馆藏珍贵青铜器工艺信息提取关键技术研究及应用

——以湖北省博物馆为例

江旭东

中国古代青铜器是青铜时代中华文明的核心物质见证，蕴含丰富的历史价值、艺术价值和科学价值。湖北省博物馆馆藏青铜资源丰富，拥有先秦时期最复杂的青铜器——曾侯乙尊盘，天下第一剑——越王勾践剑，最大最全保存最完好的青铜乐器——曾侯乙编钟；此外以盘龙城为代表的商代早期青铜器，以曾世家为代表的西周至战国早期曾国青铜器，以曾侯乙为代表的战国早期青铜器和以包山、望山、九连墩为代表的战国中晚期青铜器，构成了青铜时代完整的藏品体系，系统展现了长江中游青铜文明的发展脉络与工艺特色，集中反映了先秦时期青铜铸造的巅峰技艺。

丰富的馆藏资源为青铜工艺研究提供了得天独厚的条件，同时也对文物科技研究工作提出了全新挑战。考古出土青铜器多存在残损、破碎情况，可通过取样进行金相分析、锈蚀检测、合金成分测试、矿料溯源等多种研究。然而，馆藏珍贵青铜器多为完整器物，难以进行任何有损检测，如何在完全无损的前提下准确提取其成型方式、合金配比、艺术装饰等工艺信息，成为湖北省博物馆青铜文物科技研究的攻坚方向。

多模态无损检测技术体系

金相分析可通过观察青铜基体显微组织，区分铸造、热锻、淬火、冷加工等成型工艺，依据组织特征判定铜锡配比，根据二次枝晶臂间距确定基体组织冷却速度或铸后受热情况。不同于传统取样进行的金相分析，“原位金相技术”是依据腐蚀后青铜器表面遗留的组织特征，通过光学显微镜原位观察，推测其金相组织的技术，适用于饱水墓葬出土、腐蚀程度较轻的器物或锈层中“假晶”组织特征显著的青铜器。

合金配比是研究青铜器制作工艺的首要问题，选用不同含量的铜锡（铅）制作不同类型、用途和属性的青铜器，反映了古人对材料性能的科学认知。在青铜器合金成分检测中，电感耦合等离子体光谱（ICP-OES）、激光诱导击穿光谱（LIBS）、电镜能谱（EDS）等均为有损或微损方法，不符合文物保护原则；开放式X射线荧光光谱（XRF）虽可实现完全无损原位检测，但受器物表面锈蚀层干扰，锡含量波动剧烈，无法反映基体真实成分，而除锈检测又会对器物造成二次伤害。为解决锈蚀干扰难题，我馆团队构建锈层-基体双介质荧光校正模型，通过理论推导与实验验证，提出了基于双介质模型的XRF线性拟合法，建立了锡、铁元素拟合曲线，以获取青铜器基体真实锡含量。该方法在锈层厚度远小于XRF检测深度的情形下成立，适用于腐蚀程度较轻、锈层较薄的青铜器。

青铜器焊接技术始于商代，盛行于春秋，多用于青铜礼器主体和附件的连接，是最为重要的分铸技术之一。确定焊接所用焊料的材质，则是研究焊接技术的重要内容。通常情形，焊料存在于器物狭窄区域，而常规XRF检测时，检测窗需紧贴待测区域，常出现焊料“看得见、摸得着，但测不到”的困境。长焦XRF技术，工作距离可达20 cm，可在远离焊料的情况下检测，从而确定其材质。但因探测信号较弱，需延长检测时间，且一般仅做定性分析。

