减小的趋势,呈现出明显的季节性变化特征。

2.2 裂隙宽度扩展速率的主控因子

2.2.1 适用性检验

因子分析方法通过对原始环境因子进行降维处

理、使用相互独立的较少公共因子来表征环境因子的影响,进而提取公共因子、确定环境因子的影响程度、得到裂隙宽度扩展速率的主控因子。

设环境影响因子壁温、环境温度、环境湿度、气压、风速、积雨量分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 。对这些因子进行 Z-Score 标准化处理:

$$X_j^* = \frac{X_j - \mu}{\sigma} \tag{2}$$

式中, $X_j(j = 1, 2, 3, \cdots, 6)$ ——壁温、环境温度、环境湿度、气压、风速、积雨量的实测时序数据;

- μ ——对应时序数据的方差;
- σ ——对应时序数据的标准差;
- X_j^* ——标准化后的新序列数据。

研究时,裂隙扩展速率与环境影响因子是否相关采用适用性检验进行判断。适用性检验常用方法是 KMO (Kaiser Meyer Olkin)度量、巴特利特球度检验(Bartlett test of sphericity)。 KMO 度量是检验变量间相关系数与偏相关系数的指标: $KMO > 0.6$ 时可以运用因子分析方法进行分析; KMO 越接近 1,则适用性越好。巴特利特球度检验以因子间相关系数矩阵为基础,检验相关系数矩阵是否为单位阵:若检验变量的显著性水平 $p < 0.05$,则因子之间存在相关性、可以使用因子分析方法。

不同石窟的 KMO 度量值和显著性水平 p 计算结果如表 1 所示。由表 1 可知,6 个环境影响因子均通过检验,可以进行因子分析。

表 1 环境影响因子的 KMO 度量值和显著性水平 p
Table 1 KMO measures and significance levels (p -values) for environmental factors

石窟编号	KMO	p
9	0.93	0.002
10	0.95	0.006
12	0.92	0.004
13	0.90	0.001
25	0.88	0.003

2.2.2 环境因子载荷值的计算

研究时因子个数采用累计方差贡献率、结合初始特征值方法进行确定:前 n 个因子累计方差贡献率大于 75%、初始特征值大于 1 时,这 n 个因子即为公共因子。对序列数据进行线性组合,构成 $k(k < 6)$ 个因子 F_1 、 F_2 、 $\cdots$ 、 F_k :

$$X = AF + \varepsilon \tag{3}$$

式中: X ——环境因子 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 ;

A ——因子载荷矩阵,反映环境因子对公共因子影响的大小;

F ——公共因子;

ε ——未被公共因子解释的冗余。

环境因子 X_j 在公共因子 F_i 上的载荷值 $\beta_{ij}(i = 1, 2, 3, \cdots, k; j = 1, 2, 3, \cdots, 6)$ 满足:

$$F_i = \beta_{i1}X_1 + \beta_{i2}X_2 + \cdots + \beta_{i6}X_6 \tag{4}$$

公共因子 F_i 的综合得分为 F :

$$F = \alpha_1F_1 + \alpha_2F_2 + \cdots + \alpha_mF_m \tag{5}$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_m$ ——公共因子方差贡献率百分比。

为了使公共因子解释环境因子的效果更好,使用最大方差法将式(1)计算得到的因子载荷矩阵正交旋转,得到正交旋转变换后的因子载荷矩阵(表 2)。表 2 中,因子载荷值表示环境因子在公共因子上的重要性程度:环境因子载荷值越大,公共因子受该环境因子的影响程度越大。由表 2 可知,指标 X_1 (壁温)、 X_3 (环境湿度)、 X_6 (积雨量)最大载荷值出现在公共因子 F_1 上,可将公共因子 F_1 作为解释壁温(X_1)、环境湿度(X_3)、积雨量(X_6)的综合性指标;类似地,可将公共因子 F_2 用作解释环境温度(X_2)、风速(X_5)的综合性指标,可将公共因子 F_3 用作解释气压(X_4)的综合性指标。

