

学人文集

上海博物馆建馆60周年论文精选

【科技卷】



学人文集

上海博物馆建馆60周年论文精选

科技卷



图书在版编目(CIP)数据

学人文集：上海博物馆六十周年论文精选：全5卷 /
上海博物馆编. -- 上海：上海书画出版社，2012.12
ISBN 978-7-5479-0497-8

I. ①学… II. ①上… III. ①艺术—中国—文集②考古—中国—文集 IV. ①J12-53 ②K87-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 294908 号

出版发行 ②上海书画出版社

地 址 上海市延安西路593号 200050

网 址 www.shshuhua.com

E-mail shcp-ph@online.sh.cn

设计制作 上海鹏程制版有限公司

上海丽佳制版有限公司

上海出版印刷有限公司

印 刷 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本 1/16 (787×1092)

印 张 154.75

印 次 2012年12月第一版 2012年12月第一次印刷

印 数 1-1,000

书 号 ISBN 978-7-5479-0497-8

定 价 980.00元(全五册)

责任编辑：王 彬 熊樱菲

编 辑：钱俊龙 谢 燕 潘小伦 顾 雯

技术编辑：钱勤毅

封面设计：姚伟延 张晶晶

《学人文集·上海博物馆建馆60周年论文精选》编辑委员会

(以姓氏笔画为序)

王维达 包燕丽 李维琨 吴来明 宋 建
陈克伦 陈燮君 陆明华 单国霖 周 亚 胡 江

序

2012年为上海博物馆建馆60周年。

回望一甲子的历程，几代上博人兢兢业业，锐意进取，在文物的征集、保管、研究、教育等各个领域都取得了一定的成绩，同时也逐步确立起了上博以学术立馆的宗旨。在这过程中，每一步的前进都离不开前辈们的努力，凝结着先行者的奋斗。

作为对60周年的致敬，我们感到，有必要对上博学人一路走来的历程进行回顾与梳理，并在此基础上寻求更深的突破和更广的拓展，于是有了这套《学人文集》。全书共收录百余名作者的代表性论文，时间跨度五十多年，内容涉及青铜、陶瓷、书画、考古、工艺以及博物馆学、陈列设计、社会教育、文物保管与科学保护等多方面主题，全面展示了上海博物馆在文博领域内不倦探索的足迹和薪火相传的坚守。

60年的辉煌是经过几代人的辛勤耕耘而收获的果实，更是今天的上博人抖擞精神、整装出发的新起点。展望未来，我们有信心在保存、继承、传播、弘扬中华优秀传统文化方面投入更多的努力，在文物博物馆研究领域内争取更多的果实，努力为推进我国文化事业发展做出新的更大的贡献！

上海博物馆馆长 陈燮君

2012年11月

目 录

一、文物保存环境研究

基于洁净概念的博物馆环境预防性保护应用技术研究与实践·····	吴来明	1
博物馆文物保存环境质量标准研究·····	陈元生 解玉林	19
馆藏文物保存环境检测用无动力扩散采样器初步设计 ·····	解玉林 徐方圆 吴来明	55
聚合物膜修饰电极QCM方法对博物馆环境中典型气态分子污染物甲醛的检测研究 ·····	周 浩 吴来明 闫 莹 赵利红 彭熙瑜 蔡兰坤	64
文物藏展常用木材挥发性酸快速检测评价方法研究 ·····	徐方圆 解玉林 刘 霞 施超欧 吴来明	69
木材中挥发性有机酸的SPME-GC/MS分析研究·····	周新光 吴来明 宋国新	75
便携式拉曼光谱用于文物及文物保护材料光老化作用的快速评价 ·····	罗曦芸 叶 菲 吴来明 袁盛伟 张维冰 杜一平	79
馆藏青铜器保存状况综合研究及应用实例··	黄 河 周 浩 吴来明 顾 雯	92

二、文物保护技术研究

银器文物的变色原因及防变色缓蚀剂的筛选 ·····	祝鸿范 周 浩 蔡兰坤 张东曙	102
青铜器锈蚀结构组成及形态的比较研究·····	周 浩 祝鸿范 蔡兰坤	109
严重朽蚀饱水竹筒的真空冷冻干燥研究·····	陈元生 解玉林 罗曦芸	119
用水分平衡控制法脱水保护南宋钱金人物纹朱漆长方盒·····	张 岚	130
书画装裱材料——宣纸形稳定性的研究·····	徐文娟 陈元生	135

