

兵马俑博物馆冬季室内大气 悬浮颗粒物与游客数量的关系

胡塔峰¹, 曹军骥^{2,1}, 李旭祥¹, *Lee Shun-Cheng*^{3,2}, *Judith C Chow*^{4,2}, *John G Watson*^{4,2}, 容波⁵

(1. 西安交通大学 环境科学与工程系, 陕西 西安 710049; 2. 中国科学院 地球环境研究所, 陕西 西安 710075, 中国;

3. 香港理工大学 土木与结构工程系, 香港, 中国; 4. 美国沙漠研究所 大气科学部, 内华达州, 雷诺, 美国;

5. 秦始皇兵马俑博物馆, 陕西 西安 710054, 中国)

摘要: 通过对秦始皇兵马俑博物馆铜车马展厅和一号坑室内采集的冬季大气悬浮颗粒物进行单颗粒分析, 评价了在具有不同通风条件的两个展厅中, 游客数量对大气悬浮颗粒物的影响。研究中采用配备能谱的扫描电子显微镜对单颗粒进行了形貌和元素组成分析, 以判断室内悬浮颗粒的来源和化学组成差异, 同时监测了两个展厅室内的微环境变化。结果显示, 在铜车马展厅室内悬浮颗粒的昼夜质量浓度之比(1.30~3.12), 明显高于同期的一号坑(0.96~2.59)和室外(0.68~1.79), 表明在铜车马展厅游客数量对颗粒物质量浓度的贡献大于在一号坑内。室内、外对比的结果表明, 悬浮颗粒物的质量浓度、粒径分布和颗粒类型等特性, 在配备了机械通风设备的铜车马展厅中受游客数量的影响较大, 而在自然通风为主的一号坑中, 通风条件则成为决定因素。颗粒物组成分析显示, 博物馆冬季的室内悬浮颗粒主要由黄土中的矿物颗粒、烟炱等低原子序数的颗粒、硫酸盐、燃煤飞灰和生物质颗粒组成。除烟炱和铝硅酸盐会造成对文物的脏污外, 随着温、湿度的波动, 硫酸钙的结晶、溶解、渗透和再结晶作用都会产生应力, 导致兵马俑表面的风化。

关键词: 大气悬浮颗粒; 游客数量; 文物

中图分类号: X513 **文献标志码:** A

文章编号: 1008-5548(2009)02-0032-06

Relationship Between Tourist Flow and Indoor Airborne Particles in the Museum of the Terracotta Army

*Hu Tafeng*¹, *Cao Junji*^{2,1}, *Li Xuxiang*¹,
Lee Shun-Cheng^{3,2}, *Judith C Chow*^{4,2},
John G Watson^{4,2}, *Rong Bo*⁵

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049; 2. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 3. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University,

Hong Kong, China; 4. Division of Atmospheric Sciences, Desert Research Institute, Reno, Nevada, USA; 5. The Museum of the Terracotta Army, Xi'an 710054, China)

Abstract: The daytime and nighttime total suspended particulate matters (TSP) were collected inside and outside the bronze chariots, horses exhibition hall (BCH) and Pit No. 1 Exhibition hall (Pit 1) of the Museum of the Terracotta Army (MTA) in winter, 2008. The purpose of this research was to study the contribution of visitors on indoor airborne particles in two display halls with distinguishing ventilating conditions in MTA. The morphological and elemental analyses of individual particles were performed with scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometer to determine the source of particles and their chemical changes. The microclimate inside the two display halls was also monitored. In most sampling days with intensive tourist visits, the daytime/nighttime particle mass ratios in BCH (1.30~3.12) were higher than those in Pit 1 (0.96~2.59) and outdoors (0.68~1.79), indicating more contribution of the tourist flow on particle mass concentrations in BCH than in Pit 1. The difference between indoor and outdoor particle mass concentrations, number particle size distribution and particle types were found in close relationship with visitor numbers in BCH equipped with a mechanical ventilating system, and with ventilating condition in Pit No.1 relying on natural ventilation. Indoor airborne particles in winter were composed of loess mineral dusts, low Z (atomic number) particles, sulfates, fly ashes and biological particles. Besides soiling hazard posed by soot and aluminosilicate, crystallization, dissolution, penetration and recrystallization of deposited calcium sulfates with the fluctuation of relative humidity and temperature might produce stress, thereby causing weathering on the surface of the terracotta statues.

