



莫高窟洞窟自然通风性能分异特征及归因分析

陈海玲^{1,2}, 郭青林^{1,2}, 张景科^{1,3}, 谢团科⁴, 蔺旺兵⁴, 高文强²,
王小伟², 张正模², 寇宗起²

1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 敦煌研究院, 甘肃省敦煌文物保护研究中心, 甘肃 敦煌 736200;
3. 兰州大学 岩土质文物保护基础科学研究与人才培养甘肃省文物局重点科研基地, 甘肃 兰州 730000;
4. 甘肃莫高窟文化遗产保护设计咨询有限公司, 甘肃 敦煌 736200

摘要 洞窟自然通风性能对于洞窟空气质量的优劣至关重要, 并影响文物保存状况及游客舒适度。针对覆斗顶形窟和中心塔柱窟, 以换气次数为评价指标, 采用示踪气体浓度衰减法系统研究了2种形制洞窟的自然通风性能, 分析了其空间差异性、量化特征及影响因素。研究结果表明: 覆斗顶形窟换气次数依甬道、主室中央、西南角和东北角递减, 中心塔柱窟依塔柱东、甬道、塔柱南北、西南角、塔柱西递减; 洞窟换气次数随窟门开启程度的减小而急剧下降, 窟门打开、仅纱网门关闭、窟门关闭3种工况下, 洞窟换气次数分布范围分别为 $1.7 \sim 13.3 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1.5 \sim 5.2 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.4 \sim 1.3 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均值依次为 7.0、2.8、0.8 $\text{次} \cdot \text{h}^{-1}$; 洞窟自然通风性能与窟门开启程度、窟内外温差、窟门面积呈正相关, 与洞窟体积呈负相关, 同时还受门窗类型影响, 表现出多重因素的叠加效应。这些结果可为莫高窟众多洞窟自然通风策略的设计和评价提供重要理论支撑。

关键词 莫高窟; 自然通风; 浓度衰减法; 文物保护

中图分类号: K854; TU11 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-02-010

Differentiation characteristics and attribution analysis of natural ventilation performance of Mogao Caves

CHEN Hailing^{1,2}, GUO Qinglin^{1,2}, ZHANG Jingke^{1,3}, XIE Tuanke⁴,
LIN Wangbing⁴, GAO Wenqiang², WANG Xiaowei²,
ZHANG Zhengmo², KOU Zongqi²

1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Gansu Provincial Research Center for Conservation of Dunhuang Cultural Heritage,
Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China;
3. Key Scientific Research Base of Basic Science of Rock-Earthen Relics Protection and Talents Cultivation,
Cultural Heritage Bureau of Gansu Province, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

收稿日期: 2025-12-20 修回日期: 2026-02-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF0907705); 甘肃省文物保护科学和技术研究课题(GWJ202008); 甘肃省陇原青年英才项目。

第一作者: 陈海玲, 女, 博士研究生, 副研究馆员, 从事文物预防性保护研究, chhailing2023@lzu.edu.cn。

通信作者: 郭青林, 男, 研究馆员, 博士生导师, 从事文物保护研究, lzu_guoql@lzu.edu.cn。

4. Cultural Heritage Conservation and Design Consulting Co., Ltd of Gansu Mogao Grottoes, Dunhuang Academy,
Dunhuang 736200, China

Abstract Natural ventilation performance plays a key role in air quality of Mogao caves. As a consequence, it also has an important effect on the conservation of cultural relics and climate comfort degree of tourists in caves. This study aims to investigate the natural ventilation performance of two types of caves, one with truncated pyramidal ceiling and the other with central pillar, by means of tracer gas concentration decay method and air changes per hour (ACH) is used as the evaluation index. Additionally, the spatial difference, quantitative characteristics and factors of ACH in caves are well discussed. The results show that the ACH in caves with truncated pyramidal ceiling declines successively in the order of corridor, center of main chamber, southwest corner and northeast corner. While the caves with central pillar exhibit a different situation and its order of ACH from high to low is east side of pillar, corridor, south and north side of pillar, southwest corner and west side of pillar. Furthermore, it is also found that the overall ACH in both types of caves decreases significantly with the reduction of door opening degree. ACH ranges from 1.7 to 13.3 h^{-1} for open caves, 1.5 to 5.2 h^{-1} for caves only with gauze door closed and 0.4 to 1.3 h^{-1} for closed caves, and their average value are 7.0, 2.8 and 0.8 h^{-1} respectively. In terms of the factors that affects the ACH obviously, this study finds that ACH has a positive correlation with door opening degree, temperature difference between inside and outside and door area and a negative relationship with cave volume. Besides, the form of door and window also influences the ACH in caves dramatically. In conclusion, ACH in caves depends on the additive effect of multiple factors mentioned above. The results of this study are meant to provide a scientific basis for designing and evaluating the strategy of natural ventilation in Mogao Caves.

Keywords Mogao Grottoes; natural ventilation; concentration decay method; conservation of cultural relics

敦煌莫高窟现存十六国后期到北魏、西魏、北周、隋、唐、五代、宋、西夏、元等时代的洞窟 735 个,这些洞窟因开凿时代不同,在建筑形制、空间结构、大小等方面存在较大差异^[1-2]。近年来,莫高窟游客量不断攀升,2023 年全年游客接待总量高达 265 万人次。旅游旺季超大客流涌入洞窟,常常造成窟内空气品质下降,游客参观体验不佳等问题^[3-5]。此外,窟内外水汽运移是导致莫高窟壁画病害的主要原因^[6-9],在全球气候变化背景下,敦煌地区极端降水事件的增多^[10]也对莫高窟洞窟空气质量调控提出更大挑战。因此,深入开展莫高窟不同类型洞窟换气次数及其影响因素研究,对优化洞窟空气质量调控策略、提升游客参观体验和壁画病害防控能力等具有重要意义。

换气次数是建筑自然通风性能评价的常用指标^[11],示踪气体法是确定建筑换气次数相对成熟的实验方法,包括浓度衰减法、恒定浓度法和恒定释放法^[12]。该方法中常用的示踪气体有 SF_6 、 CO_2 、 N_2O 等,其中, CO_2 由于安全便捷、购置成本低、可靠性高而被广泛应用^[13]。国内外对于建筑换气次数及其影响因素的研究多集中在住宅建筑^[14]、宿舍类建筑^[15]、教育建筑^[16]和办公建筑领

域^[17],测试方法较为成熟^[18],而关于文物建筑换气次数的研究尚不多见。建筑换气次数的影响因素主要包括环境因素(温差、上游风)和建筑因素(开口数量、面积、位置、形状、建筑立面、周围环境等)^[19],文物建筑在建筑形制、材料、体积、开口设置、赋存环境、使用情况等方面与其他现代建筑之间存在较大差别,因而有必要研究示踪气体法在文物建筑中的具体应用。

