

文章编号:1005-1538(2026)03-0077-11

DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20250903733

重庆武隆关口西汉一号墓出土木牍的保护

顾来沅¹,赵阳^{2,3},黄伟¹,刘勇⁴,叶琳¹,史少华^{2,3},方北松^{2,3}

[1. 重庆市文物考古研究院,重庆 400013; 2. 荆州文物保护中心,湖北荆州 434020;

3. 出土木漆器保护国家文物局重点科研基地(荆州文物保护中心),湖北荆州 434020; 4. 中国社会科学院考古研究所,北京 102488]

摘要:重庆武隆关口西汉一号墓出土饱水木牍是研究汉代初期墓葬制度的重要实物。为科学制定保护方案,本研究在现场保护的基础上,综合运用树种鉴定、含水率测定、光学显微镜观察、红外光谱分析、离子色谱及电感耦合等离子体发射光谱等技术,对木牍保存状况、降解特征及环境离子影响进行评估。结果表明,木牍木材为油杉,处于中度降解状态,显微结构受损明显,红外光谱显示纤维素及半纤维素特征峰显著减弱,化学结构破坏明显,离子浓度分析显示铁离子影响程度较轻。针对其糟朽、氧化变色及变形等病害,根据科技分析结果,采用连二亚硫酸钠脱色与乙醇-十六醇脱水联合方法进行保护处理,并通过色差监测及尺寸测量对保护效果进行系统评估。处理后的木牍明度值显著提升,尺寸收缩率控制在2.5%以内,胎体恢复浅黄色,字迹清晰完整,达到了保护、研究与展示要求。本实践有效贯彻了考古与文物保护一体化理念,为同类饱水木牍文物的保护实践提供了科学参考。

关键词: 关口西汉一号墓;饱水木牍;保护**中图分类号:** K876.6 **文献标识码:** A

0 引言

关口一号墓位于重庆市武隆区江口镇乌江腹地,是2023年乌江白马航电枢纽工程重点考古发掘点之一。该墓是目前发现年代最早、纪年明确的西汉初期墓葬,亦是西南地区保存最为完好的木椁墓,同时也是长江上游地区一次性出土漆木竹器数量最多的墓葬。墓中共出土各类珍贵文物680余件,包括竹器、木器、漆器、陶器、铜器、玉器及纺织品等,其中尤为重要是干支木牌、告地书、遣策等木牍^[1],为墓葬断代、墓主身份认定及名物对照等问题提供了直接依据。此外,这批木牍也是西汉时期告地书发展演变与等级制度研究的重要实物资料,对探讨巴蜀地区汉文化确立过程中巴、蜀、楚、秦文化的交汇融合研究具有极其重要的学术价值。

在出土饱水简牍类文物的保护方面,目前国内已有一定探索。如管理等^[2]对江西南昌西汉海昏侯刘贺墓出土饱水竹简的现场应急保护、提取包装、运输及室内清理等环节进行了系统梳理。卫扬

波等^[3]在湖北随州市周家寨墓地M8出土简牍的清理保护中,研发了适用于饱水脆弱简牍的揭取、清洗与脱色的技术,有效支持了简牍的识读和信息提取。吴昊等^[4]则以海昏侯墓葬出土竹简为对象,探索应用生物碱和表面活性剂对失水干缩竹简进行复形处理。然而,受不同地域环境与埋藏条件的影响,出土脆弱简牍的保存状况差异显著,需因地制宜地制定科学保护方案。针对关口西汉一号墓木牍的具体发掘和保存情况,重庆市文物考古研究院联合荆州市文物保护中心、中国社会科学院考古研究所,系统开展了现场发掘、清理、保护、信息采集、文字释读、科技分析及实验室的脱色脱水等一系列工作,为后续研究和长期保存奠定了重要基础。

1 木牍的出土情况

关口西汉一号墓墓室内沉积的淤泥厚度约1 m左右,黏度较高。木牍全部出土于头厢最底层靠东北角位置,其上方的淤泥中叠压有大量的漆木器

收稿日期:2025-09-05;修回日期:2026-03-17

基金项目:国家社会科学基金项目(24BKG013)、重庆市科研机构绩效激励引导专项(CSTB2024JXJL-YFX0058)资助

作者简介:顾来沅(1987—),女,高分子化学与物理专业,硕士研究生,副研究馆员,研究方向为金属文物及竹木漆器类有机质文物的保护修复,E-mail: gulaiyuan101@163.com

(图 1)。在逐层清理椁室内文物的过程中,当发掘至木牍所在层位时,发现编绳已全部朽烂,无法辨识。木牍散落于椁室底部多处,表面颜色已严重氧化,呈棕褐色,无法用肉眼辨识字迹。该批木牍经两千余年地下埋藏,长期处于饱水状态,加之受上方器物叠压影响,部分出现断裂、变形和残缺等病害。为充分提取现场信息并减少环境突变对文物的影响,项目组在详细调查关口一号墓埋藏环境与墓葬特点的基础上,提前制定了周密的发掘及保护预案。通过环境调控、保湿、固型等措施,实现了出土木牍的现场妥善保护^[5]。



图 1 木牍的出土情况

Fig.1 Excavation of wooden slips

2 木牍的现场清理及信息提取

2.1 木牍的现场清理

2.1.1 应急预处理 发现疑似木牍文物后,立即暂停发掘工作,对其进行全方位、多角度的摄影和摄像,详细记录其原始埋藏状态及相对位置关系;随后,采取覆盖保鲜膜的方式进行临时保湿,以减缓木牍因水分蒸发而导致的失水变形或开裂。

2.1.2 木牍提取 在明确木牍整体分布情况后,制定提取方案。由于头厢内多层置物隔板坍塌导致器物堆积,除 5 枚呈扇形有规律叠压的木牍外,其余木牍均已散落。针对叠压的木牍,严格遵循从上往下的顺序逐层、逐支地揭取,每揭取一枚便立即进行编号与现场记录。