表 2 不同洞窟裂隙处环境因子的载荷值
Table 2 Loadings of environmental factors on fissures in different caves

石窟编号	公共因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
9	F_1	0.82	0.32	0.91	0.25	0.47	0.75
	F_2	0.39	0.84	0.33	0.21	0.77	0.20
	F_3	0.36	0.31	0.54	0.75	0.25	0.57
10	F_1	0.84	0.49	0.90	0.22	0.46	0.75
	F_2	0.39	0.92	0.29	0.37	0.79	0.16
	F_3	0.46	0.32	0.20	0.82	0.23	0.19
12	F_1	0.85	0.41	0.89	0.25	0.36	0.71
	F_2	0.39	0.82	0.34	0.31	0.78	0.19
	F_3	0.46	0.38	0.24	0.71	0.22	0.26
13	F_1	0.75	0.49	0.92	0.23	0.31	0.79
	F_2	0.41	0.89	0.15	0.21	0.72	0.13
	F_3	0.48	0.41	0.19	0.9	0.16	0.09
25	F_1	0.82	0.44	0.86	0.26	0.36	0.77
	F_2	0.32	0.75	0.29	0.51	0.68	0.16
	F_3	0.36	0.49	0.17	0.66	0.19	0.24

由式(4)得到裂隙宽度扩展速率方差贡献率较大的 3 个公共因子 F_1 、 F_2 、 F_3 。为使公共因子具有代表性,初始特征值需大于 1,使用载荷平方和提取初始特征值对应的公共因子方差及方差贡献率、使用旋转载

荷平方和得到初始特征值旋转变换后的公共因子方差及方差贡献率。表 3 列出了公共因子 F_1 、 F_2 、 F_3 特征值与方差贡献率的计算结果。由表 3 可知,公共因子可以反映 6 个环境因子的主要信息; F_1 对裂隙扩展速率的影响最大、 F_2 的影响次之、 F_3 的影响最小。

表 3 不同洞窟公共因子特征值与方差贡献率

Table 3 Eigenvalues and variance contributions of common factors in different caves

石窟 编号	公共 因子	载荷平方和			旋转载荷平方和		
		合计	方差/%	累计值/%	合计	方差/%	累计值/%
9	F_1	2.81	40.37	40.37	2.78	39.94	39.94
	F_2	1.71	24.57	64.94	1.52	21.84	61.78
	F_3	1.42	20.40	85.34	1.64	23.56	85.34
10	F_1	3.87	39.33	39.33	3.53	35.91	35.91
	F_2	2.67	27.15	66.48	2.89	29.36	65.27
	F_3	2.06	20.94	87.42	2.18	22.15	87.42
12	F_1	3.56	40.98	40.98	3.23	37.18	37.18
	F_2	2.45	28.21	69.19	2.12	24.41	61.59
	F_3	1.32	15.2	84.39	1.98	22.8	84.38
13	F_1	2.81	40.25	40.25	2.78	39.74	39.74
	F_2	1.71	24.49	64.74	1.52	21.82	61.56
	F_3	1.42	20.33	85.07	1.64	23.51	85.07
25	F_1	3.71	43.95	43.95	3.29	38.92	38.92
	F_2	2.28	27.01	70.97	2.15	25.47	64.39
	F_3	1.02	12.08	83.05	1.57	18.66	83.05

使用式(4),得到不同洞窟各月公共因子及综合因子得分、并由大到小排序,得到表 4(为了节省篇幅,这里只列出第 9 窟的计算结果)。

表 4 第 9 窟裂隙扩展速率的公共因子得分

Table 4 Scores of common factors for fissure expansion rates in Cave 9

月	F_1		F_2		F_3		F	
	数值	排名	数值	排名	数值	排名	数值	排名
1	0.17	12	0.31	6	0.06	12	0.22	12
2	0.36	9	0.48	2	0.14	9	0.67	9
3	0.47	8	0.54	1	0.15	7	0.69	8
4	0.62	6	0.42	3	0.19	6	0.83	6
5	0.76	5	0.39	4	0.23	4	0.81	5
6	1.02	2	0.36	5	0.26	1	1.37	2
7	1.34	1	0.22	8	0.25	2	1.56	1
8	0.98	3	0.11	11	0.23	3	1.23	3
9	0.84	4	0.16	9	0.20	5	1.06	4
10	0.59	7	0.06	12	0.15	8	0.70	7
11	0.29	10	0.13	10	0.09	10	0.41	10
12	0.20	11	0.26	7	0.08	11	0.34	11
总和	7.64		3.44		2.03		9.89	

