

# 物联网监测技术在古墓葬砖壁画墓室中的应用

杨殿刚

嘉峪关丝路（长城）文化研究院 甘肃嘉峪关 735100

**摘要：**古墓葬是鉴于可移动文物和不可移动文物之间的一种特殊珍贵文物，受地域空间和环境限制，墓室内的砖壁画受环境影响和人为干扰，保护和修复难度大。利用物联网技术对环境和结构稳定性监测，可以帮助制定保护预案，合理控制游客承载量，减少墓室内温湿度、二氧化碳和稳定性变化，达到延缓和治理墓室中病害的作用，为可持续发展的古墓葬展示利用提供技术支撑。

**关键词：**古墓葬；砖壁画；物联网；监测；应用

## 引言

“果园—新城墓群”是国务院 2001 年公布的全国第五批重点文物保护单位。嘉峪关魏晋砖壁画墓是“果园—新城墓群”的新城部分，位于嘉峪关市区东约 18 公里的新城镇，在近 13 平方公里的地域内分布着魏晋时期的古墓葬一千余座，素有“地下画廊”之称。1972—1979 年期间，先后发掘了 18 座墓葬，其中 8 座为砖壁画墓，10 座为素砖墓。

新城墓群六、七号墓作为对外开放和研究使用，五号墓搬迁至甘肃省博物馆外，一、三、四号墓因坍塌，将墓室内砖壁画搬迁至博物馆收藏，其余墓葬因保护需要给予回填。六、七号墓发掘于 1972—1973 年间，这两座墓均为魏晋砖壁画墓。建筑形制独特，墓葬由墓道、墓门、照壁、前室、中室、后室、甬道、耳室、壁龛等组成。这两座墓的建造工艺不同于其他几座墓，其建造工序为先挖墓道，然后顺着墓道方向在地下根据墓室大小挖出拱形洞室，再用干砖叠砌墓室，先筑后室，再砌中室、前室，最后砌墓门和门楼。墓室内空间面积较小，其中六号墓面积仅为 21.15 平方米，七号墓面积为 27.42 平方米。六、七号墓采用挖墓道后掏墓洞锥形，用干砖垒砌而成，干砖层最大宽度为 34.5cm，干砖垒砌层和砂砾层间距为 1-2 米的中空层，由于砖与砖之间的相互作用力，不能使用外力对墓室进行稳定性支撑保护，无法对墓室进行整体加固。受温湿度、二氧化碳和游客参观影响，六、七号墓出现壁画色彩淡化，砖画表面起甲、脱落、霉变，砖体开裂。同时六号墓作为开放墓葬，游客参观过程产生的环境变化和稳定性变化，需进行监测管理。因墓室空间小，无固定设备位置，无法使用体积较大和有有线传输的监测设备。

因此针对六、七号墓要采用物联网技术，敷设墓室环境和稳定性监测设备，利用以太网和无线传输技术，实现物与人的信息交流，对采集的数据进行合理分析，评估研判影响因子，达到提前预测和感知位移、应变力、环境因素对墓室和砖壁画的影响，做出合理的文物预防性保护方案，有效提高墓葬砖壁画文物管理水平。

## 1. 物联网技术在砖壁画墓室中的应用

### 1.1 无线传感网系统

物联网监测系统是文物预防性保护和日常监测工作的重要组成部分。运用先进的物联网感知手段，结合高精度探头、低功耗采集和无线传输技术，实现对文物本体、载体和环境的在线、实时监测，构建在线监测和监测数据管理预警为一体的结构保存环境与结构本体监测评估体系，为后续的结构稳定性分析研究和预警提供科学有效的依据。

利用物联网技术建立六、七号墓监测体系，主要监测内容包括：墓室微环境监测、墓室结构性稳定监测等。考虑到墓室内无网络通信信号，不能在文物上固定设备等特殊因素，因此在墓室内安装监测设备要选择体积小，利用率高，信号传输稳定且受环境因素影响较小的传感器。在墓道口安装一台 4G 路由器，采用网线与安装在墓道底部入口处的物联网网关进行连接，从而实现数据的实时采集和传输。物联网网关与墓室内无线传感器终端配合，可以实现无线传感器终端的入网管理、数据采集、存储、转发等服务。