目前,仅有少量利用示踪气体法研究莫高窟自然通风的先例。21 世纪初,敦煌研究院与美国盖蒂保护研究所以 SF_6 为示踪气体合作研究了窟内外温差、洞窟形制、体积和游客对莫高窟不同类型洞窟换气次数的影响,但没有涉及窟门类型等因素,也未研究换气次数的空间差异性^[7, 20]。此后,张君杰研究了不同季节莫高窟洞窟自然通风的驱动力,并采用示踪气体浓度衰减法测定了洞窟换气次数和空气龄,但其研究重点在于对比自然通风和机械通风效果,对窟门启闭工况、测点布设方法并未关注^[21]。最近,陈海玲等利用游客呼出 CO_2 测定了洞窟的换气次数,验证了该方法的可靠性和适用性^[22],然而限于该方法对游客数量和分布情况要求较高,使其难以在多个洞窟推广

应用。总体来看,莫高窟洞窟自然通风性能仍有待深入研究。

综上,在前人研究的基础上,本文以莫高窟现存数量最多的覆斗顶形窟和中心塔柱窟为研究对象,针对不同洞窟换气次数空间差异、量化特征和影响因素开展系统研究,分析了影响洞窟换气次数的主控因素,探讨了换气次数时空变化特征的成因,据此提出2种形制洞窟的测点布设方法及洞窟空气质量调控建议。这对于莫高窟不同洞窟的开放管理及自然通风设计具有重要现实意义,

同时也可为其他石窟寺洞窟自然通风性能研究提供方法借鉴。

1 材料与方法

1.1 实验设计

选取莫高窟现存数量最多、空间结构差异最大的2种形制洞窟(覆斗顶形窟、中心塔柱窟)共计15个,开展洞窟自然通风性能的系统研究,洞窟分布位置等如图1所示。

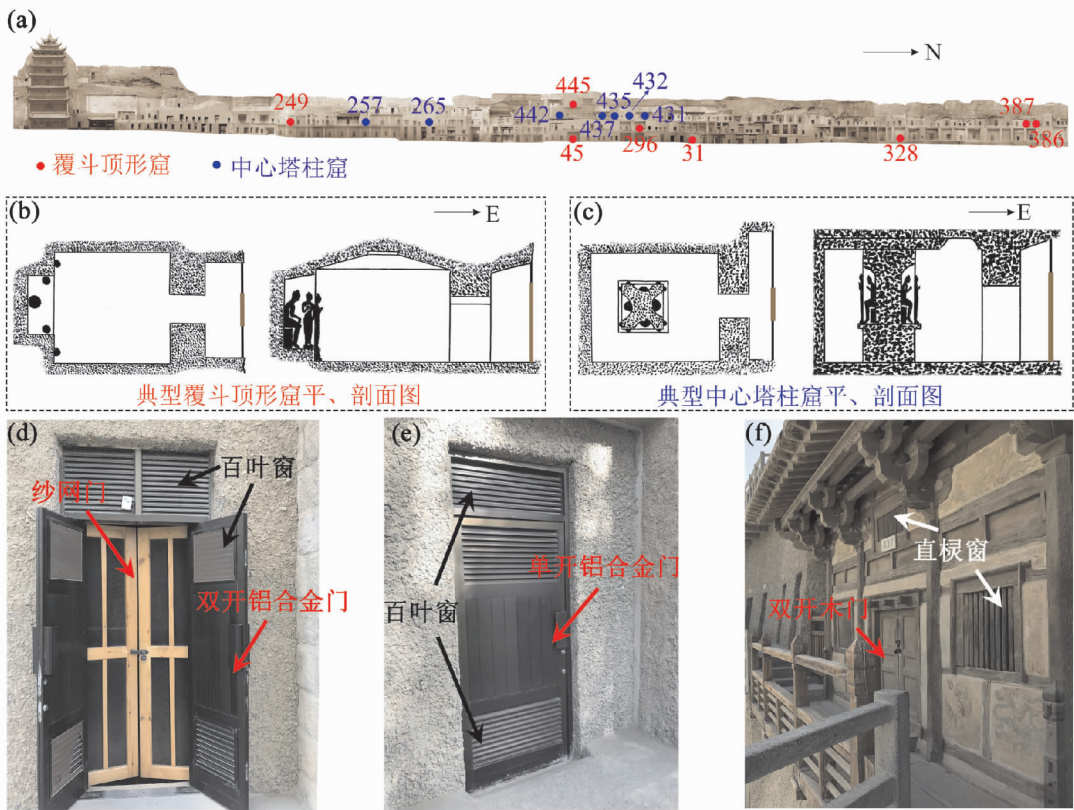


图1 实验洞窟分布位置、形制及门窗外观

Fig.1 Location, architectural form and typical view of test caves

中心塔柱窟是北朝时期莫高窟主要洞窟形制,其主室平面呈长方形,窟顶为前人字披后平顶的复合形式,主室中央靠后部有一座象征佛塔的方形塔柱[见图1(c)],塔柱四面开龕造像,并形成以塔柱为中心的回廊,可供信徒观瞻和礼拜^[23]。西魏以后,覆斗顶形洞窟逐渐增多,至隋唐时期覆斗顶形洞窟成为莫高窟的主要洞窟形制^[1]。覆斗顶形窟其主室平面通常为方形,窟内正面开佛龕,窟顶由四壁向中心呈斜面逐渐收成一个方形并向上凸起,称为藻井^[24]。由于窟顶形

如倒覆之斗,故称作覆斗顶形窟[见图1(b)]。莫高窟所有洞窟均为单侧开口,因此通风口即门窗类型对于洞窟自然通风性能至关重要。本研究包括了莫高窟现有的4种窟门类型和2种窗户类型[见图1(d)~(f)],即单开和双开铝合金窟门、双开纱网门、双开木门以及铝合金百叶窗、木制直棂窗,其中,铝合金百叶窗内侧附有纱网以阻挡沙尘。实验洞窟具体层位、体积等其他详细信息见表1。

表 1 实验洞窟概况
Tab. 1 The general information of test caves

窟号	形制	层位	前室	甬道	体积/ m ³	进深/ m	铝合金门/ m ²	纱网门/ m ²	木门/ m ²	铝合金窗/ m ²	木窗/ m ²
31	覆斗顶	一层	有	有	113.1	9.9	双开 2.3	无		1.0	
45		一层	有	有	64.0	5.7	双开 2.4	2.3		1.2	
328		一层	有	有	110.8	7.1	双开 2.4	2.4		0.8	
249		二层	无	无	116.7	5.8	双开 2.3	2.3	无	1.2	无
296		二层	有	有	67.0	6.5	单开 2.5	无		1.0	
386		三层	有	有	93.0	5.9	双开 2.2	2.2		1.2	
387		三层	有	有	98.6	5.1	单开 1.8	无		0.6	
445	中心塔柱	四层	无	有	122.2	8.5	单开 1.5	无		0.5	
257		二层	无	无	275.4	9.6	双开 2.3	2.3		1.1	
265		二层	无	有	150.5	10.2	双开 2.6	无		1.2	
432		三层	有	有	99.0	4.9	双开 2.2	无	无	1.1	无
435		三层	无	无	57.7	5.4	单开 1.6	无		0.6	
442		三层	无	有	57.3	6.9	单开 1.8	无		0.6	
431		三层	有	有	109.6	8.2	无	无	1.7	无	0.7
437		三层	有	有	62.9	7.8	无	无	1.3		1.0

