



· 文物稳态微环境调控 ·

【主持人语】在全球化与城市化进程加速的背景下,文化遗产保护面临前所未有的挑战,文物既要抵御自然环境的侵蚀与人为干预的扰动,又需要在当代语境下实现文化价值的有效传递。文物保护已从单一的物质修复技术,跃迁为融合环境科学、材料工程、数字技术、人文美学的系统性学科,其核心在于以科学认知化解“保护”与“活化”的张力。本专栏4篇论文紧扣时代命题,以“预防性保护”为逻辑主线,从环境调控、技术革新、材料解析、观众体验四个维度展开研究,既回应了国际文物保护的前沿理念,又扎根中国文化遗产的地域特性与历史语境,以跨学科协同的创新范式,为中国文化遗产的永续传承注入科学动能,构建起从理论模型到工程实践、从微观材料到宏观环境的立体研究框架。《我国文物赋存环境标准与管理方法》立足宏观视角,通过国际国内标准对比,揭示了文物保护环境控制的共性与差异,提出分气候区优化、能耗革新与评价体系完善等预防性保护策略,为后续研究奠定了理论基础。《超声波雾化技术在汉阳陵土遗址补水保护实验》以技术创新破解土遗址干裂难题,通过物理补水机制的重构,实现了文物本体与环境动态平衡的精准调控,体现了工程技术与文物病理学结合的实践智慧。《照明参数对不同色调中国绘画的偏好度影响及计算模型》突破传统文物保护与展示的二元对立,以量化模型平衡光环境对文物材质的影响与观众审美感知需求,为“以人文本”的博物馆照明设计提供了科学范式。《近现代历史建筑的水泥基材料成分——以上海张园历史建筑群为例》则聚焦近现代建筑保护这一新兴领域,通过材料微观分析与历史文献互证,揭示了早期水泥工艺的特殊性,警示保护工程中“照方抓药”的潜在误区,凸显了实证研究对修复实践的基础性意义。

【主持人】兰丽,上海交通大学设计学院研究员,博士生导师。

我国文物赋存环境标准与管理方法

兰 丽¹, 郭 超¹, 刘一格¹, 蒙乃庆², 李存明²

(1. 上海交通大学 设计学院, 上海 200240; 2. 西藏自治区建筑勘察设计院, 西藏 拉萨 850000)

摘要 自然蜕变是文物基体遭受损坏的主要原因,采取预防性保护,为文物创造一个适宜、稳定的赋存环境,可以避免文物由于被侵蚀而遭受损害,将未来可能发生的损坏风险降到最低。温湿度、光照和空气污染物是引起文物衰退、劣化的最主要原因,这些环境因素会导致文物发生一系列物理和化学变化。对比我国文物赋存环境标准与国际上主要国家标准,结果发现,无紫外线、低照度、低浓度空气污染物、温湿度恒定且低温中低湿的清洁环境是国际上文物赋存环境的主要共识。我国《博物馆建筑设计规范》(JGJ 66—2015)中对不同材质文物保存的温湿度范围、光照强度、污染性气体和颗粒物浓度做出了详细的要求和建议,但是在文物赋存环境标准和实际管理上仍存在一些缺陷和问题,包括未明确文物保存所需的新风量,维持文物赋存环境耗能较大,混合材质文物保存、多材质文物混合保存

收稿日期:2024-11-25

基金项目:国家自然科学基金(52178081);西藏自治区中央引导地方科技发展资金项目(XZ202201YD0037C)。

第一作者:兰丽,女,博士,研究员,博士生导师,从事文物保护与室内环境研究,lanli2006@sjtu.edu.cn。

的方法还没有统一的建议等。将来,可依据因地制宜的原则,分气候区制定文物保存环境标准,增加库房新风量推荐值,优化室内设计参数,调整空调系统能源结构,采取被动式建筑技术,健全文物保存环境评价体系等管理方法,进一步完善文物赋存环境要求。

关键词 预防性保护,赋存环境,博物馆环境,文物储存,藏品保存环境

中图分类号:K883/887 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbzr.2025-02-013

Standards and management approach for the conservation environment of cultural heritage in China

LAN Li¹, GUO Chao¹, LIU Yige¹, MENG Naiqing², LI Cunming²

(1. School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Tibet Autonomous Region Architectural Survey and Design Institute, Lhasa 850000, China)

Abstract Natural degradation is the primary cause of damage to cultural relics. Implementing preventive conservation measures to create a suitable and stable environment for cultural relics can prevent damage caused by erosion and minimize the risk of potential future deterioration. Temperature, humidity, light exposure, and air pollutants are the primary factors leading to the deterioration and degradation of cultural relics. These environmental factors can induce physical and chemical changes in the relics. Upon comparing the conservation environment standards for cultural relics in China with those of several major international countries, it is evident that the international consensus on the preservation environment for cultural relics emphasizes a clean environment with no ultraviolet radiation, low light levels, low concentrations of air pollutants, and stable temperature and humidity at low to moderate levels. In the Chinese museum architectural design specification JGJ 66-2015, detailed requirements and recommendations are provided regarding the temperature and humidity ranges, light intensity, pollutant gas concentrations, and particulate matter levels for the preservation of cultural relics made from different materials. However, there are still some deficiencies and issues in both the standards for cultural relic preservation environments and their practical management. These primarily include the lack of clear guidelines on the required fresh air volume for relic preservation, the significant energy consumption required to maintain relic preservation environments, and the absence of unified recommendations for the preservation of mixed-material relics and relics composed of multiple materials. In the future, it is possible to establish cultural relic preservation environment standards based on the principle of adapting to local conditions by dividing regions according to climatic zones. This can include increasing recommended fresh air volumes in storage facilities, optimizing indoor design parameters, adjusting the energy structure of air conditioning systems, implementing passive building technologies, enhancing the assessment system for cultural relic preservation environments, and other management methods to further refine the requirements for cultural relic preservation environments.

Keywords preventive conservation; preservation environment; museum environment; artifact storage; collection preservation environment

众所周知,文物是不可再生资源。第一次全国可移动文物(馆藏文物)普查结果显示,我国共有可移动文物共计 10 815 万件(套),涵盖重要实物、艺术品、文献、手稿、图书资料等。中华民族丰富的馆藏文物资源记载着民族悠久的历史,避免文物资源受到损坏,既是为了保留珍贵的记忆,也是贯彻落实国家文化遗产保护政策。结合我国文物赋存环境的实际状况,詹长法先生提出了文物

保护赋存环境的预防性保护理念^[1],保护文物原貌,是展开文物预防性保护的基础工作。

自然蜕变是文物基体遭受损坏的主要原因,这种损坏与文物所处的环境有着密切的关系。采用预防性保护,为文物创造一个合适的赋存环境,避免文物由于被侵蚀而遭受损害,将未来可能存在的文物风险降低到最小,可达到长期保护的目 的,文物保护工作者对预防性保护理论进行了深

入探讨^[2-3]。国家文物局在上海博物馆设立“馆藏文物保存环境国家文物局重点科研基地”,作为国内馆藏文物保存环境领域的探路者,开展了一系列馆藏文物保存环境应用技术专项研究,探讨了有机酸、甲醛和氧化型气体污染物对金属制品的腐蚀机理,总结了复合污染物对银器变色的协同影响等^[4]。随着我国文物预防性保护研究工作的开展和深入,发现不适宜的温湿度、光照和空气污染物是引起文物和艺术品老化、变质的最主要原因,库房内温湿度、光照和空气污染物参数约束对文物的长久保存有至关重要的作用。所以,为文物藏品营造长期安全可靠的保存环境,避免遭受上述环境因素的侵蚀,研究室内环境条件对馆藏文物保存的影响具有重要意义。本文解析了不同环境因素对不同材质文物劣化的影响,论述了我国文物赋存环境参数标准制定的历史沿革和科学性,比较分析了我国文物标准与国际文物

