

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.141>



夯土遗址风化病害类型、机理与保护加固：现状和展望

刘怀玉¹, 陈永贵^{1*}, 李佳卉¹, 张涛², 蒋妍², 叶为民¹, 何海平³

1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092

2. 北京市考古研究院, 北京 100009

3. 首都博物馆, 北京 100045

摘要: 自然气候使夯土遗址发育风化病害, 威胁其稳定保存。总结了遗址风化病害类型, 阐述了病害发育规律和机理的研究进展, 分析了保护加固方法及适用性。遗址风化受物理、化学、生物作用, 力学强度和表面硬度随风化进程降低, 表层土和内部夯土的热物理参数差异显著。水—热—风—盐耦合作用使遗址表面趋于形成结皮层-疏松层, 其孔隙为双孔结构, 持水模式异于内部夯土。在环境作用下, 疏松层先于结皮层产生应力疲劳, 发生结皮剥离。常用保护加固方法除微生物诱导碳酸钙沉淀 (microbial induced calcite precipitation, MICP) 技术以外均已实现工程应用。夯土遗址长期处于非饱和状态, 现有成果多聚焦于饱和状态, 无法准确描述实际工况的水—力特性演化及致病机理, 亟待深入研究。

关键词: 夯土遗址; 风化; 自然环境; 可溶盐; 毛细作用; 水盐运移; 工程地质。

中图分类号: P642.5

文章编号: 1000-2383(2025)06-2284-14

收稿日期: 2024-09-24

Weathering Types, Mechanism and Protection of Rammed Earth Sites: Progress and Prospect

Liu Huaiyu¹, Chen Yonggui^{1*}, Li Jiahui¹, Zhang Tao², Jiang Yan², Ye Weimin¹, He Haiping³

1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Beijing Institute of Archaeology, Beijing 100009, China

3. Capital Museum China, Beijing 100045, China

Abstract: Natural climate makes rammed earth sites develop weathering disease, threatening its stable preservation. In this paper it summarizes the types of weathering diseases of sites, expounds the research progress of the evolution law and mechanism of the diseases, and analyzes the protection and reinforcement methods and applicability. The weathering of the site is affected by physical, chemical and biological processes. The mechanical strength and surface hardness decrease with the weathering process, and the thermal physical parameters of the topsoil and the internal rammed soil are significantly different. The coupling of water, temperature, wind and salt makes the surface of the site tend to form a crust-loose layer, and its pores are double-porosity structure, which makes the water retention mode be different from that of the inner rammed soil. Under the action of the

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 42125701); 上海市教委科研创新计划项目(No. 2023ZKZD26)。

作者简介: 刘怀玉 (2001—), 女, 博士研究生, 主要从事土遗址保护和非饱和土力学等方面的研究工作。ORCID: 0009-0001-6275-4364. E-mail: liuhuaiyu@tongji.edu.cn

*** 通讯作者:** 陈永贵, 教授, 博士生导师, 从事环境工程地质及非饱和土力学研究工作。ORCID: 0000-0002-6571-2549. E-mail: cyg@tongji.edu.cn

引用格式: 刘怀玉, 陈永贵, 李佳卉, 张涛, 蒋妍, 叶为民, 何海平, 2025. 夯土遗址风化病害类型、机理与保护加固：现状和展望. 地球科学, 50(6): 2284—2297.

Citation: Liu Huaiyu, Chen Yonggui, Li Jiahui, Zhang Tao, Jiang Yan, Ye Weimin, He Haiping, 2025. Weathering Types, Mechanism and Protection of Rammed Earth Sites: Progress and Prospect. *Earth Science*, 50(6): 2284—2297.

environment, the loose layer produces stress fatigue before the crust, and the crust peeling occurs. All the common protection and reinforcement methods except microbial induced calcite precipitation (MICP) have been applied in engineering. The rammed earth site has been in the unsaturated state for a long time, and most of the existing results focus on the saturated state, which cannot accurately describe the evolution of the hydraulic and mechanical behavior and the pathogenic mechanism of the actual working condition, so it is urgent to further study.

Key words: rammed earth sites; weathering; natural environment; soluble salt; capillarity; water-salt transportation; engineering geology.

0 引言

土遗址是古文化遗址的重要组成部分,在1 000多处世界文化遗产名录中(Shukla, 2016),土遗址文物超过1/3.我国第三次全国文物普查确认不可移动文物近76.7万处(雒树刚,2018),其中约1/3为土建筑遗址(张博,2021),约64%采用生土夯筑技术(张忆宁,2023).夯土遗址包含极为丰富的历史信息,是研究人类文明起源及发展历程的重要依据,具有重大历史、科学及艺术价值.例如,杰内大清真寺以独特的撒哈拉—苏丹建筑风格著称于世,被誉为“尼日尔河谷的宝石”.三星堆遗址昭示了长江流域为中华文明的母体,被誉为“长江文明之源”.武陵山区土司遗址为中国遗存丰富且最具价值特征代表性的土司城遗址.圆明园遗址曾被称为“万园之园”,在世界园林艺术史上占有重要的地位.长城是中国古代的军事防御工事,是世界文化遗产之一.统筹开展文物本体抢救保护、文物周边环境综合整治和文物安全防护设施建设,实现大遗址文物本体和周边环境综合保护,是当前国家发展战略和城乡建设需求的重要内容.

夯土遗址多存在于露天环境,天然含水率较低,长期处于非饱和状态.当遭遇短时强降雨时,遗址干燥的稳定结构会迅速被破坏,丧失强度;在强蒸发作用下,遗址从饱和状态迅速转换为非饱和状态.同时,遗址长期受太阳辐射、温湿度、降雨、可溶盐、风等外营力持续影响,经物理、化学和生物风化作用,极易发育一系列病害,寿命严重缩短,最终导致遗址破坏甚至消亡.因此,研究夯土遗址在气候条件下的风化机理至关重要.

大量研究表明,自然气候条件中,水、温度、风、可溶盐和动植物作用是导致夯土遗址风化病害的主要因素(孙满利等,2022;Du *et al.*, 2023).按致病因素的类型,风化可分为物理风化、化学风化和生物风化等3类,各风化机理存在显著差异.根据风化类型和遗址土基本性质制定保护加固方法,保护方

法包括软覆盖和牺牲层,加固方法包括化学加固、锚固、夯补支顶加固和微生物诱导碳酸钙沉淀技术(microbial induced calcite precipitation, MICP)(张博,2021;梁玉鑫,2023).软覆盖常应用于发育降雨、风沙等物理因素造成的冲沟、裂隙的遗址保护中,已应用于汉阳陵陵园、渤海上京遗址、三星堆遗址等(杨小菊等,2023).牺牲层适用于发育风沙、温度、降雨等物理因素造成的剥蚀和可溶盐等化学因素造成的酥碱的遗址保护中,已应用于北庭故城、定陶汉墓和忻州土城墙等国内夯土遗址(石落,2020)和西班牙甘德萨 Coll del Moro 伊比利亚遗址(Manzano-Fernández *et al.*, 2024).化学加固应用范围广泛,可用于发育各类因素导致的剥蚀、裂隙、掏蚀和生物破坏等的遗址加固中,为达更理想的防治效果,常将其与其他方法结合(李桐林,2020),已应用于圆明园澹怀堂、交河故城、含山凌家滩遗址、熊家冢遗址等.夯补支顶加固和锚固常用于发育物理和化学因素造成的基底掏蚀的遗址加固中,已应用于瓜州锁阳城遗址、长城、交河故城等(裴强强等,2018).以上方法仍存不足,在环境因素作用下,遗址已加固的表面仍将进一步风化,且加固表面与原遗址存在明显色差,保护加固的后续效果评估及其与遗址的兼容性有待进一步研究.MICP为新兴加固技术,现处于室内试验阶段,尚未应用实际工程.

