

汉阳陵帝陵外藏坑遗址 展示厅的文物保存环境研究

曹军骥 胡塔峰 马涛 李库 编著



科学出版社

汉阳陵帝陵外藏坑遗址展示厅的 文物保存环境研究

曹军骥 胡塔峰 马 涛 李 库 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书通过对汉阳陵博物馆帝陵外藏坑文物保护展示厅内大气和土壤环境的长期综合观测与采样分析,构建了科学化掌握文物保存环境的监测体系并获得一手观测数据,揭示了遗址文物展陈环境的演化趋势,力求做到地球科学基本理论与文物保存环境评价的应用相结合,实现环境科学和黄土环境学在文物保护领域的拓展与深化应用,为国内外遗址文物的预防性保护提供科学手段。

本书可供环境科学研究人员及文物保护专业工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

汉阳陵帝陵外藏坑遗址展示厅的文物保存环境研究/曹军骥等编著.
—北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047409-4

I. ①汉… II. ①曹… III. ①汉墓-遗址博物馆-文物-藏品保管(博物馆)-环境因素-研究 IV. ①K878.84②G264.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 036352 号

责任编辑:祝洁 罗娟/责任校对:贾娜娜
责任印制:赵博/封面设计:红叶图文

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津新科印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:18 3/4 彩插:2

字数:380 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

汉阳陵帝陵外藏坑保护展示厅是世界上首座全地下遗址博物馆。展示厅创造性地采用全封闭式玻璃屏护设计，意在便于游客近距离观赏遗址的同时，减少外界环境对文物的影响。但 2006 年展厅开放不久，遗址土体和展陈文物表面很快出现了结晶盐析及彩绘起翘脱落等明显病害。由于缺乏文物保存环境的观测数据，难以评价汉阳陵展陈模式对文物的定量影响。

本书将大气环境监测、气溶胶化学及黄土环境化学与水文学等研究领域的基本理论与实用技术引入对遗址博物馆文物保存环境的演化评价，通过构建室内空气质量观测系统，实时探测对遗址文物有重要影响的微环境变化，定量评价展示厅内空气密闭程度；陆续开展微气候、腐蚀性气体、气溶胶理化成分先后五年的联合观测对比，获得关键污染物的变化特征及机制；结合土遗址本体、地下水、返碱部位及陶俑表面风化物的理化组成和微结构特征，认识污染物迁移、转化的过程，并评估文物的损害程度。上述长期综合观测积累的实践经验和基础数据，将为有效的控制对策与措施提供科学依据，也可为国内外同类遗址博物馆文物保存环境研究提供先导性研究案例，有助于实现遗址文物的预防性保护。

本书汇集中国科学院地球环境研究所文物保存环境研究小组的主要成果，参加汉阳陵监测采样与数据分析工作的研究组成员包括杨雅媚、李莹莹、曹南颖、贾文婷、刘随心、张婷、张二科、陈志诚、朱玉庆、方其鸣、王昭允、王星翰和牛馨祎，感谢他们的辛勤劳动。衷心感谢西安交通大学李旭祥教授、顾兆林教授对我们工作的长期支持。特别感谢汉阳陵博物馆吴晓丛、王保平、晏新志、陈波、段晓彤、程蓓和孟乐等为外场观测提供的极大便利。特别感谢美国沙漠研究所 Judith C. Chow 教授、John G. Watson 教授对有关工作给予无私支持与帮助。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

曹军骥

2015 年 12 月

目 录

前言

1 文物保存环境	1
1.1 文物	1
1.2 博物馆的作用	1
1.3 遗址博物馆	2
1.4 造成文物受损的环境因素	4
1.4.1 微气候	4
1.4.2 大气气溶胶	8
1.4.3 气态污染物	16
1.4.4 土壤和地下水	23
1.4.5 环境因素的协同作用	25
1.5 遗址文物保存环境	32
1.6 国内外文物保存环境研究现状	34
1.6.1 国外文物保存环境研究现状	34
1.6.2 国内文物保存环境研究现状	39
2 汉阳陵博物馆	41
2.1 汉阳陵	41
2.1.1 汉景帝	41
2.1.2 自然地理状况	41
2.1.3 汉阳陵陵园	42
2.1.4 社会经济环境	43
2.2 汉阳陵博物馆	45
2.2.1 博物馆概况	45
2.2.2 陵区遗迹和建筑	47
2.3 帝陵外藏坑保护展示厅馆藏文物	52
2.3.1 文物类型	52
2.3.2 文物材质	55
2.4 帝陵外藏坑保护展示厅文物保存环境	56
2.4.1 全封闭遗址区	56