Key words: airborne particles; visitor numbers; historical relics

被誉为“世界第八大奇迹”的秦始皇兵马俑于1974年在西安市骊山脚下的秦始皇陵东侧被发现, 吸引了每年超过200万的游客前来参观。展厅中的陶俑出土后就暴露在空气中, 不可避免地会受到室内微环境和大气污染物的威胁^[1-2]。临近的西安市有800万人口和近年日益增长的交通流、燃煤消耗和

收稿日期: 2008-11-18。

基金项目: 香港理工大学联合培养项目, 编号: GU-330。

第一作者简介: 胡塔峰(1973-), 男, 博士研究生, 从事大气气溶胶等研究。电话: 029-82668385。E-mail: hutafeng@163.com。

基础设施建设,博物馆周边有农田,每年一定时期会有生物质的燃烧。

近年来博物馆室内空气质量和文物保护的研究日益受到关注^[3-5]。室内大气污染物中的悬浮颗粒可沉降或吸附到文物表面,不但有潜在的研磨作用,还能将有害化学物质携带到文物、艺术品的表面,导致对文物材料的化学侵蚀和物理风化^[6-8]。进入博物馆的游客会带入颗粒物质,游客的走动还会使博物馆地板上和通道中已经沉降的颗粒物质再次悬浮在室内空气中。曾有研究发现人在房间内的走动使大气颗粒物浓度加倍^[9],而鞋和衣物则是室内尘埃的一个主要来源^[10],研究还表明游客是文物展品受脏污的一个主要贡献者^[5]。

本文中研究了在秦始皇兵马俑博物馆两个通风条件不同的展厅中,游客流量对大气悬浮颗粒质量浓度和化学组成的影响。用配备能谱检测器的扫描电子显微镜(SEM-EDX)对约8000个单颗粒的粒径分布、形貌和化学组成进行分析,讨论了室内大气悬浮物对文物的潜在脏污和侵蚀威胁,并对改善遗址博物馆的室内环境提出了建议。

1 方法

2008年2月15~22日,在兵马俑博物馆采集了共7d的冬季室内外大气悬浮颗粒物样品。3个采样点位置在图1中分别用五角星标示,一个室内采样点位于铜车马展厅(BCH),此展厅于1999年开放,建筑封闭性较好,配备有空调系统,但采样期间并未运行;另一个室内采样点位于一号坑遗址大厅(Pit1)内,此展厅为兵马俑博物馆面积最大的展厅,于1979年开放,部分窗户常年敞开,有良好的自然通风,受外界温湿度波动和大气污染物的影响较大;室外采样点位于博物馆办公区的屋顶,距地面约5m。为便于比较,采样在3个点同时进行,样品使用Airmetric Mini-vol气溶胶采样仪收集到47mm聚碳酸酯滤膜(孔径0.4μm)上,流速为5L/min。每天的采样均分为昼间样品和夜间样品,分别于早10:00和晚11:00开始,采样时间为5h。样品密封后,置于冰箱中4℃下保存。由于采样器故障,缺少17日样品。

剪取采有大气悬浮颗粒的滤膜(10mm×10mm),用导电胶带固定在铝制样品台上,喷碳后用JEOL JSM-6460 LV型SEM进行形貌观察,20kV加速电压下摄取二次电子像(SEI)。单颗粒粒径定义为电镜图像中颗粒最长的长度和与其正交的宽度的平均值^[11-12],图像处理 and 颗粒粒径测量用IMAGE PRO PLUS 5.0软件进行,测定电镜图像中粒径大于0.2μm的全部颗粒。元素组成分析借助NORAN SYSTEM SIX EDX

检测器完成,能谱采集时间为30s,各元素的能谱峰采用EDX的软件转换为元素的质量分数,未采用ZAF校正。样品的质量浓度采用Sartorius MC5(精度±1μg)电子天平测定。气象数据由Davis Vantage Pro气象站采集,室内温、湿度用Testo 175H2和177H1红外传感器记录。游客流量数据由兵马俑博物馆提供。