青铜器结构是确定其铸造方法、分铸方式以及制作工序的重要依据，是工艺研究中最核心的内容。传统的X射线探伤技术，可利用X射线的穿透性，区分不同密度和厚度的部位，推测青铜器的结构，但受限于其平面成像的特点，难以准确还原结构复杂的器物。X射线断层扫描（X-CT）通过计算机重建器物三维立体图像，可清晰展示其内部结构，是青铜器工艺研究最重要的手段。同时，X-CT可与高精度三维扫描互为补充，前者擅长青铜器内部结构的复原，后者优势在于表面纹饰的精准提取，通过两者的数据转换、模型对齐、数据融合等处理步骤，可获得结构准确、纹饰清晰的青铜器三维数字模型，为其工艺研究、展示利用提供数据支撑。

此外，定制化改装的超景深显微镜、拉曼光谱仪（Raman）、X射线衍射仪（XRD）等，可原位观察和检测青铜器表面纹饰、铭文、镶嵌物等，确定器物的装饰工艺。上述原位检测技术，能够在完全无损的条件下，揭示青铜器金相组织、合金配比、内部结构、焊料和镶嵌物材质等，为馆藏珍贵青铜器工艺信息的提取提供关键技术支撑。

典型应用案例

越王勾践剑作为吴越青铜剑的典范，代表了中国古代青铜剑铸造的最高技艺。通过原位金相和XRF线性拟合法确定剑身含锡量约18%～20%；依据X射线探伤确定剑身和剑茎一体铸造，剑格为后铸铸接，同心圆剑首则单独铸造再铸焊连接在剑茎末端；采用原位金相和XRF，结合模拟试验确定剑身菱形纹采用热镀锡方法制作。据此推测越王勾践剑的制作工序：一体铸造剑身和剑茎；采用热镀锡法在剑身制作菱形花纹；剑身打磨、开刃；在剑身和剑茎结合处铸接带有凹槽的剑格；单独铸造同心圆剑首；铸焊连接剑首与剑茎；在剑格凹槽处镶嵌蓝琉璃和绿松石。

曾侯乙尊盘作为商周青铜器的巅峰之作，代表了先秦时期青铜礼器分铸工艺的最高水平。我馆联合故宫博物院利用工业CT获取了器物完整三维数据模型，结合长焦XRF确定连接部位的焊料成分。从铸造学角度，分析尊盘的主体和附件的结构、数量和连接方式，表明：尊由1具尊体、33只附件和19只U形锁扣，通过32处铅锡焊、23处铜焊连接成一体；盘由1具盘体和44只附件，通过8处铸接、52处铅锡焊、4处铜焊连接成一体。

曾侯乙编钟作为迄今世界上规模最大、保存最完整的青铜乐器，代表了中国先秦礼乐文明与青铜铸造技术的巅峰。为迎接2028年曾侯乙编钟出土50周年，湖北省博物馆在编钟入选《世界记忆国际名录》之际，启动编钟三年研究计划，在工艺方面聚焦编钟合金配比测定和数字模型构建。前期研究表明，原位金相观察揭示其二次枝晶臂间距较常规铸造青铜器显著偏宽，佐证了预热铸型与延缓脱型工艺的应用；XRF线性拟合技术测定编钟基体锡含量，精准对应先秦编钟声学性能最优的合金配比区间。针对器壁较厚导致工业CT难以清晰呈现表面纹饰的问题，采用工业CT与三维扫描融合技术，将编钟甬部中空结构数据与外部精细纹饰数据整合对齐，经修整生成兼具内部结构和外部纹饰的高保真三维数字模型，为后续声学有限元分析、发声机理研究、数字编钟特展等奠定了坚实的数据基础。目前，该研究仍在持续推进中。

此外，湖北省博物馆联合中国科学院高能物理研究所，利用加速器CT、长焦XRF等技术开展的曾侯乙建鼓座工艺研究成果，将于9月以科技成果展对外呈现；此前，在国家社科基金的支持下，开展的曾侯乙青铜器工艺研究，已出版《探古论金：曾侯乙青铜器工艺图解》；在湖北省社科基金和湖北省博物馆馆级课题的支持下，开展的曾国青铜器工艺研究成果，将于年内出版。