根据公共因子及综合因子得分计算结果,壁温、环境湿度、积雨量是公共因子 F_1 主要解释的环境因子,气压是公共因子 F_3 主要解释的环境因子,公共因子

F_1 对裂隙扩展速率的影响最大;壁温、环境湿度、积雨量、气压对裂隙宽度扩展速率的影响在夏季最大、在冬季最小;环境温度、风速对石窟裂隙宽度扩展速率的影响在春季最大;环境因素综合影响在夏季最大、在冬季最小。

2.2.3 主控因子的确定

使用因子载荷值,将公共因子 F_1 、 F_2 、 F_3 载荷值最大的环境因子(即对公共因子影响最大的环境因子)作为各公共因子的主控因子。由于环境湿度、环境温度、气压为 3 个公共因子的主控因子,其中必然存在石窟裂隙宽度扩展速率的主控因子。

下面使用多元线性回归分析确定裂隙宽度扩展速率的主控因子。为了使计算结果具有可比性,使用前述极差标准化方法将环境湿度、环境温度、气压转化为无量纲数据。裂隙宽度扩展速率与 3 个公共因子主控因子(环境温度、环境湿度、气压)的多元线性回归关系式如表 5 所示。

表 5 裂隙宽度扩展速率与环境参数的回归关系

Table 5 Regression relationships between environmental parameters and fissure expansion rates

石窟编号	回归关系式	R^2
9	$v_{\omega} = 0.40X_2' + 0.54X_3' + 0.10X_4' - 0.116$	0.83
10	$v_{\omega} = 0.34X_2' + 0.66X_3' + 0.16X_4' + 0.084$	0.90
12	$v_{\omega} = 0.39X_2' + 0.68X_3' + 0.19X_4' + 0.035$	0.86
13	$v_{\omega} = 0.46X_2' + 0.62X_3' + 0.08X_4' - 0.091$	0.82
25	$v_{\omega} = 0.46X_2' + 0.62X_3' + 0.08X_4' - 0.091$	0.89

根据表 5,对于裂隙宽度扩展速率来说,当环境温度、环境湿度、气压标准值每增加 1.0 时,第 3 窟扩展速率分别增大 0.35、0.59、0.17,第 9 窟分别增大 0.40、0.54、0.10,第 10 窟增大 0.34、0.66、0.16,第 12 窟分别增大 0.39、0.68、0.19,第 13 窟分别增大 0.44、0.63、0.24,第 25 窟分别增大 0.46、0.62、0.08。因此,环境湿度对裂隙宽度扩展速率的影响最大,是裂隙宽度扩展速率的主控因子。

3 立柱倾斜角度变化速率变化特征与主控因子

采用前述分析裂隙宽度扩展速率变化特征与主控因子的类似方法,得到立柱倾斜角度变化速率变化特征与主控因子。为了节省篇幅,下面只阐述主要过程和主要结果。

3.1 立柱倾斜角度变化速率变化特征

由于立柱柱身受风化影响发生不同程度的倾角变化,可以通过监测柱体倾角变化来表征柱体风化速率。

第 9 窟前庭立柱柱体倾斜角度变化速率如图 3 所示(图中数值是标准化后的结果)。

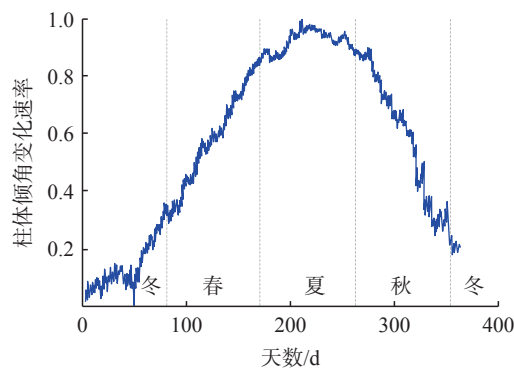


图 3 第 9 窟立柱柱体倾斜角度变化速率随时间的变化
Fig. 3 Rate of change in column inclination angles over time in Cave 9