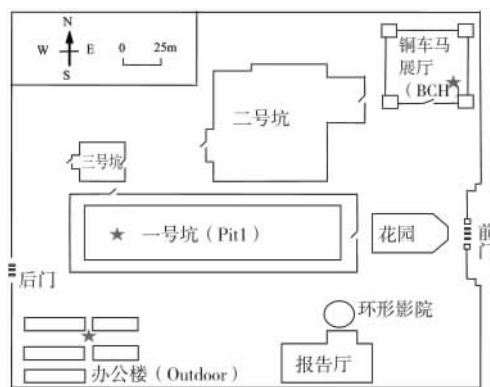


图1 兵马俑博物馆内采样点所处位置的平面示意图

Fig.1 Location of the three sampling points in the Museum of the Terracotta Army

2 结果与讨论

2.1 室内微气候

兵马俑博物馆所处的黄土高原属于温带半干旱大陆性气候,冬季的典型特点为温度较低,降雨较少。本次采样期间均为晴天多云天气,采样期间3个采样点的温、湿度变异如图2所示,灰色阴影标示了昼、夜采样时间分别为上午10:00至下午3:00、晚11:00至次日凌晨4:00。室外温度介于-1.1~18.4℃之间,相对湿度为19%~78%。一号坑内温度略低于室外,为-1.2~13℃,相对湿度明显高于室外,为34%~99%。虽然本次采样期间铜车马展厅内的空调系统并未运行,其室内温度仍然稳定在7.9~11.4℃之间,相对湿度12%~87%,与室外的湿度变化范围基本一致。一号坑室内温度随室外有规律地变化,约在每天上午10:00开始上升,在下午4:00达到最高值,与此同时室内的相对湿度也降到最低值。此次观测到的最低温度和最高相对湿度值都出现在一号坑,这应该是由于其自然通风和玻璃钢架结构建筑材料的良好热传导性能所造成的,这种极端环境条件很有可能促进陶俑材料的劣化,尤其冬天会出现冻融循环作用,并且高湿度增强了陶俑表面吸附气态污染物的能力。另外,随温、湿度的波动,沉降在文物表面的可溶盐颗粒频繁溶解、水合或结晶,会造成对文物的物理风化。