2.4.2	文物病害	59
2.4.3	汉阳陵博物馆文物保存环境研究的内容和意义	61
3	帝陵外藏坑保护展示厅遗址区的微气候	65
3.1	微气候监测概述	65
3.1.1	温度监测方法	65
3.1.2	湿度监测方法	70
3.1.3	气密性检测方法	76
3.2	帝陵外藏坑保护展示厅遗址区的微气候监测	81
3.2.1	遗址区的气密性检测	81
3.2.2	遗址区的温、湿度监测	85
3.3	遗址区玻璃围护的气密性	87
3.3.1	遗址区影响气密性的环境因素	87
3.3.2	遗址区的空气交换速率	88
3.4	帝陵外藏坑保护展示厅遗址区的微气候	91
3.4.1	馆外气象状况	91
3.4.2	遗址区内微气候的季节变化	92
3.4.3	遗址区内微气候的日内变化	93
3.4.4	遗址区内微气候的历史演变	94
4	帝陵外藏坑保护展示厅遗址区的大气气溶胶	98
4.1	大气气溶胶科学概述	98
4.1.1	大气气溶胶科学的发展史	98
4.1.2	常见单位与术语	98
4.1.3	大气气溶胶粒子的粒度和形状	100
4.1.4	大气气溶胶粒子间的作用力	102
4.1.5	气溶胶粒子的物理化学变化	104
4.1.6	室内气溶胶	108
4.2	大气气溶胶的采集	110
4.2.1	测量方案设计	110
4.2.2	大气样品的采集	112
4.2.3	大气气溶胶的过滤采集	112
4.2.4	滤膜的选择	113
4.3	大气气溶胶的分析	117
4.3.1	气溶胶物理性质测量	117
4.3.2	气溶胶化学组成分析	118
4.3.3	气溶胶微生物检测	120

4.3.4	离子色谱分析	122
4.3.5	X 射线荧光光谱分析	123
4.3.6	颗粒态碳分析	124
4.3.7	单颗粒分析	127
4.4	帝陵外藏坑保护展示厅遗址区的大气气溶胶	128
4.4.1	样品采集	128
4.4.2	样品分析	131
4.4.3	BC 变化特征	134
4.4.4	PM _{2.5} 质量浓度	135
4.4.5	PM _{2.5} 化学组成	136
4.4.6	TSP 单颗粒分析	139
4.4.7	遗址区内 PM _{2.5} 的历史演变	140
5	帝陵外藏坑保护展示厅遗址区的气态污染物	144
5.1	室内气态污染物监测	144
5.1.1	室内气态污染物来源	144
5.1.2	室内气态污染物监测技术	145
5.1.3	室内气态污染物监测方法	155
5.1.4	室内空气质量标准	164
5.1.5	室内气态污染物监测方案	173
5.2	遗址博物馆室内气态污染物	179
5.2.1	博物馆室内关键气态污染物	179
5.2.2	博物馆室内气态污染物的监测方案	212
5.3	帝陵外藏坑保护展示厅遗址区气态污染物的采集与分析	215
5.3.1	样品采集	215
5.3.2	样品分析	215
5.3.3	质量控制	221
5.4	帝陵外藏坑保护展示厅遗址区内的气态污染物特征	222
5.4.1	遗址区室内外气态污染物的质量浓度	222
5.4.2	遗址区内气态污染物浓度的变化机制	223
5.4.3	遗址区内气态污染物的衰减速率	225
5.4.4	遗址区内气态污染物的历史变化	227
6	帝陵外藏坑保护展示厅的土壤环境与文物病害	229
6.1	遗址博物馆的土壤环境	229
6.1.1	土遗址及其病害	229
6.1.2	文物赋存的土壤环境	230

6.1.3 帝陵外藏坑保护展示厅内的盐蚀病害	232
6.2 样品的采集	233
6.2.1 表层土壤样品的采集	233
6.2.2 结晶盐样品的采集	233
6.2.3 土壤剖面样品的采集	234
6.2.4 地下水样品的采集	234
6.3 样品的分析	234
6.3.1 土壤含水量	234
6.3.2 化学组成分析	235
6.3.3 微观形貌与元素组成	236
6.3.4 元素化学态	236
6.4 帝陵外藏坑保护展示厅的土壤环境	237
6.4.1 表土和剖面土壤的含水量	237
6.4.2 剖面土壤的碳酸钙含量	239
6.4.3 表土和结晶盐的元素组成	240
6.4.4 水溶性无机离子	242
6.4.5 表土和结晶盐的矿物组成	248
6.4.6 结晶盐微观形貌与元素组成	250
6.4.7 结晶盐元素化学态	250
6.4.8 遗址区土壤环境的历史变化	252
6.5 盐害机理	254
6.5.1 土壤盐分迁移	255
6.5.2 硫的干沉降	258
6.5.3 盐蚀过程	261
结语	263
参考文献	265
彩图	

