

熊家冢遗址博物馆车马坑展厅环境监测研究

陈 华¹ 胡塔峰² 曹军骥²

(1. 荆州文物保护中心, 湖北荆州, 434020; 2. 中国科学院地球环境研究所, 陕西西安, 710061)

摘要 2006年熊家冢墓地发掘的大车马坑是迄今发现规模最大的车马坑, 具有重大的保护意义和展示价值。2012年建成的车马坑展厅, 将车马坑遗址保存环境由“室外”转变为“室内”。本文针对遗址保存环境研究中的微气候因素、大气组分、大气污染物、气溶胶进行了监测, 为车马坑遗址得以长久保存的环境控制提供了科学依据。

关键词 熊家冢墓地 大车马坑展厅 环境 监测

引 言

熊家冢墓地距荆州城45km, 是楚国高等级贵族墓地, 也是春秋战国时期楚文化最高水平的杰出代表。整个墓地由主冢、附冢、殉葬墓、车马坑、祭祀坑等组成。2006年以来在主冢和附冢西侧, 发掘出1座长132.6m、宽11.6~12m、深约1.7m的特大型车马坑和排列有序的39座小车马坑, 该大车马坑是迄今发现规模最大的车马坑, 具有重要的研究和展示价值。2012年熊家冢遗址博物馆建成类似于汉阳陵地下博物馆的封闭式玻璃围护的车马坑展厅, 在游客通道中安装了天花板嵌入式空调, 在大车马坑遗址区装有除湿机和机械通风系统。

1 采样及分析方法

1.1 遗址博物馆展厅特点及采样时间

表1为熊家冢遗址博物馆展厅特点及采样时间。

表1 熊家冢遗址博物馆展厅特点及采样时间

采样时间	建筑结构	地理位置	典型病害	备注
2016.08.19 ~ 2016.08.25	全封闭式	农村地区	开裂、霉菌	采样期间除湿机24h运行
2016.04.06 ~ 2016.04.13				4月6日和4月12日降雨

图1为熊家冢遗址博物馆监测布点及现场采样图。



图1 熊家冢遗址博物馆监测布点及现场采样图
(a) 车马坑展厅内；(b) 博物馆外

1.2 监测项目及采样方法

表2为本研究中采集的大气样品及分析方法。

表2 大气样品采集及分析方法一览表

监测项目		采样/分析方法
在线监测	微气候因素	温度 (T)
		湿度 (RH)
	大气组分	二氧化碳 (CO_2)
	大气污染物	二氧化硫 (SO_2)
		二氧化氮 (NO_2)
		臭氧 (O_3)
颗粒态污染物 ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$)		
离线采样与分析	气溶胶	元素组成
		水溶性离子
		碳组分
		形貌与元素分析

1.2.1 在线监测

1.2.1.1 微气候条件

Q-Trak (TSI Inc., Model 7575) 空气质量检测仪实时测量室内外环境空气的温度、湿度、 CO_2 浓度的仪器, 包括利用非分散红外 (NDIR) 感应器测量 CO_2 浓度, 电化学 (EC) 感应器测量 CO_2 浓度。 CO_2 的监测范围是 $0 \sim 5000\text{ppm}$, 精确度为 25°C 时 $\pm 3\%$ (每变动 1°C , 变化 $\pm 0.36\%$), 解析度为 1ppm 。温度感应器属于热感应器, 检测范围是 $0 \sim 50^\circ\text{C}$, 精确度为 $\pm 0.6^\circ\text{C}$, 解析度为 0.1°C 。湿度的感应器属于热膜电容式感应器, 它的监测范围为 $5\% \sim 95\%$, 精确度为 0.1% 相对湿度。设定 Q-Trak 每分钟记录一组在线数据 (温度、湿度、 CO_2 等), 借助仪器配置的通用型 TrakPro 数据分析软件对数据做进一步分析。