本文全面归纳和总结夯土遗址的风化类型和致病因素,揭示遗址风化机理,总结遗址防护加固方法,并进一步阐述遗址风化机理研究的不足之处,提出今后需深入研究的主要问题,以期为夯土遗址风化机理、病害发展和防护加固措施提供未来研究方向.

1 夯土遗址风化病害类型

在自然和人为因素作用下,夯土遗址将发育多种风化病害.病害按其发育特征分为片状剥蚀、裂隙、冲沟、掏蚀、生物破坏和人为破坏等,按其主

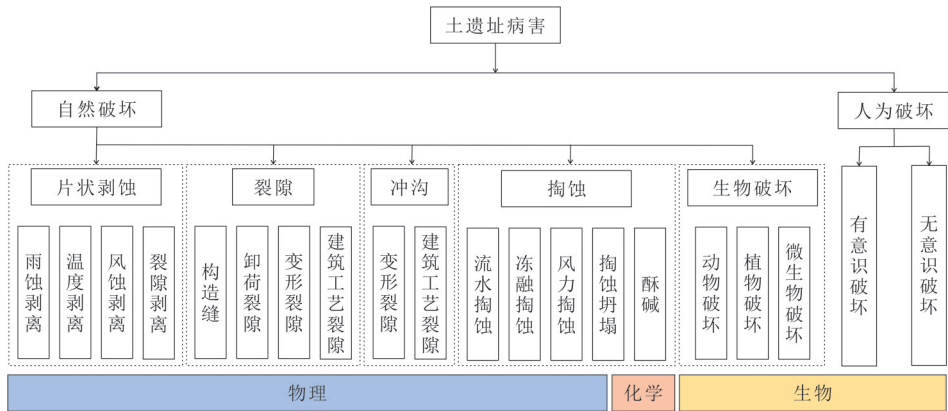


图 1 夯土遗址病害分类

Fig.1 Deteriorations classification of rammed earth sites

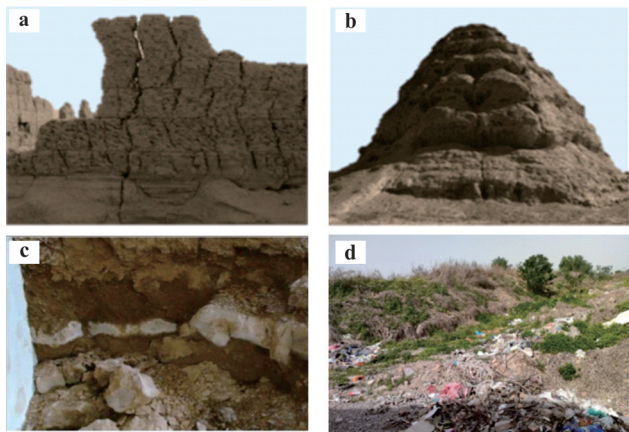


图 2 夯土遗址的典型病害

Fig.2 Typical deteriorations of rammed earth site

a. 交河故城剥离病害;b. 西夏王陵冲沟病害;c. 蓝田猿人遗址酥碱病害;d. 汉长安城遗址被垃圾覆盖

致病因素分为物理风化、化学风化和生物风化等。病害分类图如图 1。

物理致病因素包括水、温度和风等(梁涛, 2010; 谌文武等, 2020; 崔凯等, 2022a), 水的作用包括降雨、地表水、地下水和干湿循环等。化学致病因素包括可溶盐(孙满利等, 2022)及其水盐运移。生物致病因素包括动物、植物和微生物。各致病因素作用下, 遗址发育的典型病害如图 2。

2 夯土遗址风化机理

夯土遗址在水、温度、风、可溶盐、动物、植物和微生物等因素单独和耦合作用下, 其组构和孔隙率等微观结构不断演化, 强度、风蚀模数、热物理参数、纵波波速等宏观风化指标劣化, 最终诱发各类风化病害, 如图 3 所示。

2.1 物理风化

物理风化包括水、温度和风等作用。

2.1.1 水的作用 自然界广泛存在水, 降雨、地表水、地下水和干湿循环均可在一定条件下引起夯土遗址风化。

降雨时, 一方面, 雨水对遗址产生溅击作用(赵海英等, 2003; Richards, 2020), 打散遗址表层松散土颗粒并发生崩解, 颗粒在毛细力作用下向夯土内部迁移, 堵塞内部土体孔隙, 阻止雨水向内迁移, 导致遗址表层土在雨水浸润下吸力降低, 由非饱和状态转变为饱和状态, 强度降低, 表层土在重力作用下沿薄弱面剥落。另一方面, 降雨与风的耦合作用使遗址风化更加复杂(Luo *et al.*, 2020)。风速改变降雨与夯土墙的夹角, 溅击动能随风速增加而降低, 且风增强降雨对夯土墙表面的冲刷作用, 使遗址表面发育裂隙。同时, 高强降雨可在夯土层表面形成水膜, 一定程度上削弱雨水的溅击动能; 风速越小, 表面水膜厚度越小, 水膜削弱作用减小。在冲刷、动能和水膜的三重作用下, 存在一个使裂隙发育程度最大化的风速。

地表水对遗址产生流水冲刷、冲沟、水分入渗、干湿循环、水盐运移等作用(刘易见, 2019; 王楚斌, 2023), 特别是流水冲刷导致遗址进一步发育冲沟(王石斌, 2009)。冲刷和冲沟使地表水汇集形成径流, 冲刷遗址, 严重时导致遗址裂隙扩展贯通或直接剥蚀遗址表面, 造成冲沟病害。

夯土遗址在地下水毛细作用下(周杰等, 2022), 可产生拉裂—倾倒和压裂—滑移两类劣化(Zhao *et al.*, 2013)。毛细作用下, 遗址劣化内部出现空腔, 悬空部分出现拉应力带, 产生自上而下的裂纹, 裂纹向下扩展至空腔处, 遗址发生倾倒破坏; 也

