

文/ 孔琳
程蓓
李库
段晓彤

人为因素对封闭展陈模式下土遗址的影响分析

——以汉阳陵为例

摘要: 以往对汉阳陵帝陵外藏坑地下遗址展示厅环境因素的调查分析,都是在展馆开放参观期间进行的。为了分析人为因素对这种封闭展陈模式下土遗址的影响,本次调查将汉景帝阳陵博物院闭馆期(2020年2月至3月)与次年同时段开放期(2021年2月至3月),帝陵外藏坑地下遗址展示厅的环境温湿度、CO₂浓度和土壤温度与含水率的监测数据进行了采样,通过横向对比分析认为,人为因素包括参观游客和空调系统运行能对封闭展陈模式下的土遗址产生一定影响,而展厅全封闭式的玻璃幕墙为遗址提供了一个洁净、稳定的保存环境。为减轻人为影响,建议增加对遗址区内环境因素的预警调控,以及对参观区域空气质量的科学干预。

关键词: 遗址保护; 环境监测; 人为因素; 对比分析

土遗址是我国非常重要的一类历史文化遗产,不仅具有重要的历史、科学和艺术价值,是不可再生和不可替代的,而且是我国文物保护工作的重点和难点所在。对于这类文化遗产的保护与展示,最重要和最直观方式之一就是建设遗址保护场馆,其建筑形式主要为半封闭型遗址和全封闭型遗址。无论土遗址是半封闭或者全封闭的展示模式,其所处环境均可以分为上环境类型和下环境类型,上环境主要有大气温湿度、光照、露点温度、空气污染物、微生物等因素,下环境主要是土壤温度、土壤含水量等因素^[1]。引发遗址损坏的环境因素包括地质因素、气象环境因素和人为因素等,它们作用机制错综复杂,有必要进行长期监测并开展研究^[2]。目前,对影响土遗址保护的各种环境因素研究相对较多,其中人为因素的影响研究则较少。杨强义^[3]对大明宫丹凤门遗址空气温度、相对湿度、遗址温度进行了监测和定量分析,认为外

界环境和人流量因素的影响很大。许江涛^[4]通过定点测试数据分析了若干遗址博物馆内温湿度、CO₂浓度等环境因素状况,认为其中的人为因素仍是不可忽视的一部分。还有研究^[5]对土遗址病害特征和形成原因进行了详细的分析,认为侵蚀作用与自然和人类活动有着直接的联系。

汉阳陵帝陵外藏坑地下遗址展示厅是一座典型的全封闭式遗址博物馆(图一),于2006年建成开放,整个展示厅建筑面积约7000平方米,采用复合中空镀膜电加热玻璃幕墙将遗址区和游客参观区最大程度地隔离开^[6]。在该遗址展示厅的环境因素调查工作中,有专家学者在2010年采用环境监测仪器对展示厅的室内空气温湿度和空气颗粒物方面做了监测评估,认为汉阳陵地下遗址博物馆室内空气环境对文物保存保护有利^[7]。为了全面掌握汉阳陵馆藏文物和遗址区的保存环境实时状况,为文物保护提供科学有力的数据支持,汉景帝阳陵

博物院于2009年开展了“文物保护环境实时监测系统”项目建设,并逐步完善了考古陈列馆、帝陵外藏坑地下遗址展示厅、文物库房等区域的环境监测系统。到目前为止,我们已借助该监测系统提供的环境因素数据开展过若干相关综合研究^{[8][15]},但是,由于汉阳陵帝陵外藏坑地下遗址展示厅实行全年开放参观,尚未针对人为因素对文物遗址保存环境的影响进行过专门分析。因此,本次调查选择将汉阳陵闭馆期(2020年2月至3月)与开放期(2021年2月至3月),即在相同的季节气候条件下,帝陵外藏坑地下遗址展示区内环境温湿度、CO₂浓度、土壤温度与含水率的环境因素数据进行横向对比,以讨论汉阳陵全封闭模式下人为因素对土遗址保护所产生的影响。

一、环境监测数据采集

(一) 数据采集时间和地点

受2020年疫情影响,汉景帝阳陵

作者简介:孔琳,女,汉景帝阳陵博物院馆员,硕士学位,研究方向:文物保护;程蓓,女,汉景帝阳陵博物院副研究馆员,硕士学位,研究方向:文物保护;李库,男,汉景帝阳陵博物院科技保护部主任,研究馆员,学士学位,研究方向:汉阳陵考古学研究及遗址管护;段晓彤,男,汉景帝阳陵博物院馆员,硕士学位,研究方向:土遗址保护。



