



超声波雾化技术在汉阳陵土遗址补水保护实验

常彬¹, 李佳轩¹, 李库², 马涛³, 顾兆林¹, 罗昔联¹

(1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 汉景帝阳陵博物院 科技保护部, 陕西 西安 710201;
3. 陕西科技大学 文物保护科学与技术学院, 陕西 西安 710021)

摘要 干裂和盐分富集是暴露于土壤空气耦合环境中的土遗址常见的劣化问题。单纯依赖维持高相对湿度的空气环境, 无法完全避免土遗址的劣化, 主要原因在于水分存在从土遗址向空气环境的单向迁移。为此, 该研究提出了一种新的保护策略, 在土遗址表面构建雾状大气, 通过超声波雾化技术生成含微米级水滴的近饱和空气, 促进液态水向土遗址的回迁, 从而抑制劣化进程。为验证该方法的有效性, 在西安市汉阳陵博物馆的模拟土遗址展厅中建立了超声波雾化补水系统, 并通过一系列实验测试对其效果进行了评估。实验结果表明, 补水处理后, 土遗址表层土壤含水量恢复至接近挖掘前的水平, 部分裂缝得到了显著愈合, 表层可溶盐含量明显降低, 未观察到盐害的发生。此外, 超声波雾化补水方法在土遗址出土初期表现出最佳的补水效果, 为该技术在土遗址保护中的应用提供了重要的实践依据。

关键词 土遗址; 补水保护; 超声波雾化; 干裂; 盐分富集

中图分类号: TU411 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2025-02-014

Experimental investigation of ultrasonic atomization for moisture preservation at Han Yangling earthen sites

CHANG Bin¹, LI Jiaxuan¹, LI Ku², MA Tao³, GU Zhaolin¹, LUO Xilian¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Science and Technology Protection, Hanyangling Museum, Xi'an 710201, China;

3. School of Conservation Science & Technology for Cultural Heritage,
Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract Cracking and salt accumulation are common forms of degradation in earthen sites exposed to soil-air interactions. Maintaining a high relative humidity alone cannot fully prevent degradation in earthen sites, mainly because moisture migrates unidirectionally from the site to the surrounding air. To address this, the study proposes a novel conservation strategy: Creating a mist-like atmosphere on the earthen site's surface using ultrasonic atomization technology to generate near-saturated air containing micron-sized water droplets. This promotes the return migration of liquid water, thereby inhibiting degradation. To verify the method's effectiveness, an ultrasonic atomization moisture system was established in a simulated exhibition hall of an earthen site at the Han Yangling Museum in Xi'an, and experimental tests were conducted to assess its performance. The

收稿日期: 2024-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(52078417); 陕西省重点研发计划(2024SF-YBXM-679)。

第一作者: 常彬, 男, 博士生, 从事土遗址预防性保护技术研究, changb@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者: 罗昔联, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事博物馆环境监测与调控等领域研究, xlluo@mail.xjtu.edu.cn。

results show that after moisture treatment, the soil moisture content at the surface of the earthen site returned to near its pre-excavation level. Some cracks healed significantly, and the soluble salt content at the surface decreased, with no salt damage observed. Furthermore, the ultrasonic atomization method showed optimal moisture effects during the early stages of excavation, offering valuable practical insights for its application in earthen site conservation.

Keywords earthen sites; moisture preservation; ultrasonic atomization; cracking; salt enrichment

土遗址作为重要的历史文化载体,全球范围内数量众多且分布广泛。尤其在中国,历史土遗址占据了国家重点保护单位的绝大部分^[1]。然而,这些珍贵的历史土遗址在出土后,因环境因素变化而面临干裂和盐分富集等劣化问题,这不仅损害了遗址结构的完整性,也削弱了其历史价值。因此,探索有效的保护和修复方法是实现土遗址可持续保存的关键。传统的保护措施,如在土遗址原址上建立博物馆,虽然在一定程度上减少了外界环境对遗址的影响,但温湿度控制等保存环境技术的不完善,仍使许多土遗址处于非理想的保存状态^[2-3]。例如,秦始皇兵马俑博物馆和半坡遗址博物馆等,由于温湿度波动大和空气干燥,馆内土遗址普遍出现干裂和盐害现象,进一步恶化了这些遗址的保存状况^[4]。

土壤水分蒸发被普遍认为是导致土遗址表面干裂的主导因素^[5-6]。汉阳陵博物馆通过将文物空间与游客空间分隔,并将土遗址展厅内相对湿度维持在 95% 以上,该高湿环境策略在短期内有效缓解了土遗址的干裂和劣化速度^[7]。然而,长期观察表明,单纯依赖空气湿度调整不能根本解决土遗址的失水问题,土壤持续失水及表面干裂问题仍然存在^[8-10]。因此,探索直接向土遗址补充液态水的保护方法成为新的研究方向。这种方法不仅是对传统温湿度控制手段的有效补充,也代表了土遗址保护理念的创新。然而,传统人工补水方法如使用喷水壶或简单灌溉系统进行局部补水,虽能短期缓解干裂问题,却可能导致土体板结和应力不平衡,进而加剧土遗址劣化^[11-12]。显然,这些现有补水措施在安全性和稳定性方面不足,无法满足长期文物预防性保护需求。

为响应土遗址急迫的补水需求并规避补水措施可能引发的二次破坏,本研究引入超声波雾化技术进行土遗址补水保湿。该技术作为一种先进的空气加湿手段,利用高频振动将水分解成微米级水滴,通过风力驱动装置将这些水滴输送至空气中,形成细腻均匀的水雾,实现加湿^[13-15]。超

声波雾化技术因其加湿效果显著、雾滴细小且分布均匀等特点,在办公室、工厂车间和农业大棚等多个领域得到广泛应用^[16-17]。尽管超声波雾化技术在土遗址补水方面尚处于初步探索阶段,但其显著的安全性和稳定性使其有望替代传统粗犷的人工补水方法,成为有效的补水手段。本研究在此基础上设计了土遗址补水保护方案,通过自动控制的超声波雾化加湿系统,将微米级水滴均匀送入土遗址保存区域,构建湿润的保存环境。在汉阳陵模拟考古基地搭建的实验室中,开展了一系列实验,以验证该系统的有效性和安全性。本研究旨在为土遗址的补水保护提供新的思路和技术支持。