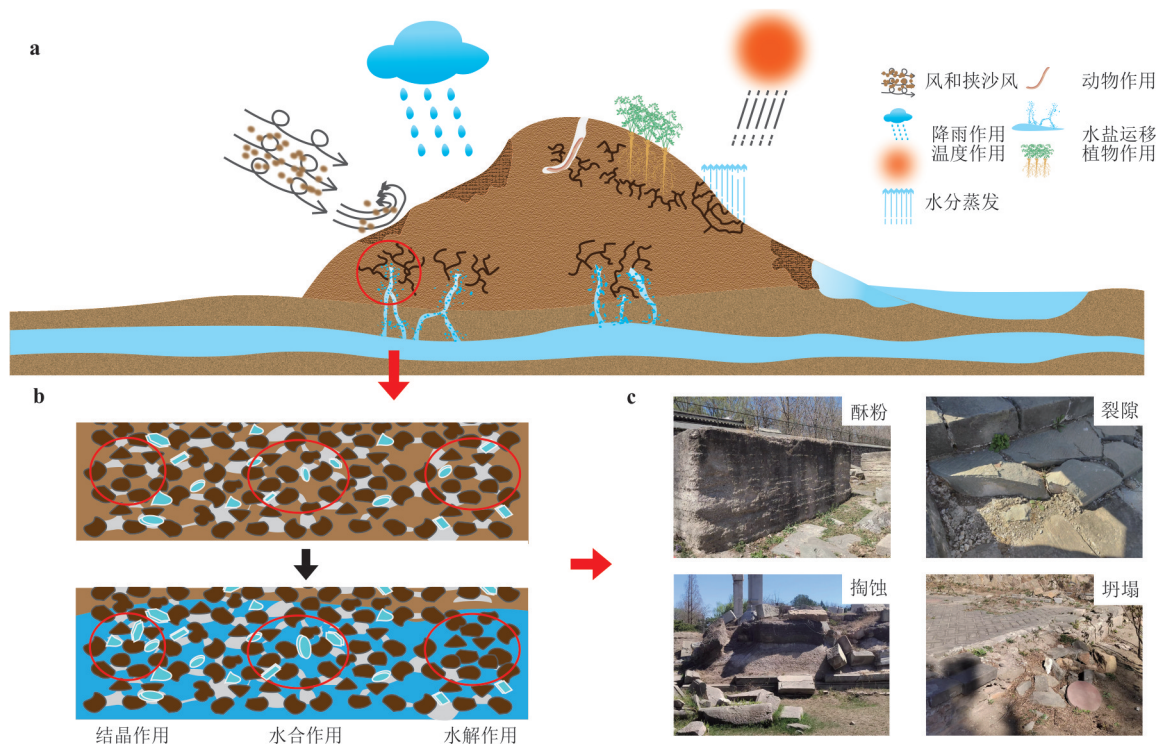


图3 夯土遗址风化机理示意

Fig.3 Schematic diagram of weathering mechanism of rammed earth site

a. 自然环境下夯土遗址的风化; b. 水盐运移的致病机理; c. 水盐运移的致病类型

有可能悬空部分出现张拉带,产生自下而上的裂纹,裂纹向遗址顶部扩展使遗址发生滑移.研究表明,毛细作用导致遗址出现空腔与吸力作用下的气态水迁移有关(徐龙飞等,2021),气态水凝结于土颗粒间,形成结合水膜,水膜增厚楔开土颗粒,导致遗址膨胀变形,进而发育空腔.

进一步研究表明,干湿循环作用下遗址强度降低,易发生基底掏蚀.张虎元等(2011)研究了交河故城在干湿循环作用下力学性能变化,原状土抗压强度和风蚀量随循环次数的增加而降低,重塑土随循环次数的增加而先增强后降低.Li *et al.* (2023)研究了干湿循环下粉土土柱不同高度处抗剪强度分布,发现底部抗剪强度低于高处.任克彬等(2019)通过粉土室内干湿循环试验,研究遗址土黏聚力和内摩擦角的变化规律,研究发现随循环次数的增加黏聚力先增加后减小,干湿循环对内摩擦角无影响.干湿循环导致遗址底部粘聚力、强度衰减,孔隙扩大、孔隙数量增加,粒间接触由面接触向点接触转变,孔隙贯通性增强,导致遗址基底处裂隙发育,进而发育掏蚀病害(张燕芳,2021).

夯土遗址在自然环境中长期处于非饱和状态,其持水和渗流特性与饱和状态时存在明显差异.目

前,普遍开展了遗址土毛细持水模式的研究,集中于毛细上升高度理论模型(崔凯等,2022b)和土水特征曲线的拟合模型(Chen *et al.*, 2023)等研究.事实上,土体持水模式与土体孔隙大小相关(Qiao *et al.*, 2021),孔隙大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时毛细作用为主要持水模式,孔隙小于 10 nm 时吸附作用为主要模式, $10\text{ nm}\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 时二者兼具.为进一步厘清持水和渗透特性,应开展不同吸力量测和控制方法的持水试验,对比分析各方法对夯土遗址的适用性;通过热重分析、核磁共振和差示扫描量热等方法,分析遗址的主要持水模式;通过瞬时截面法和恒水头法,开展遗址土的渗透试验,获得相对渗透系数,阐明遗址土的渗透特性;结合土水特征曲线和收缩曲线,间接预测相对渗透系数,对比分析各方法的适用性.

2.1.2 温度的作用 温度作用下,夯土遗址的劣化机理表现为两类:(1)温度影响遗址土内外膨胀性能及矿物演化;(2)冻融循环.

强温差作用下遗址表层土和内部夯土层的膨胀性能存在差异,遗址产生不均匀热胀冷缩,长期反复的热胀冷缩将导致遗址结构疏松.孙博等(2009)对人工模拟墙表面和内部温度监测,研究表

表 1 土遗址表层和内部热物理性质差异

Table 1 Difference of thermal physical properties between surface and interior of rammed earth sites

试样部位	热传导系数 κ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热扩散系数 λ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	体积比热 c ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
试样表层	0.747 3	0.698 0	1.070 6
试样内部	1.024 0	0.901 4	1.136 0

注:据张虎元等(2018).

明墙体温度变化幅度远大于当地气温幅度,墙体表面与内部变化幅度差异大,内外温度梯度高达 15℃以上.张虎元等(2018)对遗址表层和内部热物理参数测定,研究发现遗址二元结构(结皮层—疏松层)与内部夯土层存在热物理性质差异,与内部相比,二元结构的热传导系数、热扩散系数和体积比热更低(如表 1),二元结构长期热物理性质差异将产生热应力,导致表层疲劳劣化,发生隆起剥离,加剧风蚀、雨蚀等对遗址的破坏.温差及温度循环导致遗址的矿物成分发生演化(Sun *et al.*, 2023),遗址中石英相对含量升高,钠长石、方解石和黏土矿物相对含量降低,黏土含量降低导致遗址黏结力降低、发生结构疏松.

进一步研究表明,冻融循环下遗址将发育裂隙、酥碱、剥蚀、粉化等病害(Richards *et al.*, 2022).魏大川(2019)通过积雪覆盖和雪水入渗的形式,研究水从遗址顶部入渗时冻融循环破坏机理,研究表明冻胀率随冻融循环次数的增加而增加,与雪水入渗相比,积雪覆盖的冻胀率更低,但土体表面更易出现酥碱和泥皮翻卷.严耿升等(2011)采用电镜分析法研究发现,冻融循环导致遗址在内应力集中处萌生微裂纹,随循环次数增加出现次生微裂纹,部分裂纹沿矿物结构面方向延伸发展,损伤面积增大,局部土粒细化,导致文物劣化破坏.

2.1.3 风的作用 风蚀作用导致遗址出现凹进和沿夯土层层状剥离的现象(赵海英等, 2003),如图 4.在干旱与半干旱地区,风和风沙流的风蚀机理存在差异(Richards *et al.*, 2019),纯风作用仅吹蚀遗址表层已松散土颗粒,遗址表层趋于平滑;低携沙量风沙吹蚀机理与纯风相似,高携沙量风沙导致遗址表层出现点蚀,沙的动能冲击表层土颗粒,遗址由致密结构转为松散结构,松散表层土被吹蚀剥离.同时,风沙的携沙量随高度呈指数下降,遗址底部风沙携沙量极高,在风沙的吹蚀作用下遗址易出现底部凹进的现象.当风沙遇到遗址时,由于地形突变,将在夯土层层面形成涡流,增加迎风面风沙的阻

力,风速降低,根据伯努利原理(速度大的压力小),将形成沿夯土层层面、由迎风面吹向背风面的风沙流,导致遗址沿夯土层层状剥离.Pineda and Iranzo (2017)采用计算流体力学,模拟风沙对西班牙 Baelo Claudia 遗址的影响,研究表明风沙吹蚀作用受沙粒粒径影响,沙粒被风携带的阈值粒径为 0.33 mm,高于该粒径不易被携带.

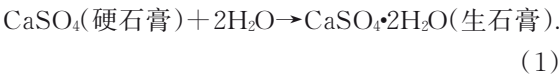
2.2 化学风化

遗址孔隙中易溶盐及水盐运移过程导致遗址化学风化(沈云霞, 2017).夯土遗址的盐分来自岩石风化、溶解和风蚀,盐分在地表水、降雨、蒸发及风力作用下富集于遗址中.遗址包含的主要离子为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等,包含的主要可溶盐为 Na_2SO_4 、 NaCl 、 CaSO_4 、 KNO_3 、 NaNO_3 、 KCl 、 MgCl_2 等(孙满利等, 2007;张慧等, 2008).