总结与展望

研究实践表明，原位金相、XRF线性拟合法、长焦XRF、X-CT等多模态原位检测技术，能够在无损条件下精准提取馆藏珍贵青铜器的工艺信息，确保文物完整留存、世代传承，是践行“文物属于人民”理念的具体体现。同时，科研成果通过展览、科普与数字共享等方式回馈社会，则是“文物服务人民”的生动实践。湖北省博物馆将持续深耕馆藏青铜器工艺研究，优化工艺信息提取体系，深化理论研究与实验验证，深度挖掘长江中游青铜文明的科学价值与文化内涵，以文物科技创新赋能优秀传统文化创造性转化、创新性发展，让千年青铜文明持续焕发时代光彩。

（作者单位：湖北省博物馆）

皮革制文物劣化机理研究

周旸

制革史是人类发展史极其重要的组成部分，与人类文明史的发展息息相关，我国大量出土或传世的皮革制文物，对于实证中华文明具有重要价值。与其他类别有机质文物相比，皮革制文物用材多样、鞣制工艺复杂、劣化机理不明，保护难度更大，相比国外数十年皮革制文物的研究经验，国内急需弥补相关基础研究和关键技术突破等不足。

针对皮革文物表征技术发展呈点状分布、集成性不强，特别是微生物对皮革制文物的影响未得到足够重视，项目整合多维度技术，首次建立覆盖宏观形貌、微观结构及分子层面的病害分级量化指标体系，在病害分类的基础上完成17种皮革制文物病害识别判定和分级量化，建立皮革制文物病害评估方法1套，涵盖羟脯氨酸含量检测、体视显微镜、扫描电子显微镜（SEM）、显微型计算机断层扫描系统（显微CT）、X射线能谱仪（EDS）、衰减全反射-傅里叶变换红外光谱（ATR-FTIR）、差示扫描量热法（DSC）、柔软度及色度色差测试等技术，其中SEM法通过获取皮革的显微图像特征，为劣化程度分级提供了关键依据。该套评估方法可用于判断皮革制文物的劣化程度、预测潜在的病害风险，为皮革制文物劣化程度精准评估提供了可量化、可重复的技术范式。通过追踪微生物群落结构动态变化、胶原蛋白酶等功能蛋白表达规律及代谢产物演变特征，系统阐明了关键病害微生物对皮革胶原纤维的降解路径与动态腐蚀机制，通过解析不同环境中微生物的群落组成、优势菌种及传播路径，明确了环境微生物与文物病害微生物的溯源关系及互作机制，为针对性优化馆藏保存环境、制定皮革制文物预防性保护策略提供了全新的环境调控思路。

鞣剂作为皮革加工的核心材料，其成分与结构直接影响皮革的热稳定性、柔韧性和耐用性等性能。由于不同鞣剂与皮胶原的结合机理存在差异，不同鞣法所制得的皮革制文物在长期保存过程中呈现出不同的劣化特性。项目创新性利用SAXS周期性衍射峰特征实现有机/无机鞣剂的快速区分，结合EDS、Py-GC/MS实现皮革鞣剂的精准识别，形成了“材质确认—大类初判—种类精鉴”三级鉴定流程。该体系成功应用于跨越战国至元代、来源涵盖亚欧的10件考古皮革样本，实现了植鞣、油鞣、铝鞣及未鞣生皮等多类型的准确鉴别，显著提升了工艺溯源的科技支撑能力。利用天然鞣剂材料，高度复原古代皮革鞣制工艺，成功制备了涵盖植鞣、铝鞣、铁鞣、烟熏鞣、硝面鞣和油鞣等6种鞣法的古代皮革模拟样品，并系统研究了这6种古代鞣法的鞣制机理，阐明了植鞣依赖氢键网络、铝/铁鞣基于配位键合、烟熏鞣涉及共价交联、硝面/油鞣以物理作用为主的差异化稳定机制，明确了铁鞣中Fe^{3+}的催化氧化效应是其热老化加速劣化的关键，植鞣则凭借单宁抗氧化性表现出最优热稳定性，通过微生物群落分析，揭示鞣制工艺抗生物劣化的微观本质，为预防性保护策略的制定提供了直接科学依据。