2.2 总悬浮颗粒物的质量浓度

秦始皇兵马俑博物馆的冬季开放时间是早8:30

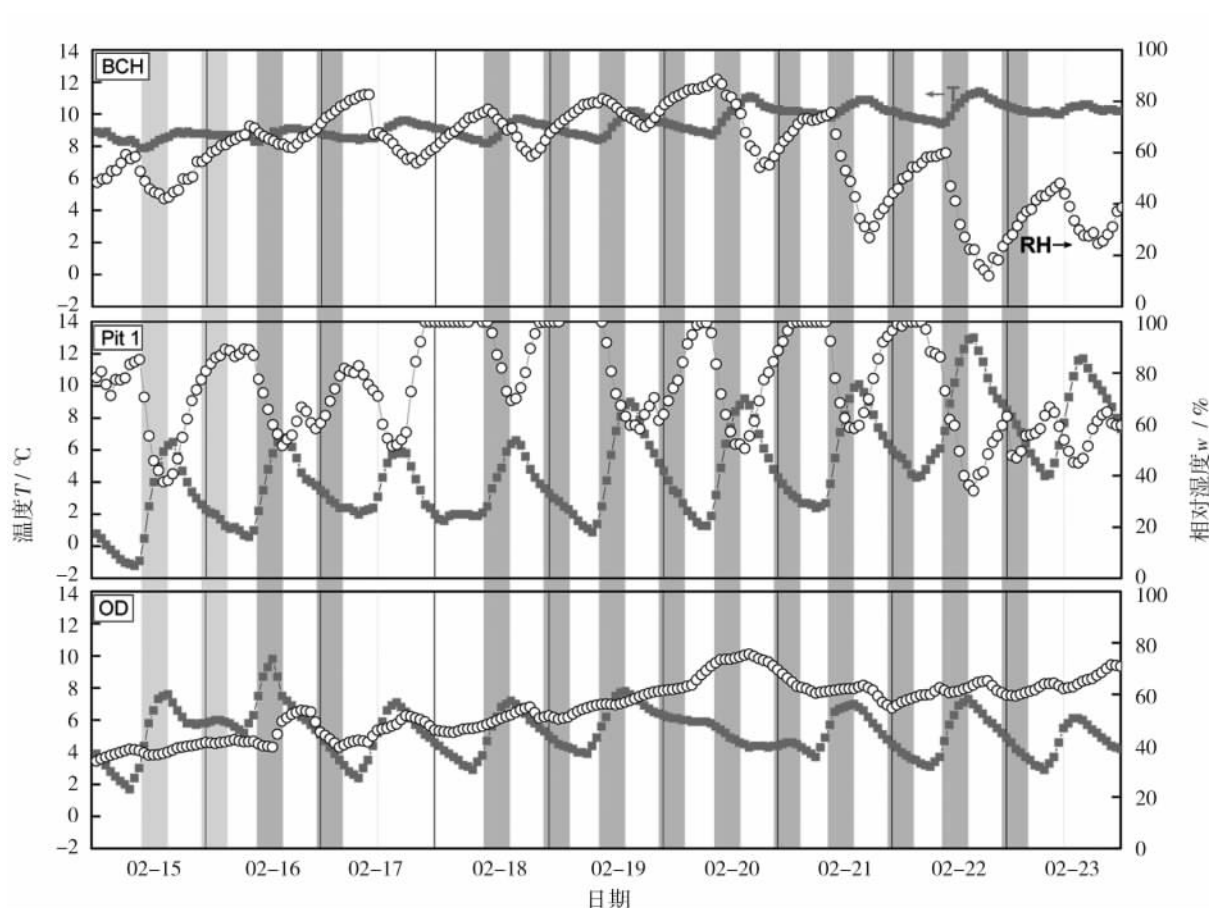


图 2 兵马俑博物馆内 3 个采样点的温度和相对湿度记录

Fig.2 Temperature and relative humidity recorded in the Museum of the Terra cotta Army

至晚 17:00, 昼间样品和夜间样品可分别代表展厅内有游客和无游客活动时的大气悬浮颗粒物水平。铜车马展厅、一号坑和室外的昼间颗粒物质量浓度分别在 $108.1 \sim 291.7$ 、 $131.4 \sim 285.4$ 、 $205.3 \sim 395.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围内, 而夜间颗粒物的质量浓度范围分别是 $54.7 \sim 173.2$ 、 $95.3 \sim 260.7$ 、 $203.3 \sim 341.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在 3 个采样点, 昼、夜大气悬浮颗粒物的质量浓度比值和游客数量的关系如图 3 所示。在绝大多数采样天, 铜车马展厅内昼、夜颗粒物质量浓度比值在 $1.30 \sim 3.12$ 之间, 高于同时期的一号坑内 ($0.96 \sim 2.56$) 和室外 ($0.68 \sim 1.79$), 显示在铜车马展厅中, 游客活动对大气悬浮颗粒的贡献高于一号坑。在一号坑中, 不但在门厅和通道走动的游客会搅动起地面的尘土, 通过敞开窗户吹入展厅内的自然通风气流, 也会带入颗粒或吹起地面的颗粒物质。相对于一号坑, 在建筑密封性较好的铜车马展厅内颗粒物的质量浓度更能与游客数量变化保持一致。

两个展厅中室内/外颗粒物质量浓度的比值 (ρ/ρ_0) 列于表 1, 在全部采样天内只有两个 ρ/ρ_0 比值大于 1, 且都出现在白天, 其中 2 月 15 日铜车马展厅

中出现的比值 1.22 是由于当天的清洁活动, 而 2 月 22 日在一号坑出现的比值 1.05 很接近 1, 并未显示突出的室内来源。虽然一号坑属于遗址博物馆展厅, 陶俑文物均直接陈列在遗址的黄土上, 但其室内颗粒物依然主要来自室外渗透进入。

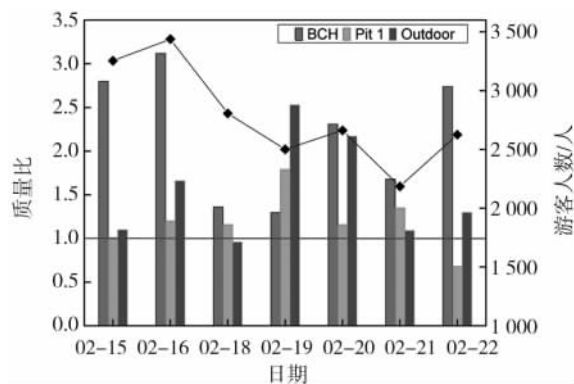


图 3 兵马俑博物馆内 3 个采样点大气悬浮颗粒物的昼、夜质量浓度比值

Fig.3 The daytime/nighttime mass concentration ratios of airborne particles collected in the Museum of the Terra cotta Army

表1 铜车马展厅(BCH)和一号坑(Pit1)内大气悬浮颗粒物的室内/外质量浓度比值和游客数量

Tab.1 Indoor/outdoor ratios of airborne particle concentrations in BCH and Pit 1 and the visitor numbers

日期	室内/外质量浓度比 ρ_i / ρ_o				游客数量/人
	BCH, 白天	BCH, 夜晚	Pit1, 白天	Pit1, 夜晚	
02-15	1.22	0.44	0.64	0.58	3 255
02-16	0.74	0.28	0.81	0.58	3 439
02-18	0.29	0.25	0.56	0.68	2 806
02-19	0.3	0.41	0.66	0.47	2 501
02-20	0.74	0.37	0.83	0.44	2 662
02-21	0.74	0.59	0.72	0.89	2 186
02-22	0.71	0.18	1.05	0.55	2 626