1.2.1.2 气态污染物采集方法

SO₂监测仪（Interscan 4240-1999b型）和NO₂监测仪（Interscan 4150-1999b型）均由美国Interscan公司生产，基于电化学传感器原理，响应时间短，采用连续泵吸式采样（流速为1L/min），可以实现实时监测。量程为0~1999ppb，分辨率为1ppb，精度均为0.01ppm。每次使用之前进行标准气体校准，开机后和监测期间每8h调零。同步使用无纸记录仪（北京昆仑天辰仪表科技有限公司，XSR10R系列）与传感器配合进行数据记录。

2B O₃监测仪（2B Technologies, Model 205）由美国2B公司生产，采用最新技术的254nm紫外双光束光源技术及设计，仪器量程为1ppb~100ppm。该仪器具有精度高（1ppb）、体积小、质量小及耗电量低的特点。每次使用时先预热30min，之后加调零头调零。同时借助仪器配置的通用型2B Technologies分析软件，对数据进行分析。

1.2.1.3 气溶胶在线监测

Dust-Trak（TSI Inc., Model 8532）气溶胶（粉尘）质量浓度测量仪，切割头有1.0μm、2.5μm、10μm三种，测量对应粒径的气溶胶的质量浓度，质量浓度测量范围为0.001~150mg/m³。本研究用Dust-Trak使用2.5μm切割头，采样间隔设定为每分钟记录一个质量浓度值，每次采样前进行校准。

1.2.2 离线采样

便携式大气气溶胶颗粒采样器（MiniVol TAS型）由美国Airmetrics公司生产，该采样仪由撞击式采样切割头、进出气口、采样泵、气体压力传感器以及空气流量传感组成。空气动力学切割器每周用去离子水清理一次，其流量应用 BIOS Defender500质量流量计进行采样流量矫正。本研究所用切割器的切割空气动力学粒径为2.5μm，流速为5L/min，采样时间控制在18~24h。

1.3 PM_{2.5}滤膜样品分析方法

1) 气溶胶质量浓度

PM_{2.5}气溶胶样品的质量浓度分析使用灵敏度为±1μg的微电子分析天平（Sartorius Microbalance, ME5-F, Germany）进行称量。

2) 气溶胶有机碳/元素碳

气溶胶样品中有机碳（organic carbon, OC）与元素碳（elemental carbon, EC）分析使用热-光碳分析仪（Thermal/Optical Carbon Analyzer, DRI Model 2001）。

3) 气溶胶水溶性离子组成

石英滤膜采集到的样品切1/4，用于水溶性离子的分析。样品经溶解、超声振荡、过滤（孔径0.45μm）后，使用Dionex-600型离子色谱（Dionex Inc., Sunnyvale, CA, USA）的AS11-HC分析柱检测6种阴离子（F⁻、Cl⁻、Br⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻），用CS12A分析柱检测5种阳离子（Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺）组分浓度。使用Chameleon软件进行谱图分析，得到11种水溶性离子的质量浓度。

4) 气溶胶元素组成

PM_{2.5}的石英滤膜气溶胶样品采用能量色散X射线荧光光谱分析仪（Energy Dispersive X-Ray Fluorescence spectrometer, EDXRF）（PANalytical Corp., Netherlands）定量分析51种元素。

1.4 室内外空气交换分析方法

本研究中计算博物馆车马坑展厅内外空气交换率 (ACH) 采用浓度衰减法, 即在车马坑展厅内释放一定量的示踪气体 (CO_2), 待测室内释放的示踪气体与室内空气混合均一后, 随着车马坑展厅内与外界的空气交换, 示踪气体浓度随时间延长呈指数衰减。通过浓度的测量和计算, 得出空间与外界的空气交换率。