1 土遗址补水需求的理论依据

水分蒸发是导致土遗址干裂劣化的主因(见图 1)。当土壤含水率降至临界开裂值以下,不仅发生干裂劣化,还伴随着盐分富集现象,即土壤中的可溶盐随水分蒸发至土表^[18]。水分在土壤和空气之间的迁移化学势如公式(1)所示^[8],

$$\Delta\mu = \underbrace{-2.41 - 0.002\theta^{-1.75}}_{\text{液态水}} - \underbrace{\frac{RT}{M_w} \ln(RH)}_{\text{水蒸气}} \quad (1)$$

式中: θ 表示土壤中自由水含量(kg/kg); M_w 表示水的分子质量(kg/mol); R 是通用气体常数($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T 和 RH 分别表示空气中水蒸气的温度和相对湿度。当 $\Delta\mu$ 值大于 0, 土壤中的水转移到空气; 当 $\Delta\mu$ 值小于 0, 空气中的水蒸气转为液态水进入土壤; 当 $\Delta\mu$ 值等于 0, 土壤水分与环境达到平衡。研究表明, 即使相对湿度高达 99.9%, $\Delta\mu$ 仍然高于 0, 即水分仍自土体向空气迁移^[8]。因此, 保持土遗址的初始含水量需直接补充液态水。另外, 尽管大多数无机土遗址保存环境对温度要求不严, 但对温湿度短期波动有限制^[19]。补水期间, 温湿度波动导致土壤表面可溶盐重复结晶、溶解, 加剧干裂。因此, 依据中国博物馆文物

保存标准和美国暖通空调手册,建议控制土遗址补水期间温度和相对湿度波动分别在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 5\%$ 以内,以最小化温湿度波动对补水的影响^[20-21]。

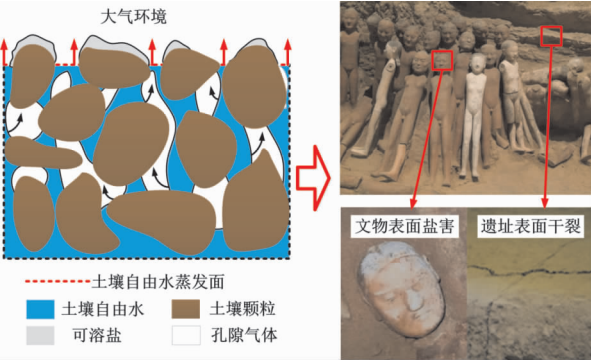


图1 土壤水分迁移机理及遗址表层劣化现象

Fig.1 Mechanisms of soil moisture migration and surface deterioration of earthen sites

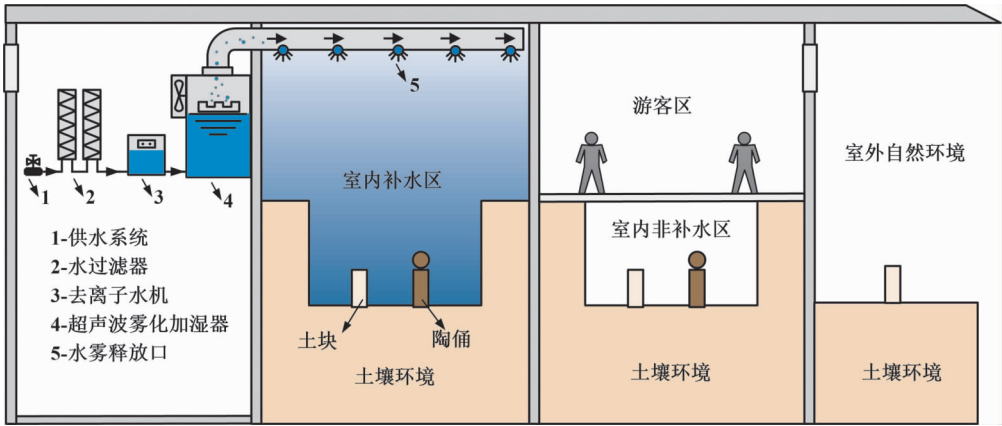
2 实验系统及分析方法

2.1 实验系统

为增强实验的可靠性及更真切展现土遗址补水保护的成效,本实验选址于距汉阳陵博物馆 200 m

处的汉阳陵模拟考古基地。依照真实陪葬坑的尺寸,复原出一个遗址葬坑,其主空间的长、宽、高分别为 300、200、100 cm。图2展示了整套土遗址补水保护系统,包括位于选定实验场地的土遗址补水系统原理、实验环境舱以及实验葬坑。实验环境舱内划分为补水区与非补水区,以便进行对比研究。

补水系统由水过滤器、去离子水供应器和超声波雾化加湿器组成。去离子水经超声波雾化加湿器处理后,转化为 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的细微水滴,随着送风系统进入室内文物保护区域,以达成土遗址的补水目的。文物保护区内布置有模拟遗址土块和仿制陶俑,其中土块包括干燥土块(初始含水率 5%)和湿润土块(初始含水率 15%),分别象征出土后一段时间的干燥土遗址和刚出土时的潮湿土遗址。这些土块分布于补水区与非补水区(室内外),仿制陶俑则均匀放置于补水区和室内非补水区的葬坑底部。在形状上,方形土块的长、宽、高分别为 15、5、10 cm,柱形土块的底面直径和高均为 10 cm。