实验分别于 2021 年 12 月、2022 年 4 月和 8 月开展,限于实验设备数量,每个时段仅选择部分洞窟进行测试。《室内环境空气质量监测技术规范》(HJ/T 167—2004)关于室内新风量的测定中规定,应按照对角线或梅花状均匀布点采样^[25]。本研究中涉及覆斗顶形窟和中心塔柱窟 2 种窟形,其中,覆斗顶形窟主室空间大体呈正方体形

[见图 1(b)],而中心塔柱窟主室以方形塔柱为中心形成回廊形空间[见图 1(c)],基于均匀布点原则并结合 2 种洞窟空间结构特征,针对覆斗顶形窟和中心塔柱窟,分别以对角线和类似梅花形布设监测点可全面反映洞窟空间气体分布,监测点布设高度为 1.5 m,点位示意图及测试现场如图 2 所示。

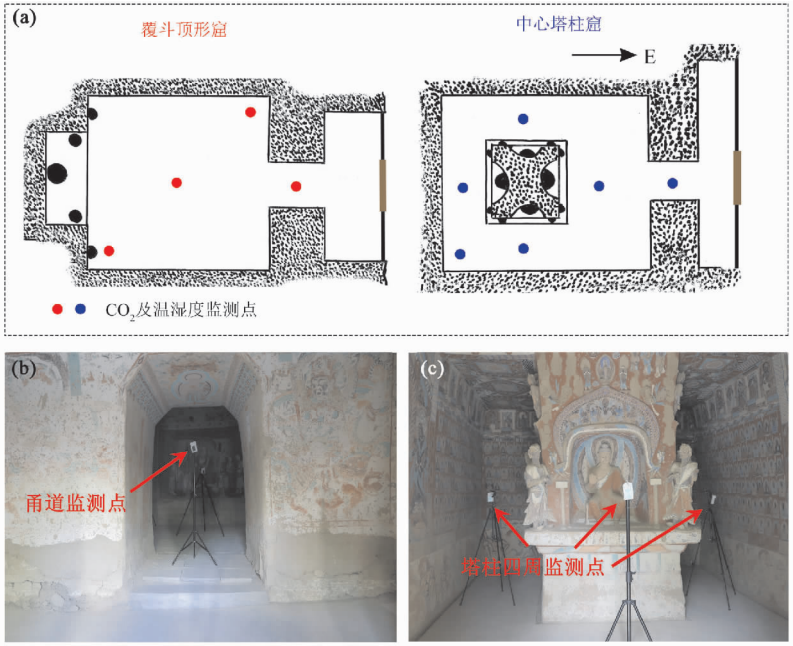


图 2 实验洞窟监测点位布设图
Fig. 2 Position of data loggers in test caves

监测设备采用美国 Onset 公司生产的 MX1102A 型 CO₂ 及温湿度监测仪,数据采集频率为 1 次 · min⁻¹,详细技术参数见文献[22]。窟外气象数据利用美国 CAMPBELL SCIENTIFIC 公司的全自动气象站测得,数据采集频率为 1 次 · (10 min)⁻¹。

1.2 实验步骤

实验所采用的设备和材料包括 CO₂ 及温湿度监测仪、监测仪支架、市售钢瓶装 CO₂ 气体适量、通气胶管和低功率电风扇。实验具体步骤如下^[18]。

1) 校准监测设备:将所有 CO₂ 及温湿度监测仪置于窟外通风良好无人干扰处,稳定运行 20 min 后统一进行手动零点校准。

2) 测定 CO₂ 背景浓度:在窟外空旷处距地面 1.5 m 布设 1 个监测点,测量窟外环境中 CO₂ 浓度。

3) 布设监测点位:打开实验洞窟门,按照 1.1 节中所述的布点方法,利用监测仪支架在窟内布设多个监测点,利用手机蓝牙功能连接所有监测设备并读取数据,待窟内 CO₂ 浓度与窟外一致时关闭窟门。

4) 释放示踪气体:利用通气胶管释放 CO₂ 气体,胶管一端连接窟外带有减压阀和流量计的钢瓶,另一端由实验人员手持引入洞窟释放气体,待实验人员进入窟内后,用塑料布密封洞窟开口。

5) 混匀示踪气体:打开窟内低功率电风扇搅动气流,实验人员持胶管在洞窟空间来回移动,对于高处空间采用竖杆绑缚胶管释放气体,同时随时读取多个测点 CO₂ 浓度,及时调整气体释放位置和电风扇位置,必要时可通过多次释放气体的方法使洞窟内 CO₂ 尽量均匀,待多个测点 CO₂ 浓度最大差值在 100 mL/m³ 以内且单个测点浓度接近 1 500 mL/m³ 时,停止释放气体,关闭电风扇,人员撤出并移走塑料布。

6) 记录示踪气体衰减数据:实验中设计 3 种工况,分别为窟门关闭、窟门打开、外层铝合金窟门打开而内层纱网门关闭(双层窟门洞窟),依据具体工况打开或关闭窟门,开始测试,待窟内测点 CO₂ 浓度接近窟外背景浓度时停止测试,记录测试起止时间。

1.3 数据处理

示踪气体法测定建筑自然通风效率的基本原

理是示踪气体遵循质量守恒方程,待测建筑空间 CO₂ 浓度与通风量存在如下关系^[15]:

$$V \frac{dC_{in}}{dt} + Q(C_{in} - C_{out}) = F \quad (1)$$

式中:V 为测试空间净体积,m³;C_{in} 为测试空间 CO₂ 浓度, mL/m³;t 为时间,h;Q 为测试空间通风量,m³ · h⁻¹;C_{out} 为室外 CO₂ 浓度, mL/m³;F 为 CO₂ 释放速率,m³ · h⁻¹。

本文采用浓度衰减法,由于衰减法中无示踪气体释放,故 CO₂ 释放速率为 0,求解式(1) 可得式(2)^[26]:

$$A = \frac{\ln(C_{t1} - C_{out}) - \ln(C_{t2} - C_{out})}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:A 为测试空间换气次数,次 · h⁻¹;C_{t1} 为 t₁ 时刻测试空间内 CO₂ 浓度, mL/m³;C_{t2} 为 t₂ 时刻测试空间内 CO₂ 浓度, mL/m³;C_{out} 为室外 CO₂ 浓度, mL/m³;Δt 为 CO₂ 浓度下降时长,即 t₁ 至 t₂ 的时长,h。

换气次数可由式(2) 通过平均法和回归方程法计算得到^[18,21],前者仅需初始和末尾时刻 CO₂ 浓度数据,后者需连续采样获得一系列时刻 CO₂ 浓度进行曲线拟合,本文采用回归方程法。

为明确洞窟不同位置通风性能的异同,采用换气次数相对误差进行评价,其计算公式如下^[27]:

$$\delta(i) = \frac{|A(i) - \bar{A}|}{\bar{A}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:δ(i) 为第 i 个测点换气次数的相对误差,%;A(i) 为第 i 个测点的换气次数,次 · h⁻¹;Ā 为多个测点的平均换气次数,次 · h⁻¹。