由图 3 可知,前庭立柱柱体倾斜角度变化速率呈现先逐渐增大、后逐渐减小的季节性变化。

3.2 立柱倾斜角度变化速率主控因子

检验适用性时,立柱位置环境因子计算结果均满足 $KMO>0.6$ 和 $p<0.05$ 的要求,因此,可以使用因子分析方法对影响柱体倾斜角度变化速率的环境因子进行进一步研究。

计算环境因子载荷值时,首先得到影响柱体倾斜角度变化速率方差贡献率较大的 3 个公共因子 F_1 、 F_2 、 F_3 。第 9、10、12、13、25 窟的公共因子累计方差贡献率分别为 84.02%、87.63%、90.25%、86.39%、83.16%,均大于 75%;公共因子初始特征值均大于 1。因此,公共因子 F_1 、 F_2 、 F_3 可以用于解释 6 个环境因子的主要信息,可分别作为解释壁温和环境温度、环境湿度和积雨量、气压和风速的综合性指标。

确定主控因子时,根据前庭立柱柱体倾斜角度变化速率及环境参数,得到每月公共因子及综合因子得分、并由大到小进行排序(表 6 为第 9 窟的计算结果)。

结果表明,公共因子 F_1 、 F_2 、 F_3 及综合因子 F 对柱体倾斜角度变化速率影响总体表现为夏季较大、冬季较小,壁温和环境温度、环境湿度和积雨量、气压和风速对立柱柱体倾斜角度变化速率影响均表现为夏季较大、冬季较小;多种环境因素综合作用下,柱体倾斜角度变化速率 1—7 月逐渐增大、7—12 月逐渐减小;各公共因子及综合因子对柱体倾斜角度变化速率均为促进作用;壁温、环境温度、环境湿度、气压、风速、积雨量与柱体倾斜角度变化速率均为正相关关系。

使用多元线性回归分析,得到柱体倾斜角度变化速率与壁温、环境湿度、风速的关系式(如表 7 所示),回

表 6 第 9 窟立柱倾斜角度变化速率的公共因子得分
Table 6 Scores of common factors for changes in column tilt angles in Cave 9

月	F_1		F_2		F_3		F	
	数值	排名	数值	排名	数值	排名	数值	排名
1	0.12	12	0.17	10	0.15	11	0.25	12
2	0.34	9	0.30	9	0.21	9	0.61	9
3	0.37	8	0.31	8	0.27	7	0.68	8
4	0.67	7	0.42	7	0.38	5	1.08	7
5	0.95	6	0.57	2	0.39	4	1.38	6
6	1.58	2	0.49	4	0.48	2	2.00	2
7	2.05	1	0.64	1	0.52	1	2.46	1
8	1.38	3	0.43	11	0.43	3	1.80	3
9	1.12	4	0.51	9	0.37	6	1.53	4
10	1.06	5	0.48	12	0.24	8	1.42	5
11	0.30	10	0.13	10	0.19	10	0.46	10
12	0.13	11	0.10	7	0.13	12	0.30	11
总和	10.07		4.55		3.76		13.97	

归效果较好;壁温、环境湿度、风速每增加 1.0,第 9 窟立柱倾斜角度变化速率分别增大 0.77, 0.30, 0.13,第 10 窟分别增大 0.64, 0.26, 0.24,第 12 窟分别增大 0.59, 0.42, 0.26,第 13 窟分别增大 0.68、0.33、0.24,第 25 窟分别增大 0.71, 0.25, 0.17。因此,壁温对石窟立柱倾斜角度变化速率影响最大,可作为影响石窟立柱倾斜角度变化速率的主控因子。