1 文物保存环境

1.1 文 物

“文物”一词，在中国最早是指礼乐制度，《左传·桓公二年》记载：“夫德，俭而有度，登降有数，文物以纪之，声明以发之；以临照百官，百官于是乎戒惧，而不敢易纪律。”现在，人们多把古代遗留下来的具有历史价值、艺术价值、科学价值和特殊商品价值的东西称为文物。2002年10月28日修订通过的《中华人民共和国文物保护法》中界定了文物的范畴为：“（一）具有历史、艺术、科学价值的古文化遗址、古墓葬、古建筑、石窟寺和石刻、壁画；（二）与重大历史事件、革命运动或者著名人物有关的以及具有重要纪念意义、教育意义或者史料价值的近代现代重要史迹、实物、代表性建筑；（三）历史上各时代珍贵的艺术品、工艺美术品；（四）历史上各时代重要的文献资料以及具有历史、艺术、科学价值的手稿和图书资料等；（五）反映历史上各时代、各民族社会制度、社会生产、社会生活的代表性实物；具有科学价值的古脊椎动物化石和古人类化石。”

文物是文化的产物，是人类社会发展过程中的珍贵历史遗存物，它从不同的领域和侧面反映出历史上人们改造世界的状况，是研究人类社会历史的实物资料。文物中蕴含了民族特有的思维方式和想象力，是各民族智慧的结晶和全人类文明的瑰宝。因此，保护文物、保持民族文化遗产的传承，是联结民族情感、增进民族团结和维护国家统一及社会稳定的重要文化基础，也是维护世界文化多样性和创造性、促进人类共同发展的前提。

1.2 博物馆的作用

博物馆，亦称博物院，是受社会的付托，安置一套文物典藏的建筑物或机构。1974年，国际博物馆协会（International Council of Museum, ICOM）第十一届大会通过的章程明确规定：博物馆是为社会及其发展服务的、非营利的永久性机构，并向大众开放，它为研究、教育、欣赏之目的征集、保护、研究、传播并展出人类及人类环境的物证。1979年，中国博物馆学会通过的《省、市、自治区博物馆工作条例》中明确规定：博物馆是文物和标本的主要收藏机构、宣传教育机构和科学研究机构，是我国社会主义科学文化事业的重要组成部分。

博物馆起源于约公元前 300 年古希腊亚历山大港的缪斯, 缪斯中专门收藏亚历山大大帝在欧洲、亚洲及非洲的征战中得到的珍品, 博物馆的英文“MUSEUM”就是源于希腊语的缪斯“MUSEION”。然而, 当时的博物馆并不对外开放, 世界第一批公共博物馆设立于 17~18 世纪的欧洲。第一个真正的公共博物馆是 1793 年法国大革命期间开设的巴黎卢浮宫, 这是历史上首次让各地与各种地位的人们自由地观看前法国王室的收藏。

我国是博物馆众多的国家, 自 1905 年清末爱国主义实业家、教育家、社会活动家张謇创办第一个博物馆——南通博物苑, 到目前我国最大的博物馆——故宫博物院(占地 72 万平方米), 我国的博物馆已超过百年历史, 达 2300 余座(不含港、澳、台地区), 馆藏文物 2000 多万件(套)。主要的文物材质类型包括陶器(如兵马俑、汉俑、陶罐、陶仓)、金属(如金、银、铁、青铜器)、珍宝器物(如玉、石)、艺术藏品(如瓷器、书画、纺织品)及其他材料类型等。

博物馆是保存、保护、研究、展示文物实物资源和传播人类文明的重要场所, 是一个国家、地区历史文化和文明进步的重要标志。因此, 博物馆被称为物化的人类发展史, 博物馆内陈列的文物既是历史源远流长的见证, 又是维系各国和民族团结统一的精神纽带。博物馆通过征集和收藏代表自然现象和人类生活的实物, 进行科学研究; 通过举办陈列和展览, 传播历史和科学文化知识, 为公众提供知识、教育和欣赏。它对人类文化遗产和自然遗存的管理起到非常大的作用, 已成为一个国家、地区历史文化与现代文明的主要组成部分和重要标志。在中国的文物保护制度中, 可移动的文物大多收藏在国家建立的、具有良好保护设施的博物馆或者纪念馆和科研院所中, 因而被称为馆藏文物。不可移动文物的主体, 主要是各级文物保护单位, 以及古遗址、古墓葬、古建筑、石窟寺及石刻、近现代重要史迹及代表性建筑等。