基于传感监测数据智能处理需求，建立云服务平台。利用混合式时序数据管理技术、配置物联网设备管理系统、海量监测数据可视化展示系统和物联网监测数据智能告警

分析系统，对输出监测数据高效存储管理和智能分析。

### 1.2 监测因素

新城墓群监测系统建设完全按照《中国世界遗产监测能力手册》为指导，紧扣监测要素和墓葬文物监测需求，根据保护要求

设定监测范围和监测因子。本文涉及的墓室监测要素主要为墓室内环境监测和稳定性监测。

(1) 游客流量，六号墓为对外开放墓室，经过核算墓室游客承载量 225 人/日。瞬时游客容量限定为 12 人，按日周转率 20 次计，日游量不超过  $20 \times 10$  人次/日 = 240 人/日，每年实际接待量为 9500-10000 人，日平均接待游客 28 人，但游客参观集中在 7、8、9 月份，对墓室内温湿度、二氧化碳浓度变化和墓室稳定性有一定影响。

(2) 墓室温湿度，墓室内的温湿度对砖壁画的保存起到直接的作用。新城墓群在酒泉和嘉峪关交界的戈壁之上，此处日照长而强烈，降雨少蒸发快，常年地面干燥，六、七号墓处于地下 10-12 米之间，墓室内受外界温湿度影响较小。墓室相对湿度在 50% 左右，温度在 11.5-12.5℃ 对砖壁画影响小。墓室内的砖壁画色彩基本没有变化，在不同环境下对砖壁画色彩对比，长城博物馆馆藏砖壁画在恒温恒湿条件下色彩基本没有变化，七号墓相对温湿度变化较小，砖壁画色彩有轻微变化。六号墓因游客参观，温湿度极不稳定，砖壁画色彩变化较大。

(3) 二氧化碳浓度，二氧化碳主要是人体呼吸产生。在空间范围内，人流量较大，二氧化碳含量增高，人体呼出的有机质和菌类随气体流动，在温湿度升高，有机质含量增大时，容易滋生霉菌附着在墓室砖壁画上。

(4) 位移变化，墓室建筑结构为干砖垒砌，与砂砾层有 1-2 米的间隔，中间为中空层，振动对墓室稳定性影响较大，主要振动源为地震、车辆行驶和人员走动产生的振动。墓室上方结构层对下层砖体的压力，结合振动，下方砖体振动受压，产生开裂。墓室中空层上方为砂砾层，砂砾层受外界环境因素影响，部分砂砾岩坠落，墓室结构层受压变形，严重时会造成墓室坍塌。

(5) 应力应变，在墓室中，墓室砖块为烧制青砖，没有外力支撑的作用下，个别砖块受上方砖块压力影响，产生碎裂，砖体的应力变化，单块砖体碎裂，直接威胁到整体砖墙面的安全。

## 2. 监测设备使用

现代数字科技为文物保护提供了有利的支撑，墓葬类文物预防性保护受地域空间和环境条件限制，在物联网技术还未成熟阶段，砖壁画的保护只能是肉眼可见和长期经验的方式对存在的病害进行判断分析，没有云服务技术直接观察各类变化和精确的理论数据，不能形成系统的预防性保护手段。物联网技术发展，对监测地域、监测规模、监测准确度、监测灵活程度和设备可操作性等方面是传统人工手段难以比拟的优势。在墓室中，满足空间限制和文物保护需要，通过物联网技术，在特定环境下，针对性的选择符合墓室砖壁画监测需要的低功耗、体积小、容量大、稳定性强、易安装维护以及无线传输传感器，避免因设备过大和布线线路造成的砖壁画损坏和展示利用受限。