建筑自然通风的驱动力包括热压和风压 2 种作用,其中单侧自然通风的驱动力可通过雷诺数(Re) 与格拉晓夫数(Gr) 的比值(Re²/Gr) 进行判断,当该比值远小于 1 时,认为热压作用为主要驱动力,此时可不考虑风压的影响,当该值远大于 1 时,则认为风压为主要驱动力,可不考虑热压的影响,当该值接近 1 时,则说明由热压和风压共同进行驱动^[21]。本文依据该比值进行洞窟自然通风驱动力的判断,具体计算公式如下:

$$\frac{Re^2}{Gr} = \frac{u^2}{gd} \cdot \frac{T}{\Delta T} \quad (4)$$

式中:u 为窟外风速,m/s;g 为重力加速度,取 9.8 m/s²;ΔT 为洞窟内外温差,K;T 为窟内外平均空气温度,K;d 为洞窟口水力直径,m。

2 结果与分析

2.1 洞窟换气次数的空间差异性

图 3(a)、(b) 分别显示了第 31 窟(覆斗顶形窟)和第 432 窟(中心塔柱窟)在窟门打开工况下,窟内不同测点的 CO₂ 浓度衰减情况。从图 3(a)可以看出,第 31 窟各测点 CO₂ 浓度衰减趋势大体一致,均表现为 0~0.1 h 内 CO₂ 快速衰减,

浓度由初始时刻的 1 400 mL/m³ 左右下降至约 800 mL/m³,在随后的 0.1~0.3 h 衰减速率逐渐减小,期间 CO₂ 浓度下降约 300 mL/m³,0.3 h 以后 CO₂ 浓度曲线趋于平缓。图 3(b)表现出类似变化趋势,说明第 432 窟中各测点 CO₂ 浓度也经历了快速衰减、降速衰减、趋于平缓 3 个阶段。窟门关闭工况下洞窟 CO₂ 浓度衰减规律与窟门打开工况下相似,此处不再赘述。

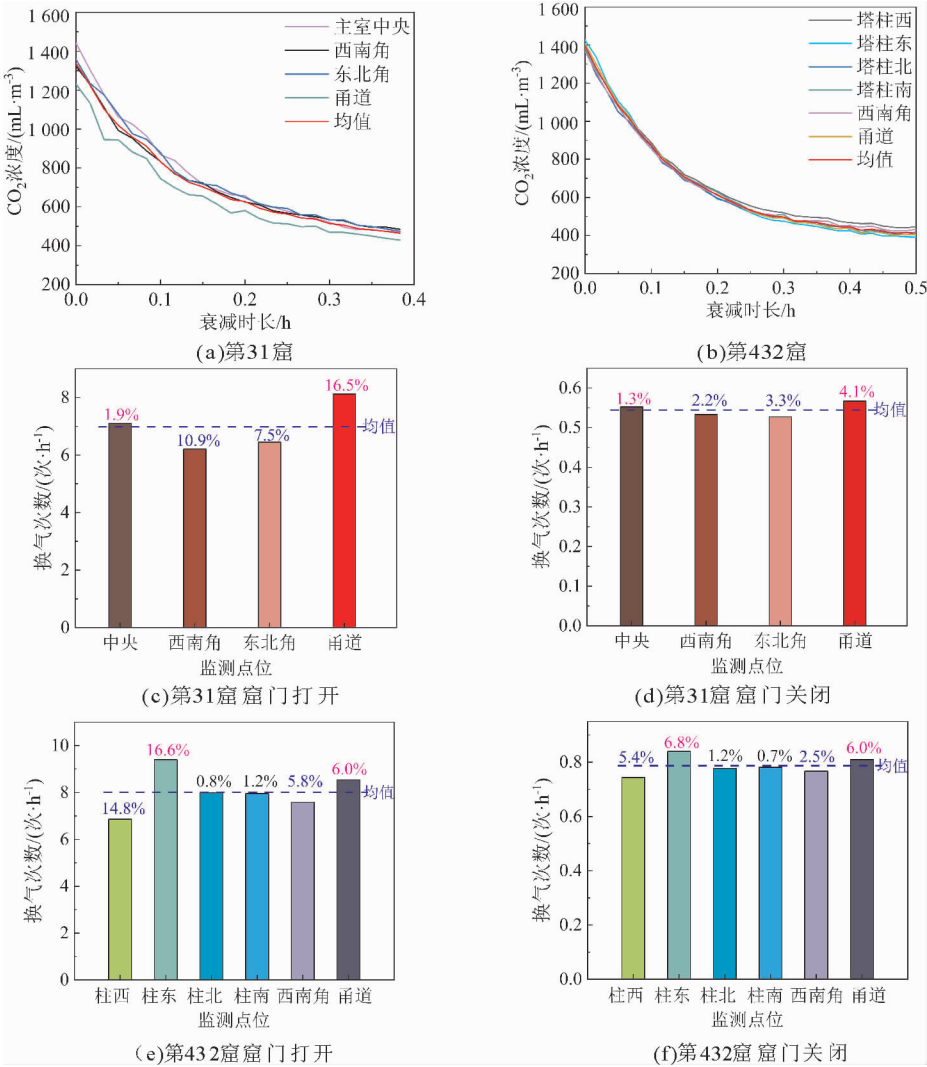


图 3 窟内不同位置 CO₂ 浓度衰减曲线及换气次数

Fig. 3 CO₂ concentration decay curves and air changes per hour of different positions in caves

图 3(c)、(d) 依次为第 31 窟在窟门打开和关闭工况下不同位置的换气次数,可以看出 2 种工况下换气次数的空间特征类似,即雨道处最大,且高于均值,2 种工况下其换气次数相对误差分别为 16.5% 和 4.1%,主室中央最接近均值,相对误差为 1.9% 和 1.3%,西南角和东北角均低于均值。图 3(e)、(f) 分别为第 432 窟在窟门打开和

关闭工况下不同位置的换气次数。其表现为塔柱东侧最大,相对误差为 16.6% 和 6.8%,雨道次之,塔柱西侧最小,且远低于均值,相对误差分别为 14.8%、5.4%。塔柱南、北两侧居中,二者大小相当且最接近均值。此外,当窟门由打开转为关闭时,第 31 窟和第 432 窟内不同位置自然通风性能差异均趋于减小。

图4(a)为8个覆斗顶形窟不同位置换气次数相对误差统计结果,结果显示其存在明显差异。在变化幅度方面,甬道处最大,西南角次之,再次为东北角,主室中央最小。甬道和主室中央相对误差范围分别为1.1%~16.5%和0.03%~3.6%。在均值方面,甬道处最大,为5.9%,西南角与东北角相当,分别为4.5%和4.9%,主室中央最小,为3.6%。说明甬道换气次数对均值的偏离程度最大,且不同洞窟间差异大,主室中央最接近均值,且不同洞窟间变幅小。