利用科技手段分析文物劣化机理有助于了解皮革文物老化发生、发展、变化的过程及影响皮革老化的因素，为皮革文物的保护提供科学依据。针对饱水环境下皮革制文物的劣化，项目融合PCR、免疫学、蛋白质组学与代谢组学，建立了高效的降解产物精准检测方法，系统揭示了饱水皮革中胶原蛋白的降解产物，形成了从“腐蚀分析、产物检测到老化模拟”的完整集成技术平台，基于所建立的饱水皮革微生物模拟劣化样品制备方法，结合多场景单一微生物腐蚀分析、病害形貌观察，以及傅里叶变换红外光谱、机械性能测定、元素含量分析、BCA蛋白定量与蛋白质组学等多种表征手段，系统阐释了饱水环境下微生物劣化皮革文物的特征过程及其与环境因素的关联。动力学研究将饱水皮革文物保护从传统的经验性修复提升至基于分子机理的预测性、预防性科学保护阶段。通过构建的饱水环境下胶原纤维网络形态变化的分析模型，揭示了不同离子作用下胶原纤维d周期的改变及其对纤维网络结构的调控机制，并通过反应级数、半衰期等动力学参数，阐明了酸、碱饱水环境对胶原网络形态演变的作用规律。通过研究化学模拟饱水皮革样品获得大量数据，以数据建立了涵盖厚度、质量、红外光谱及热分解温度（Td）等多维指标的胶原形态变化表征形态，并结合水分、脂质、羟脯氨酸、氨基酸和多种降解物等成分的流失规律，构建了形态—成分流失的可视化模型，为阐释饱水埋藏环境中皮革文物的劣化机制提供了重要工具。研究明确了K^+、Na^+、Mg^{2+}、Al^{3+}、Ca^{2+}和Fe^{3+}等离子在胶原纤维中的配位位点及其迁移速率的差异，在此基础上构建了离子在饱水环境中与胶原纤维的配位—迁移行为示意图，为皮革类文物在饱水环境中的科学保护提供了理论依据与技术支撑。

针对干燥环境下皮革制文物的劣化，项目系统构建了温度、湿度、紫外辐射、金属离子等多因素作用下的皮革加速老化实验体系与动态分析模型。通过多尺度系统分析，揭示了湿热耦合引发水解性整体崩解、湿-紫外交联导致氧化性界面侵蚀这两条差异化破坏路径，更重要的是通过动力学建模与统计分析，明确了二者在驱动化学降解与物理失效中的不同角色与协同关系，这为评估馆藏或出土皮革文物的保存风险、预测其寿命，以及制定针对性的环境控制和保护干预策略提供了深刻的理论依据和科学的决策支持。动态分析模型阐明了劣化过程的两条核心路径协同驱动：路径Ⅰ（湿-紫外驱动）以光氧化和物理松弛为主，率先破坏纤维间联结，快速触发力学失效；路径Ⅱ（湿-热驱动）则以水解反应为核心，直接攻击胶原主链，导致材料的根本化学性解体，两条路径的竞争与协同，共同决定了皮革在复杂环境下的最终衰变命运。系统应用蛋白质组学技术于古代皮革研究，成功鉴定出胶原蛋白α-1（Ⅰ）链、α-2（Ⅰ）链、α-1（Ⅲ）链以及Q51597、A5PK73等5种主要降解产物，为揭示干燥埋藏环境中皮革文物的劣化机制提供了分子依据，进一步明确了Ⅰ型胶原主要贡献材料的机械强度，而Ⅲ型胶原则与弹性相关，二者的降解比例变化直接影响皮革文物的物理性能。建立了首个结合质量损失、羟脯氨酸含量、机械性能及微观形貌等多个关键指标的皮革文物热劣化三级（轻、中、重度）定量评估框架，为文物保存状态的科学诊断提供了可量化的标准。面向文物保护一线需求，原创性研发了两种具有自主知识产权的快速检测技术：基于竞争免疫层析的种属鉴定试纸和基于磁珠信号放大的高灵敏比色传感器。二者形成了从现场快速筛查到实验室精确定量的完整解决方案，实现了对皮革胶原降解产物的准确、快速、微损鉴定，填补了该领域现场快速分析技术的空白。