每座博物馆发挥社会功能的侧重点不同, 在藏品种类和展出内容上也不尽相同, 博物馆的类别大致包括综合类、专题类、历史类、遗址类、纪念类、文化艺术类、自然科学类、民族民俗类等。博物馆类别的区分和研究, 有助于博物馆科学地把握自己的专业方向, 征集与本馆专业相关的藏品, 也有利于同类型博物馆之间开展交流、协作和学术研究。

1.3 遗址博物馆

遗址是指古代人类活动的遗迹、具有特殊文化意义的遗迹、具有突出价值的人类工程或自然与人类联合工程等, 是不可再生的特殊资源, 具有极高的历史文化及科学价值。遗址蕴含着、体现着古代文明特有的民族精神价值, 通过遗址考古和人类学研究可以寻找古代人类生活和历史文化的轨迹。遗址具有不可移动的

特性,不可能像文物一样盛于匣柜之中,并置于环境良好的库房或展厅内保存、陈列。因此,文物和遗迹经过调查、勘探和发掘,在遗址发掘现场营建保护性建筑(遗址博物馆),展示文物在所处历史时期的原始面貌,就成为一个必然的选择。

遗址博物馆是在古文化遗址上建立的,针对该遗址文化进行发掘、保护、研究、陈列的专门性博物馆。作为博物馆家族的一个分支,遗址博物馆既是一种强调馆址性质的物质实体,也是整个人类社会发展和历史沿革的文化遗存和实物档案,并具有“不可移动性”和“整体不可分割性”的特点。遗址博物馆除具备博物馆的基本属性外,与其他传统博物馆的主要区别在于:遗址本身也是文物,是博物馆展示的中心内容,是博物馆赖以生存的基础。在博物馆的发展过程中,人们越来越重视遗址,并在遗址上建立起现代化的博物馆,让人身临其境地领略古代的历史和文化。

世界著名的博物馆群——梵蒂冈博物馆(Vatican Museum),原为教皇的宫廷,从17世纪后利用部分建筑陈列收藏品,后改为博物馆。馆内不但陈列有大量教皇的雕塑和收藏艺术品,而且其建筑本身便是古代优秀杰出的艺术品。瑞典的斯坎森露天博物馆(Skansen Open-air Museum)是世界上第一座露天博物馆,1880年筹建,其仿古建筑严格按照原状复原陈列。意大利的庞贝古城(The City of Pompeii)博物馆位于意大利南部坎帕尼亚大区,公元79年,维苏威火山爆发,庞贝城被火山灰吞没,1748年被发现后,经过200多年的考古发掘,现已基本完成。古城面积63公顷,城内有完整的供水系统,以及广场、政府机关、寺庙、街市、民居等,出土有各类壁画、陶器、雕塑等,反映了庞贝城700余年发展的文化内涵,每天都吸引上万游客前来参观。

我国境内的遗址类文化遗存非常丰富。截至目前,在第一至六批2352处全国重点文物保护单位中,古遗址506处,占22.5%。据不完全统计,我国目前已经有遗址博物馆100余座,分布在几乎所有的省、自治区和直辖市,近年来各地新建和即将竣工开放的遗址博物馆也有50余座。1958年建成的西安半坡遗址博物馆,是我国在考古发掘的基础上建立的第一座现代意义上的遗址博物馆。之后的20多年里,遗址博物馆在各地纷纷建立,其中最为重要的,当属1979年建成开馆的秦始皇兵马俑博物馆。20世纪80年代以后,遗址类博物馆进入了一个新的发展时期,又陆续建成了广州南越王墓博物馆、河姆渡遗址博物馆、河南安阳殷墟博物苑、三星堆遗址博物馆、金沙遗址博物馆等一系列半开放、半封闭的遗址博物馆。2006年对外开放的汉阳陵博物馆帝陵外藏坑保护展示厅,以完善的空间设计和封闭的空间围挡技术,创造性地尝试了遗址保护环境与游客参观环境的分割,开创了新一代的遗址展示、陈列和保护的模式,标志着我国遗址博物馆的发展达到了新水平。目前,全国范围内遗址博物馆的建设方兴未艾,如成都永陵、杭州萧山跨湖桥、嵩山汉三阙等都在规划设计遗址博物馆。