图4(b)为7个中心塔柱窟不同位置换气次数相对误差统计结果,类似地表现出空间差异性。

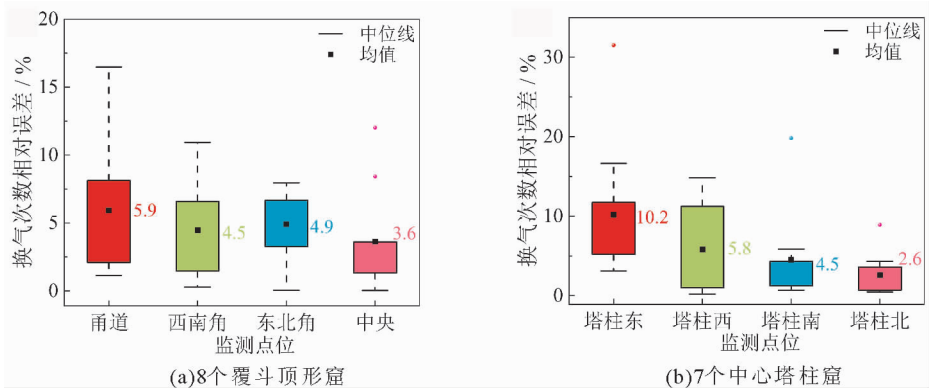


图4 洞窟不同位置换气次数的相对误差

Fig.4 The relative error of air changes per hour of different positions in caves

2.2 洞窟换气次数的量化特征

图5为所有实验洞窟换气次数的统计结果,可知在窟门打开、仅纱网门关闭和窟门关闭工况下,洞窟平均换气次数依次为7.0、2.8、1.2次·h⁻¹。表明在窟门打开时,每小时窟内可与窟外进行7次空气交换,当纱网门关闭时,通风效率下降60%,而当窟门关闭时,进一步下降为窟门打开工况的17%。此外,随窟门开启程度减小,换气次数波动幅度亦减小,窟门打开时为1.7~13.3次·h⁻¹,仅纱网门关闭时为1.5~5.2次·h⁻¹,窟门关闭时变幅低至1次·h⁻¹。

表2为2022年春季洞窟换气次数及相关气象条件,其中,窟内外温差指窟内温度减窟外温度,为便于理解,以下均以绝对值表述。由表2可知,拟合优度均在0.96以上,说明拟合结果良好。在窟门打开和关闭工况下,换气次数分别为5.3~11.3次·h⁻¹和0.3~4.5次·h⁻¹,且大体上随洞窟体积增大而减小。窟门打开时,第432窟和第387窟体积相当,但前者换气次数明显高于后者,这可能是由于中心塔柱窟(第432窟)换气

在波动幅度方面,塔柱西侧最大,其次为塔柱东侧,塔柱南、北侧相对较小。塔柱西侧和塔柱北侧相对误差波动范围分别为0.2%~14.8%和0.5%~4.3%。从均值来看,依塔柱东、西、南、北的顺序递减,分别为10.2%、5.8%、4.5%、2.6%。这些结果表明塔柱北侧换气次数与平均值的偏离程度最小且最稳定。

考虑到洞窟主室是文物保存的主要空间,且甬道换气次数与均值存在较大偏差,下文中统一以主室多个测点换气次数均值代表整个洞窟换气次数。

次数计算中包括通风效率比较高的塔柱东测点,类似情况的还有第265窟和第445窟。窟门关闭时,木制窟门的第431、437窟换气次数分别为3.8次·h⁻¹和4.5次·h⁻¹,而其他铝合金窟门洞窟最高换气次数为1.3次·h⁻¹,最低仅为0.3次·h⁻¹,后者与前者相差2.5次·h⁻¹以上。

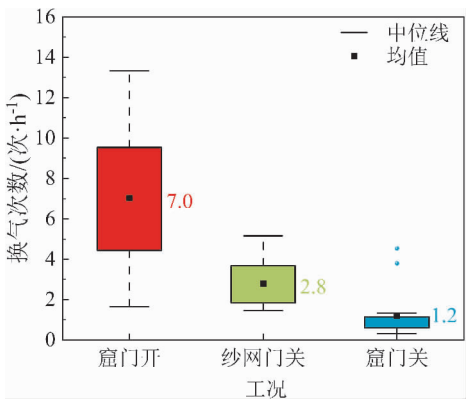


图5 不同工况下洞窟换气次数

Fig.5 Air changes per hour of test caves under various working conditions

表 2 不同体积洞窟的换气次数
Tab. 2 Air changes per hour of test caves with varied volumes

窟号	体积/m ³	窟门打开				窟门关闭			
		换气次数/ (次·h ⁻¹)	R ²	窟内外 温差/℃	风速/ (m·s ⁻¹)	换气次数/ (次·h ⁻¹)	R ²	窟内外 温差/℃	风速/ (m·s ⁻¹)
442	57.3	—	—	—	—	1.3	0.998 7	−10.87	0.74
435	57.7	11.1	0.992 6	−4.31	0.71	1.0	0.998 8	−10.07	0.86
437	62.9	—	—	—	—	4.5	0.964 6	−10.50	0.83
45	64.0	11.3	0.994 7	−7.32	0.75	1.2	0.993 3	−13.33	0.83
386	93.0	8.3	0.999 1	−6.42	0.64	1.3	0.998 3	−9.88	0.76
387	98.6	5.7	0.993 4	−6.15	0.64	0.9	0.998 3	−10.42	0.69
432	99.0	8.0	0.998 7	−5.04	0.71	0.8	0.999 0	−10.16	0.86
431	109.6	—	—	—	—	3.8	0.979 8	−10.28	0.84
31	113.1	6.6	0.996 6	−8.05	0.81	0.5	0.998 3	−13.96	0.83
249	116.7	—	—	—	—	0.9	0.993 0	−7.03	0.67
445	122.2	5.6	0.998 3	−11.32	0.94	0.3	0.997 8	−7.26	0.92
265	150.5	9.5	0.998 5	−12.28	1.05	—	—	—	—
257	275.4	5.3	0.995 5	−10.70	1.00	—	—	—	—

2.3 洞窟换气次数的影响因素

表 3 为第 249 窟和第 257 窟在窟门打开和关闭工况下的气象条件及由式(4)计算得到的 Re^2/Gr 值。其中,窟门关闭工况下窟口风速参考文献[21]中的实验结果取值 0.02。从表 3 可以看出,在实验期间,第 249 窟和第 257 窟窟外风速较小,最大值为 1 m/s,最小为 0.77 m/s。大体上夏季和冬季的窟内外温差相当,变化范围为 3.32 ~ 5.24 ℃,但第 249 窟与第 257 窟春季窟内外温差显

著大于夏季和冬季,分别高达 7.03 ℃和 10.70 ℃。从 Re^2/Gr 值可以看出,在窟门打开工况下,其均介于 1 和 4 之间,且大体与窟内外温差呈负相关。由此判断当窟门处于打开状态时,第 249 窟和第 257 窟的自然通风受热压和风压共同影响,但由于风速整体偏小,导致 Re^2/Gr 值总体偏低,且受温差影响明显。在窟门关闭工况下,窟口风速极小, Re^2/Gr 值远远小于 1,此时洞窟自然通风主要受热压影响。

表 3 不同工况下第 249 窟和第 257 窟的自然通风驱动力
Tab. 3 Natural ventilation driving force of Cave 249 and 257 under different working conditions