夯土遗址中,易溶盐破坏机理分 3 类:(1)结晶作用:易溶盐结晶时产生结晶压,破坏土体结构;(2)水合作用:易溶盐与水作用形成水合物,该过程产生体积膨胀,破坏土结构;(3)水解作用:土中矿物发生水解导致矿物流失,土体内部形成孔隙,土体结构疏松.

2.2.1 结晶作用 多位学者研究发现(赵海英等, 2003;Hu *et al.*, 2023),易溶盐溶解—结晶循环导致遗址表面发育盐害,如图 5 所示,遗址干燥时,易溶盐以结晶固体形式填充土孔隙、胶结土颗粒,降雨作用下,易溶盐溶解并向遗址基底和表层富集,蒸发使其再次结晶;温度和降雨作用,使基底和表层易溶盐发生溶解—结晶循环,破坏遗址致密结构,形成基底掏蚀和表层酥碱病害.

2.2.2 水合作用 遗址中盐分水合作用使固体体积膨胀,如硬石膏(CaSO_4)经水合作用后形成生石膏,体积膨胀 1.5 倍,膨胀将导致土体微裂隙发育,破坏土体结构.



2.2.3 水解作用 遗址中含盐矿物解离的阳离子

址化学成分、遗址粘粒含量、土壤 pH 等影响. 研究表明(Liu *et al.*, 2018; Li and Gu, 2022), 遗址孔隙中的吸附水和毛细水将促进表面微生物的生长, 导致遗址表面发育病害. 进一步研究表明(Wang *et al.*, 2022), 水、碳、氮、硫含量和碳氮比对真菌的影响较显著, 碳、氮、硫、钙、镁、铝含量和碳氮比对细菌的影响较显著.

2.4 水—热—风—盐耦合作用

在水—热—风—盐多场耦合的作用下, 遗址表层出现二元结构(结皮层—疏松层), 如图 6 所示, 该结构是遗址风化的主要形式之一.

雨水溅击作用使表层土体达饱和状态, 形成泥浆, 泥浆在重力作用下沿墙面向下蠕流, 形成墙面泥膜. 降雨后泥膜收缩干裂形成网纹状结皮, 在结皮层下部形成疏松层, 二者组成的二元结构附着于夯土表层. 二元结构的形成与内部夯土层粉黏粒含量相关, 含量越高越易形成结皮.

结皮层开裂与剥离受水—热—风—盐多场耦合作用的影响. 自然环境作用下, 二元结构与内部夯土层在盐分和温度分布上存在差异. Du *et al.* (2023) 研究表明, 相比疏松层和内部夯土层, 结皮层易溶盐含量较少. Zhang (2023) 研究了水—盐耦合作用下结皮蒸发开裂机理, 结果表明结皮层的抗拉强度随着基质吸力和盐含量的增大而增大, 结皮越难以开裂; 这是由于高盐条件使土的蒸发速率降低, 基质吸力产生的拉应力作用时间变长, 但抗拉强度在高盐、高吸力条件下显著提高, 因此高盐土体形成裂隙时需要更大的拉应力, 即达到更低的含水率才能发生开裂. 张虎元等(2009)采用粒度分析和红外摄像测温方法研究发现相较内部夯土层, 结

皮层温度变化幅度更大. 进一步研究表明(Du *et al.*, 2022), 朝阳面的遗址表层盐分迁移梯度和收缩率均高于背阴面, 这说明朝阳面可溶盐迁移更严重、不均匀收缩更明显, 该面更易发育出二元结构.

采用扫描电子显微镜分析和压汞分析方法, 发现二元结构的微观结构与内部夯土层存在明显差异. 杨龙等(2017)对内部夯土层和结皮层的微观结构研究, 研究表明, 内部夯土层颗粒表面粗糙, 孔隙度低, 团聚体呈分散态片状排列; 结皮层颗粒表面平整, 微小颗粒间以泥质胶结, 细小颗粒排列紧密形成薄膜状结构, 孔隙度小. 陈毅等(2018)研究发现, 疏松层孔隙呈双孔结构, 孔隙体积和孔隙粗糙度随风化时间增加而降低, 易导致结皮层剥离; 内部夯土层孔隙呈单孔结构(团聚体间孔隙), 孔隙体积随风化时间增加而先减小后增大.

总而言之, 多场耦合作用导致夯土遗址二元结构的开裂和剥离过程更复杂. 降雨后, 地表积水的毛细作用使结皮层在竖直方向存在盐分分布差异, 低处结皮盐分含量低于高处, 低处结皮更易发生开裂, 导致低处结皮剥离严重而高处几乎无剥离. 强烈温差作用导致遗址表面材料应力疲劳, 且结皮层的力学强度优于疏松层, 疏松层优先发生应力疲劳, 加速了结皮层沿疏松层剥离. 风蚀作用直接磨蚀结皮层, 或风沙灌入结皮裂缝中, 在裂隙涡流的推动下转动磨蚀, 加速剥离病害的发展.

然而, 夯土遗址的风化机理有待深入研究. 自然气候条件下, 遗址长期处于非饱和状态, 且风化病害多发育于土体原生和次生裂隙中. 但目前, 关于遗址非饱和状态下的持水、蒸发开裂、收缩体变和力学强度特性等的研究仍不明晰, 有待进一步

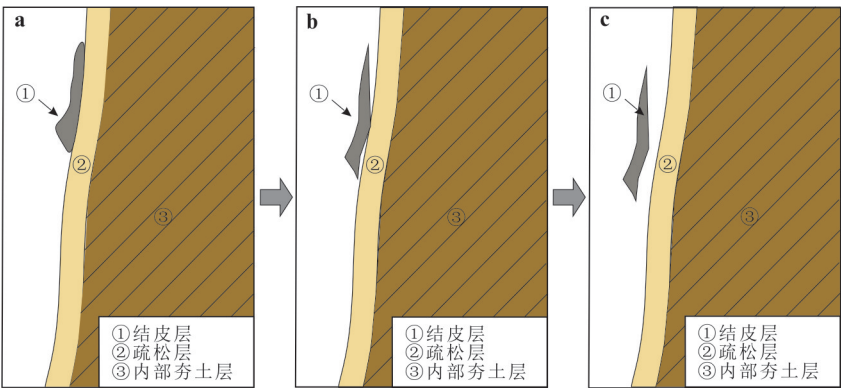


图 6 夯土遗址二元结构形成与结皮层剥落的示意

Fig.6 Schematic diagram of the formation of binary structure and crust scaling of rammed earth sites
a. 二元结构在夯土遗址表面形成; b. 结皮层起翘; c. 结皮层剥离; 据 Du *et al.* (2023)

研究.

3 夯土遗址保护加固方法

夯土遗址的风化将破坏其稳定的结构,使遗址面临永久性破坏的风险,应根据遗址的赋存环境和自身基本物化性质,对其进行保护与加固.

3.1 保护方法

夯土遗址的保护方法包括牺牲层和软覆盖等方法,两种方法均可阻隔外界因素对土体的不利影响,对遗址起保护作用.

3.1.1 牺牲层 牺牲层是指在遗址表面覆盖与遗址本体性质类似的泥敷层,使外营力优先破坏该层,以达到保护遗址的目的.常向牺牲层内添加植物纤维,如麻刀、麦糠、马连草、麦草等,提高其抗雨蚀和抗收缩能力.相较马连草和麦草,麻刀和麦糠牺牲层的表面强度更高,风化程度更弱;麦糠和麻刀在减小土体收缩率、改善牺牲层透气性、对牺牲层色度影响小等方面均有益,但相较麦糠,麻刀可明显提高土体强度(张博,2016; Wang *et al.*, 2020),因此麻刀纤维应用更广泛,其可均匀分散于土体内部,能分散遗址内应力,避免应力集中,提高土体的延展性、强度和抗雨蚀能力,有效抑制干湿循环过程中的裂隙发育,麻刀牺牲层如图7所示.牺牲层具有较好的抗雨蚀能力,适用于极旱、干旱和半干旱等存在短时强降雨的地区.