三、古代青铜工艺研究

中国青铜时代陶范铸造技术研究·····	谭德睿	141
铜镜表面处理实验及相关问题研究·····	吴来明	197
浑源牺尊铸造技术考察及相关技术的讨论·····	廉海萍	209
东周楚式戈斑纹的成分与相组成·····	丁忠明 吴来明 李戈扬	226

四、科技考古技术研究

古陶瓷热释光测定年代的研究和进展·····	王维达	236
热释光前剂量激活法与熄灭法测定瓷器年代结果比较 ·····	夏君定 吴婧玮 熊樱菲 龚玉武	289
古代瓷器热释光测定年代制样方法的比较与研究·····	吴婧玮 龚玉武	298

陶器古剂量线性回归方法和误差评估·····	龚玉武 吴婧玮	307
表面弯曲的古陶瓷样品X射线荧光无损定量分析·····	何文权 熊樱菲	317
清代官窑瓷器的透明釉成分分析研究·····	熊樱菲 何文权 金延龄	324
徐州狮子山楚王陵出土金缕玉衣和镶玉漆棺的玉料组分特征及产地来源研究 ·····	谷娴子 李银德 丘志力 张 尉 王黎琳 李榴芬	330
从九种核心期刊的文献计量分析看中国科技考古的发展 ·····	钱俊龙 熊樱菲 潘小伦	342
从九届“考古与文物保护化学学术研讨会”论文集文献计量分析看中国考古与 文物保护化学的发展·····	谢 燕 钱俊龙 熊樱菲 潘小伦	358
五、文物修复技术研究		
略述中国古旧绢本书画的修复·····	诸品芳	363
中国书画修复的误区·····	沈亚洲	368
古代青铜器修复钎焊用钎剂与钎料的改性研究 ·····	张光敏 周 浩 张佩琛 张 茗 吴鲁海 薛小怀	380
计算机辅助设计(CAD)在文物修复中的运用·····	张佩琛	396
宋耀州窑瓜棱形双耳罐的修复·····	杨 蕴	401
六、信息技术应用研究		
论博物馆数字展示的核心价值观·····	胡 江	405
关于博物馆信息化工作的一些思索·····	刘 健	409
综合布线现状与发展分析·····	徐耀琦	416

基于洁净概念的博物馆环境预防性保护应用技术研究与实践

吴来明

引言

博物馆环境，是指收藏与展示各类可移动文物的相对封闭空间的总体，包括文物库房、展厅、展柜、储藏柜（箱、盒）等空间中的各种物理、化学、生物等条件。研究表明^[1]，环境因素是引发博物馆藏品劣化损害的主要原因，主要包括温湿度、光辐射、污染气体（包括颗粒物）和有害生物四类因素。博物馆藏品的环境空间，大致可分为微环境（以展柜、储藏柜、包装盒内空间为代表）、小环境（以库房、展厅等室内空间为代表）、大环境（覆盖整个博物馆建筑的空间）和室外环境（博物馆建筑之外的空间）。

就馆藏文物保护而言，研究应用一切与博物馆环境相关的科学技术和成果，对馆藏文物保存环境进行有效的监测和控制，最大限度地抑制和减缓环境因素对文物材料的破坏作用，是预防性地从源头上保护珍贵文物的关键，即文物预防性保护理念已经成为当今国际文化遗产保护的共识，也是当今世界文物科技保护领域的发展趋势。为此，国家文物局在上海博物馆设立了馆藏文物保存环境国家文物局重点科研基地，组织开展了一系列专项研究，探索博物馆藏品保存环境预防性保护对策，提出了“基于‘洁净’概念的文物保存环境”评估体系的理念和内容框架^[2]，研发了一批应用技术，并在2010年上海世博会等重大文物展示和保存活动中发挥了积极有效的作用，保障了参展珍贵文物的环境安全。基于这些研究基础，进而提出了建设全国馆藏文物保存环境监测平台的文物风险预控保护对策。

基金项目：国家科技支撑计划资助（2006BAK20B01、2009BAK53B07、2010BAK67B15）。

项目成员：其他主要研究人员有上海博物馆徐方圆、解玉林、周浩、罗曦芸、徐文娟、周新光、黄河；华东理工大学蔡兰坤、张文清、修光利、施超欧；复旦大学陈建民、孔令东、黄升；西安交通大学齐春；南京林业大学戴红旗等。