2 结果与讨论

2.1 室内外空气交换率

通过浓度衰减法, 采用回归方程得到的夏季采样期间车马坑展厅内外空气交换率为 0.035h^{-1} , 表明每小时内外的换气次数为 0.035, 即每小时车马坑展厅中有 3.5% 体积的气体与外界发生了交换。此空气交换水平相当于每经过 28.6h, 车马坑展厅内的空气与外面气体的交换量相当于整个车马坑展厅的体积。而春季采样期间车马坑展厅内外空气交换率比夏季稍大, 为 0.06h^{-1} 。

2.2 微气候环境分析

表3为采样期间车马坑展厅内外温湿度均值。表4为采样期间车马坑展厅内温度和湿度波动极差值。图2为采样期间车马坑展厅内外温湿度变化曲线图。图3为温湿度日内变化图。

表3 采样期间车马坑展厅内外温度和相对湿度值

监测时间	监测地点	$T/^\circ\text{C}$			RH /%			备注
		平均值 \pm 标准差	最大值	最小值	平均值 \pm 标准差	最大值	最小值	
2016.08.19 ~ 2016.08.25	展厅内	29.5 ± 0.1	29.9	29.3	84.6 ± 1.6	87.6	81.0	夏季采样
	室外	30.1 ± 2.0	34.6	25.6	82.0 ± 9.4	95.0	57.5	
2016.04.06 ~ 2016.04.13	展厅内	16.5 ± 0.6	17.4	15.4	89.7 ± 2.1	95.0	84.1	春季采样
	室外	18.3 ± 2.4	25.8	13.0	87.3 ± 9.3	95.0	43.3	
2013.07.19 ~ 2013.07.20	展厅内	28.0 ± 0.2	—	—	92.3 ± 2.1	—	—	参考文献 [1]
	室外	28.6 ± 0.3	—	—	85.3 ± 3.2	—	—	
2014.01.13	展厅内	8.7 ± 0.3	—	—	69.7 ± 2.8	—	—	
	室外	8.0 ± 0.4	—	—	69.8 ± 6.3	—	—	

表4 采样期间车马坑展厅内温度和湿度波动极差值

监测时间	建筑结构	地理位置	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta \text{RH}/\%$	参考文献
2016.08.19 ~ 2016.08.25	全封闭式	农村地区	0.6	6.6	夏季采样
2016.04.06 ~ 2016.04.13			2.0	10.9	春季采样
2013.07.19 ~ 2013.07.20			1.1	8.3	参考文献 [1]
2014.01.13			1.1	11.0	
美国加热冷冻及空调工程师学会 (ASHRAE, 2011) 推荐值			2	5	