3.1.2 软覆盖 软覆盖对遗址具保护和破坏的双重作用.一方面,软覆盖的生长对遗址的浅表层造成一定程度的损伤.另一方面,软覆盖的保护作用体现在:对表层土的加筋作用;吸收易溶盐离子,降低表层土的易溶盐富集;降低径流流速,提高土体抗冲刷能力.常用软覆盖植被为草本植物、灌木、乔木、苔藓(如图8)和地衣等.软覆盖对提升土遗址抗雨蚀能力有明显作用,其抗雨蚀能力取决于所选植被是否能在无人或人为干预的情况下适应环境生长,该方法较适合湿润、半湿润环境的土遗址保护.

3.2 加固方法

夯土遗址加固方法包括化学加固、锚固、夯补支顶加固和微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)等(张博, 2021; 梁玉鑫, 2023),化学加固和夯补支顶加固在实际工程中应用最广泛, MICP作为新兴方法,仍处于室内试验阶段.

3.2.1 化学加固 化学加固是向遗址表面风化层

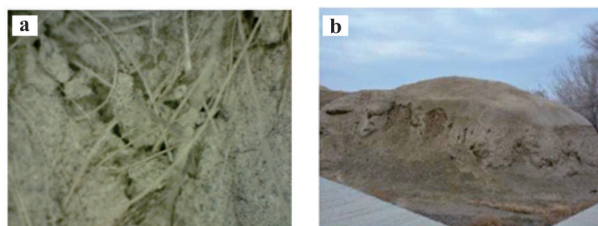


图7 麻刀牺牲层

Fig.7 Hemp fiber sacrifice layer

a. 麻刀纤维与土体显微结构(张博, 2021); b. 北庭故城的麻刀牺牲层(张博, 2016)

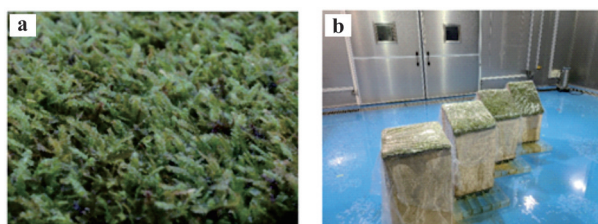


图8 软覆盖模型

Fig.8 Soft cover of rammed earth sites

a. 薄壁卷柏藓; b. 软覆盖培植; 据张博(2021)

渗透加固材料提高风化层强度,改善土体防风化性能.加固材料按其性质分为无机材料、纳米材料和有机材料,无机材料常用聚苯乙烯(PS),纳米材料常用纳米 SiO_2 溶胶和微纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (郭青林等, 2023)等,有机材料常用正硅酸乙酯、丙烯酸树脂、糯米浆液和SH浆液(谌文武等, 2017)等.化学加固目前是使用最广泛的加固方法之一,其适用条件广泛,对土遗址具有明显的保护加固效果,但无机材料加固常面临加固材料与土遗址不兼容的问题,相较无机加固,纳米和有机材料加固面临加固有效时间更短、加固效果更差的问题.

PS加固效果与孔隙水中pH和离子类型有关. pH低于9或存在高价金属离子时,PS生成硅酸钙镁沉淀和硅胶颗粒,形成的凝胶填充孔隙,包裹于土颗粒表面,使骨架颗粒被有效地连接,黏结土体为一个空间网状整体,提高土体强度.纳米 SiO_2 溶胶可吸附或包裹于土颗粒表面,增大颗粒直径,使颗粒由点接触向面接触转化,粒间间隙很大程度上被填充,提升土体力学性能.正硅酸乙酯加固机理与纳米 SiO_2 溶胶相似,其生成的凝胶包裹于颗粒表面,提高颗粒接触面积,提高土体粘结力.

除了研究加固机理外,学者还聚焦于加固材料与遗址土的兼容性.谌文武等(2017)通过红外热成像技术评估糯米浆液和SH浆液加固与土体的兼容性,研究发现处理后的墙体较原遗址墙体吸热系数

没有产生明显变化,两种加固材料与原遗址墙体兼容性较好,可应用于工程实际。

3.2.2 微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)

MICP技术是指通过人为提供钙盐类营养物质诱导细菌产生的碳酸盐沉淀填充土孔隙,增强土颗粒间胶结作用,从而改善岩土体的物理力学性能(梁玉鑫,2023)。目前,诱导沉淀的途径包括尿素水解、硫酸盐还原、铁盐还原、反硝化、光合作用和甲烷氧化等。尿素水解具有反应机制简易、反应过程可控、碳酸盐生成效率高等优点,应用最广泛。刘汉龙等(2024)总结提出 CaCO_3 颗粒在加固材料中的沉积模式:(1)胶结模式:碳酸盐颗粒沉积于土颗粒连接处,胶结颗粒;(2)涂层模式:碳酸盐颗粒附着于土颗粒表面,提高表面粗糙度;(3)填充模式:碳酸盐颗粒填充土颗粒间孔隙,降低孔隙率。

对于夯土遗址的修复,该方法正处于室内试验阶段,工程应用较少;由于该技术是基于微生物在土遗址中的生长及沉淀物的产出,仍面临微生物对夯土环境的适应性、加固过程副产物对土遗址的不利影响、该技术加固效果的长期稳定性等问题,其工程应用有待进一步研究。岳建伟等(2021a,2021b)采用喷洒法和水平旋转滴注法对仿制遗址土进行MICP加固,研究表明,与素土相比,加固土的裂隙发育宽度更窄,深度更浅,MICP有效改善了土体受风蚀破坏、遇水崩解的不利情况(图9)。梁玉鑫(2023)观察了MICP加固前后黄土微观结构变化,加固遗址土土颗粒间存在大量的碳酸钙沉淀,证实了MICP可有效地将土颗粒胶结,使土骨架结构更稳定。进一步研究表明(Han *et al.*,2023),向加固材料中添加纤维可在土中形成土颗粒—纤维— CaCO_3 颗粒的空间结构,该结构能够有效胶结土颗粒,降低水的渗流,提高土体的强度并降低脆性。

3.2.3 夯补支顶加固 土坯砌补和夯补支顶是加固土遗址底部掏蚀区的常用方法,夯补支顶对加固夯土遗址具有更明显的优势。夯补支顶加固是指采用与遗址土物化性质相似的夯土对遗址底部掏蚀区进行结构补强和加固的技术(张博等,2016)。研究表明,用于补强的夯土颗粒粒径与成分将影响加固效果(Chen *et al.*,2023),采用粒径比遗址土更粗的夯土,可有效阻止遗址底部水盐运移,防止底部二次盐化。

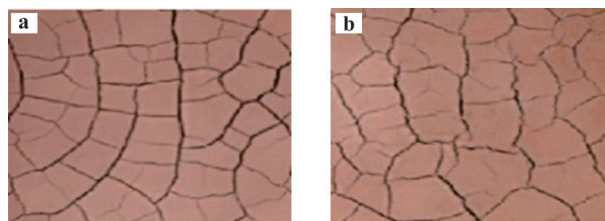


图9 MICP改善遗址土的物理力学性能

Fig.9 MICP improves the physical and mechanical properties of rammed earth sites

a.素土烘干2 h裂隙发育;b.MICP烘干2 h裂隙发育;据岳建伟等(2021a,2021b)

4 结论及展望

为系统研究自然气候作用下夯土遗址的风化机理和保护加固方法,国内外学者在物理、化学和生物因素作用下夯土遗址的宏观响应规律、微观机理和保护加固方法等方面开展研究,得到的重要结论如下。