研究成果：荣获2009年度全国文物保护科学和技术创新二等奖。

基于洁净概念的馆藏文物保存环境体系

1 现代洁净技术与馆藏文物保存环境

现代“洁净技术”又称为生产环境和污染控制技术，是近二、三十年来在传统工业洁净室和生物洁净室技术体系基础上，随着半导体加工、数据储存、液晶显示、生物医药和航空航天等领域高新技术发展而崛起的一门综合性的新兴科学技术，在洁净环境的空间设计、制造、空气净化过滤、环境监测、分级评估、运行维护和管理方法、标准和理念等方面已经形成科学体系，在保证产品质量与人身安全方面起着非常重要的作用。

随着微电子行业产品加工尺寸的进一步细微化，现代“洁净技术”对生产环境清洁度的要求愈加严格。近年来，影响清洁度的各种超微量的“气态分子污染物（Airborne Molecular Contaminants，简称AMCs）”被列入精确测定和控制的项目^[3]。在生产过程中，AMCs常会引起产品成品率下降、性能退化及失效。AMCs覆盖的范围非常广泛，它包括了酸性气体、挥发性有机物（VOCs）、悬浮颗粒物、掺杂剂、胺类化合物等^[4]，浓度大多在十亿分之一（ 10^{-9} 即ppb、 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 数量级）或更低的范围内。

对于博物馆文物保存环境，除了温度、湿度、光照等物理环境因素影响之外，还要控制空气污染物，包括硫氧化物（ SO_2 ）、氮氧化物（ NO_x ）、硫化氢（ H_2S ）、二氧化碳（ CO_2 ）等无机酸性气体，氨（ NH_3 ）等碱性气体，臭氧（ O_3 ）等氧化性气态物，醛系、苯系、羰基硫化物、有机羧酸等挥发性有机物以及细微颗粒物等AMCs污染气体^[5、6]，这些污染物与温度、湿度、光线等物理因素协同作用，对文物产生了明显的或潜在的威胁。其中，主要来源于各种装饰装修材料及文物自身降解老化所散发的甲酸（ HCOOH ）、乙酸（ CH_3COOH ）、甲醛（ HCHO ）、乙醛（ CH_3CHO ）等挥发性有机物污染气体，已经成为当前恶化博物馆环境的主要因素^[7]。与洁净室环境相比，博物馆微环境空间相对密闭，环境质量参数的背景值相对稳定，但文物材质种类较多，对不同污染物的敏感性不同，环境质量的指标要求也因文物材质的不同而有所差异，低浓度的污染物对文物的影响和作用以长期的累积效应为主。与现代“洁净技术”近年来关注的环境因素相比，尽管研究对象有所不同，但总体而言，馆藏文物保存环境需要考虑的因素与现代生产洁净环境十分相近，所提出的浓度控制指标数量级（表1）也与现代“洁净技术”控制要求相一致。显然，博物馆环境中污染气体所具有的这种影响因素复杂且极限值低的特征，是与一般室内人居环境控制质量有很大的不同。

表1 日本东京国立博物馆与东京国立文化财研究所空气质量标准^[8)]

室内空气 污染物	一氧化氮 NO / $\times 10^{-9}$	二氧化氮 NO ₂ / $\times 10^{-9}$	二氧化硫 SO ₂ / $\times 10^{-9}$	氨 NH ₃ / $\times 10^{-9}$	甲醛 HCHO / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	乙醛 CH ₃ CHO / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	甲酸 HCOOH / $\times 10^{-9}$	乙酸 CH ₃ COOH / $\times 10^{-9}$
东博试用标准	5.0	5.0	5.0	40.0	67.0	19.0	50.0	100.0
东文研标准				30.0	100.0			170.0
新东博标准	5.0	5.0	5.0	5.0	60.0	19.0	10.0	50.0

当前,馆藏文物科技保护的观念,已经从以抢救性保护修复、被动维修遭损文物,向以预防性调控环境、主动维护防止文物产生劣化方面转变。近年来,随着现代科学技术的发展,一些先进的“洁净技术”及其管理理念,已经被部分应用于馆藏文物的预防性保护。如美国Purafil公司生产的On Guard系列环境反应性(腐蚀)监测仪^[9]、德国福劳恩霍夫应用研究所研制的石英玻璃传感器监测技术等,已经用于全球多家博物馆、档案馆、图书馆的室内环境质量的监测和评估。