图一 汉阳陵国家考古遗址公园局部俯瞰图

表一 帝陵外藏坑遗址区
环境监测节点选取情况

| 监测内容 | 监测节点位置 | 节点对应编号 |
|--------------------|----------------------|------------------|
| 环境温湿度 | K21中段 | 110137 |
| | K20东段 | 110149 |
| | K19西段 | 110150 |
| | K19外走廊东端 K19外走廊西端 | 110158 110159 |
| 土壤温度和含水率 | K19西段 | 110192 |
| | K20中段 | 110193 |
| | K20东段 | 110201 |
| | K14中段 | 110206 |
| CO ₂ 浓度 | K20西段 | 110171 |
| | K19东段 | 110174 |
| | K14东段 | 110175 |

表二 环境温湿度数据统计表

| 时段 | 区域 | 监测节点 | 温度/°C | | | 相对湿度/% | | |
|-----|------|--------|-------|------|-------|--------|------|------|
| | | | 最大值 | 最小值 | 浮动范围 | 最大值 | 最小值 | 浮动范围 |
| 闭馆期 | 遗址区内 | 110150 | 15.7 | 11.6 | 4.1 | 86.5 | 69.5 | 17.0 |
| | | 110149 | 16.0 | 11.5 | 4.5 | 82.1 | 65.9 | 16.2 |
| | | 110137 | 16.0 | 12.2 | 3.8 | 86.2 | 67.3 | 18.9 |
| | | 平均值 | 15.9 | 11.8 | / | 84.9 | 67.6 | / |
| | 遗址区外 | 110158 | 16.3 | 13.3 | 3.0 | 73.9 | 36.8 | 37.1 |
| | | 110159 | 18.3 | 12.6 | 5.7 | 66 | 30.2 | 35.8 |
| 平均值 | | 17.3 | 12.95 | / | 69.95 | 33.5 | / | |
| 开放期 | 遗址区内 | 110150 | 15.3 | 12.0 | 3.3 | 85.4 | 63.0 | 22.4 |
| | | 110149 | 15.4 | 12.0 | 3.4 | 82.2 | 61.6 | 20.6 |
| | | 110137 | 15.8 | 12.6 | 3.2 | 85.3 | 61.0 | 24.3 |
| | | 平均值 | 15.5 | 12.2 | / | 84.3 | 61.9 | / |
| | 遗址区外 | 110158 | 16.5 | 14.5 | 2.0 | 70.6 | 28.1 | 42.5 |
| | | 110159 | 17.6 | 13.2 | 4.4 | 68.9 | 30.1 | 38.8 |
| 平均值 | | 17.05 | 13.85 | / | 69.75 | 29.1 | / | |

Table.2 Statistical table of ambient temperature and humidity datas

博物院接上级指示于2月暂停游客参观接待，实行全面闭馆，3月后即恢复参观开放。闭馆期间，展厅内的空调系统全部停止运行，只有几名值班人员在遗址区外值守；恢复开放后，展厅空调系统开放，有游客和工作人员在参观区域逗留。这两个时期内，汉阳陵帝陵外藏坑地下遗址展示区所处的外界环境状况有着明显差异，具有一定研究价值。故数据采集时间为闭馆期（2020年2月至3月）与开放期（2021年2月至3月）。

笔者观察发现，由于K21、K20和K19三条外藏坑遗址位于参观廊道的正面起点下方（图二左），游客多会聚集在此处，并停留较长时间，但是该区域的玻璃廊道高度和宽度均在2米左右，空间低矮且狭窄；K14外藏坑在该廊道尽头，紧贴玻璃幕墙内侧，这里对游客来说具有更开阔、更直观的视野范围，而且和遗址的距离更近（图二右），也会吸引大量游客在该区域的玻璃幕墙外侧停留聚集，尽管该区域的高度约十余米，但是由于外

藏坑遗址展示厅本就处于地下环境中，空气流通相对缓慢。因此，本次调查选择这两个重点区域遗址内布设的监测节点为数据采集对象，并以遗址区外游客通道处的监测节点数据为对比。

（二）监测内容

本次调查借助汉阳陵“馆藏文物保存环境实时监测系统”布设于帝陵外藏坑地下遗址展示区内的无线传感器监测节点收集的环境因素数据，这些数据通过覆盖在博物馆内的无线通讯网络传输到监测系统管理平台。节点监测内容主要包括环境温湿度、CO₂浓度、土壤温度、土壤含水率等。其中，温湿度和CO₂浓度监测节点布设于遗址坑内，土壤温度和含水率监测节点布设于遗址坑土梁浅表层大约5厘米深处。监测节点的数据为瞬时数值，每30分钟采样一次。以下为监测节点选取情况（表一）和分布情况（图三）。