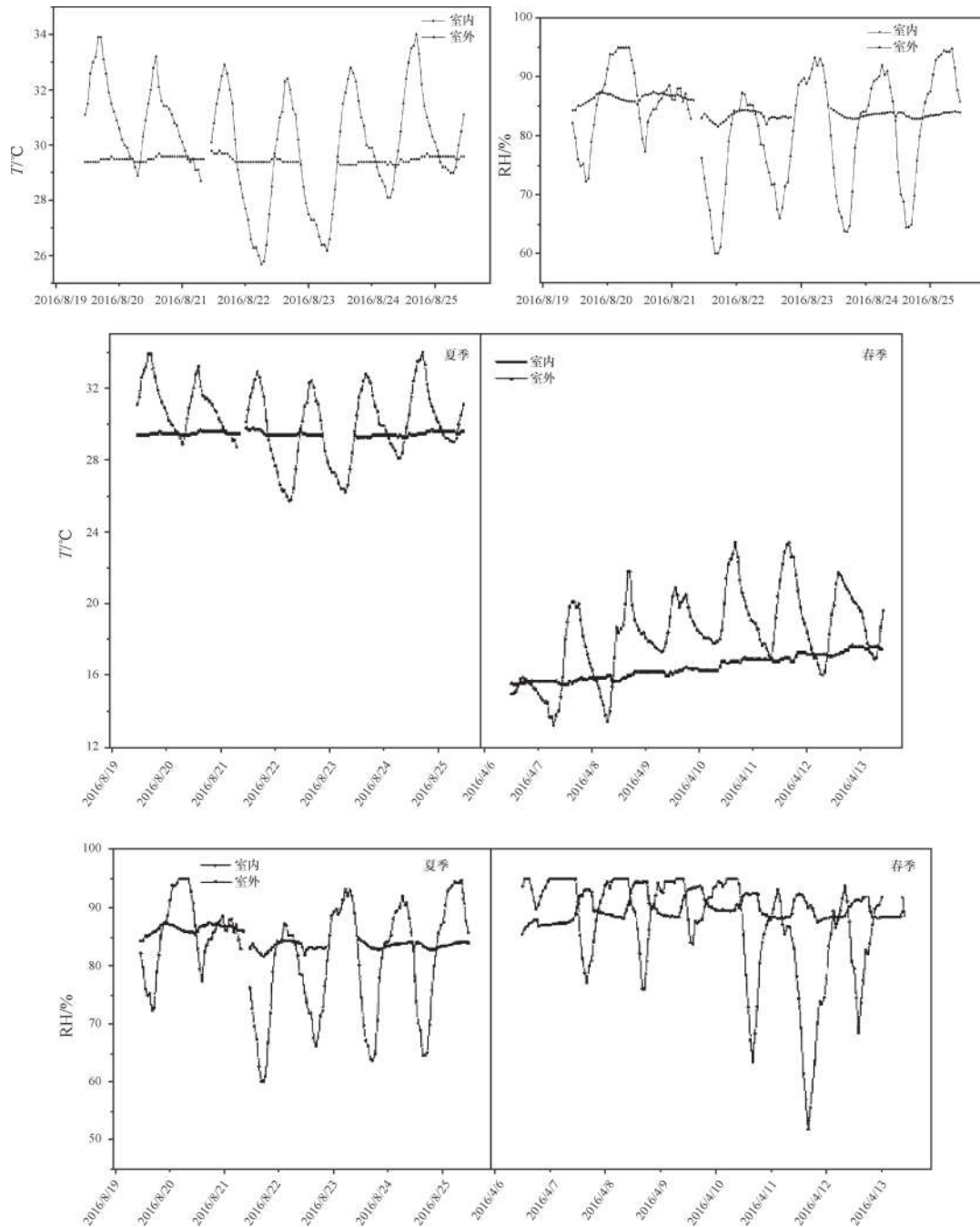
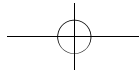
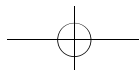


图2 采样期间大车马坑展厅内外温湿度变化曲线图

美国加热冷冻及空调工程师学会 (ASHRAE, 2011) 对于保存展示一般藏品的博物馆建筑内短时间 (非季节性调整) 的温度和相对湿度波动推荐值为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 5\%$ 。与此推荐值对比, 由表4 可以看出, 熊家冢遗址博物馆大车马坑的保存环境温度达到此推荐值, 相对湿度离此推荐值还有一