因此,随着科学技术的发展,博物馆环境保护有必要借鉴现代“洁净技术”管理理念与体系,形成适合博物馆藏品预防性保护的、具有行业特征的、基于“洁净”概念的馆藏文物保存环境科学体系。

2 基于“洁净”概念的博物馆环境体系的核心内涵

影响文物保存的环境因素是复杂的。自1930年在意大利罗马召开的关于艺术品保护国际研讨会第一次提出“预防性保护”概念以来,文物保护人员始终非常关注文物保存环境中温度、湿度和光辐射的控制指标和平稳性,不断探索对环境中污染物浓度的控制问题,对文物虫害和霉菌也是着意防治。那么,如何来诠释预防性保护的核心内涵?基于“洁净”概念的博物馆环境体系研究,归纳提出了“稳定、洁净”理念:

1) 文物“预防性保护”,就是采取有效的质量管理、监测、评估、调控等预防措施,抑制各种环境因素对文物的危害作用,努力使文物处于一个“稳定、洁净”的安全生存环境,尽可能阻止或延缓文物的物理和化学性质改变乃至最终劣化,达到长久保存文物的目的。

2) 博物馆“稳定”环境,是指控制温度、湿度等环境因素在适宜指标下的平稳性,防止出现较大幅度的波动。所谓“适宜指标”,是指文物本身已经长期良好适应的温湿度环境状态。另外,鉴于文物受湿度的影响较温度敏感^[10],博物馆环境温湿度控制应以湿度为优先。

3) 博物馆“洁净”环境,是指控制文物收藏、展示环境空气中特征污染物浓度达到科学合理的安全极限值以内。不同的材料对各种环境因素的敏感程度不同,即不同材质文物的主要环境影响因素可能是不同的,尤其是代表性的特征污染物的影响。

因此，需要特别关注这些“特征污染物”浓度的洁净控制。

4) 博物馆环境的“预防措施”，是指通过管理和技术应用，从源头控制文物保存空间的污染物水平、光照强度和温湿度平稳性（如防止藏展材料散发污染物，提升文物展柜密封度和环境调控功能等），加强环境监测与风险评估，实施必要的环境调控措施。

基于“洁净”概念的馆藏文物保存环境体系，是以文物预防性保护为核心的技术体系。研究提出的基于‘洁净’概念的文物保存环境评估体系框架见图1，其目标是努力获得适宜于文物长期保存的“稳定、洁净”环境，最大程度地预防保护文物。其对策是：

- 1) 在技术层面上，建立合适的博物馆环境因素检测和综合质量监测技术系统，形成科学的环境质量评估和环境调控产品质量评价技术，研发有效的主动调控和被动调控技术。
- 2) 在管理层面上，建立博物馆环境风险预控管理系统，研制一批技术标准，制定环境监测调控管理手册，形成文物预防保护准则，有效推进博物馆环境监测和调控工作。
- 3) 在应用层面上，通过示范推广，建立全国馆藏文物保存环境监测平台，基于环境因素对各种文物的破坏影响作用机理研究，实施文物保存环境风险评估和预控，形成馆藏文物保存环境监测评估长效机制，努力提升馆藏文物预防性保护能力。