未来，项目将坚持科技创新引领，遵循文物保护特点规律，通过多学科协同促进学研用深度融合，积极开展皮革制文物劣化诊断与修复保护相结合的延伸研究，在解决科学性问题的同时，促进皮革制文物相关理论研究的科普性发展。

（作者单位：浙江理工大学）

科技赋能纸质文献规模化脱酸保护与传承

张金萍

我国馆藏古籍与近现代纸质文献历史价值突出，但受材质、年代与保存环境的影响，纸张脆化、变色、残缺等病害频发，尤其是以机制纸作为载体的近现代纸质文献极易出现酸化问题，严重者触之掉屑掉渣，亟待保护处理。尽管我国馆藏纸质文献普遍面临酸化问题，然而现有技术仅能满足小批量处理需求，尚未实现规模化脱酸保护。

实际上，纸张酸化是一个世界性问题。目前，世界范围内的脱酸技术以液相法为主，例如以德国ZFB公司为代表的溶液型无水液相脱酸处理技术、以美国BookKeeper为代表的悬浮型脱酸技术和以德国GSK为主的水溶液脱酸技术。然而，由于国内外纸张在造纸原材料、造纸工艺、纸张厚度、印刷方法、装帧形态等方面呈现诸多差异，进口脱酸设备往往存在“水土不服”等问题，完全的“拿来主义”并不是理想方法，自主开发基于国内纸质文献特点的脱酸技术势在必行。

在此背景下，由南京博物院牵头实施的国家重点研发计划项目“馆藏中华古籍与近现代纸质文献规模化脱酸装备试制及实证（2022YFF0904200）”，历经三年理论研究、技术攻关与研发制造，按照前端理论研究—中端研发制造—后端应用评估的技术布局，基于我国馆藏古籍与近现代纸质文献特点，着力开发集成文献浸渍、快速干燥、脱酸液高效回收、脱酸流程信息在线采集、设备智能控制及安全预警等功能系统，成功试制出单批次处理量可达80公斤以上的纸质文献规模化脱酸装备样机，并在实际环境中顺利开展3批次应用实证。装备运行过程中，纸质文献规模化脱酸装备通过PLC中央控制系统与装备内设液位、温度、压力传感器等编程联网，能够实现流程自控和监测及主动安全保护，充分保护古籍与近现代纸质文献安全。

我国古籍与近现代纸质文献与国外精装文献的显著区别为较少采用精装形式且普遍没有硬实封面和高强度书脊，在酸化脆弱状态下无法承受国外规模化脱酸模式所采用的机械扰动方式。为此，以我国古籍和近现代纸质文献纸张特性为理论研究指导，针对文献纸张松软特点，项目重点提出“实现批量整本文献静态分页的脱酸关键技术综合解决方案”，基于独创的整本文献静态分页技术通过负压压差实现文献自动分页，提高脱酸传质效率，整个规模化浸渍环节无需机械外力扰动，能够解决传统工艺易损伤纸张、脱酸不均匀的难题，从根源上提高纸张脱酸效果。此外，解决方案中其他技术如批量整本文献快速干燥技术能够确保不同厚度文献的干燥均匀性；脱酸液高效回收技术能够提高脱酸液回收率及重复利用性能；脱酸工艺控制与检测全自动技术能够确保装备全自动安全稳定运行。经实证检验，依托纸质文献规模化脱酸装备，脱酸处理后的批量整本文献保护效果满足各项需求。