(1)夯土遗址的风化受物理(水、温度、风)、化学(易溶盐含量、种类和水盐运移)、生物(动物、植物和微生物)因素单独及耦合作用影响。夯土遗址的力学强度(抗剪、抗拉和抗压强度)、表面硬度在各因素作用下逐渐降低,表层二元结构和内部夯土层的热物理参数在数值上有明显差异。

(2)自然气候作用下夯土遗址的风化机理与夯土微观孔隙结构、颗粒分布和颗粒接触方式相关。水—热—风—盐耦合作用下,夯土遗址趋向于形成结皮层—疏松层—内部夯土层的形式,结皮层颗粒粒径明显低于内部夯土层,疏松层具备双孔结构,使其持水特性变化,在外界自然作用下发生结皮剥离。

(3)夯土遗址的保护方法包括牺牲层和软覆盖,加固方法包括化学加固、锚固、夯补支顶加固、MICP等,各方法具有一定的适用性。

国内外研究表明,夯土遗址在自然气候条件下,长期处于非饱和状态,非饱和状态下土体的持水、蒸发开裂、体变、渗透特性等均存在明显不同,现有研究多集中于饱和状态下风化机理的研究,不完全符合实际工况。因此,如下研究值得进一步展开。

(1)明晰非饱和夯土遗址的持水与蒸发开裂特性。结合非饱和土力学的内容,开展夯土遗址的持水特性研究,采用滤纸法、饱和盐溶液法、露点水势仪等多种测试方法,测定土水特征曲线,结合经典

持水模型,明晰夯土遗址持水特性和适配模型.在此基础上,开展夯土遗址蒸发开裂特性研究,采用蒸发曲线、实际蒸发率等试验指标和PIV、CIAS等试验手段,阐明夯土遗址蒸发下裂纹发育条件和拓展机理.

(2)阐明自然气候条件下,非饱和状态夯土遗址的风化过程与机理.研究干湿循环、冻融循环、水盐运移等条件下,夯土遗址宏观水力特性的演化规律,采用SEM、MIP等技术明晰该过程夯土遗址微观结构的变化,阐明遗址宏观风化规律和微观风化机理,建立预测模型.

(3)在此基础上,研究夯土遗址长期稳定的保护加固方法与评价体系,实现保护加固效果评价,为夯土遗址的长期稳定保护提供保障.

References

- Chen, W. W., Jia, B. B., Shan, X. K., et al., 2023. Preventing the Secondary Salt Deterioration in the Repaired Area of Basal Erosion of Earthen Sites Based on Capillary Barrier Effect. *Construction and Building Materials*, 366: 130168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130168>
- Chen, W. W., Xia, Y. Y., Du, Y. M., et al., 2020. Effect of Wind Erosions on Earthen Sites under the Different Water Contents. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 56(6): 793—798 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W. W., Yang, G., Cui, K., et al., 2017. Field Penetration Test to Strengthen the Scaling off of Earthen Sites. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 53(3): 309—315 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Zhang, H. Y., Yang, L., 2018. Analogy Study on Evolution of Microstructure of Earthen Monument during Natural Weathering Process. *Rock and Soil Mechanics*, 39(11): 4117—4124, 4141 (in Chinese with English abstract).
- Cui, K., Chen, S. Y., An, X. Y., et al., 2022a. Temporal and Spatial Variation of Temperature of Typical Rammed Earth Sites in Northwest China. *Journal of Engineering Geology*, 30(6): 1986—1997 (in Chinese with English abstract).
- Cui, K., Chen, W. W., Han, L., et al., 2011. Effects of Salinized Deterioration and Aeolian Ullage on Soils in Undercutting Area of Earthen Ruins in Arid Region. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 33(9): 1412—1418 (in Chinese with English abstract).
- Cui, K., Chen, W. W., Wang, X. D., et al., 2012. Study of Microscopic Mechanism of Effect of Aeolian Erosion Ullage at Salinization Belt on Earthen Ruins in Arid Region. *Rock and Soil Mechanics*, 33(4): 1167—1172 (in Chinese with English abstract).
- Cui, K., Guan, X. P., Chen, W. W., et al., 2017. Effects of Salinized Deterioration and Aeolian Ullage on Soils in Undercutting Areas of Earthen Ruins in Arid Regions (II). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(10): 1777—1784 (in Chinese with English abstract).
- Cui, K., Zhao, X. Z., Zhu, M. J., et al., 2022b. Effects of Salinized Deterioration and Aeolian Ullage on Soils in Undercutting Areas of Earthen Ruins in Arid Regions (III): Capillary Process. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(11): 2043—2051 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. M., Cui, K., Chen, S. Y., et al., 2022. Quantitative Research on the Development Difference of Scaling off on the Sunward Side and Nightside of Earthen Sites. *Journal of Cultural Heritage*, 57: 107—117. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.08.008>
- Du, Y. M., Dong, W. Q., Cui, K., et al., 2023. Research Progress on the Development Mechanism and Exploratory Protection of the Scaling off on Earthen Sites in NW China. *Science China Technological Sciences*, 66(8): 2183—2196. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2272-5>
- Guo, Q. L., Li, P., Zhang, B., et al., 2023. Laboratory Test of Micro - Nano $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Reinforced Earthen Sites. *Rock and Soil Mechanics*, 44(8): 2221—2228 (in Chinese with English abstract).
- Han, Y., Chen, Y. M., Chen, R. Z., et al., 2023. Effect of Incorporating Discarded Facial Mask Fiber on Mechanical Properties of MICP-Treated Sand. *Construction and Building Materials*, 395: 132299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132299>
- Hu, T. F., Brimblecombe, P., Zhang, Z. M., et al., 2023. Capillary Rise Induced Salt Deterioration on Ancient Wall Paintings at the Mogao Grottoes. *Science of the Total Environment*, 881: 163476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163476>
- Li, J., He, Y. Q., He, C. J., et al., 2024. Diversity and Composition of Microbial Communities in Jinsha Earthen Site under Different Degree of Deterioration. *Environmental Research*, 242: 117675. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117675>
- Li, T. L., 2020. Study on Reinforcement Methods of Earthen Sites and Its Anti-Seismic Stability (Dissertation). China Earthquake Administration, Lanzhou Institute