二、监测结果与数据分析

（一）温湿度

从图四和图五中可以看出，不论是在闭馆期还是在开放期，遗址区内的环境温湿度总体变化趋势很接近，不仅存在季节性的温湿度波动^[15]，而且在季节转变时期温湿度的波动也有明显特征，即随着春季的到来，外界气候开始逐渐转暖，遗址区内的温度

随之升高，相对湿度也呈现出波动上升的趋势（文中曲线图中的断点是因2020年闰月产生）。

从表二可以看出，两段时期内

遗址区内温度的大致区间范围比较接近，分别为11.8℃~15.9℃（闭馆期）和12.2℃~15.5℃（开放期）。以汉阳陵帝陵外藏坑遗

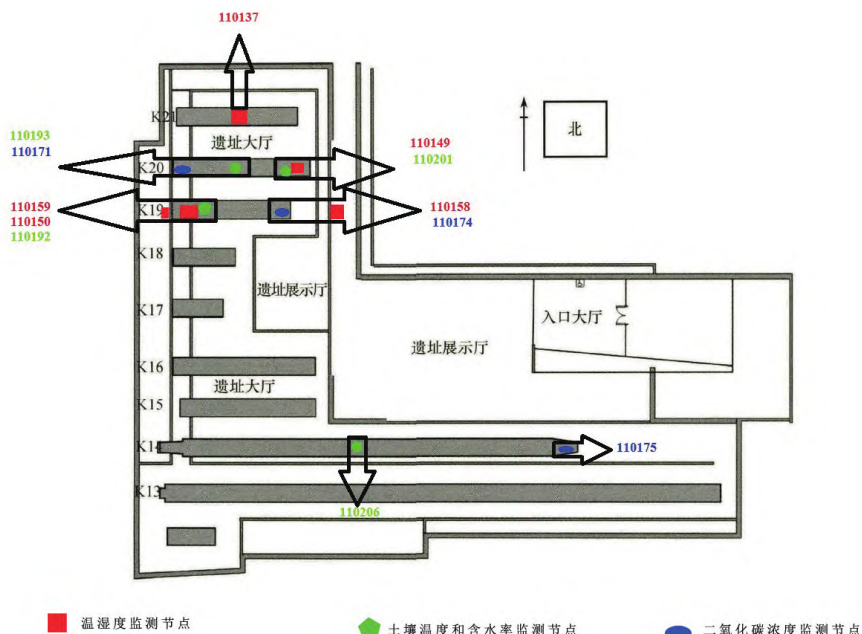
址内环境冬季温度标准推荐值^[16]（13.5℃~14.8℃）以及封闭式土遗址保护厅内适宜的温度参数的推荐值范围^[17]（15±1℃）为参考，可以看出遗址区内环境温度基本围绕这两个参考推荐值上下浮动，且更接近帝陵外藏坑遗址内的冬季温度标准推荐值。同时，温度的浮动范围分别在3.8℃~4.5℃（闭馆期）和3.2℃~3.4℃（开放期）之间，由此说明，遗址展示厅空调系统运行对于维持遗址区内环境温度的稳定起到了一定作用，但从短期来看效果不大。

遗址区外即游客参观区的温度大致区间范围在两段时期内也比较接近，分别为12.95℃~17.3℃（闭馆期）和13.85℃~17.05℃（开放期），温度浮动范围在3.0℃~5.7℃（闭馆期）和2.0℃~4.4℃（开放期）之间。可以看出，不论是闭馆期还是开放期，参观区的环境温度浮动范围都比遗址区内温度浮动范围大。由此说明，外藏坑地下遗址展示厅玻璃幕墙在维持遗址区内温度的稳定方面起到了有效作用。