预计到 2020 年,我国遗址博物馆数量将增加 3000 个,建筑面积预计将增加 1000 万平方米。

1.4 造成文物受损的环境因素

建立博物馆是为了保护和管理文物和收藏品,称为文物的实物有一个共同的特点,就是不可再生,只能最大限度地将其长久地保存下去。由于文物材质的多样性和所处环境的复杂性,无论文物被发掘后将以何种方式进行处理和保存,并向社会公众开放或用于考古研究,都需要根据文物材质的内在属性和保存地点的外部条件,确定可能造成文物破损的环境因素及其协同作用(Brimblecombe, 1990; Baer et al., 1985; Thomson, 1965)。可能造成文物破坏的因素大致分为两类:文物材质的内在属性和文物保存环境的外在条件。

造成文物破坏的内在原因包括:文物选用了不匹配的材料、制作方法导致的固有缺陷和文物独特的材料所导致的化学物质之间的不相容等(Tétreault, 2003)。

造成文物破坏的外在原因是一些更宽泛、威胁更大的因素,包括大气环境(腐蚀性气体、颗粒态污染物和微生物的沉降等)、微气候条件(温度、相对湿度、光照、震动、通风换气和噪声等)、自然灾害(风灾、地震、火山爆发、雷击和洪水等)和人为毁坏(盗抢、战争和破坏等)、土壤环境(土壤蓄水和渗透,微生物的滋生,可溶盐的溶解、迁移和再结晶等)、地下水(水力剥蚀和搬运,可溶盐的毛细迁移、渗透和吸附交换等)。实际上,文物腐蚀往往是上述多方面因素同时存在,物理、化学和生物风化共同作用的结果(Camuffo et al., 2001)。这些因素也是博物馆管理者和文物保护工作者在决定文物处理方法和保存环境时,需要优先考虑的。理论上,可以建立一座理想环境条件下的博物馆,只要充分了解了文物的内在属性,就可以充分延长馆中文物的保存寿命。在这种理想化的环境中,将针对特定展品的脆弱性建立特定的环境条件,以排除各种外在因素的破坏作用,使文物在目前和未来的文明社会中可以保存数千年之久,这也是研究文物腐蚀机理和建立博物馆文物保存环境标准的意义所在。

造成博物馆内文物受损的环境因素主要包括以下几个方面。

1.4.1 微气候

博物馆室内微气候(microclimate)条件主要包括温度(temperature)、相对湿度(relative humidity)、室内风速(indoor air velocity)、通风换气速率(air exchange

rate)、光照(illumination)、振动(vibration)和噪声(noise)等环境参数(La Gennusa et al., 2005; Camuffo et al., 2004; Brimblecombe et al., 1999; Camuffo, 1998)。其中最为重要的,同时也是多数博物馆应首先考虑的问题,是温度与相对湿度的变化(Camuffo, 1998)。

1.4.1.1 温度

各种文物材质的膨胀系数不同,温度的频繁波动使文物产生热胀冷缩等机械应力,破损文物本体或黏结材料的结构、降低其物理性能,从而导致文物的崩裂等物理风化(Bernardi et al., 2000; Camuffo, 1998)。某些文物材料,如陶质材料,线膨胀系数虽然小于玻璃、木质和一些常用石质材料,但修复、黏结文物碎片使用了环氧树脂材料,其线性尺寸受温度影响变化显著(表 1-1),黏结材料与陶片之间不同的热膨胀性能,在长期频繁的温度波动下产生形变差异,导致文物在黏结处发生破裂、剥落。

表 1-1 一些文物材料的线膨胀系数

材料	线膨胀系数/($10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$)
陶质材料	0.45
木质(纤维轴向)	0.49~5.4
木质(纤维横截面方向)	3.4~5.4
玻璃	0.5~1.0
砂岩	0.7~1.2
石灰石	0.9
大理石	1.2
环氧树脂	6~7

注:线膨胀系数=单位长度的增加量÷单位长度÷温度相对增加量,即 $\alpha_l=(l_t-l_0)/(l_0 t)$ 。

另外,温度与化学反应速率密切相关,温度升高会加快空气中化学污染物(如气溶胶、SO₂、NO_x等腐蚀性气体)与文物材料之间的侵蚀化学反应速率,加速氧化和腐蚀过程(Loupa et al., 2006)。以活化能、相关温度、反应速率表示的阿伦尼乌斯(Arrhenius)经验公式为

$$\lg(R_1/R_2)=52E(1/T_2-1/T_1)$$
 (1-1)