保存环境标准的共性和差异,阐述了当下文物保存仍面临的环境性关键问题,并以国际视角提出未来文物赋存管理多维度理念。

1 环境因素对不同材质文物的劣化影响

1.1 温湿度对文物保存的影响

文物衰变率(寿命倒数)受到酸度、温度和相对湿度的影响。酸度因子主要取决于空气中酸性气体含量相对大小,在排除污染性气体导致空气酸碱度发生变化情况下,假设空气酸碱度不变,温湿度参数则是影响文物衰变重要的室内环境指标。不适宜的温湿度参数不仅会直接影响文物制成材料的耐久性,而且会加速其他不利因素对文物制成材料的破坏作用(见表1)。

表1 环境因素对文物保存的影响
Tab. 1 Impact of environmental factors on cultural heritage preservation

材料	温度、相对湿度、光照、空气污染物和虫害的影响
纸张	温度、相对湿度极端值和波动造成纸张变形、脆化或粘黏;曝光下纸张会褪色和变色;污染性气体会腐蚀纸张,使纸面泛黄、褪色、字迹不清和穿孔;老鼠和昆虫啃食纸张,霉菌会消化纸张纤维素长出霉斑,生成有机酸腐蚀纸张
照片	温度、相对湿度极端值和波动造成相片变形、脆化或软化,图像内容模糊;曝光下相片会褪色和变色;颗粒物会刮伤摄影乳剂薄膜,使图像颗粒磨损,污染性气体会使相片表面产生污点;老鼠昆虫会吃相片的纸基,感光乳剂材料也是昆虫和霉菌的营养食物,使相片腐烂
绘画	高温下清漆层会软化变得黏稠,永久地吸附灰尘和污垢在画上,图形会发生变形;相对湿度波动引起帆布等基底尺寸变化,导致油漆和清漆开裂,不同绘画结构层分离;曝光下颜料颜色易受到损害而褪色、变色,画作衰退老化;木制画框易受到蛀虫啃噬,帆布和纸板基底会受到昆虫霉菌侵蚀变质
纺织品	温度、相对湿度极端值和波动造成纺织品变形、变硬或潮解;曝光下引起的化学反应而使色彩纹理褪色、变色,纤维降解,结构变弱;汗水、血液、污染性气体和其他污渍在纺织品表面发生的化学反应而造成的损害;纺织物本身材料和表面污渍为霉菌生长提供养分,导致纺织品霉变
皮革制品	温度、相对湿度极端值和波动导致皮革脱水、油脂渗出而变硬、开裂,也会因潮湿造成蛋白质、脂肪的变质、霉腐;曝光下分解皮革中胶原纤维,让皮革失去弹性,降低皮革强度和柔韧性,色彩褪色;颗粒物灰尘会磨蚀皮革,让表面失去质感,吸引真菌孢子,污染性气体会引起植物鞣制的皮革退化,患红腐病;霉菌、细菌、白蚁、老鼠和许多昆虫都会脏污皮革,使表面形成有色斑块,造成皮革脱色;皮革会与其他材料相互作用造成损害,例如皮革中脂肪材料与皮革部件金属扣发生反应,导致扣件生锈,皮革腐烂
木制品	温度、相对湿度极端值和波动造成木制品变形、翘曲和干裂,也会因潮湿造成细菌侵袭恶化、腐败;曝光下降解木制纤维,损坏表面纹理与染色剂,降低木制品机械结构强度;木材自身散发的挥发性有机酸与盐类粉尘、污染性气体发生化学反应,共同腐蚀木制品结构;霉菌、细菌、白蚁、老鼠和许多昆虫都会脏污木材,使表面形成有色斑块,造成表面木质素脱落
金属制品	温度波动造成金属热胀冷缩而变形,高相对湿度环境会引发铁器、铜器生锈,面层脱落,结构断裂;持续曝光会提升金属温度,软化金属结构,导致变形,模糊表面纹理字画;尖锐颗粒物会在抛光金属表面留下划痕,氧化性气体会使金属变色、黑化,污染性气体会与金属原子反应,腐蚀金属制品;霉菌、细菌等微生物生长繁殖,释放的水、有机酸和其他代谢废物进一步腐蚀金属表面

根据 Arrhenius 方程,升高温度,会加快化学反应速率,文物的腐蚀和老化速率也会加速。温度升高会降低有限空间中相对湿度值,会让纸质、木制类文物水分过度蒸发,导致纤维内部的结构破坏,使纸张变硬变脆、竹木器文物干裂,机械强度下降。干燥环境也更容易引起介质积聚静电,吸引腐蚀性粉尘。温度上升会增加气体污染物分子活跃动能,加剧甲醛、臭氧、挥发性有机物等气体释放和扩散,恶化室内空气质量,并污染、氧化和腐蚀文物藏品。国内外研究表明,低温环境条件对大多数文物保存是有利的,但也有不利于在低温环境下赋存的文物。例如,富含锡元素的青铜器,当环境温度低于 13.2℃ 时,白锡材料会逐步变成煤灰状松散的粉末脱离器具,毁坏文物表面纹路。另外,温度降低更容易使得密闭环境相对湿度增大,甚至引起结露现象。

温度的波动变化也会引起文物材质受损,比如珐琅文物,珐琅器由不同材质组成,它们的膨胀系数不同,温度的变化会在器物内产生热应力,当热应力超过一定值后将引起文物的变形甚至崩裂^[5]。此外,温度变化还会引起相对湿度发生大幅变动,而相对湿度的波动变化会引起严重的材料变形,吸湿性文物通过表面材料孔隙吸收和溢出水分子,文物尺寸会随着空气中水分含量变化膨胀和收缩,从而造成文物表面破裂、部件错位、结构弯曲等问题。Stefan 探究了文物暴露在不同湿度环境下的风险值^[6],总结了温湿度对档案文物保存的影响并提出可借鉴的保护措施。大多数情况下,高温、高湿环境对文物保存是最不利的,因为高温、高湿会加速一些藏品的制作材料发生物理或化学变化,增加有害生物的繁殖风险。铁器和铜器文物在潮湿高温环境下极易氧化成以氧化铁为主要成分的“铁锈”和以碱式碳酸铜为主要成分的“铜绿”,导致文物表皮脱落甚至穿孔断裂。较高温度下也更利于昆虫和微生物的生长繁殖,Brimblecombe 量化了网纹布蛾产卵数量与温度之间的关系^[7],网纹布蛾产卵数量随着温度升高呈指数型上升。为了更好地控制温湿度给文物带来的风险,Thompson 最早建议了适合大多数文物保存的空调房间参数,夏季温度为 $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $55\% \pm 5\%$;冬季温度为 $(19 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $50\% \pm 5\%$ ^[8]。