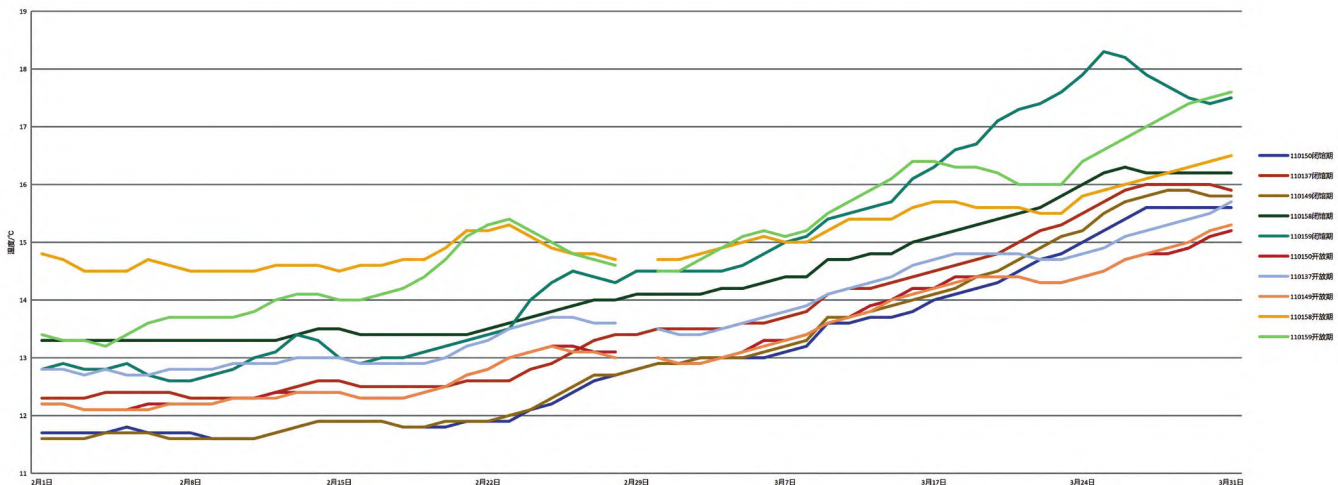
从遗址区内的相对湿度监测数据67.6%~84.9%（闭馆期）和61.9%~84.3%（开放期）可以看出，这两个时间段中遗址区的相对湿度相差不大。以汉阳陵外藏坑环境冬季相对湿度标准推荐值^[16]（73.3~76.5%）以及封闭式土遗址保护厅内适宜的相对湿度参数推荐值范围^[17]（85±5%）为参考，发现由于监测时段为冬末春



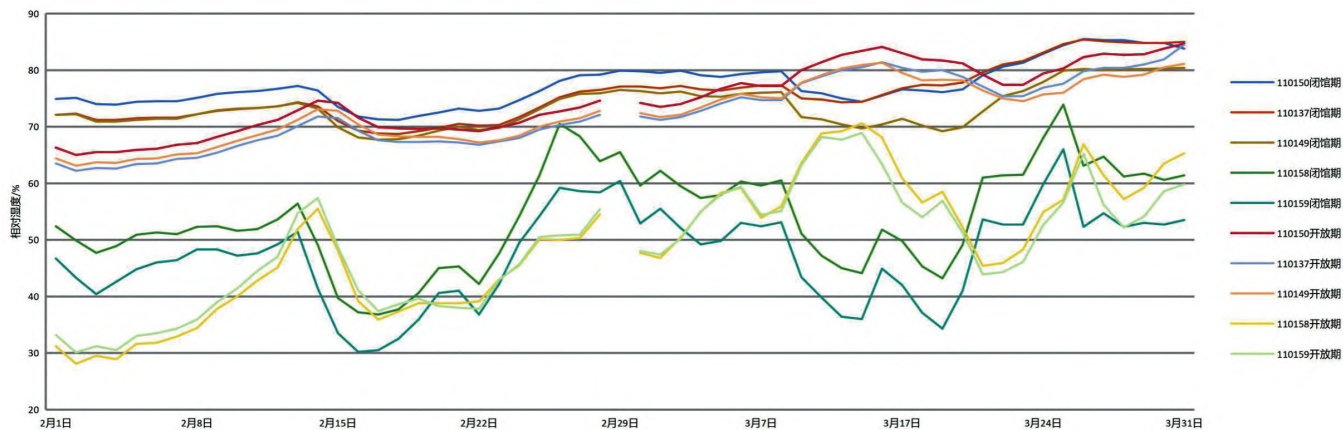
图二 汉阳陵帝陵外藏坑地下遗址展示厅（左：K21、K20和K19遗址坑外的玻璃廊道；右：K14遗址坑幕墙外侧） 作者拍摄