2.3 颗粒粒径分布

测量电镜图像中大于 0.2 μm 的单颗粒的粒径, 得出数量-粒径分布(见图 4)。铜车马展厅、一号坑和室外的昼间颗粒物最大粒径分别为: 17.5、26.0、26.4 μm , 夜间颗粒物的最大粒径分别为 14.3、16.2、19.4 μm 。室内夜间大气悬浮颗粒物粒径较小, 明显是由于白天游客的活动使更大粒径的颗粒悬浮于室内大气中。样品中仅有少于 15% 的颗粒粒径大于 2.5 μm , 所有样品的粒径均为单峰分布, 且峰值粒径都小于 1.0 μm , 其中具有峰值粒径的粒子在铜车马展厅夜间样品的数量分数最高, 其次为一号坑夜间样品, 进一步说明铜车马展厅内显著的游客扰动影响。在一号坑, 虽然夜间没有游客的活动, 但部分窗户敞开, 空气的自由流动依然会带入或卷起较大粒径的颗粒, 增加了粗粒子的数量分数。在两个展厅的昼间样品中, 粒径分布十分相似, 而室外昼、夜样品的粒径分布亦无明显差别。

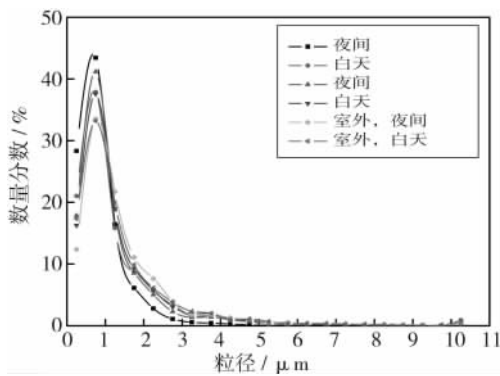


图4 兵马俑博物馆内 3 个采样点大气悬浮颗粒物的数量粒径分布
Fig.4 Number size distribution of airborne particles collected in the Museum of the Terracotta Army

2.4 颗粒分类

2.4.1 颗粒形貌

电镜观察显示颗粒物主要具有 4 种形貌: 不规则土壤尘、球形燃煤飞灰、烟炱聚集体和其它类型颗粒等(图 5)。土壤尘主要来源于室内扬起的土壤尘粒或

室外飘入, 具有不规则的形状(图 5(a)和 5(b)); 燃煤飞灰多为煤炭燃烧生成的硅铝酸盐小球, 通常呈光滑的球形(图 5(a)), 或以聚集体形式粘附其他颗粒(图 5(d)), 主要来源为博物馆西边约 17 km 的灞河热电厂; 烟炱聚集体存在于所有样品中, 多为纳米级的小球聚集成链状或簇状, 粒径多在 1~5 μm (图 5(a)), 主要来源为博物馆北边约 5 km 的西临高速公路; 其它类型颗粒中, 生物质颗粒多为来源于博物馆周围的农田和绿化植物的花粉、孢子等(图 5(c)); 此外一些椭球或立方形颗粒无法明确来源, 这些颗粒物应有更复杂的来源, 如大气非均相化学反应或长距离的大气传输, 如细长的硫酸钙和硫酸钠颗粒(图 5(b)和 5(d))。

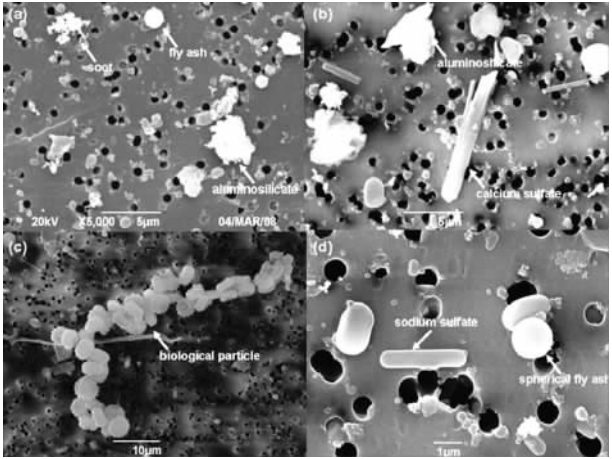


图5 在铜车马展厅(图 5(a)、(d))和一号坑(图 5(b)、(c))大气颗粒物的电子显微镜图像
Fig.5 Scanning electron images of typical particles on nucleopore filters collected in BCH (a, d) and Pit 1 (b, c)