1.2 光照对文物保存的影响

光由光子能量束组成,以波动形式传播,当

振动的光子与物质碰撞时,它们会与表面层发生反应,导致光化学损伤。所以,所有波长光线(紫外线 300 ~ 400 nm、可见光 400 ~ 760 nm、红外线 760 nm 及以上)都具有破坏性,其中紫外线辐射的破坏性最大,因为其波长最短,光子振动频率最高,具有最高的光子能量。光照对文物的破坏往往比温度伤害更大,因为光损伤是不可逆转,具有累积效应,过度的曝光会导致介质褪色、变暗、变黄、脆化以及其他化学和物理变化。过量的光照会导致染料变色、墨水褪色、纸张脱色、清漆变暗,使得文档、绘画、照片和美术作品美观度变差,甚至难以辨认。光照还会引起文物机械结构强度减弱,例如,持续光照在纺织品、布匹、皮革上,会使得纤维脆化、结构减弱,如果有污染物性气体参与光化学过程,更会加重光损伤危害。阳光持久照射在木制品文物表面,木质素会被分解,木纤维从表面脱落,影响木制品文物颜色、纹理和机械强度。由于光诱导而引起的化学劣化,即使停止照射光,将物体转移到黑暗环境中,光化学劣化进程仍会继续,这种长久深度的光化学劣化对感光性文物是严重的损害。除了光照,自然光和白炽灯的可见光和红外线产生的热量也需要格外注意,大量的热量积聚会影响相对湿度稳定,促进劣化反应,变形膨胀材料甚至引发自燃现象。

1.3 空气污染物及虫害对文物保存的影响

空气污染物是文物保存的另一项重要威胁因素。常见空气污染物有污染性气体和烟雾、灰尘等颗粒物。污染性气体包含氧化物、硫氧化物、氮氧化物、碳氧化物及硫氢化物等。主要的污染性气体源于室外化石燃料的燃烧和汽车尾气的释放,也有些污染性气体来自于室内污染源,比如,新建博物馆的未封闭混凝土表面会散发碱性物质,家具木材会释放甲醛和酸,复印机、打印机和空气过滤设备会释放臭氧^[9]。不同空气污染物对文物会产生不同程度和不同现象的伤害,像臭氧这类氧化性气体可以直接氧化文物材料变黄、变质,周浩等探究了臭氧浓度变化对银器文物腐蚀变色影响^[10],实验论证了臭氧氧化银器的化学反应机理。有些污染性气体与水结合形成酸,比如硫氧化物、氮氧化物形成硝酸和硫酸化合物,使得文物发生碳化腐蚀、脆化、褪色和长斑纹等破坏现象。Fenech^[11]、Dupont^[12]、Tétreault^[13]、Strlič^[14]等分别研究了醛类、羧酸、羰基污染物和挥发性有机污染物对纤维素纸张的老化机理。除了气体污染

物,颗粒物对文物的危害也是显而易见的,颗粒物通常包括盐类和尖锐粗糙的硅化合物,会弄脏、磨损、划刻文物材质表面。很多时候,它们悬浮于空气中,吸收气体污染物,也是无数霉菌和小有机物的载体,成为有害化学变化的培养皿。多数颗粒物为亲水性化合物,随着盐类腐蚀、水解和酸的释放,不仅会直接污染藏品,也进一步促进了霉菌的发育、繁殖,是霉菌生长扩张的“帮凶”。

霉菌是文物保存最主要的微生物威胁,另外,昆虫和脊椎动物 2 类文物藏品虫害问题也较为常见。有害生物会啃食纤维素类文物,污染文物表面色彩和纹理,弱化材质结构。霉菌对文物的危害是可怕且顽固的,它们一般食用纤维素、明胶和黏合剂等作为营养物质。表面霉斑是常见的毁坏呈现,是霉菌在材质表面生长反应留下微量元素形成的。很难彻底消灭霉菌,因为即使杀死活着的霉菌,依然有很多在相对结实细胞壁保护下休眠的霉菌孢子,一旦环境适合,它们就会生长繁殖,给文物保存管理带来巨大的麻烦。Thomas 针对博物馆虫害问题提出了一系列可行的防治管控方法和消杀建议^[15]。温湿度、光线和环境洁净程度是限制虫害的主要因素,换言之,有效地管理温湿度、光线和室内空气质量,可以限制和避免霉菌给文物造成的毁坏。控制适宜的文物赋存环境参数,要制定相关的规范与标准,实施预防性文物保护工作,为文物保存管理提供制度与科学保障。

2 我国文物保存环境标准与国外标准对比

2.1 我国文物保存温湿度环境标准及与国外标准对比

我国颁布了一系列相关标准来规范博物馆环境,这类标准可分为 2 类,第 1 类是对公共开放展示文物藏品的博物馆、美术馆、展览馆等场所环境;第 2 类是不对公众开放的文物保存的文物库房环境。对于第 1 类场所环境要求,我国卫生部于 1988 年颁布《图书馆、博物馆、美术馆、展览馆卫生标准》(GB 9669—1988),涉及到温度、相对湿度、台面照度、颗粒物浓度、细菌数等环境要求。1996 年对其进行了修订,要求在有空调环境下,室温需维持在 18~28℃,图书馆、博物馆、美术馆相对湿度在 45%~65%,展览馆相对湿度在 40%~80%^[16]。2019 年,国家卫健委发布了《公共场

所卫生指标及限值要求》(GB 37488—2019)^[17],新标准整合了 12 项公共场所环境卫生指标,对博物馆、展览馆采用空调的室内环境参数作出规定,冬季室温宜在 16~20℃,夏季室温宜在 26~28℃,相对湿度宜控制在 40%~65%。相比较原来标准,新标准区分开了冬季和夏季空调房间温度设定值,缩小了夏季和冬季空调房间温度波动范围,更有利于博物馆和展览馆内文物展品赋存环境的稳定性。

第 2 类文物保存环境最早是 1991 年我国住建部颁布的《博物馆建筑设计规范》(GJG 66—1991)^[18],要求对温湿度变化较敏感的珍品库房应设置空气调节设备,冬季室温不低于 10℃,夏季室温不高于 26℃,相对湿度应保持基本稳定,浮动区间在 40%~60%。对于未设空气调节设备的藏品库房,对温度没有特别要求,但相对湿度不大于 70%,昼夜相对湿度差不大于 5%。从室内空调房间温湿度限值上比较,GJG 66—1991 标准比 GB 37488—2019 标准更加严格,对不同材质藏品作出分类要求。GJG 66—1991 标准在 2015 年做了修订(GJG 66—2015)^[19]:首先,丰富和细化了文物材质种类,增加了锡器、铅器、搪瓷、皮革、石玉器、象牙制品、黑白和彩色照片等多种材质类型;其次,对不同材质温度有更加严格和确切的规定,比如规定了锡器、铅器在 25℃保存,青铜器、铁器、陶器、瓷器等文物赋存温度为 20℃,皮革、皮毛文物则在 5℃环境中保存,彩色照片及胶片在 0℃的低温环境中保存;最后,新标准不仅要求对温湿度敏感的文物库房设置空调设备,对展厅和藏品技术用房也同样需要设置空调,并满足文物赋存空调房间温度日较差在 2~5℃,相对湿度日波动值低于 5%。未设空调设备的藏品库房仍沿用 GJG 66—1991 版标准,遵循恒湿变温的原则。

图 1 和 2 分别对比了各国家(组织)文物保存环境标准的温度和相对湿度规定。由图可知,温度和湿度的范围分别为 14.5~23℃和 34%~55%,平均值为 20℃和 45%。埃及和巴西具有最高的保存温度(23℃),日本具有最高的保存相对湿度(55%),加拿大具有最低的保存温度(14.5℃)和相对湿度(34%)。不同国家文物保存温湿度参考值存在明显差异,引起差异的主要原因有 3 方面:①各地区气候环境存在明显差异,导致文物出土环境的差别,进而影响到文物赋存温湿度值设定的依据;②各国家对维持文物赋

存环境需消耗的建筑能耗和经济支出存在差别,一般来说,更低的保存温度和更小的温度波动与建筑能耗和经济支出成正比;③大多数出土文物的材料稳定性是不同国家设定保存温湿度值的依据,文物材料的稳定性越好,可适当放宽保存温湿