式中,R₁、R₂分别为 T₁、T₂ 温度时的反应速率;E 为活化能。也就是说,温度升高 10℃,反应速率将成倍增加。

1.4.1.2 湿度

湿度影响某些反应,能够加速侵蚀化学反应的速率,湿度的波动还会导致材

质物理形变。相对湿度的变化对文物,尤其是刚出土的文物影响非常剧烈。例如,秦俑彩绘的埋藏环境是有一定含水量的土壤环境,长时间的地下埋藏,已使不同的文物材料处于一个相对稳定的状态,一旦发掘暴露于空气中,湿度环境发生剧烈改变,即导致文物彩绘漆层在短时间内脱水、起甲、龟裂和脱落,如图 1-1 所示(张志军,1998)。陶质、砖石质等文物材料的表面具有疏松多孔的结构,在未配备温度、湿度控制装置的博物馆内,冬季的最低气温低于 0°C 时,随着昼夜温差的变化,在文物表面孔隙中的水会产生频繁的冻融作用,使文物材料表面崩解、破碎,产生机械风化。况且,随温度、湿度的波动,水汽会凝结在文物表面,不但增加了文物表面吸附气溶胶颗粒物和腐蚀性气体的能力,还会携带溶解的可溶盐渗入陶质、砖石质材料或彩绘漆层的孔隙中,形成潜在的盐蚀危害。此外,适宜的温、湿环境还易导致微生物的滋长,间接造成对文物的生物腐蚀(Orlita, 2004; Pitzurra et al., 2003)。

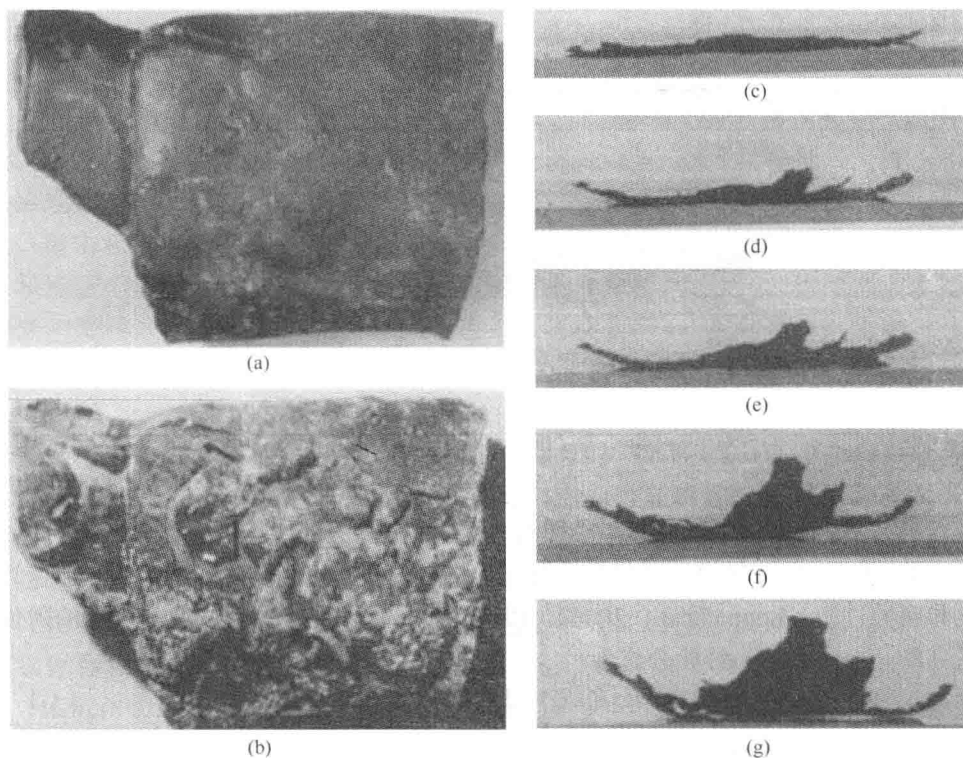


图 1-1 兵马俑彩绘漆层随相对湿度变化发生脱水、起甲、龟裂和脱落(张志军, 1998)

(a) 兵马俑陶片漆层初始状态; (b) 兵马俑陶片漆层脱水后 4min 状态; (c) 相对湿度 $\text{RH}=100\%$ 时陶片彩绘漆层的初始状态; (d) 相对湿度 $\text{RH}=60\%$ 时陶片彩绘漆层 1min 后的状态; (e) 相对湿度 $\text{RH}=60\%$ 时陶片彩绘漆层 2min 后的状态; (f) 相对湿度 $\text{RH}=60\%$ 时陶片彩绘漆层 2.5min 后的状态; (g) 相对湿度 $\text{RH}=60\%$ 时陶片彩绘漆层 4min 后的状态