2.1.3 室内清洗 将木牍安全转运至现场保护实验室,浸泡在装有去离子水的保鲜盒中,待表面淤泥完全软化后开始清洗;如图 2 所示,严格控制好水流速度,选用羊毛笔进行清洗,在不触及木牍字迹的前提下,以适中的力度清洗木牍表面的淤泥等污染物,坚持“最小干预”原则。



图 2 木牍的现场清洗

Fig.2 On-site cleaning of wooden slips

2.1.4 临时保存 初步清洗完成后,选用尺寸适合的玻璃片对木牍进行固定,并将其放置于盛有去离子水的保鲜盒中,饱水存放,确保文物本体的稳定。

2.2 木牍的信息提取

经过初步清洗后,木牍表面虽无明显污染物覆盖,但因长期埋藏导致本体颜色氧化呈棕褐色,绝大部分文字难以通过肉眼直接辨识,如图 3a 所示。为此,采用红外相机对所有木牍进行影像采集。红外光具有较强的穿透能力,能够透过表层微量沉积物并有效区分墨迹与木质基底,从而获取较可见光下更为清晰的字迹信息。赵桂芳等^[6]对清华简图像信息采集的流程、技术要求及注意事项等进行了系统介绍,为本批木牍的红外拍摄提供了有益参考。通过红外影像整理,共识别并分类出干支木牍 23 枚,告地书 1 枚,遣策 8 枚。

干支木牍形制较为统一,尺寸相近,长约 3 cm,宽约 1.2 cm、厚约 1 cm,出土时均呈散落状态,整体呈深褐色。由于木牍所书多为单字,红外图像增强技术对其识别效果较好。此外,所有干支木牍一侧距上端约 1 cm 处均发现有穿孔,部分孔周可见墨书痕迹。其中一枚书写“今日”二字的木牍,其正面上端有宽约 0.5 cm 的墨书标记,其余 22 枚干支木牍则无此标记,均单字书写十天干与十二地支。图 3b 展示了“戊”字木牍清洗后的正面及侧面红外成像结果。

告地书与遣策共 9 枚,尺寸不尽相同。其中一枚遣策长 14.1 cm,宽 3.3 cm,厚 0.2 cm,其余 8 枚尺寸较为接近,长约 22.3 ~ 23.6 cm,宽约 3.9 ~ 5.7 cm,厚约 0.3 ~ 0.4 cm。告地书正面约三分之一长及三分之二处可见编绳痕迹,惜已糟朽严重,触水即化,故及时的信息采集对于后续研究至关重要。

经红外相机拍摄,大部分文字得以辨识。清洗后遣策的可见光及红外影像如图 4 所示。这批木牍所载文字信息对判断墓葬年代、墓主身份以及评估墓葬整体价值具有关键作用。现场阶段的清理与信息提取工作,也为后续保护、考古整理与综合研究提供了重要的一手资料。

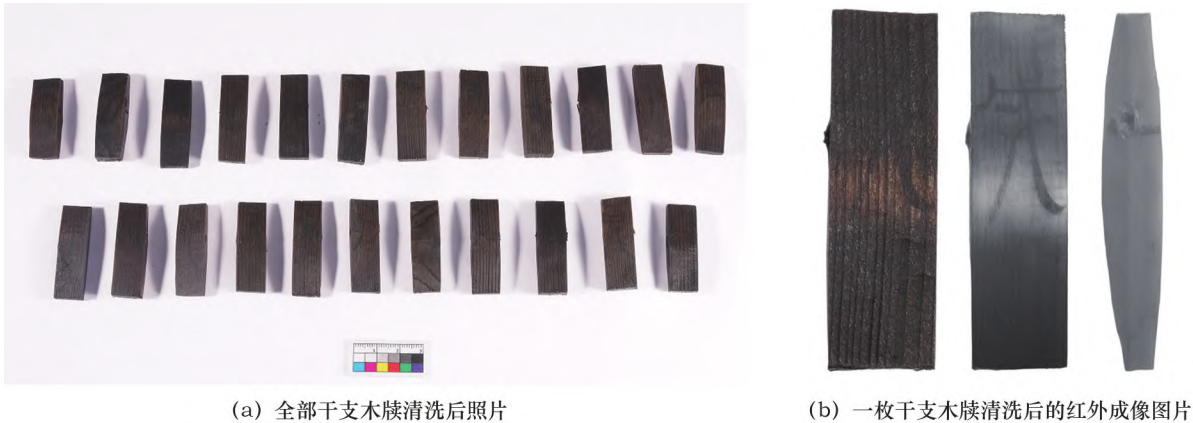


图 3 干支木牍清洗后及红外成像照片
Fig. 3 Cleaned wooden slips of the Heavenly Stems and Earthly Branches and infrared imaging photos



图 4 遣策清洗后及红外照片对比
Fig. 4 Post - decontamination photos and infrared imaging photos

3 检测分析

3.1 取样分析

这批简牍均为木牍,除编绳已完全糟朽外,木牍整体保存较为完整,主要病害类型包括饱水、变色、糟朽、少量变形、部分字迹模糊等。出土后经及时清理和低温保存,未发现明显的微生物损害。为评估木材的降解程度,选取少量空白无字木牍残片(如图 5 所示)进行树种鉴定、含水率测定、显微观察(LM)和红外光谱分析(ATR - FTIR)。此外,还对椁室内采集的原水样和木牍清洗后的浸泡溶液进行离子色谱分析(IC)与电感耦合等离子体发射光谱分析(ICP - OES),以评估铁离子等无机成分的来源