(a) 实验系统示意图



(b) 实验舱



(c) 实验葬坑

图2 土遗址补水实验系统

Fig.2 Earthen site moisturizing experimental system

2.2 数据采集系统

图 3 所示为数据采集系统的布置情况。空气温湿度传感器 Ta-1 到 Ta-5 被用于监测不同区域的环境条件。Ta-1 到 Ta-3 专门用于观察土遗址补水区的温湿度,其中 Ta-1 安置于葬坑底部上方 2 cm,Ta-2 位于葬坑中部,而 Ta-3 与葬坑隔梁表面保持同一高度。Ta-4 和 Ta-5 分别用于监测室内非补水区与室外自然环境区的温湿度,二者的安装高度与 Ta-2 一致。S-1 到 S-8 为土壤传感器,负责记录补水区土壤的含水率及电导率的变化情况。S-1 到 S-5 分别安置在葬坑底部以下 5、10、30、50、90 cm 的深度,S-6 到 S-8 则安置在葬坑隔梁表面以下 10、30、50 cm 的位置。空气温湿度传感器的测量精度达到 $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 3\%$,土壤传感器对含水率和电导率的测量精度分别为 $\pm 2\%$ 和 $\pm 3\%$ (测量范围 $0\sim 10\,000\text{ }\mu\text{s}/\text{cm}$)。

2.3 实验工况

为迅速补充土遗址水分,在实验初期,系统采

用全天候间歇性补水模式。当含水率达到较高水平(以汉阳陵博物馆附近地下黄土的平均含水率 10% 为参考值)时,系统调整为仅夜间运行的保水模式,以维持土壤水分,且该模式有助于减少白天补水时可能对土遗址观赏性造成的影响(见表 1)。实验调试结果显示,超声波加湿器的补水速率为 $4.21\times 10^{-5}\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{cm}^2)$ 。

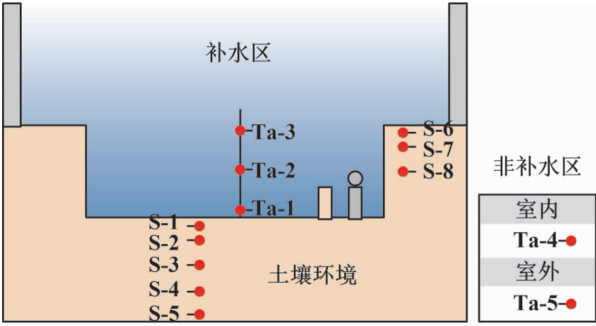


图 3 数据采集系统
Fig. 3 Data acquisition system

表 1 系统运行工况

Tab. 1 Operating conditions of the system

补水策略	系统运行模式	周期/d
补水阶段	全天运行,超声波雾化加湿器开启时间 30 min,间隔 1 h	15
保水阶段	夜间运行(19:00—7:00),超声波雾化加湿器开启时间 1 h,间隔 4 h	128

2.4 采样分析

为初步评价补水系统的效果,本研究采取记录土块的日重量变化作为衡量指标,并在完成补水阶段及部分保水阶段后,对土块实施分层采样分析。从每个土块表层以下 10 cm 处开始,每隔 1 cm 进行 1 次样品采集。采集得到的土壤样品和整个陶俑经过 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干 8 h,以确定其含水率。然后,通过离子色谱法测定土壤样品中的盐分含量,主要针对 Na^{+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 等离子,将上述离子含量的总和作为表征土壤样品总盐含量的指标,这些离子是汉阳陵土遗址中常见的可溶性盐离子。

3 结果分析

3.1 遗址展厅环境温湿度状况

图 4 为补水期间补水区及非补水区的温湿度分布情况。相较于室内非补水区 and 室外自然环境区,补水区的温湿度分布更为均匀,且其相对湿度能稳定维持在接近饱和的高湿水平。这一稳定的

高湿环境有利于抑制由超声波雾化系统产生的水滴的蒸发,从而提高土遗址的补水效率。具体来说,在补水区,纵向 3 个测点平均温湿度日波动值分别为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 2.7% ,显示出良好的稳定性。相对地,室内非补水区 and 室外自然环境区的温湿度日波动值则显著较大,特别是其相对湿度的日波动值超过了 10%。尽管室内非补水区处于较高的相对湿度水平,但湿度的剧烈波动也会导致土壤中水分的加速蒸发,从而不利于土遗址的长期保存。

3.2 土块的含水率和含盐量分布特征

图 5 为实验初期方形和圆柱土块含水率随时间的变化趋势,二者表现出相似的模式。在补水区,土块含水率显著上升,补水阶段结束时,干燥土块和湿润土块的含水率分别达到了 12% 和 20%。进入保水阶段后,这些土块的含水率能够稳定在补水阶段的水平,含水率平均波动均低于 1%。这说明在超声波雾化加湿系统的调控下,土块含水率得以有效恢复至较高水平,尤其是湿润土块,在短期补水后,其含水率接近饱和状态,恢

复至土遗址出土前的水分状态。相比之下,在非补水区,土块含水率整体呈现下降趋势,湿润土块的含水率更是在实验前 5 d 从 17% 迅速降至 4%。这一现象表明,超声波雾化加湿系统在处理