2.4.2 颗粒物的化学组成

EDX 谱图中主要元素峰为 C 和 O 的颗粒被定义为低原子序数颗粒, 这些颗粒多为形貌特征明显的烟炱聚集体和极少数生物质颗粒, 烟炱为链状或簇状的微球聚集体, 生物质颗粒多具有规则的表面或对称的形状。谱图中主要为无机元素峰的矿物颗粒依照能谱的半定量结果划分类型^[11], 颗粒的分类及其相对含量如表 2 所示, 表中各类颗粒的含量之和并不等于 100%, 这是由于样品中总有不到 2% 的颗粒不能确定类型。为避免聚碳酸酯滤膜材料的干扰, 在矿物颗粒的谱图中, 未计算 C 元素和 O 元素的相对含量, 这样处理将低估矿物颗粒中有机物质的含量。此外, 在样品前处理和分析时的真空环境去除了有挥发性的有机颗粒物。

多数样品中富 Si 颗粒含量最高, 这些石英、硅酸盐、硅铝酸盐颗粒来自黄土, 包含了石英和蒙脱石、伊利石、绿泥石、高岭石、白云母等黏土矿物。硫酸盐是颗粒中含量第二多的类型, 其中 S+Ca 次类为石膏、烧

石膏和无水石膏颗粒;“S 元素占优”次类为硫酸铵或硫酸氢铵;而含量低于 5%的 S+Na 次类表明存在芒硝类矿物。硫酸钙颗粒的 EDX 谱图中多含有强弱不等的 Si、Al 元素峰,显示硫酸钙与石英或黏土等土壤尘颗粒有不同程度的混合,土壤尘颗粒成为含 S 颗粒的载体。少量球形的 S+Fe 和 S+Ca+Si 颗粒应该是来源于电厂中的燃煤燃烧。富 Ca 颗粒在全部被测颗粒中不到 5%,包括指示碳酸钙、氧化钙、氢氧化钙或硝酸钙的“Ca 元素占优”次类和指示白云石的 Ca+Mg 次类。其他类型如富 Fe 颗粒、富 K 颗粒、富 Ti 颗粒、富 Mn 颗粒等合计,在所有样品中均低于 7%。

表 2 铜车马展厅、一号坑和室外昼夜大气颗粒的分类
及各类颗粒所占的数量分数

Tab.2 Classification and number percentage of each sub-group in
daytime and nighttime airborne particle samples collected in BCH,
Pit 1, and at outdoor site

数量分数 /%	铜车马展厅		一号坑		室外	
	昼间	夜间	昼间	夜间	昼间	夜间
石英	8.98	9.55	11.18	9.89	8.73	11.57
硅铝酸盐	27.74	14.55	28.92	29.52	28.77	24.51
硅酸盐	3.74	1.54	4.84	3.64	2.66	3.63
方解石	3.08	1.32	2.42	2.75	2.59	3.18
白云石	0.98	0.66	0.14	0.37	0.74	0.53
硫酸铵	9.57	11.17	7.19	8.85	7.03	6.73
石膏、烧石膏	16.07	8.74	17.81	17.55	20.78	22.01
芒硝	4.85	4.56	3.63	3.57	4.29	4.61
黄铁矿	0.13	0.29	0.50	0.74	0.30	0.30
硫酸钾	0.39	0.59	0.36	0.59	0.15	0.08
S-Ca-Si	7.67	2.94	10.11	6.32	9.10	6.81
赤铁矿	2.56	1.91	1.35	1.64	2.81	2.04
Fe-Ca-Na	0.72	0.59	0.21	0.30	0.52	0.38
富 Ti 颗粒	0.39	0.22	0.07	0.15	0.15	0.15
富 Na 颗粒	1.38	3.23	1.28	2.53	2.07	2.95
富 K 颗粒	0.66	0.96	0.00	0.22	0.30	0.30
烟炱、生物质颗粒	10.36	35.56	9.05	10.56	8.21	9.38
合计	99.28	98.38	99.07	99.18	99.19	99.17