窟号	工况	季节	窟口水力直径/ m	风速/ (m·s ⁻¹)	温差/ ℃	窟内外平均 气温/K	Re^2/Gr	驱动力
249	窟门打开	夏季	1.44	0.77	3.57	300.8	3.55	热压、风压
		冬季		0.78	4.66	271.3	2.52	热压、风压
	窟门关闭	春季		0.02	7.03	291.7	0.001 2	热压
		夏季		0.02	3.71	300.3	0.002 3	热压
257	窟门打开	春季	1.44	1.00	10.70	291.3	1.93	热压、风压
		夏季		0.85	4.13	301.1	3.74	热压、风压
		冬季		0.76	5.24	271.6	2.13	热压、风压
	窟门关闭	夏季		0.02	3.32	299.4	0.002 6	热压

对于本次实验中的其他洞窟,实验期间风速大体小于 1 m/s,计算 Re^2/Gr 值发现不同洞窟 Re^2/Gr 值分布情况与表 3 一致,即窟门打开工况下 Re^2/Gr 值介于 1 和 4 之间,窟门关闭工况下 Re^2/Gr 值远远小于 1,进一步说明窟门打开工况下洞窟自然通风受热压和风压共同影响,而窟门关闭时主要受热压控制。

图 6(a)、(b)依次为第 249(覆斗顶形窟)、

257 窟(中心塔柱窟)在春季(4 月)、夏季(8 月)、冬季(12 月)的换气次数。图 6(a)表明第 249 窟换气次数与窟内外温差正相关,窟门打开时,冬季窟内外温差高于夏季约 1.1 ℃,冬季换气次数比夏季高 7.2 次·h⁻¹。仅纱网门关闭时,春、夏、冬季窟内外温差依次为 1.8、0.6、6.7 ℃,换气次数依次为 4.6、1.5、5.2 次·h⁻¹,二者变化趋势一致。窟门关闭时,夏季换气次低于春季 0.4 次·h⁻¹,其

窟内外温差亦低于春季。图 6(b) 显示在窟门打开工况下,第 257 窟换气次数与温差变化趋势一致,但春季温差最大,其换气次数却位于冬季和夏季之间,说明风速也对换气次数产生了影响,且换气次数与风速大小并非始终正相关,可能是由于

风向的不同导致风压和温差对换气次数的影响方向不同,这些结果与表 3 中 Re^2/Gr 值判断结果一致。整体来看,随着窟门开启程度减小,窟内外温差对换气次数的影响也随之减弱。

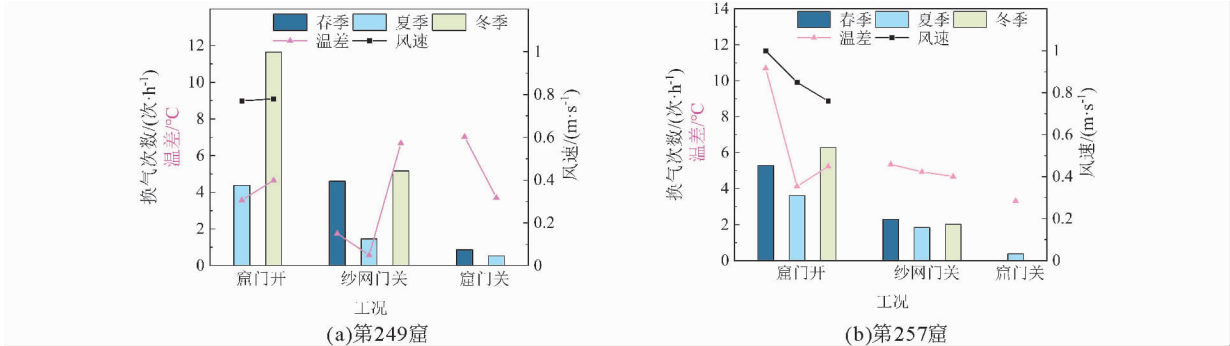


图 6 洞窟换气次数的季节差异性
Fig. 6 The difference of air changes per hour of caves in spring, summer and winter

图 7(a)、(b) 分别为 2022 年 4 月和 8 月不同工况下洞窟换气次数与体积、窟门面积、窟内外温差的关系图。由图 7(a) 可知,洞窟换气次数与洞窟体积呈显著负向关联,且亦受窟门面积和窟内外温差影响。第 45 窟至 445 窟洞窟体积逐渐增大,相应地换气次数大体呈递减趋势,说明二者呈强负相关。从 386 和 387 窟可以看出,洞窟换气次数与窟门开口面积呈正相关。在窟门打开工况下,二者体积和窟内外温差基本一致,但双开门 (2.2 m²) 的 386 窟换气次数明显高于单开门 (1.8 m²) 的 387 窟。第 445 窟和 387 窟换气次数的相对关系则说明了窟内外温差与换气次数的正向关系,二者窟门面积和换气次数趋于一致,但第

445 窟体积比第 387 窟大 23.6 m³,表明二者的窟内外温差差异是削弱体积对换气次数影响的主要原因。此外,第 387 窟体积比第 31 窟小 14.5 m³,但窟门打开工况下,后者换气次数却比前者大 0.9 次·h⁻¹,这是由于第 31 窟为双开门铝合金窟门,而第 387 窟为单开门,前者面积比后者大约 0.5 m²,同时,第 31 窟窟内外温差比第 387 窟高 2 °C,温差和窟门面积的叠加正向作用超过了洞窟体积对换气次数的负向影响。图 7(b) 展现出了相同规律,值得注意的是,仅纱网门关闭时,体积更大的第 257 窟换气次数高于体积较小的第 328、249 窟,说明窟内外温差差异对换气次数的影响超过了体积差异。

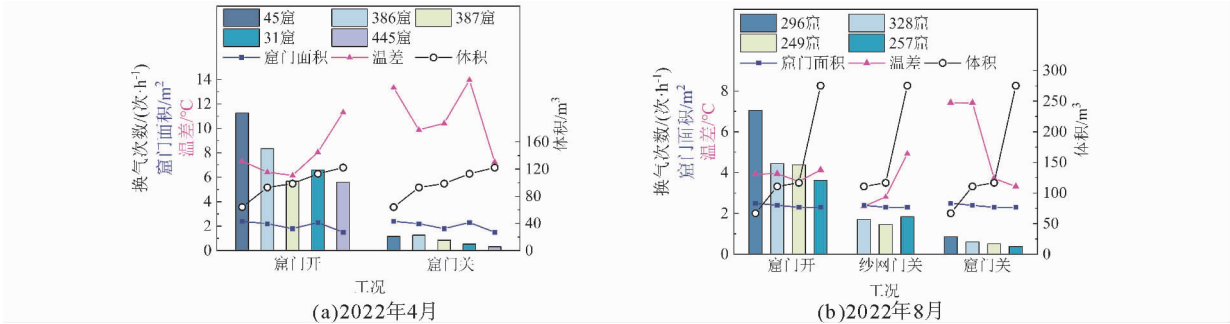


图 7 不同工况下洞窟体积、窟门面积及窟内外温差与换气次数的相关性
Fig. 7 The correlation between air changes per hour of caves and its factors under different working conditions