刚出土的土遗址时尤其有效,及时的补水保护措施能够显著减缓土遗址原有水分的蒸发,进而维护土壤的原始状态。

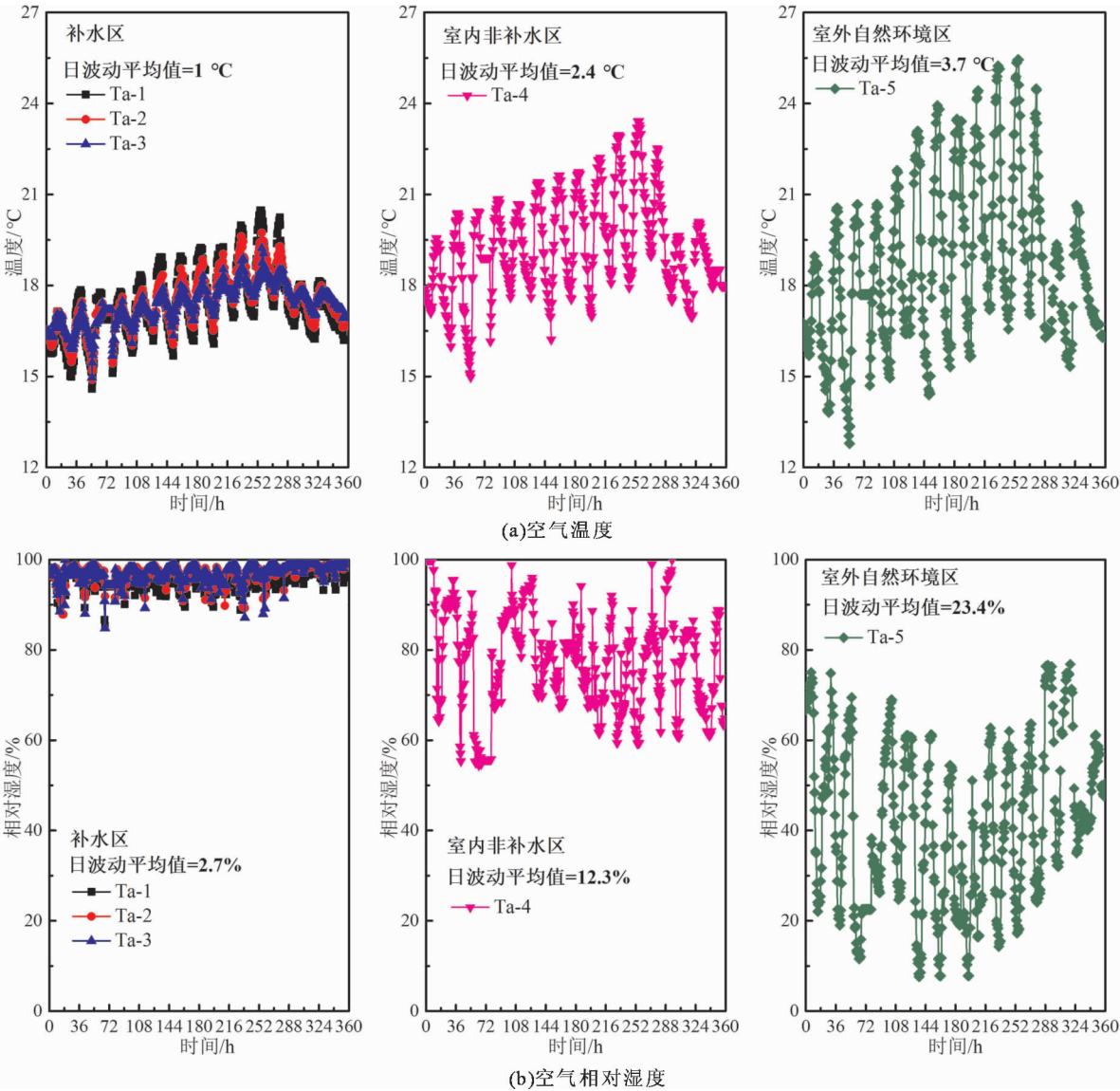


图 4 遗址展厅空间温湿度

Fig. 4 Temperature and relative humidity in the earthen site exhibition hall

图 6 为土块纵向含水率的分布。在补水区,土块的纵向含水率分布相对均匀,土块表层与底层的含水率差距均小于 1%。这揭示了土块能够有效均匀吸收系统产生的细小水滴,并在内部形成新的水分平衡,有利于阻止土壤底部可溶盐向表层回流。相比之下,非补水区的土块纵向含水率分布显著不稳定,土块表层以下 5 cm 深度的含水率普遍偏低,表层与底层含水率存在较显著差异。这种含水率的不均匀分布是导致土壤干裂加剧的关键因素,也是当前许多未进行环境调控的

博物馆中土遗址所面临的主要问题。

图 7 为土块纵向的盐分含量分布。在补水区,土块纵向的含盐量分布呈现出上部低、下部高的趋势。特别是干燥土块,其表层以下 3 cm 深度的含盐量显著减少,这说明随着水分从表层向内部运移,表层的可溶盐被溶解并随水分向内部迁移,最终在土块的更深处聚集。另一方面,湿润土块的纵向含盐量变化较为平缓,湿润土块的孔隙中水分含量较高,促进了水分从表层向底层的移动,使得可溶盐在土块内部分布更为均匀。相反,