度限值和波动范围要求。以埃及地区为例,埃及在图示国家中年平均温度最高,建筑能耗和经济支出承担能力较低,且埃及出土的大部分是材料相对稳定的岩石类和硅酸盐类文物,综合考虑,埃及设定了相对较高的文物保存温度值。

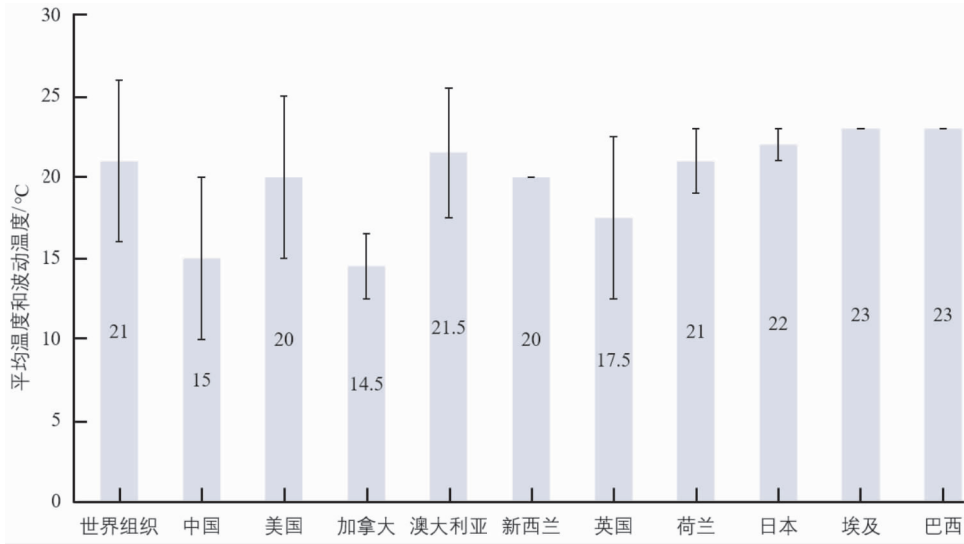


图 1 各国家文物保存温度要求

Fig. 1 Temperature requirements for cultural heritage preservation in different countries

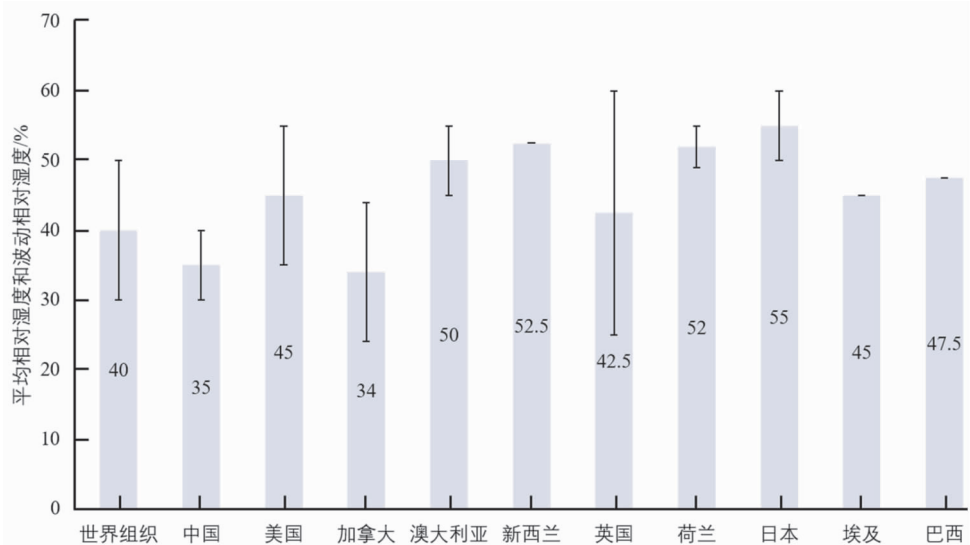


图 2 各国家文物保存相对湿度要求

Fig. 2 Relative humidity requirements for cultural heritage preservation in different countries

这 11 个国家(组织)文物保存标准中藏品可分为有机材料和无机材料 2 类(见图 3)。有机材料的保存温度和相对湿度平均值分别为 16.6℃和 41.5%,无机材料的保存温度和湿度的平均值分别为 17.9℃和 34.1%。有机材料比无机材料具有更高的保存相对湿度要求,因为有机材料需要相对湿度以维持其柔韧性,过低的湿度环境会导致有机材料的脆化、干裂,比如纸张、皮革、

木制品等。无机材料比有机材料具有更高的保存温度,因为无机材料具有耐高温的物理特性,高温对其机械性损伤较少,比如金属、硅酸盐类材料。无机材料最低保存温度和相对湿度分别为 0℃和 0%,无机材料最高保存温度为 35℃,而有机材料最高只能到 25℃。无机材料藏品保存温度和相对湿度值分散性较高,而有机材料藏品保存温度和相对湿度值相对更集中。

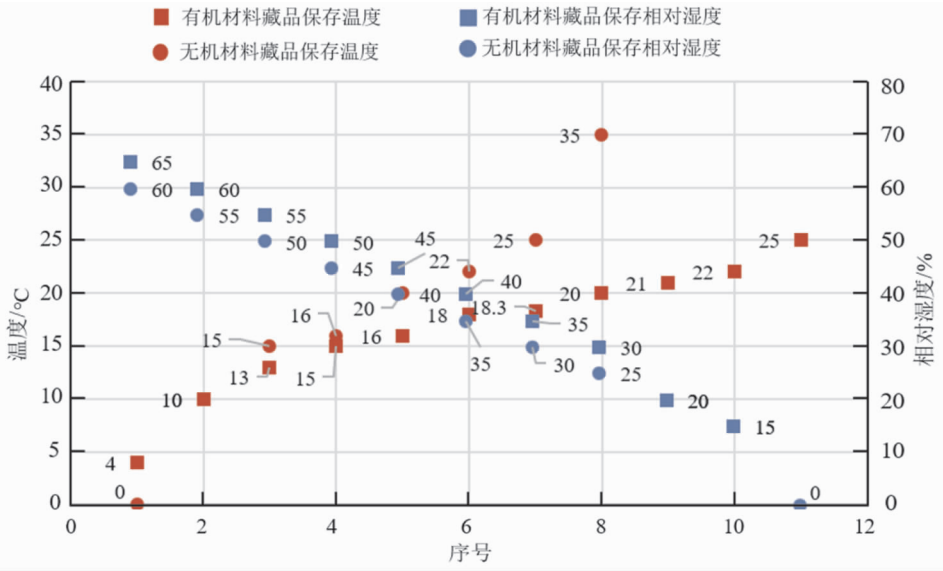


图 3 有机和无机材料文物保存温度和相对湿度

Fig.3 Recommended temperature and relative humidity conditions for preserving organic and inorganic material cultural heritage

基于 JGJ 66—2015 对文物藏品的材料分类,选取 7 种主要的材料类型,归纳 11 个国家(组织)的文物保存标准中温度和相对湿度规定,这 7 类材料的保存区间如图 4 所示。7 类材料保存共同的推荐温度范围为 15 ~ 22 ℃,低于 0 ℃被认为是更安全的保存环境,共同的推荐相对湿度范围为 40% ~ 55%,然而,没有更安全的保存相对湿

度范围。纸基、竹木、纺织绘画材料有相同的保存温度上限值(22 ℃),金属、动植物、岩石类材料有相同的保存温度上限值(25 ℃)。纸基、纺织绘画材料有相同的保存相对湿度上限值(65%),动植物、硅酸盐、岩石类材料有相同的保存相对湿度上限值(60%)。