3 讨论

3.1 洞窟自然通风性能的空间差异性

建筑自然通风的原理是风压作用或(和)热

压作用使空气产生自发运动。王江丽等研究发现莫高窟窟内气流速度与进深呈反比,甬道较主室气流速度更大^[28]。于覆斗顶形窟而言,甬道和主室中央处于通风路径,二者气流速度更高,导致其换气次数均值分别高于窟内换气次数均值 5.9%

和 3.6%,而拐角处的西南角和东北角其换气次数大体低于均值。中心塔柱窟换气次数排序恰好印证了气流速率与进深为反比的结论。塔柱东通风效率优于甬道,可能是由于二者邻近,但塔柱东侧周围空间更大,该测点 CO₂ 更易扩散。

与既有相关研究相比,王江丽等主要关注洞窟纵深气流变化^[28],其监测点主要沿洞窟纵深布设,张君杰主要依据洞窟主室中心点数据计算换气次数^[21],并未考虑其空间差异性。本研究在前人基础上,基于 2 种形制洞窟空间结构进行了均匀布点,系统揭示了洞窟自然通风效率空间分布特征。研究发现所有覆斗顶形窟主室中央换气次数与均值平均相差 3.6%,所有中心塔柱窟塔柱南、北侧与均值平均相差 4.5% 和 2.6%,分别是 2 种形制洞窟中最接近均值的测点,故可作为单点测定方法的代表性测点确定洞窟换气次数,尤其当窟门关闭时。窟门打开时,对于体积较大(>100 m³)的洞窟,更宜采用多点测定求均值的方法。

3.2 洞窟自然通风性能的多因素叠加效应

通过计算 Re^2/Gr 值判定实验洞窟在窟门打开工况下其自然通风受热压和风压共同影响,但在窟门关闭工况下则主要受热压影响。第 249 窟和第 257 窟在不同季节换气次数与窟内外温差的强正相关关系表明,即使是在窟门完全打开时,窟内外温差对洞窟换气次数的影响相较风速也更为显著。这一方面是由于实验期间窟外风速很小(<1 m/s),另一方面也与莫高窟所处地形地貌有关,其开凿于大泉河西岸的崖体上,背靠鸣沙山,西侧与三危山相交,窟区位于南北走向的河谷中,窟前东侧台地种植有防风林带,导致窟前主导风向为与崖面近似平行的南风 and 北风^[29]。此前有学者通过实验证明,在这种风向下小风速不会引起洞窟空气交换^[30],因此与风压相比,热压在莫高窟洞窟自然通风中占据更为主导地位。

洞窟通风效率是外因(窟内外温差)和内因(洞窟体积、窟门面积、门窗类型、窟门开启程度)共同作用的结果。其中,窟门开启程度的影响最突出,窟门开启程度一致时,洞窟体积对换气次数起决定性作用,二者为负相关。与此同时,窟内外温差、窟门面积也是重要影响因素,二者与换气次数正相关,其叠加作用可抵消体积对通风效率的负效应。另外,第 431、437 窟在窟门关闭工况下换气次数为其他洞窟的 3 倍以上,是因为木制直

棂窗对气流速度的削弱作用远小于铝合金窗,这与曹丽丹发现建筑纱窗对来流风速的削弱作用与纱窗孔隙率呈负相关^[26]的结论相符。

3.3 洞窟自然通风性能的时间变化特征

洞窟自然通风性能季节差异性明显,这与窟内外温差的时间变化特征有关^[31-32]。Zhang 等发现 4—9 月莫高窟窟内外温差日最大值出现在 16:00—21:00,而 1—3 月和 10—12 月则出现在 8:00—11:00^[33]。窟内外温差大体表现为:春、夏季下午大于上午,秋、冬季上午大于下午。表 2 显示,窟门打开工况下窟内外温差大部分小于 10℃,而窟门关闭工况下则多数高于 10℃,前者是在 2022 年 4 月上旬(11:00—12:00)开展,后者是在下午(15:00—20:00),这与文献[33]的研究结果一致。

2022 年 8 月在仅纱网门关闭工况下,分别在上午 11:40—12:30 和下午 1:10—1:45 连续对第 249 窟进行了 2 次换气次数测试,测试结果依次为 1.5 次·h⁻¹ 和 2.6 次·h⁻¹,窟内外温差依次为 -0.57℃ 和 -2.81℃。显然,温差的日波动导致其换气次数在短短 2 h 之内上升了 1.1 次·h⁻¹,说明在热压主导的自然通风下,洞窟通风性能将随窟内外温差在长时间尺度上的变化而改变。此前,张君杰在 1 月测得第 45 窟换气次数为 10.8 次·h⁻¹^[21],这与本研究在 4 月针对第 45 窟测得的 11.3 次·h⁻¹ 相近,对比 2 次测试时的洞窟内外温差(分别为 2.48℃ 和 7.32℃)可以发现二者相差 4.8℃,这可能是本次测试换气次数略大的原因。

4 结论与建议

1) 洞窟内不同位置自然通风性能差异显著,该差异性随窟门由打开转为关闭而明显减小。覆斗顶形窟换气次数排序为:甬道>主室中央>西南角和东北角。中心塔柱窟排序为:塔柱东>甬道>塔柱南=塔柱北>西南角>塔柱西。2 种形制洞窟的代表性测点分别为主室中央和塔柱南、北侧。

2) 窟门打开时:换气次数分布范围为 1.7~13.3 次·h⁻¹,平均为 7.0 次·h⁻¹;仅纱网门关闭时,换气次数变化范围为 1.5~5.2 次·h⁻¹,平均为 2.8 次·h⁻¹。窟门关闭时,排除第 431、437 窟,其余洞窟换气次数介于 0.4~1.3 次·h⁻¹ 之

间,平均为 $0.8 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3)洞窟自然通风的主要驱动力为热压,其通风性能受窟内外温差、窟门开启程度、窟门面积、洞窟体积、门窗类型综合影响,其中,前 3 种因素与换气次数正相关,体积与换气次数负相关。窟门开启程度为洞窟自然通风性能的主控因素,窟门由打开转为关闭时,其他因素对换气次数的影响急剧减弱。洞窟自然通风性能季节性差异显著,其根本原因在于窟内外温差的季节性变化。

4)在莫高窟洞窟空气质量调控实践中,应重点考虑洞窟门窗类型的设计以及窟门开启程度的适时调整。同时,可结合窟内外温差在日尺度、季节尺度上的变化规律,根据调控需求合理选择调控时段。未来需重点研究不同调控措施下洞窟内环境要素的变化特征,以便为调控策略的科学制定提供理论支撑。

5)本次研究通过现场试验方法,定量表征了覆斗顶和中心塔柱窟自然通风性能的时空动态特性,并对其成因进行了初步探究。然而研究对象未涉及涅槃窟等其他窟形,同时实验工况也未考虑强降雨等极端气象情况,研究结论的适用范围具有一定局限性,这些不足有待今后进一步拓展与完善。

参考文献

[1] 杨赫赫. 敦煌莫高窟石窟建筑形制演化与特征探析[J]. 石河子大学学报(哲学社会科学版), 2017, 31(3): 68-75.
YANG H H. Study on the evolvement and characteristics of architectural forms of Mogao Caves at Dunhuang [J]. Journal of Shihezi University (Philosophy and Social Sciences), 2017, 31(3): 68-75.