1.4.1.3 建筑物气密性

博物馆环境中的大气污染物种类繁多, 在室内, 污染物通常来源于室内的建筑材料、摆放的物品、陈列设施、室内的人为活动和化学转化, 甚至某些文物也会有污染物排放; 从室外环境输入的大气污染物主要与人类活动有关, 如工业、农业活动和机动车尾气。任何一种大气污染物的室内浓度都是室外污染水平、空气交换速率、室内化学反应产生或消耗污染物的速率以及污染物从室内表面去除速率的复合函数。如果将博物馆建筑物视为单一的、内部混合良好的简单系统, 则其室内、外的大气污染源和汇如图 1-2 所示。

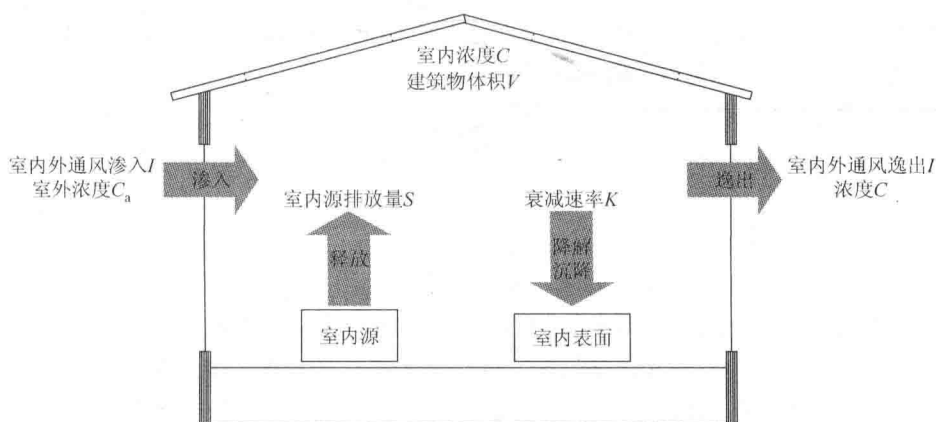


图 1-2 建筑物源和汇的简化质量平衡模型示意图

室内污染物的变化速率, 等于室外污染物进入室内的速率、室内污染物的排放速率、室内污染物排出室外的速率和室内污染物的衰减速率之和, 即博物馆室内污染物的物质平衡关系可借助式 (1-2) 表示:

$$V \frac{dC}{dt} = S + C_a IV - CIV - KCV \quad (1-2)$$

式中, V 为博物馆建筑物室内空间体积 (m^3); I 为空气交换速率 (h^{-1}); S 为室内污染物排放量 (mg/h); C_a 和 C 分别为污染物的室外和室内浓度 (mg/m^3); K 为污染物衰减速率或反应性 (h^{-1})。

博物馆展厅的气密性是其本身作为一种建筑形式的基本属性, 它反映室内、外大气的交换状态, 展示厅的气密性水平直接影响室内大气组分的浓度水平及变化速率, 因此与文物的保存环境息息相关, 是评价展厅对文物保护作用的一项重要指标。

气密性包括建筑物内部与外界进行气体交换的能力、阻止外界气体进入的能力及阻止内部气体渗出的能力。气密性研究的方法多样, 如加压检漏法、真空检

漏法、示踪气体法等,通常用空气交换速率评价其气密性,室内、外空气交换速率(air change rate 或 air changes per hour, ACH)指单位时间内由室外进入室内空气的总量与该室室内空气总量之比,单位为 h^{-1} 。ACH 与室内空气质量关系密切,不但直接影响有室内排放源的污染气体的扩散,还影响由室外渗入室内的气体污染物的浓度。在数个博物馆和图书馆内,针对特定污染物的监测研究显示,室内的氮氧化物、过氧乙酰硝酸酯和硝酸的浓度水平与室外相当,并随室外污染物浓度的波动而变化,表明这些建筑物存在较高的室内、外空气交换速率。室内、外空气交换速率还控制由室外渗入室内的大气气溶胶颗粒物的粒径分布,对于一定的空气交换速率,不同粒径范围颗粒物的渗透能力显著不同(Bennett et al., 2006)。此外,对美国南加利福尼亚州九座博物馆和图书馆内特定大气污染物的监测研究显示:加热、通风和空调(heating, ventilation, and air conditioning, HVAC)系统对室内污染物浓度水平的影响甚微,室内污染物浓度近乎等于室外浓度。在三座配备了 HVAC 系统和化学物质过滤系统的博物馆内,仅一座博物馆的室内污染物浓度和室内、外浓度比值(I/O)都较低(Hisham et al., 1991a)。