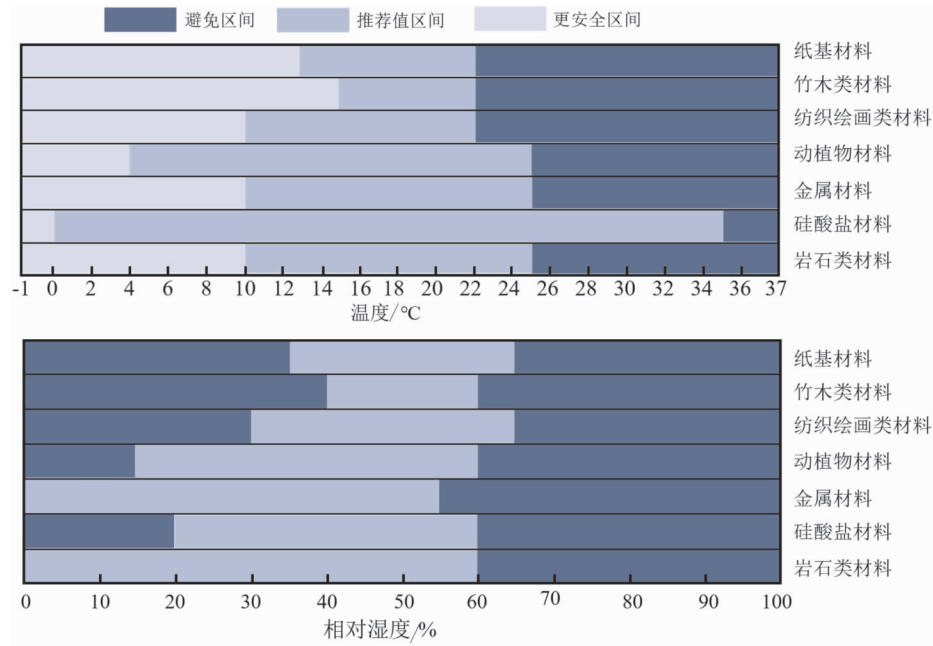


图 4 各国不同材质文物藏品保存温度和相对湿度范围

Fig.4 Temperature and relative humidity ranges for preserving cultural heritage of diverse materials across nations

2.2 我国文物保存光环境标准及与国外标准对比

根据我国《博物馆照明设计规范》(GB/T 23863)和《建筑照明设计标准》(GB 50034)要求,需要避免天然直射光进入博物馆文物藏品库房和展厅,减少采光口紫外线辐射,避免产生眩光和光幕反射等光学现象。若需要人工照明时,人工光源宜选用接近天然光色温的高温光源,藏品库房和对光特别敏感型文物的照明应配有遮光装置,选用无紫外线的光源,展厅和对光敏感型文物的照明应采用紫外线少(相对含量 $<20\text{ }\mu\text{W/lm}$)的光源。一般情况下,太阳光中紫外线和红外线含量最高,所以要杜绝阳光直射在文物上。荧光灯的紫外线含量也很高,要远高于钨卤素灯和白炽灯,在使用荧光灯做人工光源时,需要安装紫外线滤光器,并且因为滤光器存在有效期的,需要定期检查滤光器效率。相比于荧光灯,钨卤素灯和白炽灯紫外线含量虽然偏低,但电流通过细钨丝发光中会产生热量,不利于保存环境温湿度管理,所以尽量降低这3类人工光源在文物库房和展厅中使用,推荐使用不释放紫外线和红外线的LED光源作为人工照明。

在GB/T 23863和GB 50034标准基础上,建工行业规范JGJ 66—1991和JGJ 66—2015根据文物材质对光源的敏感性不同,将文物藏品分为特别敏感、敏感和不敏感型3类。例如,纸质书画、纺织印刷品和彩绘文物大多属于对光特别敏感型文物,推荐照度值需要小于 50 lx ;而金属、石材、珠宝、陶瓷等大多属于对光不敏感型文物,照度值低于 300 lx ;其余像竹木制品、油画、牙骨角器、象牙制品、漆器等属于对光敏感型文物,照度值低于 150 lx 。当考虑文物的光损伤时,退化率与照度值、曝光时间成正比,长时间低光照造成的伤害与短时间高光照造成的伤害相同。所以,控制曝光总量对于文物赋存也很重要。JGJ 66—2015标准中对光敏感型和特别敏感型文物,增加了年曝光量 $36\times10^4\text{ lx}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $50\times10^4\text{ lx}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ 的年光照总量约束。

基于JGJ 66—2015对文物藏品的材料分类,选取8种主要的材料类型,归纳11个地区(组织)不同材质文物展览期间光照强度,8种材料的光环境如图5所示。金属、硅酸盐和岩石类材料普遍具有最耐受的光环境,这类藏品展览期间可被允许的光照强度为 300 lx 。纸基和视听材料具

有最敏感的光环境,这类藏品展览期间可被允许的光照强度大多集中在 50 lx 。竹木、动植物、纺织绘画类材料的光环境要求介于 $50\sim300\text{ lx}$ 。大多数标准都是以 50 、 100 、 150 、 200 、 250 、 300 lx 作为不同材质藏品光环境的限值,以 50 lx 为一个单位增量进行区分。纸基、竹木、纺织绘画、动植物、金属、硅酸盐、岩石类和视听材料光照强度平均上限值分别为 58 、 213 、 114 、 131 、 314 、 314 、 292 、 63 lx 。不同国家对于同种材料文物的照度要求也有所区别,主要原因有2方面:①不同国家对文物展品展览期间受损的定量要求存在差异,照度越低,对文物的损害越低,但是牺牲了参展观众的视觉体验和观展效果;②相同属性材质文物在各地也存在其他差异,比如文物年份,历史价值和文物上是否含有其他的光敏感材料等。

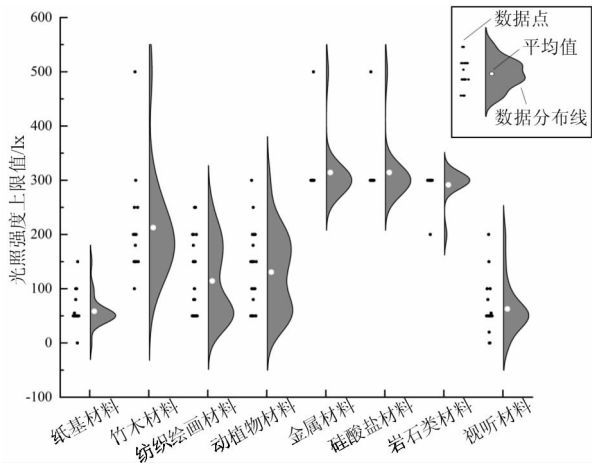


图5 各国不同材质藏品展览期照度值要求

Fig. 5 Illuminance requirements for exhibiting cultural heritage of diverse materials across nations

2.3 我国文物保存空气污染物环境标准及与国外标准对比

我国JGJ 66—2015标准主要规定了博物馆库房内 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 HCHO (甲醛)和可吸入颗粒物的阈值浓度。针对上述4种主要有害气体污染物,将我国标准与美国、英国、加拿大和日本标准进行比较^[20-23]。如图6所示,我国除甲醛阈值浓度规定高于日本外, SO_2 、 NO_2 和 O_3 浓度限值要求也都高于其他4个国家。美国、英国、加拿大和日本对 SO_2 、 NO_2 和 O_3 浓度限值都大约控制在 10×10^{-9} 及以下水平。

除了 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 HCHO 污染性气体之外,一些国家标准也将 CH_3COOH 和 H_2S 纳入威胁文物藏品保存的有害气体名单中。归纳对6种