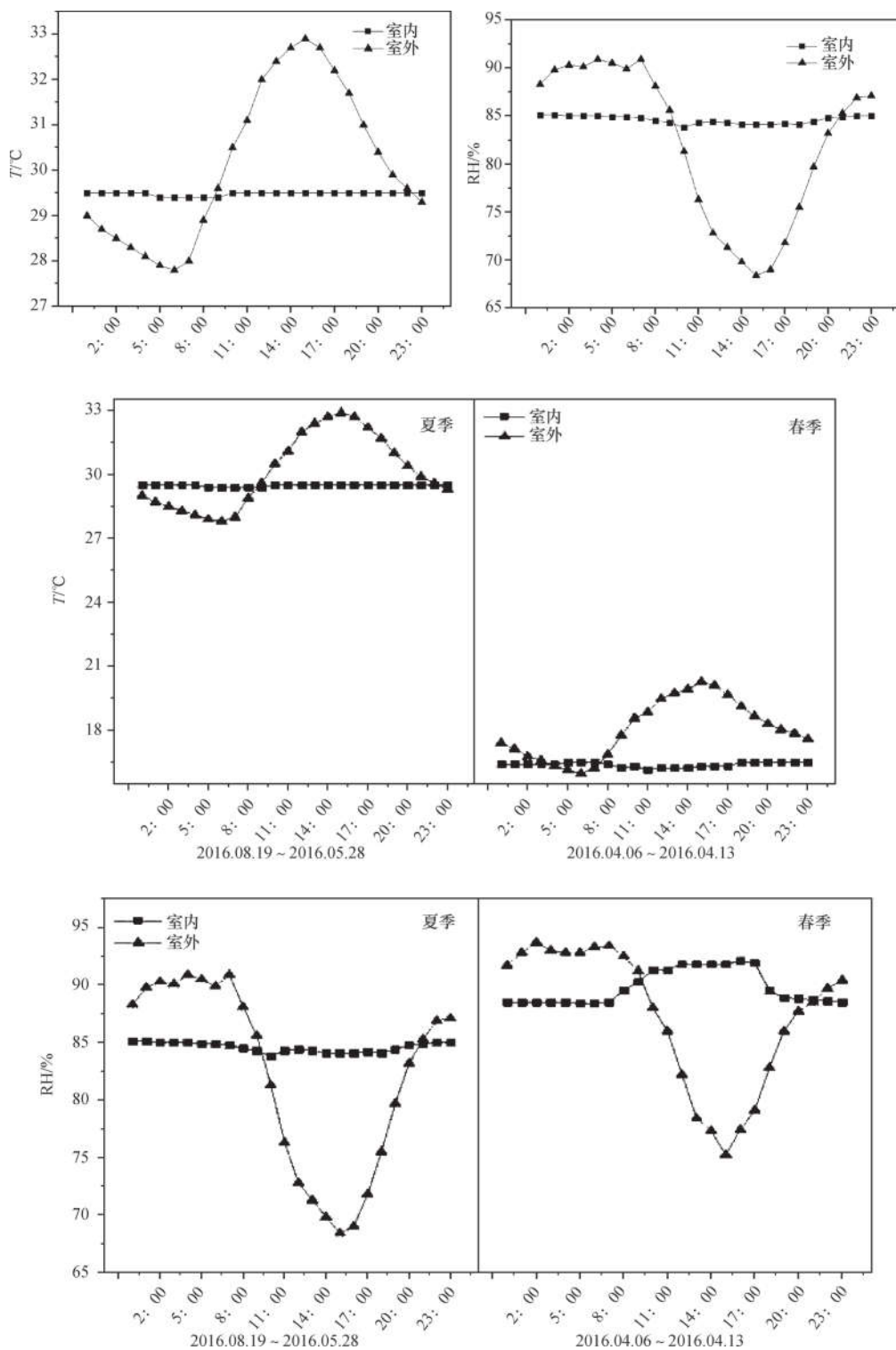


图3 采样期间车马坑展厅内外温湿度日内变化图

定差距。相比春季采样,夏季采样研究中大车马坑展厅内温湿度波动值明显减小,这与展厅内24h运行的除湿机有关,除湿机能够使展厅内温湿度变化值维持在一个较小的范围内。由图2也可以看出,具有密闭式的玻璃罩结构的大车马坑展厅内温湿度在整个采样期间变化很小,基本维持不变。而室外温湿度变化较大。从图3日内变化曲线可以看出,温度最大值和湿度最小值出现在每天的下午3点左右。温湿度表现出相反的变化趋势。