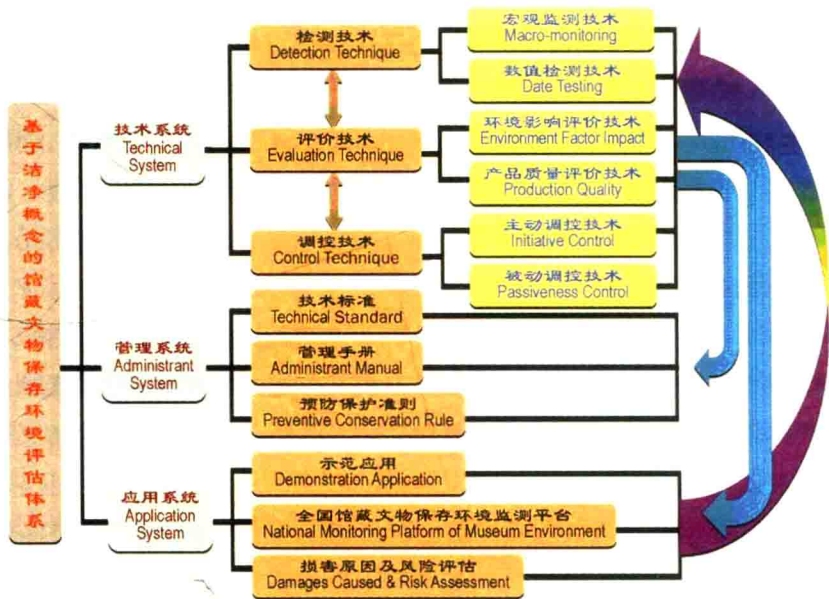


图1 基于“洁净”概念的文物保存环境评估体系框架

博物馆环境的主要问题

“全国馆藏文物腐蚀损失调查”项目研究结果显示，在各地国有文物博物馆收藏文物中，有50.66%存在不同程度的病害，尤其是对环境因素作用敏感的纺织品、纸质、竹木漆器等有机质地文物，中度以上病害发生率占半数以上，文物腐蚀损失状况相当严重并呈加重之趋势，这已成为博物馆文物保护中亟待解决的突出问题。究其原因：

一是环境因素影响已经成为博物馆藏品损害的主要原因。除了原有的埋藏腐蚀损害之外，主要是自然环境恶化和人为因素作用严重影响到博物馆环境质量，造成文物材料劣化，如：气候剧烈变化或空调系统措施不当造成博物馆微环境温湿度大幅度波动，大气污染或文物藏展材料(展柜、储藏柜、囊匣等制作材料及装饰装修材料等)散发污染物破坏博物馆微环境空气质量，过度照明引起文物退色等。

二是博物馆文物保存环境的基础科学和应用技术研究不足。环境因素对各种质地文物的影响作用机制尚不明瞭，缺乏满足博物馆微环境特点的适宜监控技术和高效调控产品，缺少相关技术规范，无法满足博物馆环境风险预控的需求。

三是馆藏文物保存环境管理机制和监控平台建设滞后。预防性保护管理意识和重视不足，缺乏以预防为主的制度化、规范化、系统化的馆藏文物保存环境风险预控管理体系，环境质量监测、风险评估、预防调控和整治改造工作往往处于被动应战状态。

与“防病胜于治病”的道理相同，博物馆文物藏品的预防性保护，第一是控制环境，目的是将馆藏文物的损害降至最低；第二是抑制文物损害并使其处于稳定状态，防止发生进一步损害。为此，首先必须具备方便的环境监测手段，能够对所关心的环境指标进行有效的检测和评估，为博物馆环境治理提供科学的依据；其次是要具有适宜的环境调控手段，能够对博物馆环境实施有效的调控；再者，为了达到有效监测和调控的目的，必须关注馆藏文物收藏和展陈设施的质量，并且能够集成高效调控技术，达到长久保存文物的目的。

因此，强化文物预防性保护理念，建设博物馆环境风险预控管理体系，加强博物馆环境适用的监控技术与调控技术的集成创新和科技攻关，推广应用相关研究成果，提升博物馆环境质量和风险预控能力等一系列工作，将是当前和今后一段时期博物馆环境科技的迫切任务。

博物馆环境监测评估技术研究

研究建立适宜的博物馆环境监测、评估手段,是实现馆藏文物保存风险预控的基础。馆藏文物保存微环境中污染物检测具有污染气体种类特殊、极限浓度低、环境空间小、安防要求高等行业特殊性^[11],现行的室内人居环境空气质量监测技术方法和标准,难以应对博物馆文物保存环境的监测评价需求。为此,研究开发了3项博物馆环境检测分析、实时监测和材料评价专用技术,并进行了应用实践。

1 博物馆微环境痕量污染气体“被动扩散采样—仪器分析”检测技术

博物馆中各种主要污染气体水平的数值检测,对于了解、评价和调控博物馆环境质量,研究环境因素对文物材料的影响作用机理是非常重要的。针对博物馆微环境中二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、氨(NH₃)、甲酸(HCOOH)、乙酸(CH₃COOH)、甲醛(HCHO)、乙醛(CH₃CHO)等痕量污染气体检测难题,以扩散管式采样器为原形,研制了新型无动力被动扩散采样器(图2),增强了适用性和可改变采样速率性,提高了检测灵敏度^[12]。研究确定实验室离子色谱分析材料、试剂及工艺流程,建立一整套 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (ppb)级痕量污染气体检测分析技术,检测灵敏度较现有标准方法提高50%^[13]。该项检测技术,可以通过24~48小时一次采样,使用离子色谱同时分析多种污染气体(图3、4),方便在文物库房、展厅、展柜、囊匣、储藏柜等微环境的检测与评价。目前已经授权2项国家专利,颁布1项行业技术标准,起草3项行业技术标准,在50多家文博单位进行了示范应用(图5)。