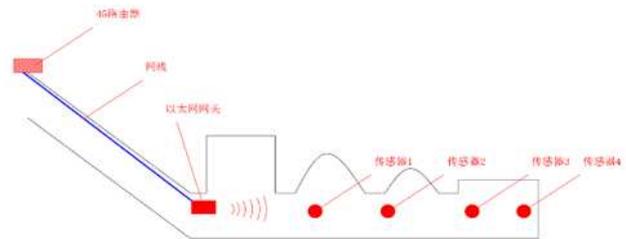


图 1 魏晋墓六号墓、七号墓监测系统逻辑拓扑图

### 2.1 感知层

感知层采用嵌入式无线传感器终端，配备低功耗，高精度的温湿度、二氧化碳、振弦应变计、人流量等探头。具有精度高、体积小等优点、采用锂电池供电、续航能力超过 1 年、无线传输距离远等特点，避免在墓室内大量布线和安装固定，降低维护周期和成本。终端 433MHz 无线传输方式，独具无线自组网通信能力，克服现场特殊环境导致的无线通信遮挡。

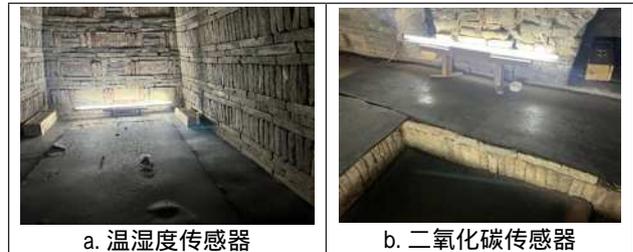




图 2 魏晋墓六号墓、七号墓感知层设备

### 2.2 传输层

传输层采用高性能物联网网关，12V 直流供电，支持以太网、WiFi 或 4G 上传方式，与无线传感器终端配合，可以实现无线传感器终端的入网管理、数据采集、存储、转发等服务。因墓室内无 4G 网络，物联网网关采用以太网传输方式，通过以太网网线的方式与墓道顶部工作间的 4G 路由器连接，实现数据上传功能。

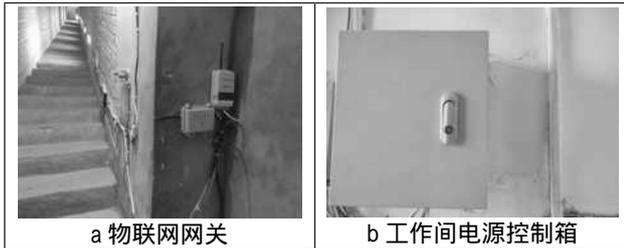


图 3 魏晋墓六号墓、七号墓传输层设备

### 2.3 应用层

墓室无线监测终端采集的数据通过物联网网关发送到物联网数据智能处理服务云平台。云平台包括了物联网设备配置管理系统、海量监测数据可视化展示系统和物联网监测数据智能告警分析系统，提供了物联网监测数据高效存储管理、基于监测数据智能分析的异常预警、监测数据变化智能溯源等服务功能。通过对墓室的人流量、温湿度、二氧化碳和稳定性等信息进行软件分析处理，在可视化展示系统中展现各类数据曲线。监测人员通过海量数据分析，确定各类量化预警阈值，为保护决策提供可靠依据。