表 7 立柱倾斜角度变化速率与环境参数的回归关系
Table 7 Regression relationships between changes in column tilt angles and environmental parameters

石窟编号	回归关系式	R^2
9	$v_{\theta} = 0.77X_1' + 0.30X_3' + 0.13X_5' + 0.036$	0.95
10	$v_{\theta} = 0.64X_1' + 0.26X_3' + 0.24X_5' - 0.051$	0.90
12	$v_{\theta} = 0.59X_1' + 0.42X_3' + 0.26X_5' + 0.113$	0.93
13	$v_{\theta} = 0.68X_1' + 0.33X_3' + 0.24X_5' - 0.102$	0.96
25	$v_{\theta} = 0.71X_1' + 0.25X_3' + 0.17X_5' - 0.068$	0.95

4 洞门沉降变化速率变化特征与主控因子

4.1 洞门沉降变化速率变化特征

图 4 为第 9 窟洞门沉降变化速率的监测结果(图中数值是标准化后的结果)。

可以看出,洞门沉降变化速率仍然表现为 1—7 月逐渐增大、7—12 月逐渐减小,呈现出比较明显的季节性变化特点。

4.2 洞门沉降变化速率主控因子

检验适用性时,洞门位置处环境因子 KMO 度量值和显著性水平 p 值均满足 $KMO>0.6$ 和 $p<0.05$,可以对影响洞门沉降变化速率的环境因子进行因子分析。

根据环境因子载荷值与因子载荷计算结果,第 9、10、

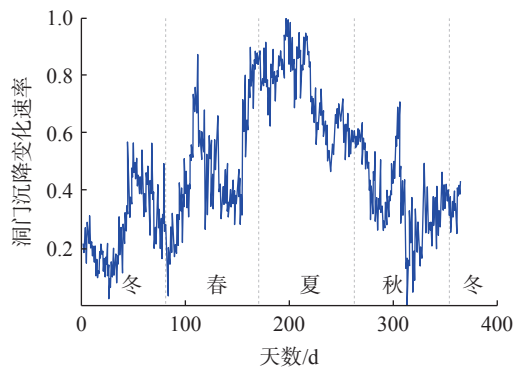


图 4 第 9 窟洞门沉降变化速率随时间的变化

Fig. 4 Temporal change rate in the settlement of the cave door in Cave 9

12、13、25 窟公共因子累计方差贡献率分别为 87.92%、90.11%、82.03%、86.30%、84.95%、均大于 75%，公共因子初始特征值大于 1，公共因子 F_1 、 F_2 、 F_3 可以用来解释 6 个环境因子的主要信息、可分别作为解释环境湿度和积雨量、壁温和环境温度、气压和风速的综合性指标。

确定主控因子时，根据洞门沉降变化速率公共因子及综合因子得分的计算结果(表 8 为第 9 窟的计算结果)，壁温和环境温度、环境湿度、积雨量的影响在夏季最大、在冬季最小，气压和风速的影响在春季最大、其他季节较小，多种环境因素综合作用在夏季最大、在冬季最小。

表 8 第 9 窟洞门沉降变化速率的公共因子得分

Table 8 Scores of common factors for the settlement rate of the cave door in Cave 9

月	F_1		F_2		F_3		F	
	数值	排名	数值	排名	数值	排名	数值	排名
1	0.15	12	0.11	12	0.35	5	0.26	12
2	0.43	10	0.26	9	0.42	2	0.56	10
3	0.49	9	0.28	8	0.49	1	0.62	9
4	0.68	6	0.35	6	0.39	3	0.82	6
5	0.84	5	0.39	5	0.35	4	0.87	5
6	1.01	2	0.48	2	0.31	6	1.26	2
7	1.23	1	0.58	1	0.24	8	1.35	1
8	0.92	3	0.43	3	0.13	11	1.06	3
9	0.91	4	0.42	4	0.15	10	0.99	4
10	0.65	7	0.34	7	0.06	12	0.8	7
11	0.62	8	0.19	10	0.21	9	0.75	8
12	0.22	11	0.16	11	0.3	7	0.47	11
总和	8.15		3.99		3.40		9.81	