污染性气体阈值浓度规定(见图 7),可以发现,同一污染物,不同标准规定的数值差异非常大,SO₂、NO₂、O₃、CH₃COOH、HCHO 和 H₂S 最大与最小阈值浓度分别相差 54、80、256、100、75 和 210 倍。这 6 种污染物的平均阈值浓度分别是 4.26×10^{-9} 、 6.23×10^{-9} 、 5.16×10^{-9} 、 181.3×10^{-9} 、 59.24×10^{-9} 和 0.72×10^{-9} 。H₂S 和 CH₃COOH 平均阈值浓度相差 3 个数量级。大多数标准对 H₂S 阈值浓度限制最为严格,对 CH₃COOH 阈值浓度限制则较为宽松。3 种常见的污染性气体如 SO₂、NO₂ 和 O₃ 的平均阈值浓度差异不大,仅相差 $\pm 2 \times 10^{-9}$ 。

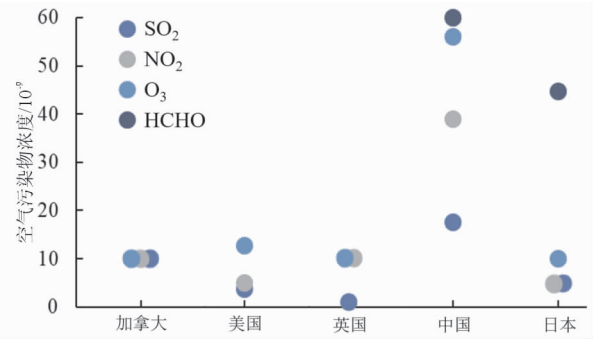


图 6 各国家文物保存环境常见污染物浓度限值
Fig. 6 Concentration limits of common pollutants in cultural heritage preservation environments across nations

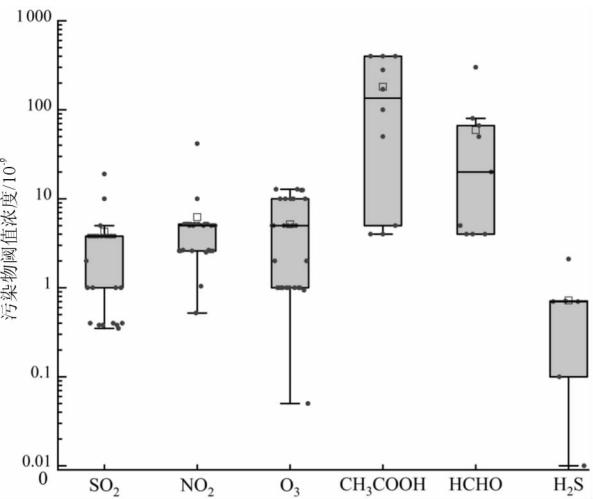


图 7 各国家藏品保存环境中主要空气污染物阈值浓度的要求
Fig. 7 Threshold concentration requirements for key airborne pollutants in cultural heritage preservation environments across nations

不同国家对文物保存环境中污染性气体浓度要求存在明显差异,差异的主要原因有 3 方面:①

与当地城市化进程、空气污染水平和环境保护治理水平息息相关,城市进程越高,空气污染严重以及环境治理水平越低,当地室外污染性气体浓度就越高,文物保存环境中污染气体浓度控制难度就越大;②各国文物材料的差异引起文物环境中污染气体阈值浓度有差别,例如,我国出土了很多文献典籍和竹木制品文物,这类文物会释放大量的有机酸(如 CH₃COOH)气体^[24],在文物库房中维持较低的污染气体浓度存在较大难度;③各国文物保存环境中的通风要求各异,文物库房中的新风量设定是当前文保工作的难题,各国家对库房通风的要求存在很大歧义,很多地区没有相关规定,不同地区库房的通风将直接影响着文物保存环境中的污染气体浓度。

3 文物赋存环境现存问题及未来管理方法

3.1 文物赋存环境现存问题

与国际上一些主要国家文物赋存环境标准相比,我国 JGJ 66—2015 标准与主要国家文物保护存储理念相似,大多数文物都适合在无紫外线、低照度、低浓度空气污染物、温湿度恒定且低温中低湿的环境中保存。因地理气候条件和文物材质差异,在具体的赋存温湿度参数数值、昼夜或季节性波动范围上略有不同,在光照强度、曝光总量、空气污染物浓度限制和有害生物防治要求上大体相同。国际上在文物保存风险管理上达成了很多共识,但是还没有形成统一的文物赋存环境参数标准,因为全球各地文物种类、材料、地理气候和经济水平相差很大,所以,不能机械地规定统一的赋存参数数值。同时,我们也需要谨慎看待和使用标准中规定的参数数值,因为参数数值描述的是大多数文物安全保存环境,也是建议值,而大多数文物保存实际参数是需要结合文物样品过去的历史及其已适应的条件综合考量的。例如,某件文物藏品是由干旱地区的木材制成,而且从未离开过该地区,那么它的正常含水量比来自温带和热带地区的普通木材要低很多,将该藏品置于标准推荐的 40% ~ 60% 相对湿度环境下保存是毫无意义的,而 25% ~ 30% 的相对湿度可能更适合该木制藏品保存。由此,与其说参考规范中的标准温湿度限值,不如说温湿度稳定性是文物长久保存最重要的因素,文物赋存环境的营造应该因地制宜。

宜,适应不同气候区环境。

在 JGJ 66—2015 标准中,没有对室内新风量做出明确规定。新风一方面可以满足库房工作人员对室内空气质量的需求,另一方面可以稀释文物释放出来的污染性气体,引入一定量的新风对于改善室内空气质量,避免文物密闭腐败有着重要作用。但是,引入新风也将会增加一些不确定性,当室外出现极端气候或剧烈的温湿度变化,新风机组很难将室外新风调整到理想的送风状态,灌入的新风将会导致文物保存环境温湿度参数不稳定,新风量越大带来的不确定风险就越高。另外,过多的新风也会造成空调能耗增加,室外污染物引入风险增大,充足、新鲜的氧气也会氧化文物,滋养微生物和虫害等一系列问题。所以,文物库房内设置多少新风量合适,目前标准中缺少相关意见。

在文物赋存环境营造实施上也面临一些现实问题。例如,标准中规定彩色照片及胶片需要在 0℃ 保存,皮革、皮毛需要在 5℃ 保存,长期维持在低温条件,会花费很大的建筑空调能耗,这不符合节能减排的环保理念,对博物馆来说也是巨大的费用开支。在我国新疆、西藏地区,要保护好文献经卷、服装和唐卡等当地特色文物,根据标准,温度需维持在 2℃,相对湿度需维持在 50%~60%,但是当地昼夜温差极大,这种气候条件下要维持稳定的温湿度是非常困难的,对恒温恒湿空调设备的精确度和系统稳定性提出更高的要求,一旦设备发生故障或调控精度不足,周期性的昼夜温湿度变化将会对文物造成伤害,空调设备维保和运行费用是昂贵的开支,增加了西北地区文物保护工作难度。所以,仍需要进一步完善节约建筑能耗和温湿度参数波动性大的问题。

另一个值得注意的问题是,很多文物并不是单一材质,比如青铜器、瓷器、铠甲、色彩画、衣饰之类,其保存条件应通过科学实验确定或者按照对环境敏感性最高(劣化进程最严重)的部件储存参数来保存整个文物藏品。目前对于混合材质的文物如何规范其保存环境参数,还没有形成统一性的标准。对于多件文物藏品集中收藏在同一库房内,不同文物之间是否存在相互影响(文物自身是否会释放气体,亲水性文物是否会改变环境相对湿度,动植物标本或毛皮是否为霉菌提供蛋白质营养物质等),按照哪件文物保存参数值设计库房统一的送风状态点,也缺乏相关规范的