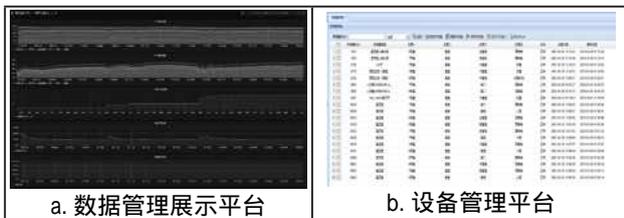


图 4 魏晋墓六号墓、七号墓应用层平台

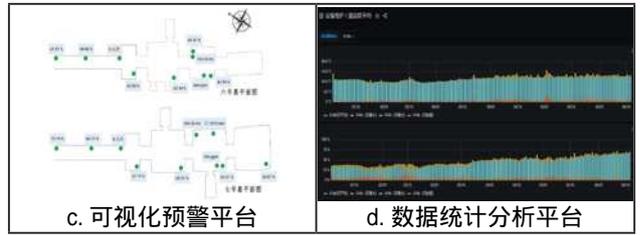


图 4 魏晋墓六号墓、七号墓应用层平台

## 3. 数据分析研判

### 3.1 监测设备布点

根据墓室监测需求，分别在六、七号墓墓室管理用房、墓道中部、墓室照壁、墓室前室、中室以及后室拐角和回廊层各摆放 1 个温湿度传感器，总计 12 个，每个墓室中室各摆放 1 个二氧化碳传感器，中室受压较为明显的素砖壁安装应变感应器，在七号墓中室东壁受挤压变形的墙体摆设位移计。布点图如下：

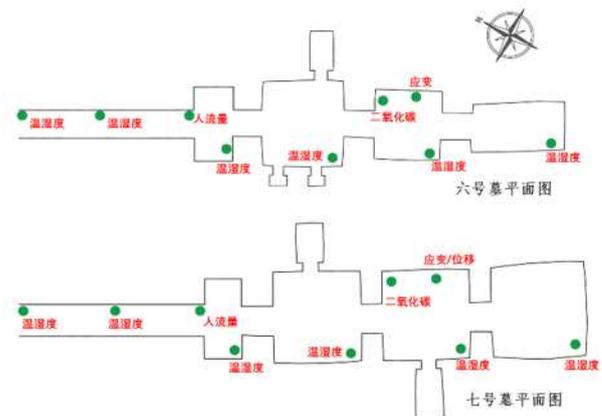


图 5 魏晋墓六号墓、七号墓监测布点图

### 3.2 数据分析

根据 2024 年监测数据分析，得出如下结论：

(1) 2024 年 1 月至 6 月，进入六号墓的人流量为超过 5000 人，主要为游客和保护人员，最高单日人次在 240 人。

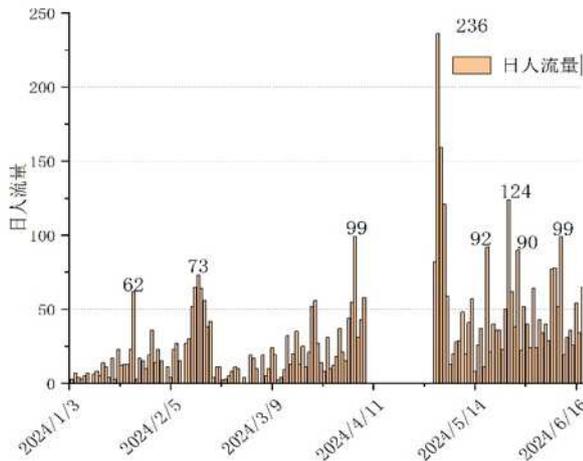


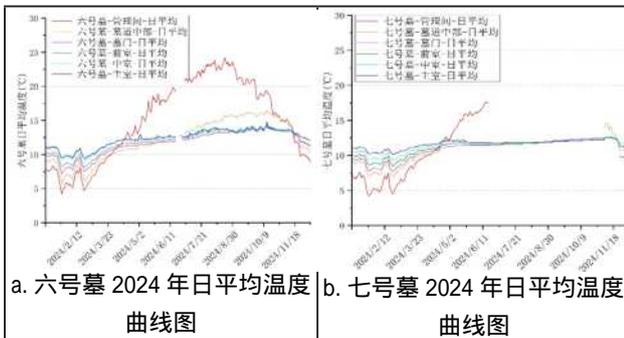
图 6 六号墓 1 月至 6 月人流量曲线图

(2) 六号墓及七号墓室内各测点 2024 年度平均温度及日较差数据统计如下:

表 1 魏晋墓六号墓、七号墓温度日平均、日较差统计表

监测点位	温度日平均 (°C)			温度日较差 (°C)		
	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg
六号墓-管理间	24.2	4.2	14.9	5.0	0.2	1.3
六号墓-墓道中部	16.4	5.7	12.1	4.1	0.1	0.8
六号墓-墓门	14.1	7.1	11.6	2.6	0.1	0.6
六号墓-前室	14.5	8.1	11.9	3.6	0.1	0.8
六号墓-中室	14.8	9.1	12.4	4.3	0.1	0.9
六号墓-后室	14.8	9.4	12.4	4.2	0.1	0.8
七号墓-管理间	17.6	4.2	10.0	5.5	0.1	0.6
七号墓-墓道中部	14.6	6.9	9.6	2.4	0.1	0.4
七号墓-墓门	12.7	7.7	11.0	2.0	0.0	0.2
七号墓-前室	12.6	8.5	11.2	1.7	0.0	0.1
七号墓-中室	12.7	9.3	11.4	5.1	0.0	0.1
七号墓-后室	12.7	10.1	11.6	2.5	0.0	0.1

说明: 日较差是指每日最大值与最小值的差值, 对于评估数据的稳定性有一定参考意义。



a. 六号墓 2024 年日平均温度曲线图

b. 七号墓 2024 年日平均温度曲线图

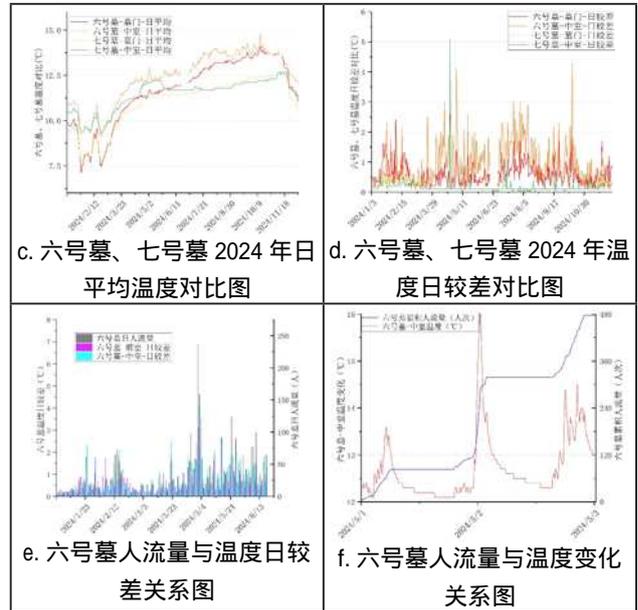


图 7 六号墓、七号墓温度数据分析图

根据上述图表分析可知, 六号墓各测点年平均温度依次为管理用房 14.9°C、墓道 12.1°C、照壁 11.6°C、前室 11.9°C、中室 12.4°C、后室 12.4°C。七号墓各测点平均温度依次为管理用房 10.0°C、墓道 9.6°C、照壁 11.0°C、前室 11.2°C、中室 11.4°C、后室 11.6°C。从气温的年波动幅度来看, 从照壁至墓室后室, 依次递增。管理用房的温度受到环境影响, 有较大幅度的波动。六、七号墓墓室内(墓道、照壁、前室、中室、后室)温度基本一致。受开放和游客数量的影响, 六号墓的平均温度略高于七号墓, 日较差也呈现明显差异。由此可见, 游客参观活动会对直接墓室的温度产生较大影响。

(3) 六号墓及七号墓室内各测点 2024 年度平均湿度及日较差数据统计如下:

表 2 魏晋墓六号墓、七号墓湿度日平均、日较差统计表

监测点位	湿度日平均 (%)			湿度日较差 (%)		
	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg
六号墓-管理间	55	24	43	28	2	11
六号墓-墓道中部	82	34	55	36	1	9
六号墓-照壁	85	32	59	25	0	6
六号墓-前室	83	32	59	21	0	5
六号墓-中室	82	32	60	23	1	6
六号墓-后室	81	29	58	18	0	5
七号墓-管理间	84	53	73	30	0	5
七号墓-墓道中部	81	60	71	28	0	4
七号墓-照壁	95	58	83	19	0	2
七号墓-前室	96	55	82	16	0	2
七号墓-中室	95	52	81	17	0	2
七号墓-后室	95	50	80	11	0	1