在非补水区,土块的纵向含盐量分布表现为上高下低的趋势,且非补水区土块表层的含盐量约为补水区土块的近 3 倍。这揭示出非补水区土块表

层可溶盐未得到溶解或迁移,而是累积,即成为盐害发生的潜在诱因。

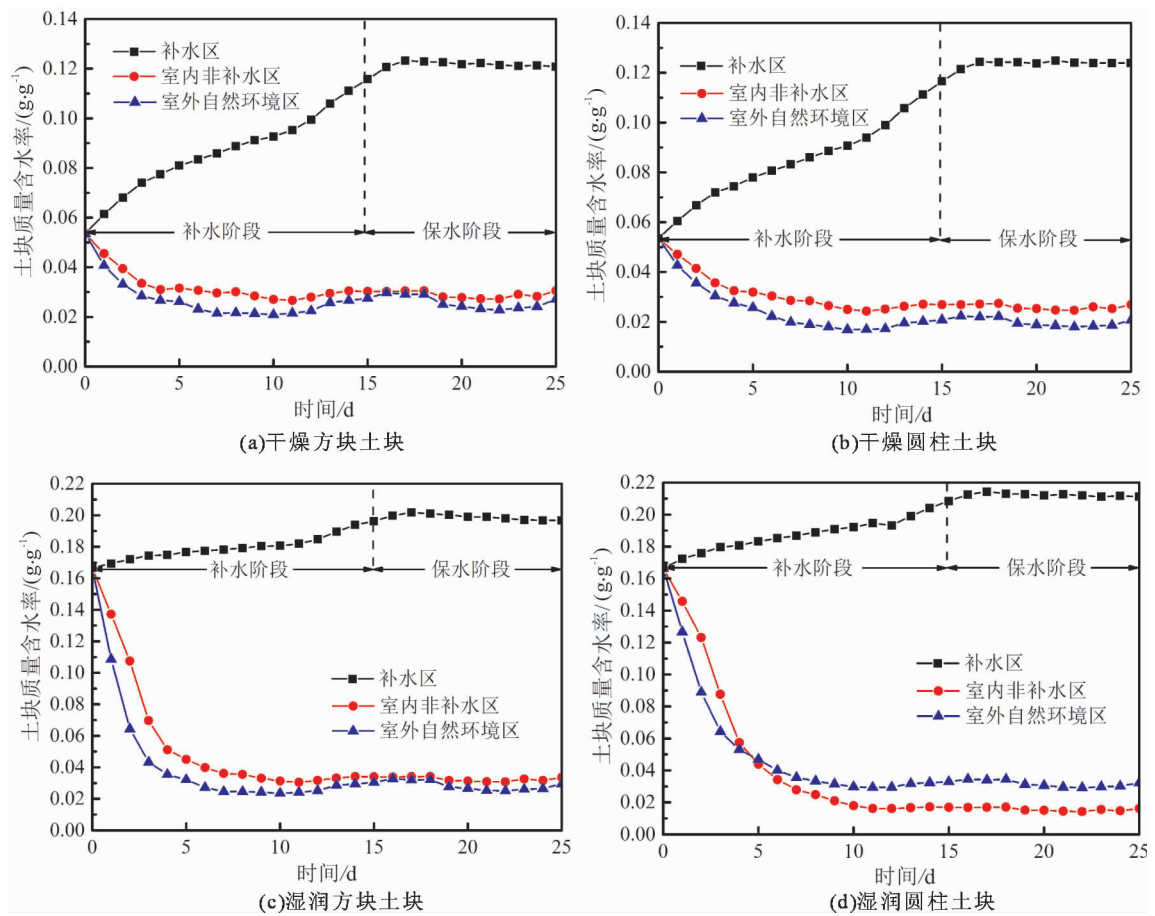


图 5 土块整体在各实验区的含水率状态

Fig. 5 Moisture retention of adobes in different zones

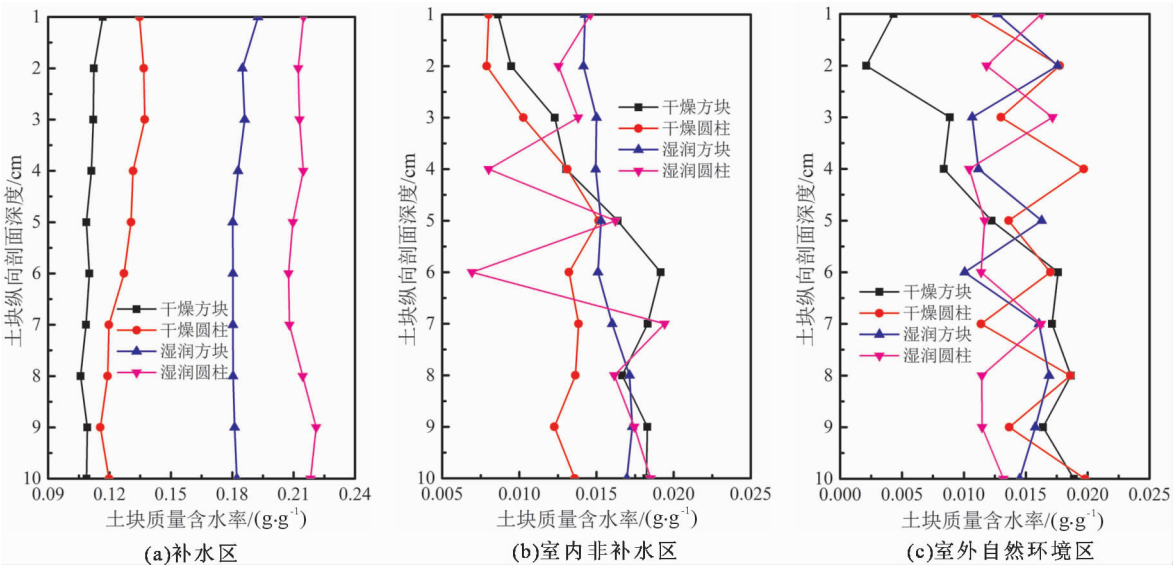


图 6 土块纵向含水率分布

Fig. 6 Vertical distribution of moisture content inadobes

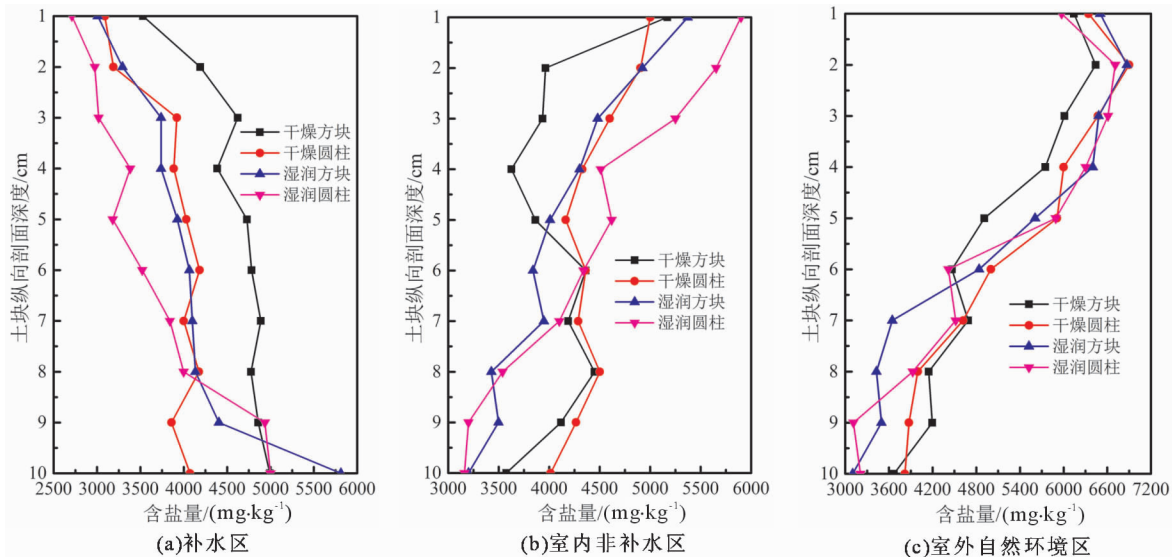


图7 土块纵向含盐量分布

Fig.7 Vertical distribution of salt content in adobes

3.3 葬坑本体含水率和含盐量分布特征

为了深入评估超声波雾化加湿系统在长期应用中对土遗址补水保护的成效,对土遗址本体含水率进行长周期监测至关重要。图8展示了长时间内葬坑本体含水率随深度的动态变化。从图8(a)可以观察到,在系统运行的4个多月期间,葬坑底部5、10、30 cm深度的含水率呈逐步上升趋势,并最终趋于稳定,分别达到25%、26%、22%。