指导建议。

3.2 文物未来赋存管理理念

基于节约建筑能耗和温湿度参数波动性大问题,我们需要根据当地地理、气候件、藏品原生环境与材料属性综合确定文物赋存的温湿度(见图 8)。JGJ 66—2015 标准描述的是建议温湿度参数和范围,不是强制执行的条文,在参考标准基础上,以全年大多数日期温湿度数值为前提,制定符合该文物收藏的温湿度值。比如,一件出土在我国海南地区的锡器,标准建议温、湿度是 25℃、0~40%,该地区全年大多数日平均气温和湿度为 28℃ 和 30%~70%,那么空调系统可以设定在 28℃ 温度,30%~40% 的相对湿度下,因为该锡器本身出土于高温偏湿环境下,不需要过多改变其原生环境参数,锡材料也不建议在温度偏低环境下存储,30%~40% 相对湿度既符合标准推荐的锡器标准值和波动区间,也处于全年大多数日平均相对湿度值范围内。符合当地气候特征的文物赋存环境温湿度参数设计可以减轻空调设备长期运行负荷,但是设备全年连续运行的耗电量问题依旧存在,可以结合当地可再生能源资源优化空调系统用能模式,采用可再生清洁能源作为空调设备主要用能来源,电能作为补偿性能源,这种能源结构将大幅度降低建筑能耗。除了通过主动式空气调节控制温湿度达到设定的适宜参数,维持稳定的保存环境,被动式的建筑技术也具有很好作用,通过设计文物藏品多层围护空间,可以衰减温湿度振荡幅度,延缓温湿度波动变化时间,多层围护空间涉及从微环境(文物囊匣、储存柜、展柜)、小环境(库房、展厅)、大环境(博物馆等单体建筑)到室外环境(地块建筑聚落、街区建筑群落)^[25],目前被动式建筑技术对文物赋存环境的影响研究还存在不足,探究被动式建筑技术设计与主动式空气调节优化将有助于缓解文物保存过程中的高能耗与温湿度波动性大问题(见图 8)。

结合博物馆文物保存环境因地制宜的特征,需依据文物藏品馆址的地理条件划分保存环境指标,或者针对性建立各地方文物保存环境标准。例如,英国《规划与设计数据公用手册》在博物馆环境设计上,要求混合藏品温度范围在 20~22℃,而相对湿度参数则需要依据不同地理与气候条件来规定,在高温高湿地区、温和海洋和其他非干燥地区、温和内陆地区、干燥地区的博物馆相对湿度分别为 65%、55%、45%~50%、40%~45%。

澳大利亚遗产收藏委员会在《文化机构中的环境控制准则》中也将不同气候地区的文物收藏环境进行区分,对于炎热潮湿气候地区建议室内温度为 22~28℃,相对湿度日波动为 55%~70%;炎热干燥气候地区建议室内温度为 22~28℃,相对湿度日波动在 40%~60%;温带气候地区建议室内温度为 18~24℃,相对湿度日波动为 45%~

65%。我国幅员辽阔,具有温带大陆性气候、高原山地气候、亚热带季风气候、热带季风气候和温带季风气候,多样的气候类型具有不同的环境特征,需要分气候区差别制定文物保存环境标准(见图 8),这将更符合管理博物馆文物赋存环境的现实情况。

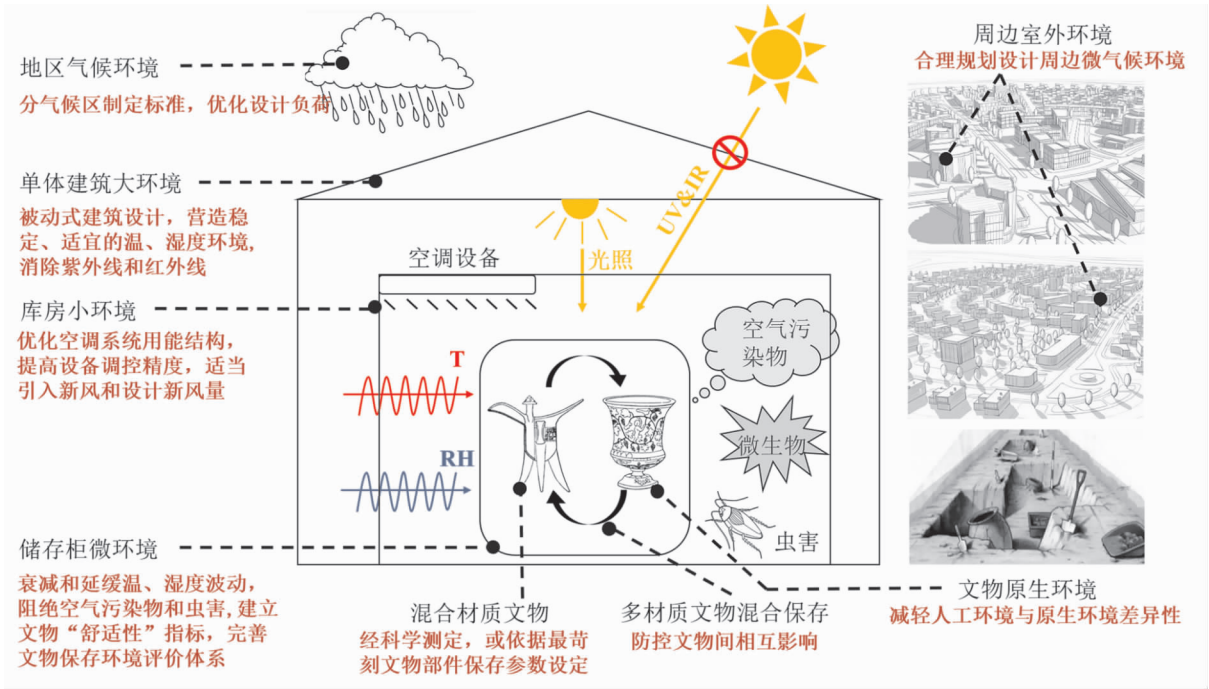


图 8 未来文物赋存环境多维度管理理念

Fig. 8 Multidimensional management framework for future cultural heritage preservation environments

我国 JGJ 66—2015 标准主要根据文物种类不同划分保存环境参数,不难发现,根据文物化学组成成分划分保存环境参数具有科学性,可以从最基本的化学元素区分文物,但是这种划分方式目前可实施性难度大,因为一些材料的化学裂变和物理退化机理还没有完全被解释,温湿度、光照、空气污染物和虫害共同影响文物机制还有待进一步研究。随着今后文保工作的深入,按照文物化学成分规定不同文物保存环境参数将成为未来文物赋存管理的一种方法,便于混合材质文物和多材质文物混合保存与管理。

另外,对于如何量化文物在当前环境中的退化率,评价环境因素的时间、空间稳定性,衡量文物赋存环境综合优劣指标,还需要更全面和深入的研究工作,建设系统的文物赋存环境标准化评估体系,量化文物保存环境在各个维度的得分,将有助于管理人员和文物保护工作者发现保存环境问题,采取解决办法,对于管理和评价保存环境有

显著意义。

4 结语

随着我国文物赋存环境领域研究开展,文物保存环境标准制定内容越来越丰富,方法越来越科学,我国 JGJ 66—2015 标准已基本形成规范、科学的文物赋存环境标准制度。标准细化了文物的材质种类,分类规定了不同材质藏品的温湿度赋存设定值与波动范围。除铅器、锡器、皮革、皮毛、照片和胶卷类文物,我国大部分文物的保存温度规定为 20℃,这与国际上文物保存标准的平均赋存温度值一致,也在 14.5~23℃国际通用的文物保存温度范围内。我国大部分文物的保存相对湿度规定为 40%~60%,将金属制品文物 0%~40%的相对湿度规定纳入,我国文物保存相对湿度均值为 35%,低于国际上文物保存标准的平均相对湿度(45%),也处于国际上通用的文物保存