说明: 日较差是指每日最大值与最小值的差值, 对于

评估数

据的稳定性有一定参考意义。

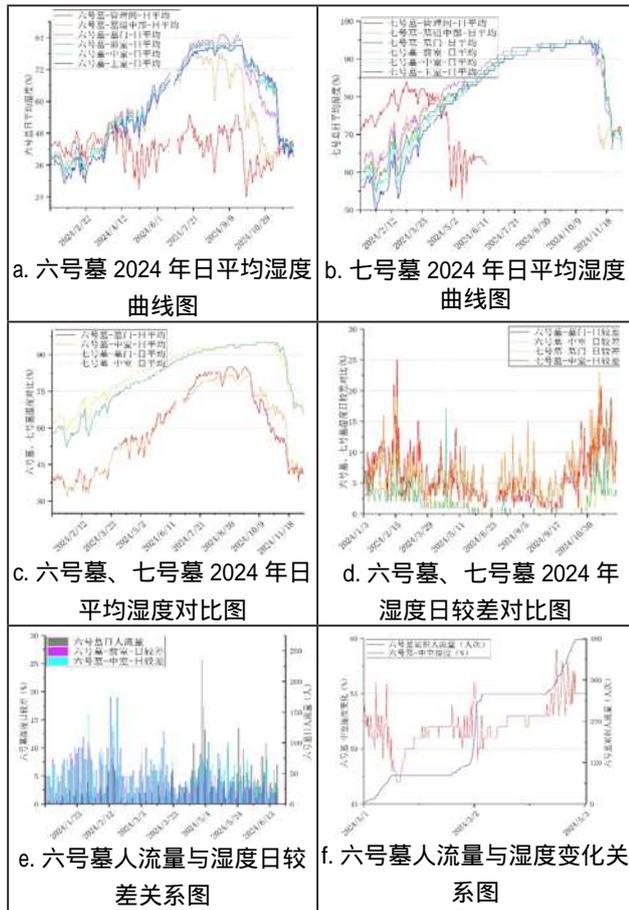


图 8 六号墓、七号墓湿度数据分析图

根据上述图表分析可知，六号墓室内各测点平均湿度依次为管理用房 43%、墓道 55%、照壁 59%、前室 59%、中室 60%、后室 58%，墓室内最高湿度 88.2% 出现在照壁。七号墓室内各测点平均湿度依次为管理用房 73%、墓道 71%、照壁 83%、前室 82%、中室 81%、后室 80%。六号墓墓室（墓道、照壁、前室、中室、后室）全年有 50% 左右的天数湿度波动超过 5%，对文物保存带来不利影响。七号墓墓室（墓道、照壁、前室、中室、后室）湿度较为稳定，全年不到 20 天湿度波动超过 5%，因湿度波动对文物的影响要远小于六号墓室。

各个墓室的温度差异不大，基本上呈现后室、中室、前室依次递增的现象。但受开放和游客数量的影响，六号墓的平均湿度比七号墓低 20% 左右，日较差也呈现明显差异。由此可见，游客参观活动会对墓室的湿度产生较大影响。

(4) 六号墓作为开放墓室，二氧化碳浓度受游客数量

影响较大，根据统计和估算，参观六号墓的游客平均每个人使六号墓的二氧化碳浓度升高 2-9ppm，且当日墓室最高二氧化碳浓度超过 1200ppm 时，六号墓当天晚上的二氧化碳浓度也降低至室外（400ppm）水平。

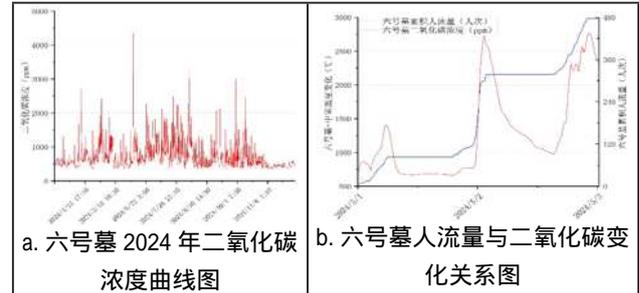


图 9 六号墓二氧化碳浓度数据分析图

(5) 六号墓和七号墓的应变数据波动不大，六号墓应变最大差值  $60 \mu \epsilon$ ，换算成形变量约 0.009mm。七号墓应变最大差值  $20 \mu \epsilon$ ，换算成形变量约为 0.003mm。