在脱酸浸渍环节中，使用安全、稳定、均匀、无毒的无水脱酸液是保障脱酸后文献纸张冷抽提pH值达到合理区间、纸张无明显变形、各种油墨字迹不褪色等保护指标的又一重要环节。基于对文献纸张微观结构和理化性能的研究结果，在脱酸质在纸张表面吸附—渗透模型的指导下，项目组采用溶剂协同策略研发脱酸溶剂，在保证脱酸液稳定性的同时有效降低氟碳溶剂成本投入。

在纸质文献规模化脱酸装备实证运行及关键规模化脱酸保护技术集成环节，不可避免地遇到一些自研技术在实验室小试、中试及大试的迭代过程中所产生的设备兼容性、设备稳定性及环境变量干扰问题。例如负压浸渍系统中溶剂持续性蒸发与冷凝回收系统中溶剂周期性回流所造成的液面差；快速干燥系统中脱酸溶剂快速蒸发所带走热量与文献干燥温度需求所导致的温度差；冷凝回收系统中少量水分混入所导致的溶剂污染及纸张变形风险等等。针对上述问题，项目依次通过增设补液装置、补热装置及水分离器等方式对纸质文献规模化脱酸装备进行一体化升级调整，保障装备运行稳定性及批量文献脱酸效果。

此外，项目组在纸质文献规模化脱酸装备试制及实证环节中始终以“安全”为第一要义，体现在四个方面。一为规模化脱酸装备样机的运行安全，体现在关键脱酸保护技术与工艺的适用性，各工序的协调性，操作条件及系统运行状态的稳定性与安全性。在装备样机运行过程中，一系列关于检测、操作的指令皆由装备的PLC 中控系统指导，能够主动巡查各路传感器，探测装备运行状态，当输入信息超过装备安全运行设定值，装备将发出声光报警信息，进入安全保护程序。二为规模化脱酸应用实证过程中的脱酸材料安全，体现在脱酸液中脱酸质与脱酸溶剂的合理选用。脱酸质始终满足无毒无害需求，可用于医药、食品、消防等其他多种工业生产过程，安全且环境友好；脱酸溶剂均为安全稳定的惰性溶剂，不燃不爆且多用于电子产业、消防行业，能够确保装备及场地安全。三为酸化古籍与近现代纸质文献安全，体现在破损书籍保护与文献干燥监控。在装备样机的浸渍脱酸环节，项目针对酸化、破损状态严重的书籍文献采用特制的柔性硅胶进行保护处理，防止掉页或松散；文献干燥环节中也在设备及随行文献样品中添加多处温度传感器，实时监测文献干燥状态，防止过度干燥情况发生。四为规模化应用实证过程中研究人员的健康安全。为更好地推进实证工作，项目对研究人员进行预先培训，学习突发情况下的紧急保护措施，营造良好的车间通风环境，确保研究任务安全推进。

在评估应用方面，项目建立脱酸方案建议数据库，收集全国多家图书馆与博物馆馆藏古籍与近现代纸质文献纸张数据，对酸化程度与基本情况进行系统分析，为脱酸装备改进、脱酸体系优化及脱酸效果评估提供参数依据；编写基于无水液相的纸质文献批量脱酸效果评估技术规范，采用主客观结合的评价方法，在指标全面性、阈值科学性、方法准确性等方面进行完善，更好地评估脱酸效果，并形成脱酸处理档案。

总体而言，项目成果具备较强的实用性、可复制性与推广价值，应用前景广阔。在文物保护方面，可实现酸化文献批量抢救，大幅延长文献寿命，缓解珍贵文献损毁压力；在技术层面，可降低批量文献处理成本，提高脱酸液回收效率与文献干燥速率；在产业化层面，可推动我国纸质文物保护技术从实验室走向规模化应用，为中华优秀传统文化的永续传承提供坚实科技支撑。