昼间样品中的颗粒类型在 3 个采样点都很接近,表明室内大气悬浮颗粒除游客的活动带入或搅动起地面尘土外,还有自然通风将室外的颗粒物输送到室内。至于夜间样品,在一号坑和室外样品中矿物颗粒都超过 89%,只有铜车马展厅内低原子序数颗粒物超过了 35%,其中绝大多数是粒径小于 1 μm 的烟炱。这再次证明,在铜车马展厅中粒径大于 1 μm 的土壤尘颗粒在白天被游客搅起,夜间逐渐沉降,造成室内大气悬浮颗粒中烟炱比例升高,而在一号坑,夜晚自由流通的气流使空气中保持了一定量的土壤尘,烟炱等低原子序数的颗粒的比例被维持在一个相对稳定的值。

2.5 物理风化

盐蚀是一种很重要也很普遍的风化过程,对建筑石料^[8,13]、砖^[14]、陶瓷和水泥^[15]等材料威胁很大。除了盐类与材料的化学反应外,盐蚀主要来自 3 个方面:结晶压力、水合压力和差热膨胀,其中结晶压力对材料表面的伤害最大^[16]。可溶盐对多孔材料的危害不是来自于盐的溶解,而是随温湿度变化,盐的结晶和结晶水合作用产生的结晶压力常常超过特定材料的强度^[17]。对石灰质石料风化的研究也发现,盐在孔隙中结晶所产生的物理应力是导致石料崩裂破损的主要原因之一^[8]。通常兵马俑的多孔陶质材料具有较高的环境耐候性,但是溶解的盐会渗入陶器的多孔表面,并在毛细作用和吸附作用的驱动下进入较深的表面内部^[8]。此时随环境变化,某些盐如石膏的生成、聚集、水合、结晶、溶解、渗透、再结晶作用,都会对陶俑材料造成化学的或物理结构的破坏。

颗粒分类结果显示,在博物馆室内大气悬浮颗粒中含有相当数量的硫酸钙等可溶盐,在以前的研究中也曾在兵马俑彩绘漆层的表面观察到坑和裂隙的附近有晶体或絮状的硫酸钙^[18]。根据 1989 年和 1992 年的记录,一号坑内日均气温的波动范围是-4.2~32 $^{\circ}\text{C}$,日均相对湿度的范围为 35%~92%^[1]。除冬季温湿度波动造成的冻融作用威胁外,在如此高的相对湿度条件下,硫酸钙细粒会溶解并渗入表面的孔隙内,随着温度升高,水分蒸发,这些盐会结晶、体积增大,产生应力造成材料开裂剥落,在漆层表面形成坑和裂隙。

3 结论

本文中对兵马俑博物馆铜车马展厅和一号坑及室外的大气悬浮颗粒进行了微观形貌观察和元素分析,并讨论了颗粒物质量浓度与游客数量和通风条件的关系。大气悬浮颗粒样品中主要包含铝硅酸盐、硫酸盐颗粒和烟炱聚集体,展厅中的文物既面对来自尘土和烟炱的脏污威胁,又面临极端环境条件和硫酸钙等可溶盐颗粒对陶俑表面的物理风化。在配备了空调系统的铜车马展厅,游客数量对颗粒质量浓度和组成有较大影响,因此,在铜车马展厅合理控制游客流量、调整展品与游客的距离或采用有效的展柜,能够有效降低颗粒物的脏污或侵蚀威胁。一号坑修建于上世纪 70 年代,是一座拱形玻璃钢架结构的展览大厅,部分常年敞开的窗户提供了良好的自然通风,造成大气颗粒物从室外渗入,室内温湿度也随室外变化而波动,因此,有效控制室内微气候、降低室外颗粒物渗入,以减少极端环境条件时的物理风化,对改善一号坑的文物保存环境更为重要。

参考文献(References):