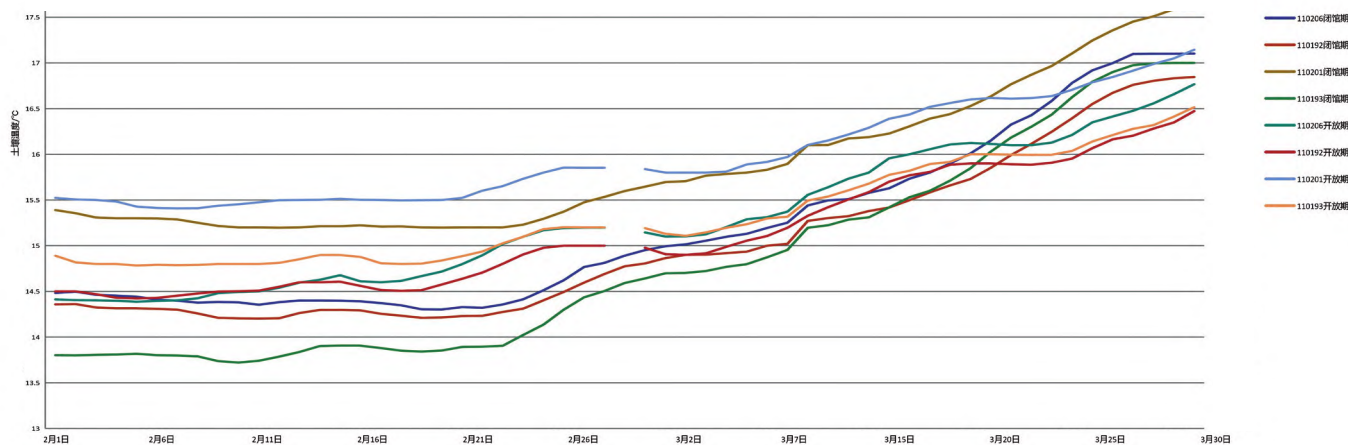
图三 汉阳陵帝陵外藏坑遗址展示厅监测节点位置分布图 作者绘制



图四 闭馆期和开放期遗址区内外环境温度均值对比曲线图（作者据监测系统平台采集的数据绘制）



图五 闭馆期和开放期遗址区内外环境相对湿度均值对比曲线图（作者据监测系统平台采集的数据绘制）



图六 闭馆期和开放期土壤温度均值对比曲线图（作者据监测系统平台采集的数据绘制）

初，这两个时期的遗址展示厅环境相对湿度范围与外藏坑环境冬季相对湿度标准推荐值更接近。但是，开放期相对湿度在 20.6% ~ 24.3% 之间浮动，明显高于闭馆期相对湿度的浮动范围 16.2% ~ 18.9%；而且参观区环境相对湿度的浮动范围更高，分别是 35.8% ~ 37.1%（闭馆期）和 38.8% ~ 42.5%（开放期），由此说明，遗址展示厅的空调系统运行会对参观区相对湿度产生较大影响，而展示厅玻璃幕墙在维持遗址内相对湿度的稳定方面起到较好的作用。

（二）土壤温度和土壤含水率

随着外界气候的逐渐变暖，不论是在闭馆期还是开放期，遗址区内土壤温度都呈现平稳缓慢的上升趋势（参见图六、图七）。虽然闭馆期的土壤温度（14.325℃ ~ 17.175℃）与开放期的土壤温度（14.7℃ ~ 16.775℃）相差并不

大，然而在闭馆期间，由于没有空调系统的调节，该时段区间内的遗址土体表层土壤温度波动幅度（2.5℃ ~ 3.3℃）比开放期的（1.8℃ ~ 2.5℃）大一些（表三）。在土壤含水率方面，闭馆期遗址区内土壤含水率（5.975%~6.4%）相比开放期的土壤含水率（5.075% ~ 5.85%）略高。

李莎^[12]在研究中发现，空气温湿度、土壤温度均与土壤含水率有一定关联性，关联次序依次为空气温度、土壤温度、相对湿度。结合以上多项监测数据推测，在开放期展厅空调运行，虽然使得遗址区的环境温度波动幅度减小了，而土壤温度在响应外界环境温度变化时也会有滞后效应^[13]，且波动幅度也比闭馆时期的小，但是这并不能减缓遗址区内土壤表层的水分向环境中散失，相反地，开放期的土壤含水率却有所降低，这就意味着土遗址浅表层内水分确实比闭馆期蒸

发的多一些，尽管遗址区内环境相对湿度明显较高，但是土体浅表层较为干燥。也就是说，环境空气中较高的相对湿度对土壤保湿的作用并不明显，由于遗址区外藏坑的土梁上土壤水分明显具有不均衡分布的特征^[10]，反而可能加速土体内部可溶盐随水分一起沿着土体内部的孔隙向表层运移、富集，盐分在温湿度变化等的影响下反复溶解结晶，继而可能导致土体酥碱、表面结皮剥落、崩塌^[18]。

（三）二氧化碳浓度

调查发现汉阳陵帝陵外藏坑遗址保护展示厅内的 CO₂ 主要是游客呼吸所产生的^[19]，看似封闭的玻璃展厅内环境气体实际上与外界环境存在交换，通过测定发现遗址区室内外空气交换率高达 0.04h⁻¹^[20]。在开放期遗址区 CO₂ 浓度，不论是整体上还是对应监测点位上都比闭馆期的 CO₂ 浓度