根据多元线性回归结果(表 9)，环境温度、环境湿度、气压标准值每增加 1.0 时，第 9 窟洞门沉降变化速率分别增大 0.29、0.56、0.14，第 10 窟分别增大 0.38、0.73、0.04，第 12 窟分别增大 0.21、0.62、0.19，第 13 窟分别增大 0.49、0.65、0.15，第 25 窟分别增大 0.40、0.59、

0.17，环境湿度的影响最大、环境温度的影响次之、气压的影响最小，环境湿度是主控因子。

表 9 洞门沉降变化速率与环境参数的回归关系

Table 9 Regression relationships between environmental parameters and the settlement rate of the cave door

石窟编号	回归关系式	R^2
9	$v_s = 0.29X_2' + 0.56X_3' + 0.14X_4' + 0.125$	0.86
10	$v_s = 0.38X_2' + 0.73X_3' + 0.04X_4' - 0.034$	0.90
12	$v_s = 0.21X_2' + 0.62X_3' + 0.19X_4' + 0.095$	0.89
13	$v_s = 0.49X_2' + 0.65X_3' + 0.15X_4' - 0.152$	0.92
25	$v_s = 0.40X_2' + 0.59X_3' + 0.17X_4' - 0.128$	0.84

5 结论

(1) 对裂隙宽度扩展速率来说，夏季是湿度、壁温、积雨量对石窟裂隙宽度扩展速率影响最大的季节，春季是环境温度和风速对裂隙宽度扩展速率影响最大的季节，主控因子是湿度；

(2) 对石窟立柱变化速率来说，夏季时壁温、环境温度、环境湿度、气压、风速、积雨量的影响最大，其他季节时影响较小，主控因子是壁温；

(3) 对石窟洞门变化速率来说，夏季时壁温、环境温度、环境湿度、积雨量影响最大，春季时气压和风速影响最大，主控因子是环境湿度。

参考文献(References):

- [1] 张博,崔惠萍,裴强强,等.不同开放环境下北石窟洞窟温湿度变化特征[J].岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2834 - 2840. [ZHANG Bo, CUI Huiping, PEI Qiangqiang, et al. Variation characteristics of temperature and humidity in North Grottoes under different opening regulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup 1): 2834 - 2840. (in Chinese with English abstract)]
- [2] WANG Xusheng, WAN Li, HUANG Jizhong, et al. Variable temperature and moisture conditions in Yungang Grottoes, China, and their impacts on ancient sculptures [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 3079 - 3088.
- [3] 汪军,徐金明,龚明权,等.基于扫描电镜图像和微观渗流模型的云冈石窟砂岩风化特征分析[J].水文地质工程地质, 2021, 48(6): 122 - 130. [WANG Jun, XU Jinming, GONG Mingquan, et al. Investigating weathering features of sandstones in the Yungang Grottoes based on SEM images and micro-scale flow model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 122 - 130. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王莹莹,徐金明,黄继忠.基于 CT 影像的砂岩文物结构