与迁移行为。



图 5 无字木牍取样部位
Fig. 5 Sampling area of the blank wooden slips

3.2 检测参数

所涉及的各项分析检测方法与仪器参数如下:
树种鉴定:采用滑走式切片机(Leica 2000R)制备木材切片,使用生物显微镜(Leica DM 2000 LED)进行观察与拍摄。树种判定依据国家标准 GB/T 29894—2013《木材鉴别方法通则》执行。
含水率测定:参照文物保护行业标准 WW/T 0086—2018《出土竹木漆器类文物含水率测定 失重法》进行测定。
光学显微观测:使用蔡司(Smart zoom5)超景深三维视频显微镜观察木材微观结构与保存状况。
红外光谱分析:采用赛默飞(Thermo Fisher Nicolet Summit X 型)傅里叶变换红外光谱仪,反射 ATR 模式采集,扫描范围为 4 000 ~ 600 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} ,背景扫描间隔 60 min,背景和样品扫描次数均为 16 次。
离子色谱分析:使用赛默飞(Aquion)高性能离子色谱仪,依据 HJ 84—2016《水质 无机阴离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-})的测

定 离子色谱法》测定液体中无机阴离子的浓度。

电感耦合等离子光谱分析:使用铂金埃尔默(Avio 200)电感耦合等离子体发射光谱仪,依据 HJ 776—2015《水质 32 种元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》测定液体中铁、钠、钾、镁、钙、铜等金属元素总量。

3.3 结果与分析

3.3.1 树种鉴定 在显微镜下观察样品横切面、径切面、弦切面三切面的显微结构,结果如图 6 所示。其生长年轮明显,早材至晚材急变;早材管胞径壁上的纹孔主要为两列或多列;晚材管胞壁厚度为厚壁;

交叉场纹孔为柏木型,每个交叉场的纹孔个数(仅指早材管胞)为 1~3 个。射线宽度几乎全部为单列,轴向胞间道存在。综合以上显微构造特征,鉴该木材树种为油杉(*Keteleeria* spp.)。相关研究表明,湖南省里耶一号古井出土的秦(木)简经显微切片鉴定,其木材包括水松、油杉和杉木三种^[7]176-182。北京大学藏一批从海外回归的秦简牍经检测亦包含油杉与云杉两类^[8]。油杉等木材具有硬度适宜、易于加工、木纹通直或略带波浪、结构均匀、稳定性好、干燥后不易开裂变形等优点,因而非常适合用于木牍的制作与长期保存。

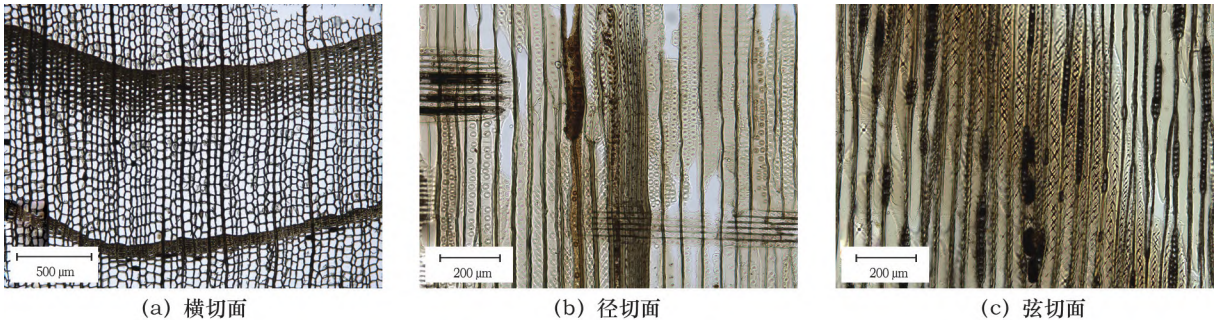


图 6 木牍样品的三切面显微照片

Fig. 6 Microscopic photographs of the three sections of the wooden slip sample

3.3.2 木材降解评估

1) 含水率测定

木材含水率是评估古代木材降解程度的重要指标。根据相关研究,木材的最大含水率(W_{max})可用于划分降解等级: $W_{max} \geq 400\%$ 为严重降解, $185\% < W_{max} < 400\%$ 为中度降解, $W_{max} \leq 185\%$ 为轻度降解^[9]。本研究选取少量饱水无字木牍样品,分别称量其原始重量及充分烘干后的重量,经计算得出样品的最大含水率为 210%。据此可初步判定,该批木牍的木材降解程度属于中度降解范畴。

2) 显微观察

采用蔡司 Smart zoom5 型超景深三维视频显微镜对缓慢烘干后的木牍样品进行显微观察。如图 7 所示,样品表面颜色较生材时期均匀加深,无明显开裂或皱缩,平整度较好;样品横切面可观察到大量不规则空腔,木材细胞明显皱缩,出现塌陷、扭曲等现象。这表明在缓慢烘干过程中,由于木材细胞结构特征以及内部水分压力过高、应力释放不当等因素,导致细胞结构的物理损伤。综合胎体糟朽程度判断,该批木牍不宜采取直接干燥法进行脱水处理。