图2 被动扩散采样器



图3 离子色谱仪

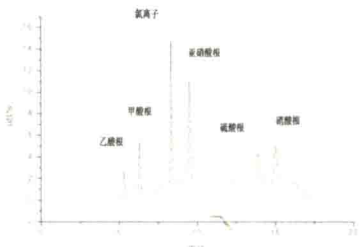


图4 被动扩散采样器



图5 离子色谱仪

2 文物保存微环境连续监测与评估技术

一般的文物保管人员并不需要了解博物馆环境中各种污染物的具体浓度，他们所关心的是博物馆环境的总体污染物水平达到了何种质量程度。借鉴现代“洁净技术”新兴的气态悬浮分子污染物（AMCs）反应性监测方法和评估原理，目标在于研发基于石英晶体微天平（Quartz Crystal Microbalance, QCM）方法的博物馆环境污染气体综合质量连续监测技术，初步构架基于洁净概念的文物保存微环境的评估体系，为进一步研发博物馆环境反应性实时监测仪器奠定科学基础。

本研究选择主要污染物类型，比较和测定不同化学修饰电极材料表面质量的痕量变化（ $\text{ng} \cdot \text{cm}^{-2}$ ）规律，采用恒电流法在石英晶振片上修饰聚苯胺，进而制备出高选择性、高灵敏度、高稳定性的低电流密度化学原位合成聚苯胺膜修饰石英晶振片电极及其压电化学传感器，能够实现在线实时监测单一污染物和复合污染物。建立一套由电源供应器、振荡器、频率计数器、多功能气相反应室等组成的“简化功能的QCM测试系统”及实验室研究装置（图6），初步研发出趋于仪器化的石英晶体微天平测试系统（图7），并提出一套提出基于洁净概念的AMCs监测评估体系框架^[14]。本项研究，已经申请1项国家发明专利，通过文物微环境调控集成在线检测联用试验和比对测试，能够识别表征腐蚀性气体污染物、有机羧酸等极性有机气态分子污染物在微环境中的含量和总体分级水平，可望进一步开发为实用仪器。



图6 简化功能的QCM测试系统及实验室研究装置



图7 新开发的基于石英晶体微天平测试系统

3 博物馆藏展材料快速筛选评估“薄膜试片测试法”研究

博物馆藏、展设施制作材料及装饰装修材料所散发的污染物，是造成当前文物保存环境质量低下、引发文物劣化的最主要因素之一。博物馆藏展材料筛选评估常用的Oddy测试法^[15]，具有实验周期偏长（28天）、目测判断存在差异等弱点，难于普遍推广，有必要进行技术优化改进。

为了推广从源头上控制保障文物微环境质量的理念和实现藏展材料快速筛选评估

的思路，本研究采用现代物理真空镀膜技术等工艺筛选制备出标准化、易评测、反应时间短的银、铜薄膜材料试片，实验表征薄膜试片，规范镀膜工艺、厚度和铝塑膜真空包装方式；改进了配套反应测试容器（图8）；采用色度比对原理和测量手段，研制出腐蚀试片图像采集装置产品及其计算机分级评判软件系统（图9、10），实现对反应试片的半定量评判；建立了一整套实验周期减半（<14天）、可评测的博物馆藏展材料快速、简便、准确的评估筛选“薄膜试片测试法”^[16]，起草相应的检测技术及质量评估规范。本项研究，已经授权或申请国家专利3项，登记1项软件著作权，起草1项行业技术标准草案，有效应用于100多种藏展材料的快速评估筛选。