（作者单位：南京博物院）

（上接7版）

基于冬季降雪冻融期现场调查及室内试验分析，构建了粉化掏蚀浅表层体积膨胀阶段近红外反射光谱与颗粒组成、密度、含水率宏微观映射关系，明确了结构弱化、粉化脱落阶段近红外反射光谱与含水率等关联关系；构建了片状剥落浅表层物质迁移阶段色度与矿物成分、颗粒组成、孔隙分布的宏微观映射关系，明确了颗粒团聚、片状剥落阶段的色度与矿物成分、颗粒组成等关联关系；构建了顶缘滑移浅表层疏松阶段表面孔隙率与密度、波速、土体孔隙率宏微观映射关系，明确了融雪冲刷、滑移垮塌阶段孔隙率与密度、波速等关联关系；构建了根系层分离界面弱化阶段含根量与孔隙度、持水量、干密度的宏微观映射关系，明确了根系层分离阶段含根量与孔隙度、持水量等关联关系。宏-微观映射关系的建立，使冻融病害从经验判断逐步转向基于指标检测的量化识别，为现场病害评估提供了更加客观的技术手段。管理和技术人员可通过颜色变化、波速、根系发育等表面信息，快速判断浅表层结构变化情况，更早发现隐蔽风险，为科学决策和及时干预赢得时间。

根据冻融病害典型类型及宏微观表征方法，考虑原位监测无损/微损技术、表征指标精准度的要求，筛选适宜土遗址冻融病害原位监测指标并划分为3级10类；依据冻融病害的作用范围和表现特征，提出由宏观到微观的“大尺度区域环境、中尺度遗址整体状态、小尺度病害发育过程”三级原位监测体系；在监测指标分类体系的基础上，对不同指标的重要性和优先级进行科学排序，划分为“必测项”“一般项”和“选测项”三个级别；研发非接触式监测技术开展土遗址冻融监测，减少对土遗址本体的干扰，融合结构化和非结构化数据进行准确的冻胀力监测分析；构建了高寒高湿区、积雪突融区、植被覆盖积雪区土遗址冻融病害原位监测技术，通过色度、近红外反射光谱等宏观指标，以及矿物成分、孔隙率等微观指标的监测明晰了冻融病害劣化过程及关键节点，并已在3处遗址应用示范获取了连续一年的监测数据。项目所提出的分级监测体系，突出“少而精、分层级”的思路，既满足全面掌握遗址状态的需求，又兼顾基层单位的实际条件，通过明确“必测项”和“一般项”，可有效避免监测项目盲目铺开、数据堆积却难以利用的情况，使有限的人力、资金和设备投入发挥更大效益，提升监测工作的针对性和可持续性。

项目研究解决了土遗址冻胀融蚀响应与赋存环境关联关系、差异冻融过程水—盐—热—力耦合作用下的土遗址劣化机制、冻融劣化细微观特征与宏观现象映射关系等3项科学问题，实现了基于土遗址冻胀融蚀响应的环境边界条件优化、基于冻融环境多要素模拟的加速实现路径、宏观现象动态识别与细微观结构表征、基于宏微观映射关系的无损/微损原位监测等4项技术。项目研究成果已在多处典型遗址开展示范应用，验证了相关技术和方法在实际环境中的可行性和稳定性，初步形成了一套可复制、可推广的冻融病害监测与风险管控路径。相关经验可为冻土区土遗址日常维护、年度工作计划制定和保护工程前期论证提供参考，推动土遗址保护工作由被动抢修向主动预防转变。

（作者单位：敦煌研究院）

五版、六版责编：张 硕 何文娟 陈尚宇
七版、八版责编：张 硕 陈尚宇 何文娟