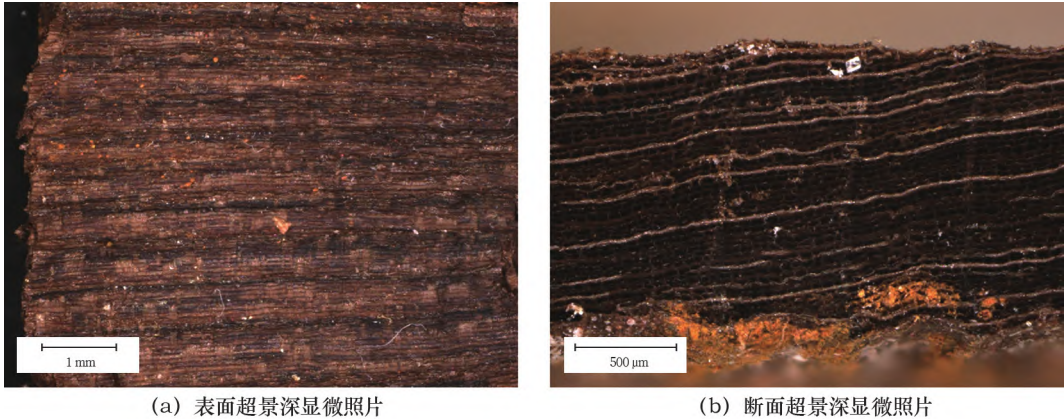


图 7 烘干后样品的显微图像

Fig. 7 Microscopic images of the samples after drying

3) 红外光谱分析

通过红外光谱表征木材中有机物分子特定官能团的变化,可以有效反映木材的降解程度。图8对比了木牍样品与现代杉木样品的 FTIR 光谱,二者之间存在显著差异。分析结果显示,木牍样品中位于 $1\,730\text{ cm}^{-1}$ 处归属于半纤维素 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动的吸收峰完全消失,表明半纤维素组分流失严重。此外,归属于纤维素和半纤维素分子的多个特征吸收峰亦几乎完全消失,包括 896 、 $1\,368\text{ cm}^{-1}$ 处的 $\text{C}-\text{H}$ 变形振动峰, $1\,101\text{ cm}^{-1}$ 处的 $\text{O}-\text{H}$ 振动峰, $1\,314\text{ cm}^{-1}$ 处的 CH_2 振动峰, $1\,053\text{ cm}^{-1}$ 处 $\text{C}-\text{O}$ 拉伸振动以及 $1\,159\text{ cm}^{-1}$ 处的 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动峰。综合上述光谱特征,可以判断该批木牍样品与现代杉木相比,其化学结构已遭到严重破坏^[9-11]。

3.3.3 离子浓度检测 铁离子是诱发饱水木质文物发生铁污染腐蚀和纤维素酸水解降解的关键因素^[12-13]。为评估墓葬埋藏环境及保存过程中铁离子的潜在影响,本研究采用离子色谱仪(IC)和电感耦合等离子光谱仪(ICP)对三类液体样品进行了离子浓度测定:关口一号墓椁室内未经扰动的原水样,未经清洗的木质椁板浸泡液,以及清洗后木牍的浸泡液。所有文物在取样前均采用超纯水浸泡,浸泡时间均大于6个月。离子色谱分析虽无法直接测定铁离子,但可精确测定 Cl^- 、 $\text{SO}_3^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$ 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 等无机阴离子的浓度。其中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 是常见的腐蚀性阴离子,对铁离子的迁移和腐蚀行为具有重要影响。电感耦合等离子光谱分析具有灵敏度高、检出限低的优势,不仅适合浓度范围较宽的铁离子

测定,还可同步测定 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等其他金属离子的含量。三类液体样品中各种离子的具体质量浓度检测结果见表1。

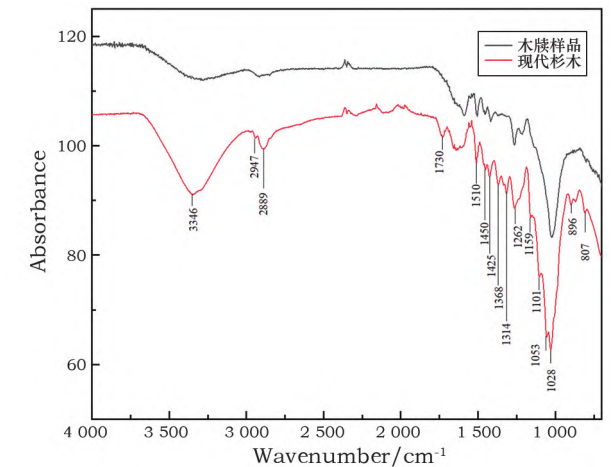


图8 木牍样品与现代杉木的 FTIR 光谱图

Fig.8 FTIR spectra of the wooden slip sample and modern cedar trees

从表1的检测数据显示,三组溶液中的铁离子浓度均处于极低水平。椁室内未经扰动的原水样反映了墓葬原始的埋藏环境,其铁离子浓度可用于判断地下水或土壤渗水是否富含铁质;而木质椁板和木牍浸泡液则代表从文物本体中溶出的物质,其铁离子浓度直接反映了木质文物内部及表面富集的铁离子水平。通过对比三组液体中各种离子,特别是铁离子浓度差异,可以判断关口一号墓出土木牍受铁离子的影响程度较低。

表1 IC及ICP分析结果
Table 1 IC and ICP analysis results (mg/L)

样品	检测结果									
	IC 分析				ICP 分析					
	Cl^-	NO_3^-	$\text{SO}_3^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$	PO_4^{3-}	Ca^{2+}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$	Cu^{2+}
椁室内未经扰动的原水样	2.86	0.02	4.61	0.12	36.20	7.26	3.71	8.84	0.01	0.00
未经清洗的木质椁板浸泡液	2.86	0.02	4.61	0.04	2.13	2.68	0.61	0.70	ND	0.00
清洗后的木牍浸泡液	0.86	0.02	30.00	0.04	2.21	0.72	0.33	0.20	0.07	0.05

注:ND表示检测结果低于方法检出限。

4 木牍的保护

4.1 木牍的脱色

这批木牍在饱水泥壤中埋藏两千余年,发掘时呈棕褐色。出土后虽经多重防护,颜色仍逐步加深为深褐色,与字迹颜色相近,严重影响了木牍的外观、文字释读及展示效果。研究表明,竹简埋葬过程

中,纤维素、半纤维素和木质素等成分均会发生降解,其中纤维素和半纤维素降解严重,木质素降解程度稍低^[14-16]。导致木材变色的因素有很多,总体可分为化学变色、光变色和微生物变色三大类,主要源于金属离子、酸、碱、氧气、紫外线和微生物等多种因素引起木材中基本发色基团和助色基团的增减和改变^[17-21]。

目前简牍脱色方法多样。管琼梅^[22]在对郭店竹简的脱色处理中,分别采用草酸、连二亚硫酸钠、乙二胺四乙酸三种不同比例的溶液进行试验,评估各种试剂的脱色效果及对字迹的影响。荆州文物保护中心^{[7]55-59}在走马楼出土的三国吴简脱色保护中,考察了草酸、连二亚硫酸钠、过氧化氢等几种脱色剂的对比应用。