- of Seismology, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Li, X.M., Liang, Z.K., Ren, K.B., et al., 2023. The Effect of Hydraulic History on Shear Strength of Silt. *International Journal of Geomechanics*, 23(9):04023137. <https://doi.org/10.1061/ijgnai.gmeng-8249>
- Li, Y.H., Gu, J.D., 2022. A More Accurate Definition of Water Characteristics in Stone Materials for an Improved Understanding and Effective Protection of Cultural Heritage from Biodeterioration. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 166: 105338. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105338>
- Liang, T., 2010. A Study on the Protection and Reinforcement of the Ruins of Subashi Temple, Xinjiang, China (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Liang, Y.X., 2023. MICP Experimental Study on Site Soil in Arid and Semi-Arid Region (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.L., Zhao, C., Xiao, Y., 2024. Reaction Principles, Deposition and Failure Mechanisms and Theories of Biomineralization: Progress and Challenges. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 46(7): 1347—1358 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T., 2019. The Influence of Plants on the Rammed Earth of Earthen Sites in Xi'an (Dissertation). Northwest A & F University, Yangling (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.B., Meng, H., Wang, Y.L., et al., 2018. Water is a Critical Factor in Evaluating and Assessing Microbial Colonization and Destruction of Angkor Sandstone Monuments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 133: 9—16. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.05.011>
- Liu, Y.J., 2019. The Study on Environmental Remediation of the Earthen Heritage Sites in the Northwestern China (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Luo, S.G., 2018. Report of the State Council on the Work on Cultural Heritage. *Communique of the Standing Committee of the National People's Congress of the People's Republic of China*, (1): 80—86 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Y., Yang, M.Q., Ni, P.P., et al., 2020. Degradation of Rammed Earth under Wind-Driven Rain: The Case of Fujian Tulou, China. *Construction and Building Materials*, 261: 119989. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119989>
- Manzano-Fernández, S., Vegas López-Manzanares, F., Mileto, C., et al., 2024. Principles and Sustainable Perspectives in the Preservation of Earthen Architecture from the Past Societies of the Iberian Peninsula. *Sustainability*, 16(12):5172. <https://doi.org/10.3390/su16125172>
- Pei, Q.Q., Wang, X.D., Guo, Q.L., et al., 2018. Laboratory Test of Deformation Mechanism of Rammed Roof-Propping Reinforcement at Earthen Heritage Sites in Arid Environment. *Rock and Soil Mechanics*, 39(8):2755—2764 (in Chinese with English abstract).
- Pineda, P., Iranzo, A., 2017. Analysis of Sand-Loaded Air Flow Erosion in Heritage Sites by Computational Fluid Dynamics: Method and Damage Prediction. *Journal of Cultural Heritage*, 25:75—86. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.12.005>
- Qiao, Y.F., Tuttolomondo, A., Lu, X.B., et al., 2021. A Generalized Water Retention Model with Soil Fabric Evolution. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 25: 100205. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2020.100205>
- Ren, K.B., Wang, B., Li, X.M., et al., 2019. Strength Properties and Pore-Size Distribution of Earthen Archaeological Site under Dry-Wet Cycles of Capillary Water. *Rock and Soil Mechanics*, 40(3): 962—970 (in Chinese with English abstract).
- Richards, J., 2020. Environmental Drivers of Earthen Heritage Deterioration in Dryland Regions (Dissertation). University of Oxford, Oxford.
- Richards, J., Guo, Q.L., Viles, H., et al., 2022. Moisture Content and Material Density Affects Severity of Frost Damage in Earthen Heritage. *Science of the Total Environment*, 819: 153047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153047>
- Richards, J., Zhao, G., Zhang, H., et al., 2019. A Controlled Field Experiment to Investigate the Deterioration of Earthen Heritage by Wind and Rain. *Heritage Science*, 7: 51. <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0293-7>
- Shen, Y.X., 2017. Salt Weathering Mechanism of Ancient Earthen Material in Arid Area of Northwest China: A Case Study of Na₂SO₄-NaCl Salt Mixtures (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Shi, L., 2021. Study on Sacrificial Layer Protection Material of Anti-Weathering of Earthen Wall in Xinzhou (Dissertation). Beijing University of Chemical Technology, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Shukla, S., 2016. Seismic Strengthening of Rammed Earth Constructions Using Reinforced Coatings (Dissertation). University of Minho, Braga.
- Sun, B., Li, X.Y., Cui, K., et al., 2023. Experimental Study on

- the Effects of Hydrochemistry and Periodic Changes in Temperature and Humidity on Sandstone Weathering in the Longshan Grottoes. *Heritage Science*, 11:173. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01021-3>
- Sun, B., Zhou, Z.H., Zhang, H.Y., et al., 2009. The Role of Temperature in Weathering of Rammed Earth Building Sites. *Dunhuang Research*, (6): 66—70(in Chinese with English abstract).
- Sun, M.L., Chen, Y.R., Shen, Y.X., 2022. New Progress and Prospects in Research on Earthen Site Deterioration. *Dunhuang Research*, (2): 136—148(in Chinese with English abstract).
- Sun, M.L., Li, Z.X., Wang, X.D., et al., 2007. Classification of Deteriorations Associated with Many Earthen Heritage Sites in Arid Areas of Northwest China. *Journal of Engineering Geology*, 15(6): 772—778, 765 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C.B., 2023. Risk Assessment Methods for Earthen Sites Deterioration in Arid Area of Northwest China and Application (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.B., 2009. Study on the Causes for Deterioration and Environmental Regionalization of Earthen Heritage Sites in Northern China (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.D., Zhang, B., Pei, Q.Q., et al., 2020. Experimental Studies on Sacrificial Layer in Conservation of Earthen Sites. *Journal of Cultural Heritage*, 41: 74—83. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.003>
- Wang, Y., Huang, W.J., Han, Y.Q., et al., 2022. Microbial Diversity of Archaeological Ruins of Liangzhu City and Its Correlation with Environmental Factors. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 175: 105501. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105501>
- Wei, D.C., 2019. Physical and Mechanical Properties of Earthen Site Soil under Snow Cover and Snow Water Infiltration (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Xia, Y., Fu, F., Wang, J.Y., et al., 2023. Salt Enrichment and Its Deterioration in Earthen Sites in Emperor Qin's Mausoleum Site Museum, China. *Indoor and Built Environment*, 32(9): 1862—1874. <https://doi.org/10.1177/1420326x231175347>
- Xu, L.F., Weng, X.L., Zhang, A.J., et al., 2021. Experimental Study of Water Retention Characteristics and Vapor Migration of Earth Material under Relative Humidity Variation. *Rock and Soil Mechanics*, 42(9): 2489—2498(in Chinese with English abstract).
- Yan, G.S., Zhang, H.Y., Wang, X.D., et al., 2011. Durability of Earthen Architecture Ruins under Cyclic Freezing and Thawing. *Rock and Soil Mechanics*, 32(8): 2267—2273 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L., Zhang, H.Y., Liu, P., et al., 2017. Microcosmic Study on Superficial Layer Diseases in Rammed Earthen Ruins of Great Wall in Arid Area. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 31(11): 75—80(in Chinese with English abstract).
- Yang, S.L., 2018. The Salt Damage Characteristics and Prevention of Rammed Earthen Sites in the Northwest of China (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Yang, S., Wu, L.F., Wu, B., et al., 2020. Diversity and Structure of Soil Microbiota of the Jinsha Earthen Relic. *PLoS One*, 15(7): e0236165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236165>
- Yang, X.J., Wu, F.S., Jia, R.L., et al., 2023. Advances in Research on the Effects of Plants on Rock-Soil Relics and Their Conservation Technology. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 35(5): 150—164(in Chinese with English abstract).
- Yue, J.W., Huang, X.J., Xing, X.X., et al., 2021a. Experimental Study on the Improvement of the Particle Gradation of the Yellow River Silt Based on MICP Technology. *Advanced Engineering Sciences*, 53(3): 89—98 (in Chinese with English abstract).
- Yue, J.W., Li, J.L., Liu, D.L., et al., 2021b. Study on Crack Prevention of Earthen Sites Using MICP Technology. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 41(3): 455—462 (in Chinese with English abstract).
- Zehnder, K., 2007. Long-Term Monitoring of Wall Paintings Affected by Soluble Salts. *Environmental Geology*, 52(2): 353—367. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0463-2>
- Zhang, B., 2016. Exploratory Research on the Anti-Weathering Sacrificial Layer of Beiting Ancient City (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., 2021. Research on the Adaptability of Weathering Prevention Technology in Earthen Sites under Different Climatic Conditions (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Wang, X.D., Guo, Q.L., et al., 2016. Quality Control Research on Reinforcement Technology Tests Using Rammed Earth to Fill Unsupported Walls in a Western Xia Imperial Tomb. *Dunhuang Research*, (5): 135—141 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Li, Y.H., Huang, S.P., et al., 2008. Analysis and