相对而言,葬坑底部50和90 cm深度的含水率变化不显著,稳定值分别为11%和13%。从图8(b)可以看出,葬坑隔梁的补水效果与葬坑底部相比较为浅显,特别是隔梁10 cm深度位置的含水率回升至20%以上所需时间,比葬坑底部多出约10 d。总的来说,在超声波雾化加湿系统的调控下,土遗址本体含水率不仅能在短时间内恢复至出土前的水平,而且在长时间周期内能保持稳定状态,验证了系统的有效性和持续性。

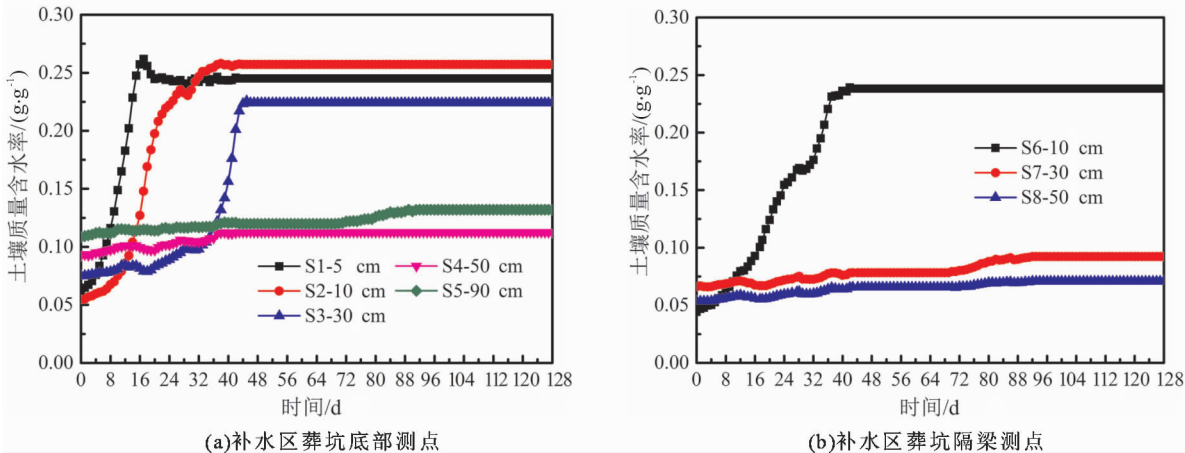


图8 长周期下补水区土遗址含水率状态

Fig.8 Moisture content of earthen sites in the moisturizing zone over extended periods

另外,通过监测土遗址本体的电导率,可以间接掌握土壤盐分浓度的变化情况,图9为长周期内葬坑本体电导率随深度的动态变化。从图9(a)可以看出,在葬坑底部的5、10、30 cm深度,电导率经历了明显的波动,包括上升、稳定和下降阶段。特别地,5 cm处的电导率在经历上升期后趋

于平稳,这一现象归因于底层表土持续吸收液态水,进而导致表层盐分浓度被稀释至较稳定水平。与此同时,10和30 cm深度处的电导率呈现累积峰值,表明在这些深度处盐分经历了短期富集。然而,随着水分继续向下渗透,这些局部富集的盐分浓度逐步降至较稳定的低盐水平。另一方面,

由于 50 和 90 cm 深度处的含水率无显著变化,相应的电导率也未观察到明显波动。图 9(b)可以看出,葬坑隔梁在 10 cm 深度处的电导率变化趋势与葬坑底部相似,而 30 和 50 cm 深度的电导率则无显著变动。在土遗址含水率得以恢复的同

时,土壤盐分浓度显著降低,从而保持土遗址表层土壤的盐分浓度在较低水平。这一稳定的含水率有助于保持土遗址各层盐分浓度的低稳态,有效避免了盐分局部富集所引发的盐害问题。

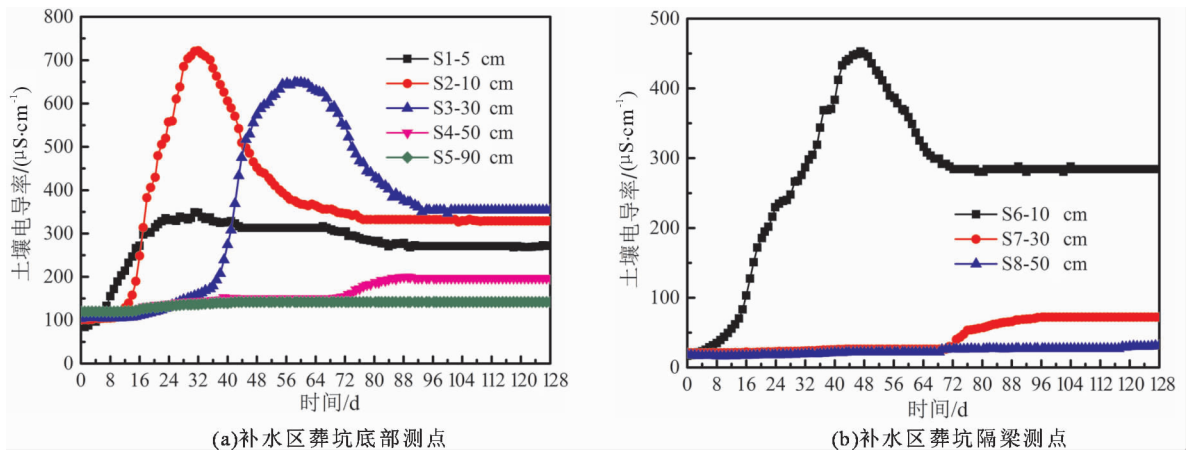


图 9 长周期下补水区土遗址含盐量状态
Fig. 9 Salt content of earthen sites in the moisturizing zone over extended periods