1.4.1.4 光照

文物材料的破坏过程需要能量,而光照是博物馆内最具破坏性的一个能量来源(Pavlogeorgatos, 2003; Thomson, 1986)。博物馆内的自然和人工照明手段都会引发大气中的污染气体发生光化学反应,生成对文物有危险的气体;或催化某些材料的氧化反应,加速其劣化和腐败;提升组成木质或纸质等文物的纤维素纤维材料的脆性,并使纸张褪色或变暗;使纸张、漆器和某些颜料降解或褪色(Whitmore et al., 2002);显著侵蚀每一种天然织物;升高藏品的表面温度,削弱物质强度。

1.4.1.5 噪声和振动

博物馆应尽量避免建在机场、铁路、高速公路和工厂等强噪声和振动污染源附近,而博物馆内的噪声和振动污染源通常包括交通工具、建筑工地、空调或空气净化系统、游客等。噪声和振动会破坏易碎、黏结或组合不牢固、未稳妥放置的藏品,并给游客带来不适感(Pavlogeorgatos, 2003)。

1.4.2 大气气溶胶

博物馆室内的大气污染物按存在状态可分为两大类:一类是气溶胶粒子;另一类是气态污染物。

气溶胶是指液相或固相微粒均匀地分散在大气中,形成的相对稳定的悬浮体系。包括土壤尘、海盐、工业粉尘、建筑尘、化石燃料产生的灰尘、生物质燃烧

产生的灰尘、植物花粉、微生物细胞（细菌、病毒、霉菌和尘螨等）和二次粒子等。大气科学中通常把“大气气溶胶”和“大气气溶胶粒子”这两个概念等同起来，习惯上均指大气中悬浮的固体颗粒物或液滴粒子（王明星，1999）。

博物馆室内环境大气中气溶胶粒子的特性与文物的腐蚀密切相关，气溶胶中的颗粒物不但会磨损、污染藏品的表面，或成为吸附和氧化某些气态污染物的媒介，而且其酸性组分还可直接侵蚀文物表面材料，富 Fe 或富 Mn 颗粒则是 SO_2 氧化为硫酸的催化剂（Oddy, 1994; Nazaroff et al., 1993; Brimblecombe, 1990）。与之相关的气溶胶粒子特性包括以下几点。

1.4.2.1 粒径分布

气溶胶是液相或固相微粒均匀地分散在大气中的悬浮体系。通常根据大气悬浮颗粒物和降尘的空气动力学直径对其分类，定义为细颗粒物（ $\text{PM}_{2.5}$ ，空气动力学直径小于等于 $2.5\mu\text{m}$ ）和粗粒子（ PM_{10} ，空气动力学直径介于 $2.5\sim 10\mu\text{m}$ ），颗粒物的粒径分布决定了其在室内的行为和能够采用何种手段对其进行控制。

颗粒物沉降到室内表面的速率受大气颗粒物浓度及其粒径分布控制，较大的颗粒物受重力作用从空气中沉降出来，细颗粒物受布朗运动作用，某些情况下还受到热迁移驱动，扩散接触到室内任何朝向的表面。粒径介于 $0.05\sim 2\mu\text{m}$ 的细粒子有很小的沉降速率，它们在室内大气环境中会停留长达数天，所以有更多的机会凝聚在一起。相比细颗粒物，粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的粗粒子在大气中悬浮停留的时间更短，如果没有强风，它们会在排放源附近就沉降到地面；粒径大于 $50\mu\text{m}$ 的粗粒子在大气中的悬浮时间只有几秒钟，会在重力作用下沉降（Camuffo et al., 1998; Nazaroff et al., 1991; 1990）。

一旦微小的颗粒物沉降到室内的表面，它们就很难被彻底清除，较大的颗粒能被气流部分吹走，但微小的有机碳和元素碳（黑碳）颗粒很难被气流驱除，很软的刷子可以用来辅助做进一步的清洁，但是一旦这些微小的颗粒嵌入入物体表面的纹理中，就会永久地成为纹理结构的一部分。建筑物所安装空气过滤装置的效率也受颗粒物粒径的控制，超细粒子（直径小于 $1\mu\text{m}$ ）的清除远比粗粒子困难（Nazaroff, 1993; 1991; 1990）。

1.4.2.2 化学组成

大气中气溶胶颗粒物的物理、化学性质及其归宿取决于众多因素，其中最重要的因素是浓度和粒径分布。颗粒物一旦沉降到文物表面，它们在视觉上对文物外观的影响及其与文物材质的化学相互作用，则取决于颗粒物的化学组成和形貌（Vaughan et al., 2000）。确定颗粒物的化学组成，是判断其室内、外来源的基础，也为文物表面脏污速率的研究及通风除尘设备的安装和设置提供依据。