关口一号墓出土木牍的在考古发掘现场已完成初步清洗和信息采集,之后一直浸泡在去离子水中低温保存。综合第 3 部分检测分析结果,这批木牍变色的主要原因为埋藏过程中降解作用与出土后光照影响的叠加,受铁离子的影响程度较低。木牍浸泡液中各种污染离子(包括铁离子)浓度极低,因此无需采用 EDTA-2Na 等络合剂进行处理。选择 5% 的草酸溶液和 1% 的连二硫酸钠进行小范围脱色试验。结果表明:无字木牍样品在草酸溶液中很快由深棕色变为浅棕色,但 15 min 后颜色复又加深;而采用 1% 连二亚硫酸钠浸泡的样品脱色速

度较慢,但无反黑现象。综合考虑,本次脱色最后选用 1% 连二亚硫酸钠作为脱色剂,具体操作步骤如下:

- 1) 信息记录:脱色前先拍照和红外扫描,记录原始痕迹。
- 2) 逐根浸泡:将纯净水进行加热至 60℃,使用 1% 连二亚硫酸钠溶液对木牍逐根进行浸泡脱色;
- 3) 过程监控:密切观察脱色过程,待木牍字迹清晰可辨后及时取出,并进行核对与信息采集。
- 4) 漂洗中和:将脱色后的木牍放入清水中漂洗,使用 pH 计检测漂洗液的酸碱度,反复更换去离子水至漂洗液连续多次呈中性,即完成全部脱色工作。
- 5) 完善档案:脱色完成后再次拍照和红外扫描,通过对比图像差异,验证保护效果并建立系统的数字档案。

告地书脱色前后对比如图 9 所示。脱色后木牍颜色较脱色前偏浅偏黄,字迹更加清晰可辨。



图 9 告地书(M1:85-1)脱色前后对比

Fig.9 Comparison of M1:85-1 before and after decoloration

4.2 木牍的脱水保护

饱水木牍长期浸泡保存易受微生物侵蚀,且墨迹存在褪色变淡的风险,因此脱水处理对于木牍的长期稳定保存至关重要。根据第 3 部分的检测分析,该木牍样品的含水率为 210%,显微观测显示木材断面存在明显塌陷与扭曲现象,红外光谱分析表明木材纤维素和半纤维素已发生严重降解。综合判断,这批木牍虽整体形貌较为完整,但木材胎体糟朽程度较为严重,不宜采用自然干燥法、醇醚连浸法或真空冷冻干燥法等常规脱水方法,需在脱水过程中同时进行填充加固。

基于上述情况,本研究采用乙醇-十六醇填充法进行脱水保护。十六醇化学性质稳定、呈中性,对木牍本体和墨迹无不良影响,脱水保护效果较为理想^{[7]87-95}。具体操作步骤如下:

- 1) 梯度乙醇置换:将绑扎固定后的木牍依次浸泡于体积分数为 50%、75% 和 99.85% 的乙醇混合溶液中,逐步置换木牍内部水分。采用便携式密度仪(日本 D-130N)监测乙醇溶液密度变化,以判断置换终点,每个浓度梯度的浸泡周期为 20 ~ 25 d。
- 2) 乙醇-十六醇复合浸渍:完成无水乙醇置换后,将木牍依次浸泡于体积分数为 50% 和 75% 浓度的乙醇-十六醇混合溶液中,恒温箱温度设定为 40℃,各浸泡周期为 7 d。
- 3) 纯十六醇置换:待乙醇-十六醇溶液稳定在 75% 以上后,将木牍转移至 100% 十六醇溶液中浸泡,鼓风干燥箱温度保持在 58℃ 左右,置换时间为 2 h。
- 4) 冷却定形:取出木牍置于在宣纸上自然冷

却,并使用棉线、玻璃条及定形器具对木牍进行定形处理,待完全冷却后放入经除尘、灭菌处理的塑料盒中暂存。

5) 表面残留清洗:采用三氯乙烯清洗木牍表面残留的十六醇,然后放置在避光、通风的环境中继续干燥 48 h。

6) 尺寸与重量记录:测量并记录脱水后木牍的长、宽、高尺寸及重量,作为后续保存与研究的基

础数据。

4.3 木牍脱色与脱水效果评估

为系统评价脱色与脱水保护处理对关口一号墓出土木牍的干预效果,本研究从尺寸稳定性、颜色变化及字迹清晰度等方面进行了综合评估。

4.3.1 尺寸稳定性评估 测量木牍脱水处理后的长、宽、高尺寸及重量,计算其收缩率与失重率,结果如表 2 所示。

表 2 木牍脱水保护信息统计

Table 2 Wooden slip dehydration information statistics

文物编号	尺寸									重量		失重率/%
	脱水前/mm			脱水后/mm			收缩率/%			脱水前/g	脱水后/g	
	长	宽	厚	长	宽	厚	长	宽	厚			
M1:75	141	33	2	141	33	2	0.00	0.00	0.00	12.66	9.75	22.99
M1:85-1	236	44	3	236	44	3	0.00	0.00	0.00	33.30	25.91	22.19
M1:85-2	235	47	3	234	47	3	0.43	0.00	0.00	28.53	22.30	21.84
M1:128	228	40	3	226	39	3	0.88	2.50	0.00	18.40	14.13	23.21
M1:129	238	57	4	236	57	4	0.84	0.00	0.00	46.92	36.20	22.85
M1:130	236	56	4	234	56	4	0.85	0.00	0.00	47.32	36.19	23.52
M1:131	235	42	3	233	42	3	0.85	0.00	0.00	28.06	21.59	23.06
M1:143	224	45	3	223	45	3	0.45	0.00	0.00	33.42	25.13	24.81
M1:144	228	40	2	228	40	2	0.00	0.00	0.00	18.68	14.51	22.32
失重率平均值												22.98

从表 2 中数据可以看出,采用乙醇-十六醇填充法对木牍进行脱水处理,脱水后样品平均失重率为 22.98%,长度、宽度、厚度方向的最大收缩率分别为 0.88%、2.50% 和 0.00%。除编号为 M1:128 的木牍脱水后宽度减少 1 mm、收缩率为 2.5% 外,其余木牍各向收缩率均在 1% 以内,表明乙醇-十六醇填充法对控制木牍尺寸稳定性具有良好的效果,脱水效果较为理想。