[2] 杨赫赫,王其亨. 敦煌莫高窟石窟建筑形制与结构特征探析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 199-212.
YANG H H, WANG Q H. Analysis of architectural form and structural characteristics of Dunhuang Mogao Grottoes [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(2): 199-212.

[3] 李最雄. 敦煌石窟保护工作六十年[J]. 敦煌研究, 2004(3): 10-26.
LI Z X. Sixty years on the conservation of the Dunhuang Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2004(3): 10-26.

[4] 李萍. 莫高窟旅游开放新模式的构建与实践[J]. 敦煌研究, 2018(2): 47-50.

LI P. The construction and practice of a new tour pattern at the Mogao Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2018(2): 47-50.

[5] 雷政广. 莫高窟分时预约系统的设计与实现[D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 1-2.

[6] 郭青林. 敦煌莫高窟壁画病害水盐来源研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009: 120-176.

[7] AGNEW N, MAEKAWA S, WEI S Y. Causes and mechanisms of deterioration and damage in Cave 85 [C] // Conservation of ancient sites on the Silk Road: Proceedings of the Second International Conference on the Conservation of Grotto Sites. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2010: 412-420.

[8] CHEN H L, CHEN G Q, AGNEW N. Long-term monitoring of microenvironment and wall paintings influenced by soluble salts at Mogao Grottoes, China [C] // Proceedings of SWBSS ASIA 2023 First International Conference in Asia on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures. Nara: Nara National Research Institute for Cultural Properties, 2023: 49-64.

[9] 陈港泉. 敦煌莫高窟壁画盐害分析及治理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016: 44-60.

[10] 李培都, 司建华, 冯起, 等. 1958—2015 年敦煌及周边地区极端降水事件的时空变化特征[J]. 高原气象, 2018, 37(2): 535-544.
LI P D, SI J H, FENG Q, et al. Temporal and spatial variation of extreme precipitation events in Dunhuang and surrounding areas from 1958 to 2015 [J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(2): 535-544.

[11] 薄权. 独立房间不同开窗形式通风特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2018: 6.

[12] SHERMAN M H. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone [J]. Building and Environment, 1990, 25(4): 365-374.

[13] 周雨先, 黄晨. 示踪气体测定自然通风量技术现状[J]. 建筑热能通风空调, 2013, 32(1): 54-56.
ZHOU Y X, HUANG C. A review of natural ventilation measurements using tracer gas techniques [J]. Building Energy and Environment, 2013, 32(1): 54-56.

[14] 简毅文, 孙荣, 刘书伟, 等. 居住建筑通风换气状况的动态特性研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(12): 44-49.
JIAN Y W, SUN R, LIU S W, et al. Study on the dynamic variation of natural ventilation rates in residential buildings [J]. Building Science, 2021, 37(12): 44-49.

[15] 李民健, 梁卫辉. 高校宿舍自然通风现状调查及不

- 同测试方法分析[J]. 建筑科学, 2022, 38(10): 216-221.
- LI M J, LIANG W H. Investigation on the current situation of natural ventilation in college dormitories and analysis of different testing methods [J]. Building Science, 2022, 38(10): 216-221.
- [16] TURANJANIN V, VUCICEVIC B, JOVANOVIĆ M, et al. Indoor CO₂ measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation [J]. Energy, 2014, 77: 290-296.
- [17] IIZUKA A, OKUIZUMI Y, YANAGISAWA Y. Estimation of uncertainty in tracer gas measurement of air change rates[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2010, 7(12): 4238-4249.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 公共场所卫生检验方法 第1部分: 物理因素: GB/T 18204.1—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 6.
- [19] ZHONG H Y, SUN Y, SHANG J, et al. Single-sided natural ventilation in buildings: A critical literature review [J]. Building and Environment, 2022, 212: 108797.
- [20] 张国彬, 汪万福, 薛平, 等. 敦煌莫高窟典型洞窟空气交换速率的对比分析[J]. 敦煌研究, 2009(6): 100-104.
- [21] 张君杰. 敦煌莫高窟洞窟自然通风特性及保护方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023: 37-73.
- [22] 陈海玲, 郭青林, 张景科, 等. 基于游客释放二氧化碳的莫高窟洞窟换气次数测算研究[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2023, 2(4): 38-49.
- CHEN H L, GUO Q L, ZHANG J K, et al. A study on the measuring method for air changes per hour in Mogao Caves using carbon dioxide exhaled by tourists [J]. Research on Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2023, 2(4): 38-49.
- [23] 赵声良. 敦煌北朝石窟形制诸问题[J]. 敦煌研究, 2006(5): 1-15.
- ZHAO S L. Regimes of shapes of the Northern Dynasties' grottoes in Dunhuang [J]. Dunhuang Research, 2006(5): 1-15.
- [24] 王洁. 敦煌早期覆斗顶窟形式初探[J]. 敦煌研究, 2008(3): 19-24.
- WANG J. Preliminary research on the caves with pyramidal ceilings in the early period of the Dunhuang Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2008(3): 19-24.
- [25] 国家环境保护总局. 室内环境空气质量监测技术规范: HJ/T 167—2004 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 4.
- [26] 曹丽丹. 住宅建筑纱窗对自然通风性能的影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 45-53.
- [27] 齐美薇, 李晓峰, 黄河. 示踪气体法利用人体作为CO₂释放源测量宿舍换气次数的方法探究[J]. 建筑科学, 2013, 29(6): 52-57.
- QI M W, LI X F, HUANG H. Discussion on measuring ventilation rates of dorms through tracer gas method with human body as CO₂ release source [J]. Building Science, 2013, 29(6): 52-57.
- [28] 王江丽, 闫增峰, 王旭东, 等. 莫高窟洞窟自然通风测试研究[J]. 敦煌研究, 2015(4): 121-126.
- WANG J L, YAN Z F, WANG X D, et al. Test research on the natural ventilation of the Mogao Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2015(4): 121-126.
- [29] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 等. 地形地貌对莫高窟区域微环境的影响[J]. 敦煌研究, 2008(3): 98-102.
- LI H S, WANG W F, ZHANG G B, et al. Effect of topography and geomorphology on the regional environment of Mogao Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2008(3): 98-102.
- [30] 王江丽. 敦煌莫高窟通风调节与控制技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016: 90-92.
- [31] 陈海玲, 陈港泉, 薛平, 等. 敦煌莫高窟第465窟温湿度时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 155-160.
- CHEN H L, CHEN G Q, XUE P, et al. Spatial and temporal distribution of temperature and relative humidity in Mogao Cave 465 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2): 155-160.
- [32] 王亚军, 张艳杰, 郭青林, 等. 敦煌莫高窟第87窟温湿度特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 1-6.
- WANG Y J, ZHANG Y J, GUO Q L, et al. Characteristics of temperature and relative humidity of Cave 87, Mogao Grottoes [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(1): 1-6.
- [33] ZHANG Y J, WANG Y J. Maintenance schedule optimization based on distribution characteristics of the extreme temperature and relative humidity of Cave 87 in the Mogao Grottoes [J]. Heritage Science, 2023, 11: 158.

(编辑 李 静)