- Study on the Composition of White Residue from Soil Sites in Shaanxi Province. *Archaeology and Cultural Relics*, (3):105—107(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. Y., Liu, P., Wang, J. F., et al., 2009. Generation and Detachment of Surface Crust on Ancient Earthen Architectures. *Rock and Soil Mechanics*, 30(7):1883—1891 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. Y., Yan, G. S., Zhao, T. Y., et al., 2011. Durability of Earthen Architecture Ruins under Cyclic Wetting and Drying. *Rock and Soil Mechanics*, 32(2):347—355(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. Y., Yang, L., Liu, P., et al., 2018. Study on Thermal Deterioration Simulation Test of Superficial Layer on Rammed Earthen Ruins. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 45(3): 149—156 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., 2023. Knowledge of Earthen Heritage Deterioration in Dry Areas of China: Salinity Effect on the Formation of Cracked Surface Crust. *Heritage Science*, 11: 41. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00890-y>
- Zhang, Y. F., 2021. Study on Engineering Geological Properties of the Ming Rammed Earth Wall under Irrigation Condition (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. N., 2023. Study on the Temporal and Spatial Evolution of the Construction Technique of Chinese Earthen Sites (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G., Ren, K. B., Ma, Q. W., 2013. Research on Collapse Failure Process and Mechanism of Earthen Sites under the Action of Capillary Water. *Applied Mechanics and Materials*, (438—439):1226—1231.
- Zhao, H. Y., Li, Z. X., Han, W. F., et al., 2003. Main Diseases and Their Causes of Earthen Ruins in Arid Region of Northwestern China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(Suppl. 2): 2875—2880 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Yang, X. F., Wang, F. R., et al., 2022. Analysis of the Deterioration Characteristics and Mechanism of Soil Sites under the Capillary Water Dry Wet Cycle. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 58(6): 804—811, 818(in Chinese with English abstract).
- 中文参考文献**
- 谌文武, 夏云云, 杜昱民, 等, 2020. 不同含水率下遗址土体的抗风蚀能力研究. 兰州大学学报(自然科学版), 56(6): 793—798.
- 谌文武, 杨光, 崔凯, 等, 2017. 土遗址片状剥离加固现场渗透试验. 兰州大学学报(自然科学版), 53(3):309—315.
- 陈毅, 张虎元, 杨龙, 2018. 遗址土劣化进程中微观结构变化的类比研究. 岩土力学, 39(11):4117—4124, 4141.
- 崔凯, 陈思雨, 安欣悦, 等, 2022a. 西北地区典型夯土遗址温度时空变化规律研究. 工程地质学报, 30(6):1986—1997.
- 崔凯, 谌文武, 韩琳, 等, 2011. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应. 岩土工程学报, 33(9):1412—1418.
- 崔凯, 谌文武, 王旭东, 等, 2012. 干旱区土遗址盐渍带风蚀损耗效应微观机制研究. 岩土力学, 33(4):1167—1172.
- 崔凯, 关喜鹏, 谌文武, 等, 2017. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应(II). 岩土工程学报, 39(10):1777—1784.
- 崔凯, 赵晓铮, 朱鸣基, 等, 2022b. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应(III):毛细过程. 岩土工程学报, 44(11):2043—2051.
- 郭青林, 李平, 张博, 等, 2023. 微纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 加固遗址土室内试验研究. 岩土力学, 44(8):2221—2228.
- 李桐林, 2020. 土遗址加固方法及其抗震稳定性研究(硕士学位论文). 兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- 梁涛, 2010. 新疆苏巴什佛寺遗址保护加固研究(博士学位论文). 兰州:兰州大学.
- 梁玉鑫, 2023. MICP 加固干旱半干旱地区遗址土的特性与机理研究(硕士学位论文). 兰州:兰州大学.
- 刘汉龙, 赵常, 肖杨, 2024. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论:研究进展与挑战. 岩土工程学报, 46(7): 1347—1358.
- 刘甜, 2019. 植物对西安市土遗址夯土的影响研究(硕士学位论文). 杨凌:西北农林科技大学.
- 刘易见, 2019. 西北地区土遗址环境整治问题研究(硕士学位论文). 兰州:兰州大学.
- 雒树刚, 2018. 国务院关于文化遗产工作情况的报告. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, (1): 80—86.
- 裴强强, 王旭东, 郭青林, 等, 2018. 干旱环境下土遗址夯补支顶加固变形机制室内试验研究. 岩土力学, 39(8): 2755—2764.
- 任克彬, 王博, 李新明, 等, 2019. 毛细水干湿循环作用下土遗址的强度特性与孔隙分布特征. 岩土力学, 40(3): 962—970.
- 沈云霞, 2017. 西北干旱区遗址土盐风化机理研究(博士学位论文). 兰州:兰州大学.
- 石落, 2020. 忻州土城墙防风化牺牲层保护材料研究(硕士学位论文). 北京:北京化工大学.
- 孙博, 周仲华, 张虎元, 等, 2009. 温度在夯土建筑遗址风化中的作用. 敦煌研究 (6):66—70.
- 孙满利, 陈彦榕, 沈云霞, 2022. 土遗址病害研究新进展与展望. 敦煌研究 (2):136—148.

- 孙满利,李最雄,王旭东,等,2007.干旱区土遗址病害的分类研究.工程地质学报,15(6):772—778,765.
- 王楚斌,2023.西北干旱区土遗址本体劣化风险评估方法研究与应用(硕士学位论文).兰州:兰州大学.
- 王石斌,2009.北方土遗址的病害成因与环境区划研究(硕士学位论文).兰州:兰州大学.
- 魏大川,2019.积雪覆盖与雪水入渗条件下遗址土的物理力学性质(硕士学位论文).兰州:兰州大学.
- 徐龙飞,翁效林,张爱军,等,2021.变湿度条件下生土材料持水特性及气态水迁移效应试验研究.岩土力学,42(9):2489—2498.
- 严耿升,张虎元,王晓东,等,2011.干旱区土建筑遗址冻融耐久性研究.岩土力学,32(8):2267—2273.
- 杨龙,张虎元,刘平,等,2017.干旱区夯土长城遗址表层病害微观研究.干旱区资源与环境,31(11):75—80.
- 杨善龙,2018.中国西北地区夯土遗址盐害特征及防治研究(博士学位论文).西安:西北大学.
- 杨小菊,武发思,贾荣亮,等,2023.植物对岩土文物的作用及保护技术研究进展.文物保护与考古科学,35(5):150—164.
- 岳建伟,黄轩嘉,邢旋旋,等,2021a.基于MICP改良黄河泥沙颗粒级配的试验研究.工程科学与技术,53(3):89—98.
- 岳建伟,李嘉乐,刘东鹭,等,2021b.MICP技术对遗址土开裂抑制作用的试验探究.防灾减灾工程学报,41(3):455—462.
- 张博,2016.北庭故城城墙防风化牺牲层探索性研究(硕士学位论文).兰州:兰州大学.
- 张博,2021.不同气候环境下土遗址防风化技术适应性研究(博士学位论文).兰州:兰州大学.
- 张博,王旭东,郭青林,等,2016.西夏陵夯补支顶加固工艺质量控制研究.敦煌研究,(5):135—141.
- 张虎元,刘平,王锦芳,等,2009.土建筑遗址表面结皮形成与剥离机制研究.岩土力学,30(7):1883—1891.
- 张虎元,严耿升,赵天宇,等,2011.土建筑遗址干湿耐久性研究.岩土力学,32(2):347—355.
- 张虎元,杨龙,刘平,等,2018.夯土遗址表层热劣化模拟试验研究.湖南大学学报(自然科学版),45(3):149—156.
- 张慧,李玉虎,黄四平,等,2008.陕西境内土遗址析白物成份分析研究.考古与文物,(3):105—107.
- 张燕芳,2021.灌溉条件下明长城夯土墙体工程地质性质研究(硕士学位论文).兰州:兰州大学.
- 张忆宁,2023.中国土遗址营造技术时空演变规律研究(硕士学位论文).兰州:兰州大学.
- 赵海英,李最雄,韩文峰,等,2003.西北干旱区土遗址的主要病害及成因.岩石力学与工程学报,22(增刊2):2875—2880.
- 周杰,杨晓芳,王逢睿,等,2022.毛细水干—湿循环作用下的土遗址劣化特征与机理.兰州大学学报(自然科学版),58(6):804—811,818.