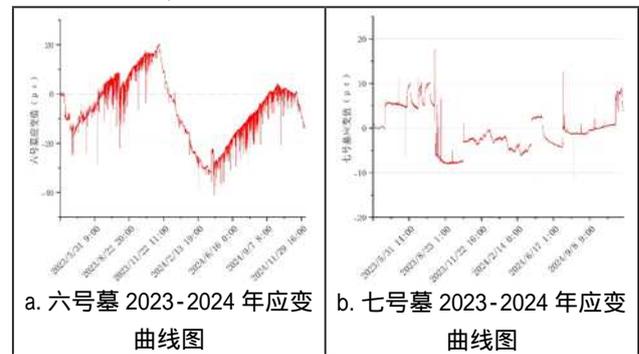


图 10 六号墓、七号墓应变数据分析图

### 3.3 数据研判

结合全年物联网微环境监测和稳定性监测，六、七号墓监测数据对比分析得出结论。由于墓室结构特性，导致从后室至前室，温度呈递减趋势，湿度呈递增趋势。六号墓作为开放墓室相对七号墓温度波动较大，湿度也比七号墓整体偏低 20% 左右。温度、湿度和二氧化碳数值升高和客流量成正比。六、七号墓墓室整体结构稳定，局部有细微变化。

游客数量的增加直接影响墓室内微环境和稳定性的变化，对墓室内砖壁画的色彩保护起到关键作用。利用物联网云服务，通过数据积累和分析，可以找出相对应的环境和稳定性关键因素，确定砖壁画微环境和稳定性风险阈值。优化云服务平台，设立云服务环境和稳定性监测预警系统，预警数值超标，自动预警。启动相对应的保护预案，自启通风除湿、除二氧化碳设备。减少墓室内游客参观量，按照游客承

载量和每次进入墓室参观数量减缓参观频次, 或者更换参观墓室和暂停墓室开放。

#### 4. 结语

通过新城墓群六、七号墓预防性保护监测系统和平台的建设、监测技术标准研制、管理手册制订、技术培训和各级决策层管理制度制订等, 建立墓室文物环境监测和稳定性监测管理体系; 通过多种有效的监测手段持续监测六七号墓环境质量和稳定性, 为未来采取有效调控措施积累数据和提供依据; 形成砖壁画文物保存环境质量评估、风险预警、响应决策调控机制; 深入开展环境影响作用机制和稳定性影响机制研究, 制定砖壁画文物保存环境质量和稳定性评价预警规范; 提高防范砖壁画色彩突变和墓室结构性风险, 尽可能预防保护古墓葬文物安全。

#### 参考文献:

[1] 甘肃省文物队、甘肃省博物馆、嘉峪关市文物所. 嘉

峪关壁画墓发掘报告 [J]. 北京: 文物出版社, 1985.

[2] 张晓东、王春梅. 嘉峪关新城魏晋墓砖壁画保护研究 [M]. 甘肃文化出版社, 2016.

[3] 张军武、高凤山. 嘉峪关魏晋墓彩绘砖画浅识 [M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1989.

[4] 胡向东. 物联网研究与发展综述 [J]. 数字通信. 2010(2):17-21.

[5] 杨予川. 墓葬壁画原址保护面临的问题和对策 [J]. 文物鉴定与鉴赏. 2024.7(下)

#### 作者简介:

杨殿刚, 男, 1979年2月、汉族、学历: 本科、文博副研究馆员, 研究方向: 文物保护研究与管理。

【甘肃省科技厅自然科学项目】河西走廊砖壁画数字化博物馆展陈设计研究, 批准编号: 23JRZA516