高一些（参见表四、图八）。由于CO₂密度比空气大，所以就很容易在水平位置更低且通风不畅的遗址区内富集。作为室内空气质量的一项评价指标——CO₂，在一定浓度下并不是大气污染物，其本身对文物材料也没有危害作用^[21]。但是如果在环境相对湿度较大的情况下，CO₂能溶解于文物表面的水分，生成弱酸——碳酸，进而溶

解文物本体所携带的钾盐、钙盐等，生成易溶于水的碳酸盐，长此以往会使文物本体变得脆弱，威胁文物安全。

此外，还可以推测出，CO₂浓度在游客的参观区域比遗址区内监测到的平均值更高。研究认为土遗址博物馆的参观区域CO₂浓度不应超过600ppm^[3]，在玻璃幕墙隔离出的密闭通道内，过高的CO₂浓度可能会导致

人体缺氧，引发不适症状。

三、分析与讨论

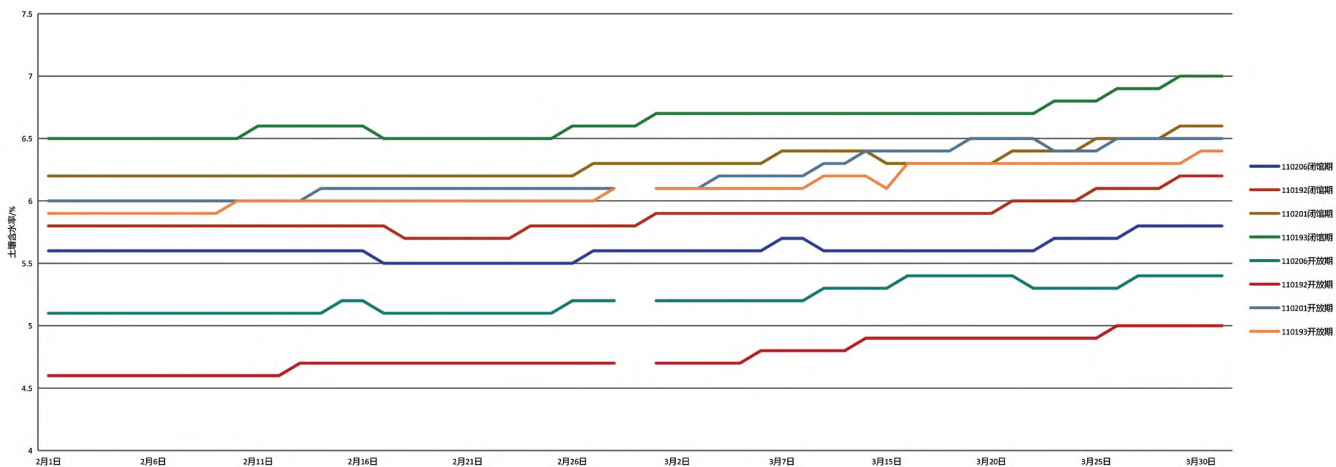
（一）通过“汉阳陵文物保存环境实时监测系统”在闭馆期和开放期收集的环境因素数据，可以看出，全封闭式的帝陵外藏坑地下遗址展示区并非完全封闭，它仍然与外界保持着密切的关联，不仅会受到季节等自然因素的影响，而且空调系统的运行和游客参观等人为因素也对遗址展示区内的环境产生了一定影响。