2.3 颗粒物浓度及I/O比值

本研究通过石英滤膜称重获得采样期间大车马坑展厅的PM_{2.5}质量浓度日均值,如图4所示。图5为大车马坑展厅PM_{2.5}质量浓度日内变化图。表5为大车马坑展厅内PM_{2.5}质量浓度日均值范围及大车马坑展厅内外颗粒物浓度(I/O)比值。

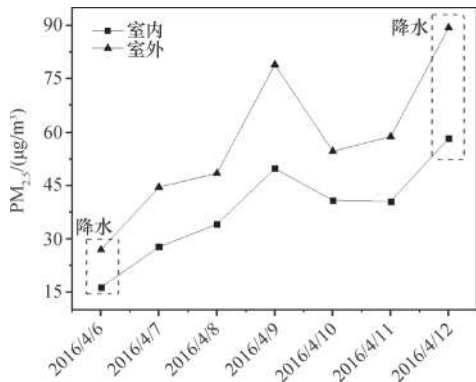


图4 采样期间熊家冢遗址博物馆的PM_{2.5}质量浓度日均值变化曲线图

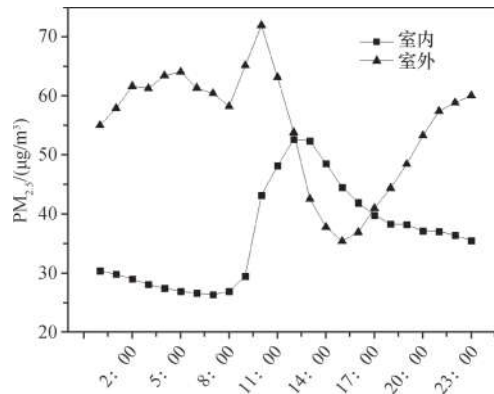


图5 大车马坑展厅PM_{2.5}质量浓度日内变化图

表5 大车马坑展厅内PM_{2.5}质量浓度日均值范围及内外I/O比值

采样时间	PM _{2.5} (µg/m ³)		I/O(除去降水日)	
	平均值 ± 标准差	范围	平均值 ± 标准差	范围
2016.04.06 ~ 2016.04.13	38.3 ± 13.8	16.5 ~ 49.8	0.67 ± 0.05	0.62 ~ 0.75

由表5和图4、图5可以看出,大车马坑展厅内外PM_{2.5}在整个采样期间变化趋势及质量浓度值极为相似,I/O比值范围0.62~0.75,平均值为0.67,显示了大车马坑展厅内颗粒物的室外来源。大车马坑展厅属于全玻璃式的密闭结构,能够很好地隔绝室外大气对展厅内的影响。由日均值变化趋势图可以看出,开馆之后,由于室内工作人员的活动,大车马坑展厅内PM_{2.5}质量浓度出现一个先增大之后减小的趋势,大车马坑展厅内颗粒物浓度相对于室外颗粒物浓度下降稍微滞后,这说明开馆后室内人员活动和室外源的渗入对大车马坑展厅内颗粒物浓度均有一定的贡献。

2.4 污染性气体统计

表6为大车马坑展厅内外的污染性气体统计表。图6为大车马坑展厅采样期间O₃浓度变化曲线

图。图7为采样期间O₃浓度的日内变化。

表6 大车马坑展厅内外的污染性气体统计

监测时间	监测地点	SO ₂ /ppb	NO ₂ /ppb	O ₃ /ppb	备注
		Avg. ± S.D.	Avg. ± S.D.	Avg. ± S.D.	
2016.08.19 ~ 2016.08.25	展厅内	3 ± 4	0	9.2 ± 1.5	夏季采样
	室外	9 ± 6	17 ± 12	27.0 ± 12.1	
2016.04.06 ~ 2016.04.13	展厅内	5 ± 3	0	6.7 ± 2.4	春季采样
	室外	8 ± 6	10 ± 8	15.1 ± 13.0	
2014.01.10 ~ 2014.01.11	展厅内	21 ± 5	1 ± 1	2 ± 1	文献 [1]
	室外	44 ± 13	2 ± 4	1 ± 2	
2013.07.19 ~ 2013.07.20	展厅内	20 ± 11	1 ± 1	1 ± 1	
	室外	34 ± 15	5 ± 3	7 ± 4	