3.4 遗址表面劣化发育状况

裂隙是土遗址表面的一种常见病害,定期监测裂隙的发展状况对于评估补水系统的效果 and 安全性至关重要。如图 10 所示,经过 4 个多月的补水保护,葬坑表面的裂隙表现出不同程度的愈合。这一变化主要因为液态水滴的渗透使土壤表面含水率提高,土壤颗粒吸水膨胀,导致裂隙收缩并最终愈合。特别是对于初期裂缝较细的情况,愈合效果显著。相比之下,开裂程度更大的裂隙愈合

速度较慢。因此,超声波雾化加湿系统产生的水雾对土遗址表面无二次破坏作用,有效维护了土遗址的真实性和完整性。此外,从图 11 可以看出,补水区的陶俑含水率平均为 14%,显著高于非补水区的 2%。补水区陶俑表面色泽鲜明,无明显劣化现象,而非补水区的陶俑表面则出现了干燥及部分泛白,这进一步说明了补水保护对于陶俑的积极作用。

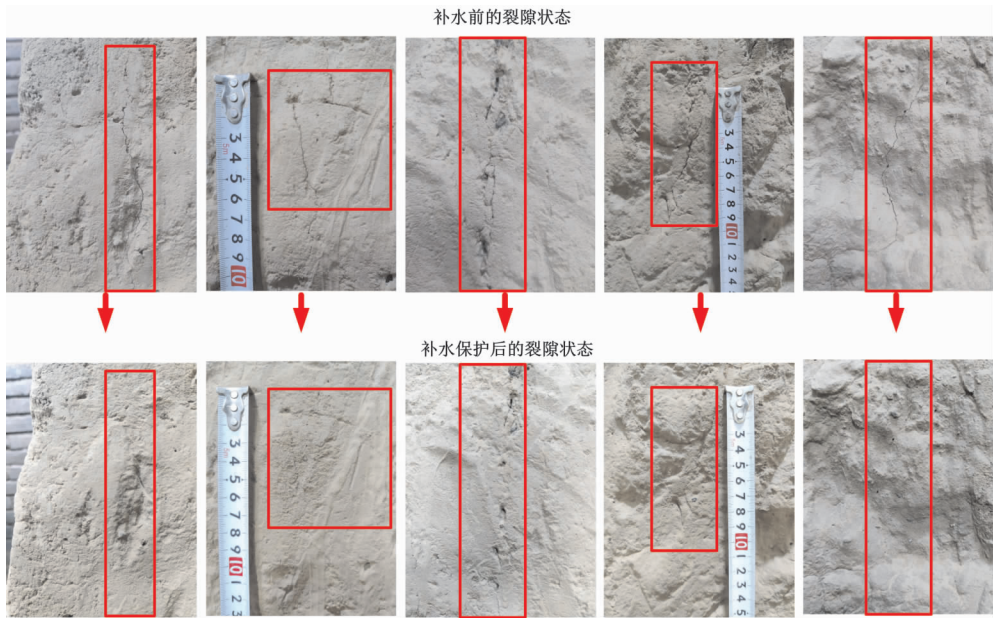


图 10 葬坑表面裂隙变化
Fig. 10 Changes in surface fractures of the burial pit

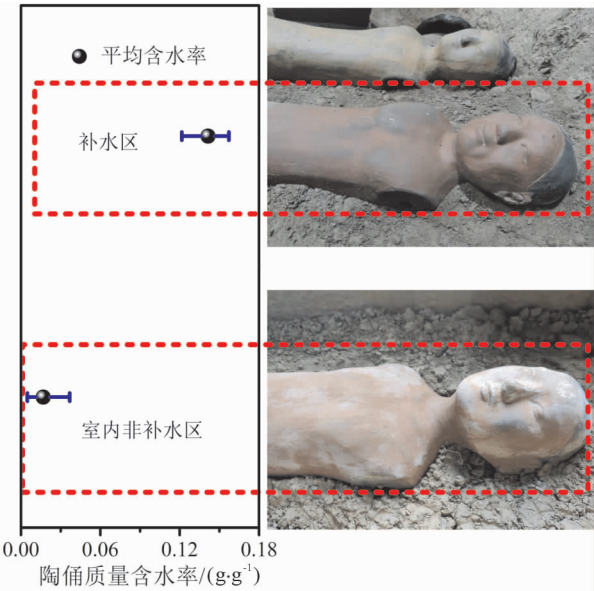


图 11 陶俑表面劣化状态

Fig. 11 Deterioration status of the pottery figurines surfaces

4 结论

本研究针对土遗址的补水需求,提出并实施了基于超声波雾化技术的土遗址液态水补充保护策略,旨在预防土遗址干裂及盐分富集等病害。为此,构建了土遗址雾化补水保护实验舱,开展了实验,以验证该雾化技术在土遗址补水保护方面的有效性及安全性。主要结论如下。

1)超声波雾化技术对土遗址的补水效果显著。土遗址的干燥土块含水率从 5% 提高至 12%,湿润土块的含水率从 15% 提升至 20%,接近出土前的水分状态。在长时间运行下,补水效果逐渐增强,特别是在保水阶段,土遗址的表层含水率得以稳定维持,并促进了部分表面裂隙的愈合,进一步提升了遗址的保护效果。

2)液态水补充能有效降低土遗址表层可溶盐浓度,并随水分下渗使深层土壤盐分浓度降低,保持表层土壤盐分浓度持续处于低水平。补水区土块表层的含盐量明显低于非补水区,后者的盐分浓度约为补水区的近 3 倍。此外,补水区陶俑表面没有出现盐分富集现象,进一步证明了该补水技术对文物的积极影响。

3)通过调节系统运行模式,有望根据土遗址的不同干燥程度满足相应补水需求,尤其对刚出土的土遗址,该技术能够有效恢复土壤水分,避免

干裂及盐害的发生。保水阶段下,土壤水分的波动率低于 1%,证明该技术具有良好的稳定性和持续性。

总的来说,该雾化补水策略不仅为土遗址保存环境的调控提供了科学、合理的方法,而且在土遗址表面盐害抑制和裂隙修复等方面展示了良好的应用前景,为未来的土遗址预防性保护提供了有力支持。

参考文献

[1] 孙满利, 窦子超. 中国土遗址保护研究进展与趋势: 基于文献的图谱量化分析[J]. 文物保护与考古科学, 2024, 36(4): 143-153.
SUN M L, DOU Z C. Research progress and trends in the conservation of earthen sites in China: Quantitative analysis based on literature[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024, 36(4): 143-153.