相对湿度范围 34% ~ 55% 的下限水平。各国家因地区气候环境、文物材料稳定性、建筑能耗和经济支出能力制定了差异性的文物赋存温湿度。综合 11 个地区(组织)标准发现,有机和无机材料文物的保存温湿度的平均值分别为 16.6 °C 和 41.5%、17.9 °C 和 34.1%。在光照要求上,我国标准从照度值、紫外线含量和年曝光总量 3 个维度约束了文物保存、展示的光环境。金属、硅酸盐和岩石类材料文物在我国和国际上均认为是最耐受光损害的,它们展览期间被允许的光照度上限值约为 300 lx;纸基和视听材料是极易受光损害的文物,最高光照度约为 50 lx。其他材料藏品因各地区对文物受损的严苛程度有区别,文物年份和价值的差异性,展览期间光照度一般规定在 50 ~ 300 lx。我国标准将 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、HCHO 和可吸入颗粒物作为对文物赋存有影响的主要污染源,其他一些国家也将 CH_3COOH 和 H_2S 列为威胁文物保存的污染源,不同国家制定的污染物浓度受到当地空气质量、文物材料和通风要求的综合影响。相比于美国、英国、加拿大和日本对 SO_2 、 NO_2 、 O_3 浓度不高于 10×10^{-9} 的严格要求,我国对污染气体阈值要求相对较低($10 \times 10^{-9} \sim 60 \times 10^{-9}$)。

标准建立的科学性固然重要,但在标准执行上,一些博物馆还存在一定难度,我国部分地区具有波动变化大的极端气候,当地经济条件也难以承受较高的空调设备运行费用,这都给文保工作带来难题。另外,由于特殊文物材质退化机理和多环境因素协同影响文物衰退机制还有待深入研究,混合材质文物保存、多材质文物混合保存的方法还没有统一的规范要求,当下文物保存环境优劣性评价指标体系也需要进一步完善。为此,本文提出的未来文物赋存环境多层次、多维度管理理念有助于缓解当前文保工作的难题,改变当前文物赋存环境面临诸多不利因素的困境。在大尺度上,区分气候区“因地制宜”制定文物保存参数,减少文物出土前原生环境与出土后人工环境的差异性,优化博物馆、美术馆和展览馆周边规划设计,形成稳定的室外人为促成微气候环境;中尺度上,调整文物保存建筑空调系统能源结构,提高环境调节设备调控精度,结合被动式建筑技术和设计策略,缓解展览馆的经费开支;小尺度上,按照混合材质文物最易受损的构件设定保存参数,引入室外新风,防控多种材质文物之间交叉污染。

在文物赋存环境优劣性评价上,建立文物“舒适性”指标,量化文物保存环境多维度的评级,助力文保工作更科学合理。

参考文献

- [1] 詹长法. 预防性保护问题面面观[J]. 国际博物馆, 2009, 61(3): 96-99.
ZHAN C F. A comprehensive view on preventive conservation issues[J]. International Museum, 2009, 61(3): 96-99.
- [2] 黄河, 吴来明. 馆藏文物保存环境研究的发展与现状[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(1): 13-19.
HUANG H, WU L M. Development and current status of research on conservation environment for museum collections[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(1): 13-19.
- [3] 孙满利, 张景科. 文物保护学的理论探讨[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 192-198.
SUN M L, ZHANG J K. Theoretical exploration of cultural heritage conservation science[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(2): 192-198.
- [4] 祝鸿范, 周浩, 蔡兰坤, 等. 银器文物防变色缓蚀作用机理的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(S1): 13-28.
ZHU H F, ZHOU H, CAI L K, et al. Study on the anti-tarnishing and corrosion inhibition mechanisms for silver artifacts[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2002, 14(S1): 13-28.
- [5] 徐方圆, 解玉林, 吴来明. 文物保存环境中温湿度研究[J]. 文物保护与考古科学, 2009, 21(S1): 69-75.
XU F Y, XIE Y L, WU L M. Research on temperature and humidity in cultural heritage preservation environments[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2009, 21(S1): 69-75.
- [6] STEFAN M. Guidelines for humidity and temperature for Canadian archives[J]. Canadian Conservation Institute Technical Bulletin, 2000, 23: 20-26.
- [7] BRIMBLECOMBE P P. Lankester, Long-term changes in climate and insect damage in historic houses[J]. Studies in Conservation, 2013, 58(1): 13-22.
- [8] THOMPSON G. The Museum Environment[M]. London: Butterworth-Heinemann, 1986.
- [9] GUO C, GAO Z, SHEN J. Emission rates of indoor ozone emission devices: A literature review[J]. Building and Environment, 2019, 158: 302-318.
- [10] 周浩, 吴来明. 臭氧浓度变化对馆藏银器文物腐蚀变色的影响[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24

- (S1):1-5.
- ZHOU H, WU L M. Impact of ozone concentration variation on corrosion and discoloration of silver artifacts in museum collections [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2012, 24(S1): 1-5.
- [11] FENECH A, STRLIČ M, KRALJ I, et al. Volatile aldehydes in libraries and archives[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(17): 2067-2073.
- [12] DUPONT A L, TÉTREAUULT J. Cellulose degradation in an acetic acid environment[J]. *Studies in conservation*, 2000, 45(3): 201-210.
- [13] TÉTREAUULT J. Airborne pollutants in museums, galleries and archives: Risk assessment, control strategies, and preservation management[M]. Ottawa: Canadian Conservation Institute, 2003.
- [14] STRLIČ M, KRALJ CIGIĆ I, MOŽIR A, et al. The effect of volatile organic compounds and hypoxia on paper degradation[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2011, 96(4): 608-615.
- [15] THOMAS J K S. Controlling vertebrate pests in museum[J]. *Canadian Conservation Institute Technical Bulletin*, 1991, 13: 1-9.
- [16] 中华人民共和国卫生部. 图书馆、博物馆、美术馆、展览馆卫生标准:GB 9669—1996 [S]. 北京:中国标准出版社, 1996.
- [17] 国家市场监督管理总局. 公共场所卫生指标及限值要求:GB 37488—2019[S]. 北京:中国标准出版社, 1996.
- [18] 中华人民共和国建设部. 博物馆建筑设计规范:JGJ 66—1991[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1996.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 博物馆建筑设计规范:JGJ 66—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [20] National Information Standards Organization. ANSI/NISO Z39.79—2001 environmental conditions for exhibiting library and archival materials[S]. Maryland: NISO, 2001.
- [21] British Standards Institution. PAS:198—2012 specification for managing environmental conditions for cultural collections[S]. London: BSI, 2012.
- [22] Canadian Council of Archives. Basic conservation of archival materials[S]. Ottawa: CCA, 2003.
- [23] KAMBA N. Environmental management for conservation at the Tokyo National Museum [J]. *Cultural Property Insect and Fungal Damage*, 2011, 61: 3-9.
- [24] 王倩倩, 铁付德, 陈星灿. 博物馆环境空气中有机酸的研究进展[J]. *中国国家博物馆馆刊*, 2022(2): 149-160.
- WANG Q Q, TIE F D, CHEN X C. Research progress on organic acids in museum environment air [J]. *Journal of the National Museum of China*, 2022(2): 149-160.
- [25] GUO C, BUCCOLIERI R, GAO Z. Characterizing the morphology of real street models and modeling its effect on thermal environment [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 203: 109433.

(编辑 李波)