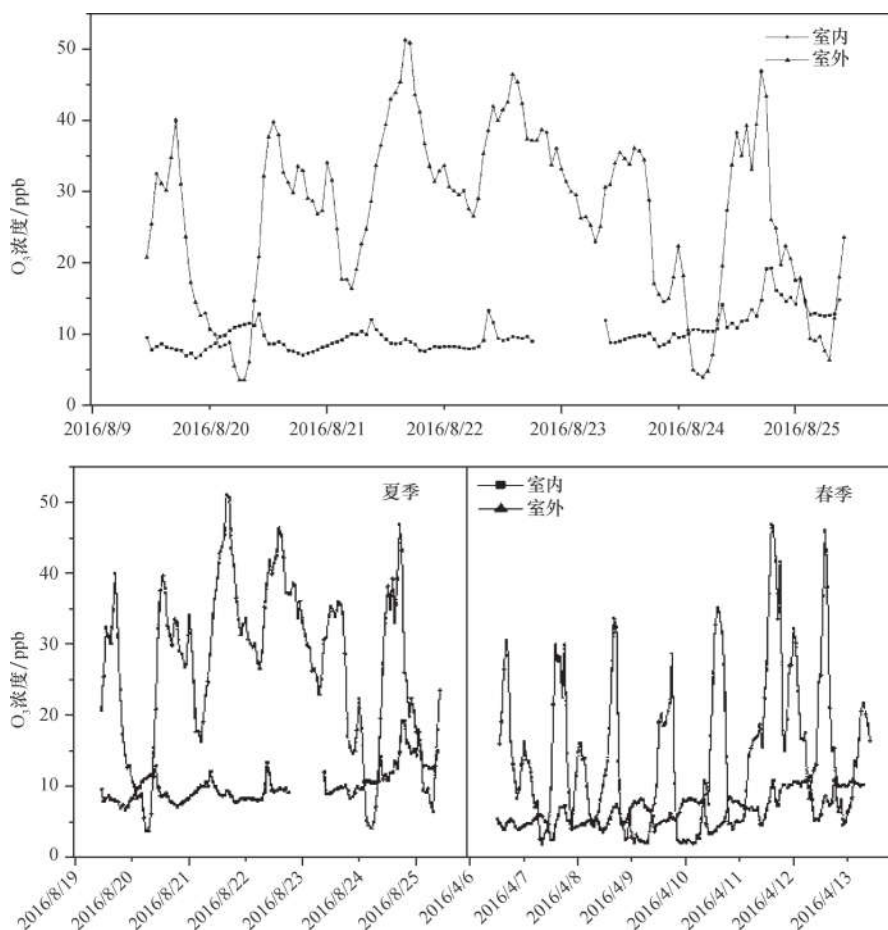


图6 大车马坑展厅采样期间O₃浓度变化曲线图

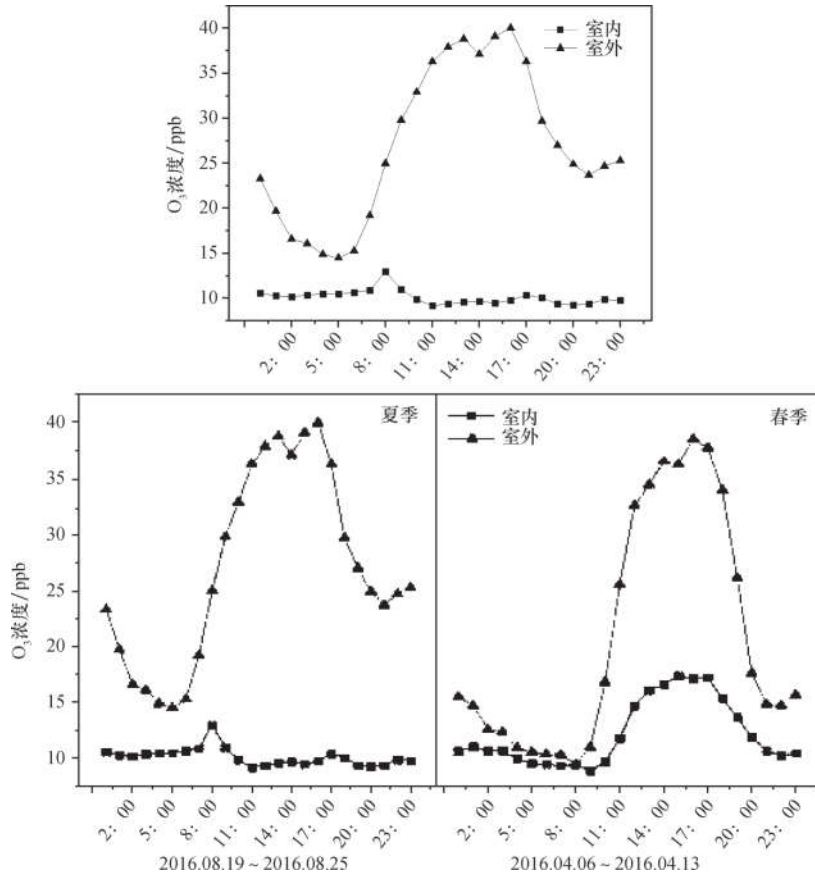


图7 采样期间O₃的日内变化

美国加热冷冻及空调工程师学会 (ASHRAE, 2011) 对普通藏品博物馆的污染物限值: SO₂浓度应<2ppb、NO₂浓度应<10ppb、O₃浓度应<5ppb。由表6可以看出, 大车马坑展厅内O₃和NO₂浓度值均低于此推荐值。大车马坑展厅内外NO₂浓度均值分别为0ppb和17 ± 12ppb, 即车马坑展厅内的NO₂处于极低的浓度水平, 这是因为展厅内较高的相对湿度有利于NO₂的沉降。由于夏季温度高, 室内外O₃浓度均高于春季采样, 而SO₂浓度和春季监测水平相当。由图6和图7可以看出, 整个采样期间, 大车马坑展厅内O₃浓度保持相对稳定水平。对比2013年和2014年监测结果, 夏季大车马坑展厅内O₃浓度稍高, NO₂和SO₂浓度水平低。

结 语

此研究对评估威胁遗址文物保存的污染物和微气候环境因素给出了直接依据, 依据环境监测结果, 熊家冢遗址博物馆大车马坑展厅存在一些不利于文物保存环境的因素。大车马坑展厅短时间内的温湿度波动、污染气体的渗入、高浓度的颗粒物污染对文物具有潜在的威胁。尽管遗址区内酸性气体 (NO₂和SO₂) 浓度水平很低, 但是大车马坑展厅内空气交换比较快, 通过气体交换进入室内

的酸性气体在反应消耗的过程中会对文物造成酸蚀影响。该研究为当前熊家冢遗址博物馆车马坑展厅环境调控提供了可行性参考,为编制遗址展厅预防性保护方案、为遗址文物保护修复和环境控制技术研究提供了基础数据,这将为潮湿环境地区遗址保存环境研究提供借鉴。

参考文献

- [1] Hu T F, Jia W T, Cao J J, Huang R J, G H, Liu S X, Ma T, Zhu Y Q. Indoor air quality at five site museums of Yangtze River civilization. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 449-454.
- [2] 李莹莹, 曹军骥, 李库. 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, (1): 93-95.
- [3] 陈华. 熊家冢车马坑展厅温湿度研究. *江汉考古*, 2015, (1): 107-111.