- [1] 张志军. 秦始皇兵马俑保护研究[M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 1998.
- [2] CAO J J, RONG B, LEE S C, et al. Composition of indoor aerosols at Emperor Qin's Terracotta Museum, Xi'an, China, during summer, 2004 [J]. China Particuology, 2005, 3: 170-175.
- [3] BRIMBLECOMBE P. The composition of museum atmospheres[J]. Atmospheric Environment, 1990, 24B(1): 1-8.
- [4] NAZAROFF W W, CASS G R. Protecting museum collections from soiling due to the deposition of airborne particles[J]. Atmospheric Environment, 1991, 25: 841-852.
- [5] YOON Y H, BRIMBLECOMBE P. The distribution of soiling by coarse particulate matter in the museum environment[J]. Indoor Air, 2001, 11: 232-240.
- [6] De BOCK L A, Van GRIEKEN R E, CAMUFFO D, et al. Microanalysis of museum aerosols to elucidate the soiling of paintings: case of the Correr Museum, Venice, Italy[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 30: 3 341-3 350.
- [7] Van GRIEKEN R, DELALIEUX F, GYSELS K. Cultural heritage and the environment[J]. Pure and Applied Chemistry, 1998, 70: 2 327-2 331.
- [8] CARDELL C, DELALIEUX F, ROUMPOPOULO S, et al. Salt-induced decay in calcareous stone monuments and building in a marine environment in SW France[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17: 165-179.
- [9] THATCHER T L, LAYTON D W. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence[J]. Atmospheric Environment, 1995, 29: 1 487-1 497.
- [10] YOON Y H, BRIMBLECOMBE P. Contribution of dust at floor level to particle deposit within the Sainsbury Centre for Visual Arts[J]. Studies in Conservation, 2000, 45: 127-137.
- [11] OKADA K, KAI K. Atmospheric mineral particles collected at Qira in the Taklamakan Desert, China[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 6 927-6 935.
- [12] ZHANG D Z, ZANG J Y, SHI G Y, et al. Mixture state of individual Asian dust particles at a coastal site of Qingdao, China[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 3 895-3 901.
- [13] BENAVENTE D, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ J, CUETO A N, et al. Salt weathering in dual-porosity building dolostones[J]. Engineering Geology, 2007, 94: 215-226.
- [14] CULTRONE G, SIDRABA I, SEBASTIAN E. Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the "Triangul Bastion", Riga (Latvia) [J]. Applied Clay Science, 2005, 28: 297-308.
- [15] MARINONI N, BIRELLI M P, ROSTAGNO C, et al. The effects of atmospheric multi-pollutants on modern concrete [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 4 701-4 712.
- [16] KUCHITSU N, ISHIZAKI T, NISHIURA T. Salt weathering of the brick monuments in Ayutthaya, Thailand [J]. Engineering Geology, 1999, 55: 91-99.
- [17] NEHDI M, HAYEK M. Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35: 731-742.
- [18] HU T F, LI X X, DONG J G, et al. Morphology and elemental composition of dustfall particles inside Emperor Qin's Terracotta Warriors and Horses Museum[J]. China Particuology, 2006, 4: 346-351.

《中国粉体技术》2009 年第 3 期要目

1. 李进春,等(西南科技大学): 涡流分级机异形叶片的数值模拟与试验研究
2. 姬广勤,等(中国石油大学(华东)): 循环流化床锅炉内颗粒速度分布的实验研究
3. 李 梅,等(内蒙古科技大学): Zr 掺杂 CeO₂ 电子结构的密度泛函计算
4. 王彩丽,等(中国矿业大学(北京)): 硅灰石表面改性及其在聚丙烯中的应用
5. 薛安顺,等(陕西交通职业技术学院): 沥青混合料合成级配的均匀性评价
6. 陈 培,等(东华大学): 电子玻璃粉体颗粒特性与造粒工艺参数的关系研究
7. 穆 兰,等(西南科技大学): 纳米 CuFe₂O₄ 催化硫酸铜热分解及机理研究
8. 胡 程,等(华南理工大学): 采用一种高能搅拌磨湿法制备纳米氧化铝粉体
9. 刘 坚,等(西南科技大学): 含先驱体 SiC 粉体低压成型低温烧结 SiC 多孔陶瓷
10. 郝保红,等(北京石油化工学院): 添加剂对纳米 AlOOH 晶体生长形态的影响
11. 郭洪娜,等(济南大学): 单分散纳米二氧化硅的制备
12. 李 敏,等(大庆石油学院): 甲烷/空气火焰法合成纳米颗粒中火焰的数值模拟
13. 李玉霞,等(中国日用化学工业研究院): 纳米碱式碳酸镁的改性研究
14. 刘 月,等(中国矿业大学(北京)): 热处理对蛋白土粉体性能的影响
15. 周潇雨,等(华南理工大学): 多孔颗粒材料内孔表面分维测算及与保水性能关系的研究
16. 周述苍,等(华南理工大学): 纳米颗粒粒径测量的 NNLS 算法分析及改进
17. 朱圣晓,等(华南理工大学): 灰色关联分析石蜡储能颗粒粒度分布对相变储能石膏板导热系数影响
18. 杨惊涛,等(上海理工大学): 纳米及微米磁性颗粒在长波长下的光散射特性分析
19. 谭立新,等(中南大学): 激光粒度法测试结果与库尔特法、沉降法的对比
20. 谢瑞红,等(中国农业大学): 超微粉碎技术的应用现状与发展趋势
21. 铁生年,等(青海大学): 超细粉体材料的制备技术及应用