- 特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(1): 127 – 134. [WANG Yingying, XU Jinming, HUANG Jizhong. Analysis on structural features of sandstones relics using digital image technology based on CT images [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(1): 127 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘逸堃, 高东亮, 马朝龙, 等. 基于时间序列分析的龙门石窟奉先寺微环境的实时监测与评估 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(5): 787 – 796. [LIU Yikun, GAO Dongliang, MA Zhaolong, et al. Monitoring and assessment of the microclimate of Fengxian temple in Longmen Grottoes based on time series analysis [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(5): 787 – 796. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ZHENG Leilei, FU Xuezhi, CHU Fei. Grey incidence analyze of environment monitoring data and research on the disease prevention measures of Longmen Grottoes [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 153(6): 1 – 8.
- [7] LI Hongshou, WANG Wanfu, ZHAN Hongtao, et al. Water in the Mogao Grottoes, China: Where it comes from and how it is driven [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(1): 37 – 45.
- [8] 王彦武, 韩增阳, 郭青林, 等. 甘肃庆阳北石窟寺水环境特征研究 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 360 – 369. [WANG Yanwu, HAN Zengyang, GUO Qinglin, et al. Research on the characteristics of water environment in beishiku temple, Qingyang City, Gansu Province [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 360 – 369. (in Chinese with English abstract)]
- [9] SANKEY J B, EAST A, FAIRLEY H C, et al. Archaeological sites in Grand Canyon National Park along the Colorado River are eroding owing to six decades of Glen Canyon Dam operations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118036.
- [10] GRÖNTOFT T, CASSAR J. An assessment of the contribution of air pollution to the weathering of limestone heritage in Malta [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79: 1 – 16.
- [11] WARAGAI T, HIKI Y. Influence of microclimate on the directional dependence of sandstone pillar weathering in Angkor Wat temple, Cambodia [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, 6(1): 10.
- [12] LI Hongshou, WANG Wanfu, ZHAN Hongtao, et al. The effects of atmospheric moisture on the mural paintings of the Mogao Grottoes [J]. *Studies in Conservation*, 2017, 62(4): 229 – 239.
- [13] LIU Hongli, WANG Xudong, GUO Qinglin, et al. Experimental investigation on the correlation between rainfall infiltration and the deterioration of wall paintings at Mogao Grottoes, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(3): 1199 – 1207.
- [14] 刘兵, 郑坤, 王超林, 等. 冻融环境下基于声发射的砂岩各向异性劣化机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 132 – 142. [LIU Bing, ZHENG Kun, WANG Chaolin, et al. Mechanism analysis on anisotropic degradation of sandstone in freeze thaw environment based acoustic emission [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 132 – 142. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 周宝发, 郎嘉琛, 闫增峰, 等. 强降雨天气下麦积山石窟第 126 窟自然通风规律研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(10): 155 – 160. [ZHOU Baofa, LANG Jiachen, YAN Zengfeng, et al. Natural ventilation law for the Cave 126 under heavy rainfall in Maiji Mountain Grottoes [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(10): 155 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [16] D'AGOSTINO D, CONGEDO P M, CATALDO R. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of microclimate for salts crystallization control and artworks conservation [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, 15(4): 448 – 457.
- [17] 汤永净, 夏昶, 黄宏伟, 等. 基于图片信息的“同济”石刻风化速率分析 [J]. *结构工程师*, 2020, 36(4): 39 – 45. [TANG Yongjing, XIA Chang, HUANG Hongwei, et al. The analysis of “Tongji” stone inscription weathering rate based on images [J]. *Structural Engineers*, 2020, 36(4): 39 – 45. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 高文浩, 付金霞, 张宝利, 等. 砒砂岩风化速率及其主要影响因素分析 [J]. *人民黄河*, 2023, 45(9): 125 – 128. [GAO Wenhao, FU Jinxia, ZHANG Baoli, et al. Analysis of weathering rate and main influencing factors of pisha sandstone [J]. *Yellow River*, 2023, 45(9): 125 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 彭弋倪, 陈旻, 李石磊. 辽河流域岩石风化速率及碳汇计算 [J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(3): 439 – 449. [PENG Yini, CHEN Yang, LI Shilei. Rock weathering rates and carbon sink calculation in Liaohe River watershed, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(3): 439 – 449. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张鸿, 周权平, 姜月华, 等. 长江干流水化学成因与风化过程 CO₂ 消耗通量解析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 30 – 40. [ZHANG Hong, ZHOU Quanping, JIANG Yuehua, et al. Hydrochemical origins and weathering-controlled CO₂ consumption rates in the mainstream of the Yangtze River [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 30 – 40. (in Chinese with English abstract)]