表三 土壤温度和土壤含水率数据统计表

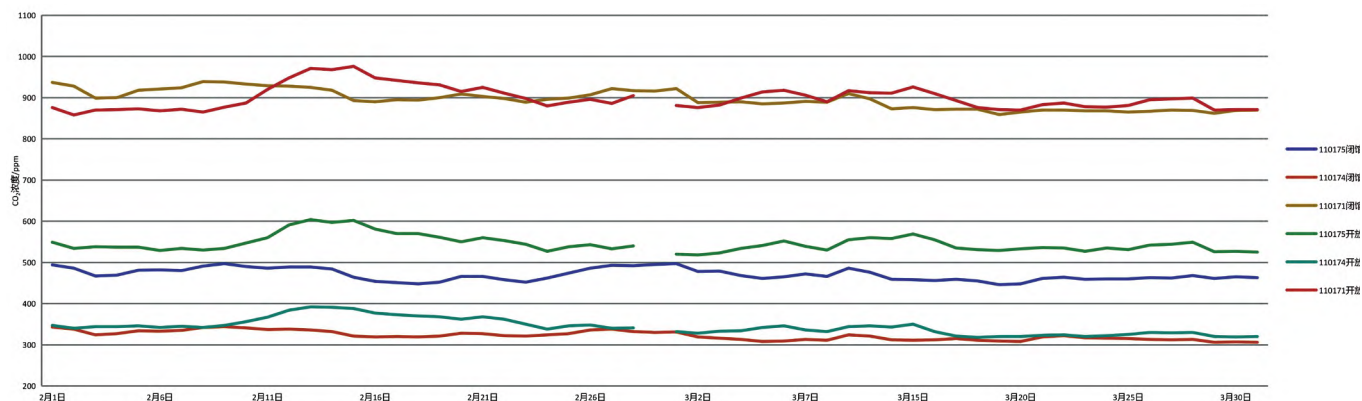
| 监测项目 | 监测节点 | 闭馆期 | | | 开放期 | | |
|------------|--------|--------|--------|------|--------|-------|------|
| | | 最高值 | 最低值 | 浮动范围 | 最高值 | 最低值 | 浮动范围 |
| 土壤温度 ℃ | 110192 | 16.9 | 14.2 | 2.7 | 16.5 | 14.4 | 2.1 |
| | 110193 | 17.0 | 13.7 | 3.3 | 16.6 | 14.7 | 1.9 |
| | 110201 | 17.6 | 15.1 | 2.5 | 17.2 | 15.4 | 1.8 |
| | 110206 | 17.2 | 14.3 | 2.9 | 16.8 | 14.3 | 2.5 |
| | 平均值 | 17.175 | 14.325 | / | 16.775 | 14.7 | / |
| 土壤含水率 % | 110192 | 6.2 | 5.7 | 0.5 | 5 | 4.6 | 0.4 |
| | 110193 | 7 | 6.5 | 0.5 | 6.4 | 4.6 | 1.8 |
| | 110201 | 6.6 | 6.2 | 0.4 | 6.6 | 6 | 0.6 |
| | 110206 | 5.8 | 5.5 | 0.3 | 5.4 | 5.1 | 0.3 |
| | 平均值 | 6.4 | 5.975 | / | 5.85 | 5.075 | / |

表四 CO₂浓度数据统计表（单位：ppm）

| 监测节点 | 闭馆期 | | | 开放期 | | |
|--------|-----|-----|------|------|-----|------|
| | 最高值 | 最低值 | 浮动范围 | 最高值 | 最低值 | 浮动范围 |
| 110171 | 962 | 793 | 169 | 1021 | 826 | 195 |
| 110174 | 353 | 292 | 61 | 416 | 309 | 107 |
| 110175 | 518 | 431 | 87 | 637 | 503 | 134 |
| 平均值 | 611 | 505 | 106 | 691 | 546 | 145 |



图七 闭馆期和开放期土壤含水率均值对比曲线图（作者据监测系统平台采集的数据绘制）



图八 闭馆期和开放期CO₂浓度均值对比曲线图（作者据监测系统平台采集的数据绘制）

(二) 受自然条件和季节变化的影响, 遗址区土体表层的水分会不断向环境中散失, 导致环境相对湿度升高, 但是这对保持土体湿润几乎没有效果, 土体含水率的不均匀分布反而会促使土壤深部的水分携带可溶盐向土体表层迁移, 进而促使土遗址和文物遗存发生病害。因此, 尽量减缓环境温湿度的变化幅度能有效维持土体健康。在闭馆期间, 遗址区内环境相对湿度的变化幅度最缓慢, 这对土遗址保护来讲是较为有利的。

(三) 参观区域不论是在闭馆期还是开放期, 环境温湿度变化幅度都较高。因此, 玻璃幕墙在维持遗址区内环境温湿度的稳定性方面发挥了重要作用。


(四) 汉阳陵考古遗址公园与人流密集区或工业园区有一定距离, 且位于西安咸阳的二级台塬上, 这里空气质量较好, 园区绿植茂盛, 但是由于帝陵外藏坑地下遗址展示厅建筑本体完全处于地下环境中, 展厅与室外环境交流需要依靠入口、出口与空调系统, 展厅内部的空气循环性相对较弱, 尤其是主展区的游客参观廊道区域, 不仅远离展厅出入口, 而且相对于一般的博物馆来讲略低矮和狭窄一些。参考博物馆游客参观区域 CO₂ 浓度^[22]卫生标准, 即不超过 1000ppm。由于遗址区与外界存在内外气体交换, 即使是在帝陵外藏坑遗址展示厅内参观人流量并不是很大的开放时段内, 在本次调查中所涉及到的遗址区某些监测节点上仍然有 CO₂ 浓度超标的情况, 所以不难推测出在主展区的游客参观廊道区域, CO₂ 浓度可能会更高。通风不畅, 空气质量欠佳, 会影响游客参观的体验感, 参观游客等人员的进出可能会带入霉菌孢子等微生物, 对遗址区文物造成影响。