4.3.2 颜色变化评估 为客观评价脱色及脱水处理对木牍颜色的影响,本研究采用国际照明委员

会(CIE)推出的 CIE $L^*a^*b^*$ 色度系统进行定量测量。该系统通过 L^* (明度)、 a^* (红绿色度)、 b^* (黄蓝色度)三个参数表征颜色变化,色差 ΔE^* 计算公式为:

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中: ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 分别为明度差、红绿色品差、黄蓝色品差。

采用柯尼卡美能达 700d 型色差仪,分别在脱色前、脱色后及脱水后对木牍指定位置进行多次色差数据采集,结果如表 3 所示。

表 3 木牍色差数据采集

Table 3 Wooden slip color difference data collection

文物编号	阶段	色差数据						检测部位
		L^*	a^*	b^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	
M1:75	脱色前	20.91	2.58	2.73	-78.46	2.77	2.63	正面底部 1 cm
	脱色后	34.90	11.48	21.90	-64.47	11.67	21.80	
	脱水后	55.72	3.11	12.01	-43.66	3.30	11.90	
M1:85-1	脱色前	27.06	4.09	4.97	-72.31	4.28	4.87	正面顶部主字下 1 cm
	脱色后	33.59	7.67	15.36	-65.78	7.86	15.26	
	脱水后	48.35	2.24	6.31	-51.02	2.43	6.20	

(续表 3)

文物编号	阶段	色差数据						检测部位
		L^*	a^*	b^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	
M1:85-2	脱色前	25.92	5.87	6.89	-73.46	6.06	6.78	正面底部第三个 小字上 5 cm
	脱色后	34.04	8.09	15.92	-65.34	8.28	15.82	
	脱水后	59.06	5.34	12.56	-40.31	5.53	12.46	
M1:128	脱色前	21.40	1.50	2.22	-77.97	1.68	2.11	正面底部 1 cm
	脱色后	35.19	9.08	18.33	-64.19	9.27	18.22	
	脱水后	50.81	3.08	14.24	-48.57	3.27	14.13	
M1:129	脱色前	26.79	5.44	6.74	-72.59	5.63	6.63	正面底第二行 卯字上 5 cm
	脱色后	34.83	6.56	11.55	-64.54	6.75	11.44	
	脱水后	53.05	3.45	14.68	-46.33	3.64	14.57	
M1:130	脱色前	26.24	4.79	7.23	-73.13	4.97	7.13	正面底部第二行 四字下 5 cm
	脱色后	37.34	9.65	20.59	-62.04	9.84	20.48	
	脱水后	55.51	4.86	17.40	-43.86	5.05	17.29	
M1:131	脱色前	23.05	3.45	4.16	-76.32	3.64	4.05	正面底部第二行 束字下 1 cm
	脱色后	34.67	7.05	11.82	-64.71	7.24	11.72	
	脱水后	47.15	3.15	10.01	-52.22	3.34	9.91	
M1:143	脱色前	22.54	5.25	5.24	-76.83	5.44	5.13	正面底部 1 cm
	脱色后	34.88	10.29	19.34	-64.49	10.48	19.24	
	脱水后	57.96	4.81	18.19	-41.42	5.00	18.08	
M1:144	脱色前	24.52	7.42	7.45	-74.86	7.61	7.35	正面底部 1 cm
	脱色后	35.69	10.48	19.01	-63.69	10.67	18.90	
	脱水后	49.71	4.70	17.70	-49.66	4.89	17.59	
平均值	脱色前	24.27	4.49	5.29	-75.10	4.68	5.19	
	脱色后	35.01	8.93	17.09	-64.36	9.12	16.99	
	脱水后	53.04	3.86	13.68	-46.34	4.05	13.57	

对表 3 中数据进行分析,结果显示:脱色处理后,木牍明度值(L^*)由保护前的 24.27 显著提升至 35.01,总色差 ΔE^* 达 67.29,表明脱色处理有效减退了木牍底色。与此同时, a^* 值与 b^* 值较脱色前有所增大,表明脱色过程中出现一定程度的色相偏移。经脱水保护后,木牍明度值在脱色的基础上进一步提升至 53.04,较原始状态整体明度提升了 118%,而 a^* 值与 b^* 值则较脱色后有所回落,并使最终总色差 ΔE^* 为 48.65。综合上述结果,两个阶段处理后,木牍颜色由深褐色(低 L^* 、低彩度)转变为浅黄褐色(高 L^* 、中等黄度),视觉效果明显改善。

4.3.3 字迹清晰度评估 采用目视观察结合标准色卡法,对脱色脱水后木牍字迹的辨识度、完整性及对对比度进行定性分析。结果表明:处理后字迹清晰完整,笔画无晕染或剥落;胎体恢复为本色,与墨迹对比度显著增强。该工艺在去除污染的同时,有效保留了原始墨迹与基质特征,处理效果满足释读、采集及研究展示要求。从图 9、图 10 可以看出,脱色脱水处理后的告地书字迹清晰,胎体颜色恢复为木

胎原有颜色。

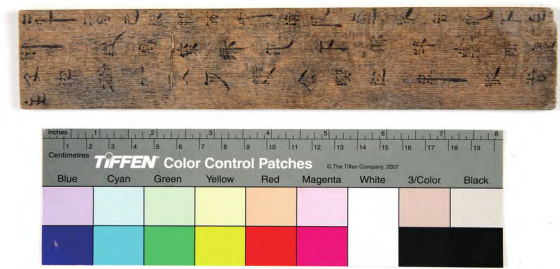


图 10 告地书(M1:85-1)脱水后照片

Fig. 10 Photograph of M1:85-1 after dehydration

最后,为了满足长期保存与展出的需要,采用 3% 的天然松香对脱水后的木牍表面进行封护处理,并定制了化学性质稳定且高透光的亚克力装具,既方便运输拿取,也便于展示。

5 结 论

关口西汉一号墓出土木牍可分为干支木牌、告地书和遣策三类,是为汉代初期墓制度的重要实物

参照。本研究在现场保护的基础上,对该批饱水木牍进行系统的科学分析与保护效果评估,得出以下结论:

1) 木材种属鉴定:通过显微结构观察,确定木牍所用木材为油杉(*Keteleeria* spp.),该树种材质适宜简牍制作,为汉代木材选用研究提供了实物依据。

2) 降解程度评估:木牍胎体最大含水率达210%,属中度降解范畴;显微观察可见细胞皱缩、塌陷等结构损伤,表明木材在饱水埋藏环境中已严重劣化,不宜采用直接干燥法脱水。红外光谱分析显示纤维素及半纤维素特征峰显著减弱,木材化学结构已遭严重破坏。

3) 变色因素评估:离子浓度分析表明,墓葬环境及文物本体中铁离子含量均处于极低水平,受铁离子的影响较轻,木牍变色的主要原因为埋藏过程中降解作用与出土后光照影响的叠加。

4) 保护处理效果:根据木牍降解程度和变色影响因素评估结果,采用连二亚硫酸钠脱色与乙醇-十六醇填充脱水联合保护工艺,取得了理想效果。脱水后木牍尺寸稳定,各向收缩率控制在2.5%以内,有效防止了干燥过程中的开裂与变形;木牍颜色由深褐色成功转变为浅黄褐色,明度值(L^*)整体提升约118%,视觉效果显著改善;处理后字迹笔画清晰完整,无晕染或脱落,完全满足学术释读、信息采集与展示要求。

综上所述,关口一号墓出土木牍材质为油杉,在埋藏环境中已发生中度至重度的物理与化学降解。本研究采用的乙醇-十六醇填充脱水法及相关脱色工艺,能有效稳定木牍尺寸、显著改善胎体色泽并提升字迹清晰度,保护效果显著。本工作践行了“边发掘、边保护、边研究”的一体化理念,为今后同类饱水木牍文物的发掘与保护提供有益参考。

参考文献:

- [1] 黄伟,叶小青,马晓娇,等.重庆市武隆区关口西汉一号墓[N]. 中国文物报,2024-01-19(6).
HUANG W, YE X Q, MA X J, *et al.* The Western Han Dynasty Tomb No. 1 at Guankou, Wulong District, Chongqing[N]. China Cultural Relics News, 2024-01-19(6).
- [2] 管理,吴昊,魏彦飞,等.江西南昌海昏侯墓出土竹简的现场及室内清理保护[J]. 文物,2020(6):6-11.
GUAN L, WU H, WEI Y F, *et al.* On-site and indoor cleaning and conservation of bamboo slips excavated from the tomb of Marquis of Haihun in Nanchang, Jiangxi Province[J]. Cultural Relics, 2020(6):6-11.
- [3] 卫扬波,黄玉洪,李玲.湖北随州市周家寨墓地 M8 简牍的清理和保护[J]. 文物保护与考古科学,2022,34(2):55-61.
WEI Y B, HUANG Y H, LI L. Cleaning and conservation of bamboo slips from Tomb M8 at Zhoujiazai Cemetery in Suizhou City, Hubei Province[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2022,34(2):55-61.
- [4] 吴昊,陈子繁,魏彦飞,等.出土饱水竹简失水干缩的复形研究——以海昏侯墓葬出土竹简等为例[J]. 文物保护与考古科学,2016,28(3):12-18.
WU H, CHEN Z F, WEI Y F, *et al.* Research on the restoration of dehydrated and dried-up bamboo slips: taking the bamboo slips found at the tomb of Huaihunhou as an example[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2016,28(3):12-18.
- [5] 顾来沅,黄伟,叶小青,等.重庆武隆关口西汉一号墓考古发掘的现场保护[J]. 西南文物考古,2025(2):265-273.
GU L Y, HUANG W, YE X Q, *et al.* On-site protection during the archaeological excavation of Western Han Dynasty Tomb No. 1 at Guankou, Wulong, Chongqing[J]. Southwest Cultural Relics and Archaeology, 2025(2):265-273.
- [6] 赵桂芳,贾连翔.简牍图像信息采集过程中的保护及要求[J]. 出土文献,2023(1):13-19.
ZHAO G F, JIA L X. Conservation and requirements in the imaging process of bamboo and wooden inscriptions[J]. Excavated Documents, 2023(1):13-19.
- [7] 荆州文物保护中心,长沙简牍博物馆.走马楼三国吴简保护修复报告[M].北京:文物出版社,2017:55-59,87-95,176-182.
Jingzhou Cultural Relics Protection Center, Changsha Jiandu Museum. Conservation and restoration report on the Zoumalou bamboo slips of the Wu Kingdom(Three Kingdoms Period)[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2017:55-59,87-95,176-182.
- [8] 北京大学出土文献研究所.北京大学藏秦简牍室内发掘清理简报[J]. 文物,2012(6):32-44.
Institute for Excavated Text Research of Peking University. New discoveries among bamboo and wood slips of the Qin Dynasty collected by Peking University[J]. Cultural Relics, 2012(6):32-44.
- [9] 包春磊.“华光礁I号”沉船木材降解评价及硫铁化合物分析[J]. 文物保护与考古科学,2021,33(5):60-70.
BAO C L. Evaluation of wood degradation and analysis of pyrite compounds of the “Huaguangjiao No. 1” shipwreck[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2021,33(5):60-70.
- [10] 李仁,张治国,金涛,等.沉船饱水考古木材内外降解特征表征[J]. 文物保护与考古科学,2024,36(6):91-102.
LI R, ZHANG Z G, JIN T, *et al.* Characterization of internal and external degradation features of waterlogged archaeological wood from sunken ships[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024,36(6):91-102.
- [11] 李仁,孙满利,焦立超,等.基于显微衰减全反射傅里叶变换红外光谱的沉船考古木材降解程度判别研究[J]. 分析化学,2025,53(6):967-975.
LI R, SUN M L, JIAO L C, *et al.* Research on the discrimination of degradation degree of archaeological wood from sunken ships based on microscopic attenuated total reflection Fourier transform

- infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2025, **53**(6):967–975.
- [12] MACLEOD I D, KENNA C. Degradation of archaeological timbers by pyrite: oxidation of iron and sulphur species[J]. Studies in Conservation, 1991, **36**(3):179–184.
- [13] NORBAKSH S, BJURHAGER I, ALMKVIST G. Impact of iron (II) and oxygen on degradation of oak – modeling of the *Vasa* wood[J]. Holzforschung, 2014, **68**(6):649–655.
- [14] 李梅英. 糟朽丝织品文物和饱水竹木质文物劣化降解机理及化学保护研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014:88–100.
- LI M Y. Research on the degradation mechanism and chemical protection of decayed silk textile cultural relics and waterlogged bamboo and wood cultural relics[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014:88–100.
- [15] 俞翔. 南昌海昏侯墓出土植物遗存降解及变色机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018:71–92.
- YU X. Research on the degradation and color change mechanism of plant remains found in the Haihunhou Tomb in Nanchang[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018:71–92.
- [16] 方北松, 刘姗姗, 童华, 等. 饱水竹筒变色机理的初步研究[C]//中国文物保护技术协会第四次学术年会论文集. 北京: 科学出版社, 2005:365–371.
- FANG B S, LIU S S, TONG H, *et al.* Preliminary study on the color change mechanism of moistened bamboo slips[C]//Proceedings of the Fourth Academic Annual Conference of the China Association for Conservation Technology of Cultrul Heritage. Beijing: Science Press, 2005:365–371.
- [17] 刘志军. 木材变色与防护问题的研究状况[J]. 世界林业研究, 2001, **14**(5):31–36.
- LIU Z J. Research status on color change and protection of wood[J]. World Forestry Research, 2001, **14**(5):31–36.
- [18] 吕文华, 江泽慧, 吴玉章, 等. 木、竹、藤材的变色防治[J]. 世界林业研究, 2006, **19**(4):38–44.
- LYU W H, JIANG Z H, WU Y Z, *et al.* Prevention of color changes in wood, bamboo and rattan[J]. World Forestry Research, 2006, **19**(4):38–44.
- [19] ROSU D, TEACA C A, BODIRLAU R, *et al.* FTIR and color change of the modified wood as a result of artificial light irradiation[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B – Biology, 2010, **99**(3):144–149.
- [20] 李茜然, 赵雨婷, 郑欣欣, 等. 西加云杉木材单宁铁变色因素及防治[J]. 林业工程学报, 2021, **6**(5):54–60.
- LI X R, ZHAO Y T, ZHENG X X, *et al.* The influence factors and prevention of iron discoloration induced by tannin in the *Picea sitchensis* wood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, **6**(5):54–60.
- [21] 李任杰, 韩裕龙, 李俊源, 等. 木材变色机理研究进展[J]. 世界林业研究, 2024, **37**(2):66–73.
- LI R J, HAN Y L, LI J Y, *et al.* Research progress on the mechanism of wood color change[J]. World Forestry Research, 2024, **37**(2):66–73.
- [22] 官琼梅. 郭店竹简的脱色及清洗报告[J]. 中国文物保护技术协会第四次学术年会论文集. 北京: 科学出版社, 2005:372–374.
- GUAN Q M. Report on decolorization and cleaning of Guodian bamboo slips[J]. Proceedings of the Fourth Academic Annual Conference of the China Association for Conservation Technology of Cultrul Heritage. Beijing: Science Press, 2005:372–374.

Conservation of wooden slips excavated from Tomb No. 1 of the Western Han Dynasty at Guankou, Wulong, Chongqing

GU Laiyuan¹, ZHAO Yang^{2,3}, HUANG Wei¹, LIU Yong⁴, YE Lin¹, SHI Shaohua^{2,3}, FANG Beisong^{2,3}

[1. Chongqing Institute of Cultural Relics and Archaeology, Chongqing 400013, China;

2. Jingzhou Cultural Relics Protection Center, Jingzhou 434020, China;

3. Key Scientific Research Base for the Conservation of Excavated Lacquered Wooden Artifacts (Jingzhou Cultural Relics Protection Center),
National Cultural Heritage Administration, Jingzhou 434020, China;

4. Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China]

Abstract: Waterlogged wooden slips unearthed from Tomb No. 1 of the Western Han Dynasty at Guankou, Wulong, Chongqing, serve as important physical evidence for the study of burial practices during the early Han Dynasty. To develop a scientific conservation strategy, this study built upon onsite preservation efforts and employed an integrated analytical approach—comprising wood species identification, moisture content determination, optical microscopy, infrared spectrometry, ion chromatography, and inductively coupled plasma – optical emission spectrometry to evaluate the preservation condition, degradation characteristics, and environmental ion impact on the wooden slips. The results identified the wood species as *Keteleeria*, which exhibited moderate degradation accompanied by noticeable microstructural damage. Infrared spectrometry revealed a significant reduction in the characteristic peaks of cellulose and hemicellulose, indicating considerable chemical deterioration. Ion concentration analysis suggested that iron ions had a minor impact on the artifacts. To address degradation issues including decay, oxidative discoloration, and deformation, a combined treatment involving sodium dithionite decolorization and ethanol – hexadecanol dehydration was applied. The conservation efficacy was systematically evaluated through chromatic aberration monitoring and dimensional measurement. Following the treatment, the wooden slips exhibited a marked increase in lightness, dimensional shrinkage controlled within 2.5%, restoration of the substrate to a pale – yellow hue, and clear and intact inscriptions, thereby meeting the requirements for conservation, research and display. This study effectively demonstrates the integrated approach of combining archaeological excavation with cultural heritage conservation, and provides a scientific reference for the conservation of similar waterlogged wooden slip artifacts.

Key words: Tomb No. 1 of the Western Han Dynasty at Guankou; Waterlogged wooden slip; Conservation

(责任编辑 顾 雯;校对 潘小伦)