[2] 李凤洁, 王旭东, 郭青林. 莫高窟壁画地仗层水汽吸附特征及其影响因素[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 606-614.
LI F J, WANG X D, GUO Q L. The characteristics and influencing factors of the moisture adsorption in the earthen plaster of murals in Mogao Grottoes[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2020, 50(4): 606-614.

[3] CHANG B, WEN H, YU C W, et al. Preservation of earthen relic sites against salt damages by using a sand layer[J]. Indoor and Built Environment, 2022, 31(4): 1142-1156.

[4] 雷勇, 原思训, 郭宝发. 秦兵马俑表层风化状况的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2004, 16(4): 36-42.
LEI Y, YUAN S X, GUO B F. Study on the weathering of the Emperor Qin's Terracotta[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2004, 16(4): 36-42.

[5] 李华, 胡塔峰, 杜维莎. 秦兵马俑和汉阳陵遗址保存环境之比较[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(2): 53-60.
LI H, HU T F, DU W S. Comparison of site environments of Emperor Qin's Terracotta Warriors and Horses Museum and Han Yangling Museum[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2019, 31(2): 53-60.

[6] 张丹, 张尚欣, 夏寅, 等. 秦陵百戏俑坑土遗址纵向水盐运移的模拟土柱实验研究[J]. 文物保护与考古科学, 2015, 27(S1): 56-63.
ZHANG D, ZHANG S X, XIA Y, et al. Preliminary research on water and salt migration at the acrobat pit

- Site in Emperor Qinshihuang's Mausoleum using soil columns[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2015, 27(S1): 56-63.
- [7] 焦少通,王家鼎,张登飞,等. 干湿循环作用下黄土厚度对其裂隙发育的影响[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(1): 1-10.
- JIAO S T, WANG J D, ZHANG D F, et al. Study on the effect of thickness of loess on its crack development under the action of dry-wet cycles [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(1): 1-10.
- [8] LUO X L, GU Z L, YU C W. Desiccation cracking of earthen sites in archaeology museum: A viewpoint of chemical potential difference of water content[J]. *Indoor and Built Environment*, 2015, 24(2): 147-152.
- [9] 董俊刚,闫增峰,刘克成,等. 汉阳陵地下遗址博物馆室内空气环境解析[J]. *建筑与文化*, 2014(3): 59-61.
- DONG J G, YAN Z F, LIU K C, et al. Analysis of indoor air environment at Hanyang Mausoleum Museum [J]. *Architecture & Culture*, 2014(3): 59-61.
- [10] 杨雅媚,曹军骥,李库,等. 汉阳陵地下博物馆土壤、大气及风化壳的理化特征[J]. *中国粉体技术*, 2009, 15(2): 8.
- YANG Y M, CAO J J, LI K, et al. Physicochemical characteristics of soil, weathering salt, and total suspended particles in the Yang Mausoleum of the Han dynasty [J]. *China Powder Science and Technology*, 2009, 15(2): 8.
- [11] CHANG B, LI J X, LI K, et al. Prevention of dry cracking of excavated earthen sites at Han Yangling Museum using ultrasonic wetting [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2025, 19(2): 216-232.
- [12] 王思嘉,张秉坚,吴健. 室内土遗址气液相变补水的可行性研究:以杭州萧山跨湖桥遗址博物馆为例[J]. *文物保护与考古科学*, 2019, 31(3): 10.
- WANG S J, ZHANG B J, WU J. Research on the feasibility of water replenishment by phase transition for indoor earthen sites: Case study of Hangzhou Xiaoshan cross-lake bridge site museum [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(3): 10.
- [13] FENG Z B, ZHOU X Q, XU S H, et al. Impacts of humidification process on indoor thermal comfort and air quality using portable ultrasonic humidifier [J]. *Building and Environment*, 2018, 133: 62-72.
- [14] YAO W, PORTO R D, GALLAGHER D L, et al. Human exposure to particles at the air-water interface: Influence of water quality on indoor air quality from use of ultrasonic humidifiers [J]. *Environment International*, 2020, 143: 105902.
- [15] ZIAUDDIN M, ALNAIMAT F, MATHEW B. Ultrasonic atomization technique for enhancing humidification process in thermal desalination [J]. *International Journal of Thermofluids*, 2024, 24: 100820.
- [16] FABBRI S, OLSEN S I, OWSIANIAK M. Improving environmental performance of post-harvest supply Chains of fruits and vegetables in Europe: Potential contribution from ultrasonic humidification [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 16-26.
- [17] TOFTUM J, LANGKILDE G, FANGER P O. New indoor environment chambers and field experiment offices for research on human comfort, health and productivity at moderate energy expenditure [J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36(9): 899-903.
- [18] XIA Y, FU F, WANG J, et al. Salt enrichment and Its deterioration in earthen sites in Emperor Qin's Mausoleum Site Museum, China [J]. *Indoor and Built Environment*, 2023, 32(9): 1862-1874.
- [19] LUO X L, CHANG B, TIAN W, et al. Experimental study on local environmental control for historical site in archaeological museum by evaporative cooling system [J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 798-809.
- [20] 陈元生,解玉林. 博物馆文物保存环境质量标准研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2002, 14(S1): 152-191.
- CHEN Y S, XIE Y L. Studies on museum environment standards [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2002, 14(S1): 152-191.
- [21] 汪怡珂,罗昔联,陈思宇,等. 文物的赋存环境及其预防性保护问题 [J]. *文物保护与考古科学*, 2020, 32(2): 95-102.
- WANG Y K, LUO X L, CHEN S Y, et al. The environment of cultural relics and relevant preventive conservation problems [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2020, 32(2): 95-102.

(编辑 李波)