四、结语

作为国家考古遗址公园和 4A 级旅游景区, 汉阳陵帝陵外藏坑地下遗址展示厅不仅实现了为文物创造良好保存与展示环境的目的, 也为游客营

造了较为舒适的参观环境。

在开放参观期间, 尽管帝陵外藏坑地下遗址展示厅确实可以受到人为因素的一些影响, 即便这种扰动并非主观意图上破坏文物保存环境, 但是展厅内全封闭式的玻璃幕墙已经为遗址提供了一个洁净、稳定的保存环境。

针对遗址区内环境温湿度的波动问题与参观区域内 CO₂ 浓度较高问题, 建议增加对外藏坑遗址保护区内空气温湿度的预警调控, 在人流量较为密集的重点区域位置加设新风系统, 对遗址区温湿度和空气质量等环境因素进行科学的人为干预, 从而实现文物与土遗址的“永续保存”。

[1] 初伟铭、夏寅、罗昔联等:《遗址博物馆土遗址统计与病害治理初论》,《人类文化遗产保护》2019年00期,第126~130页。

[2] 吴来明、徐方圆、黄河:《博物馆环境监控及相关物联网技术应用需求分析》,《文物保护与考古科学》2011年3期,第96~102页。

[3] 杨强义:《环境因素对大明宫丹凤门遗址的影响探究》,西北大学2012年硕士学位论文,第94~95页。

[4] 许江涛:《土遗址博物馆室内空气质量研究》,西安建筑科技大学2015年硕士学位论文,第114~115页。

[5] Odul, Pascal:《Pathologie humide de constructions en terre: Méthodologie de diagnostic》,《In 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture: Adobe 90 Preprints》, Las Cruces, Los Angeles: Getty Conservation Institute》1990, New Mexico, 404-13.

[6] 刘克成、肖莉:《汉阳陵帝陵外藏坑保护展示厅》,《建筑学报》2006年第7期,第68-70页。

[7] 董俊刚、闫增峰、刘克成、马涛等:《汉阳陵地下遗址博物馆室内空气环境解析》,《建筑与文化》2014年第3期,第59~61页。

[8] 李库、程蓓、段晓彤:《现代信息技术在文物遗址环境监测中的应用》,《文

博》2013年第5期,第88~91页。

[9] 李库:《汉阳陵地下博物馆遗址区域环境状况调查》,《文博》2013年第2期,第88~91页。

[10] 程蓓、段晓彤、陈波:《汉阳陵帝陵外藏坑遗址环境因素与可溶盐迁移关系的初步分析》,《温州文物》2013年00期,第93-100页。

[11] 段晓彤、陈波、张刚、程蓓等:《高湿度密闭环境中的土柱模拟实验》,《文博》2017年第6期,第92-96页。

[12] 李莎:《汉阳陵帝陵外藏坑土壤含水率的影响因子分析》,《文物鉴定与鉴赏》2020年第6期,第60~63页。

[13] 姚雪、赵凡、孙满利:《汉阳陵帝陵外藏坑遗址温度变化规律及预报模型》,《敦煌研究》2014年第6期,第69~74页。

[14] 付菲、孙满利、朱明哲等:《基于极限学习机的汉阳陵外藏坑遗址温度预测研究》,《文物保护与考古科学》2019年第1期,第72~78页。

[15] 贾文婷、胡塔峰、曹军骥等:《汉阳陵帝陵外藏坑保护展示厅遗址区的微环境及气溶胶理化特征》,《地球环境学报》2015年第7期,第307~316页。

[16] 李华、胡塔峰、杜维莎:《秦兵马俑和汉阳陵遗址保存环境之比较》,《文物保护与考古科学》2019年第2期,第53~60页。

[17] 吴士杰:《土遗址博物馆遗址保护厅适宜温湿度参数研究》,西安建筑科技大学2013硕士学位论文。

[18] 孙丽娟、韩明、张中立等:《地下水蒸发对考古发掘土遗址劣化影响初探》,《地下水》2016年38期,第12~15页。

[19] 杨雅媚、曹军骥等:《汉阳陵地下博物馆土壤、大气及风化壳的理化特征》,《中国粉体技术》2009年第2期,第38~45页。

[20] 李莹莹、曹军骥等:《示踪气体浓度衰减法定量评价汉阳陵地下遗址厅的空气渗漏》,《中国粉体技术》2010年16期,第93-95页。

[21] 郭宏:《文物保存环境概论》2001年,科学出版社。

[22] GB9669-1996. 中华人民共和国关于图书馆、博物馆、美术馆卫生标准。

(责任编辑:续鸿明)

(责任校对:朱威)