图8 测试容器及薄膜试片

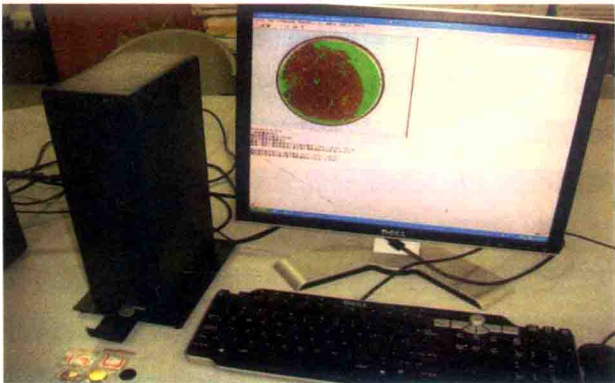


图9 腐蚀试片图像采集及评判系统

试片种类	长期使用 (Permanent)	短期使用 (Temporary)	不可用 (Unsuitable)
银薄膜试片 silver film coupons			
铜薄膜试片 copper film coupons			

图10 博物馆藏展材料“薄膜试片测试法”筛选评判结果

馆藏文物保存微环境调控技术研究

环境控制，按是否消耗人工能源，可分为主动式方法和被动式方法。主动调控方式，如博物馆展厅、库房等空间普遍采用的恒温恒湿和净化过滤空调系统、文物展柜微环境空间常用的电子调湿器等，具有调控快速的优势。被动调控方式无需消耗任何人工能源，如调湿剂和吸附剂等，主要用于文物展柜、囊匣等微环境的“平稳、洁净”调控，尤其是能够在不改造现有藏展设施情况下方便使用，因而得到了普遍的认可和

应用。关键是要研发获得高效、对文物安全友好的被动调控材料和主动调控设备。

1 博物馆微环境被动调控功能材料

调湿剂作为一种被动湿度控制调节的手段，指不需要借助任何人工能源和机械设备，依靠自身的吸放湿性能，感应所在空间空气温湿度度的变化，自动调节空气相对湿度度的材料。过去市场上主要为ART-SORB和PROSORB等专用进口产品，价格比较昂贵，缺乏自主研发产品。而市场上的吸附剂，大多为吸附高浓度污染物产品，对博物馆环境低浓度污染物的吸附效率不高。

本研究通过对壳聚糖基天然高分子材料的改性和复配，开发出多种高性能壳聚糖基调湿剂（图11、12）、甲醛吸附剂和复合吸附调湿剂产品^[17]，形成50Kg/批中试生产线1条。调湿剂的湿容量在RH30%~50%下分别为27%和10%，在RH50%~70%下为36%和43%，优于进口调湿剂产品；吸附剂可净化密闭空间中的甲醛浓度低于 $100\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，性能优于活性炭。研制的1种高效纤维调湿板，湿容量在RH30%~70%下超过15%，优于进口调湿纸的10%指标^[18]，并建立了50Kg/批的中试生产线。所有产品均通过文物环境安全性检测和国家检验部门检验。本研究任务共授权和申请发明专利4项，起草2项行业技术标准，发布企业标准4项。研发产品，已经在2008年奥运会、2010年上海世博会以及有关博物馆的文物展览环境控制中获得有效应用（图13、14）。



图11 壳聚糖基调湿剂

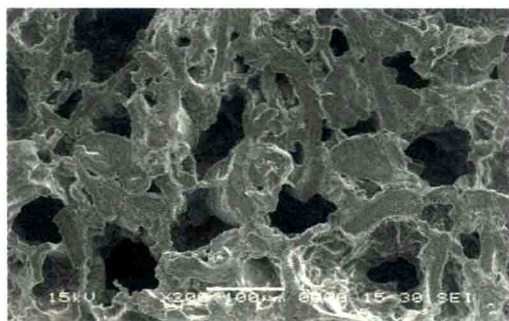


图12 调湿剂的多孔结构电镜照片

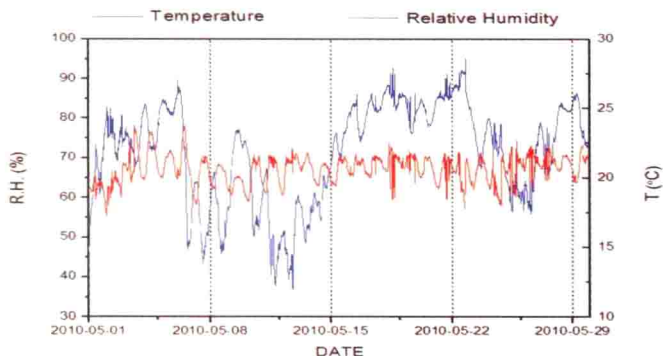


图13 无调湿剂时展柜内的温湿度变化