•丝绸之路岩土质文化遗产劣化机制与科学防治•

DOI:10.12454/j.jsuese.202600393

本刊网刊

冻融–干湿循环作用下土遗址粉化剥落机理

韦　鑫[1,2,3]，张　博[1,2,3*]，裴强强[1,3,4]，郭青林[1,2,3,4]，白玉书[3,4]，DUISHANALIEVA Aisin[3,5]

(1.敦煌研究院，甘肃 敦煌 736200；2.甘肃莫高窟文化遗产保护设计咨询有限公司，甘肃 敦煌 736200；3.中国–吉尔吉斯斯坦文化遗产保护“一带一路”联合实验室，甘肃 敦煌 736200；4.兰州理工大学 教育部土木工程防灾减灾工程中心，甘肃 兰州 730050；5.吉尔吉斯共和国文化、信息和青年政策部历史和文化古迹保护安全检测中心，吉尔吉斯斯坦 比什凯克 720040)

摘　要：季节性冻土区冻融–干湿循环是诱发土遗址表层粉化剥落发育的重要环境因素。为揭示高寒高海拔环境下病害的形成机制，基于乌鞘岭长城遗址冬季环境特征，在多场环境模拟耦合实验室开展加速冻融–干湿循环试验。通过连续监测试验墙浅表层温度、含水率和电导率变化，并结合表面硬度测试、扫描电子显微镜及压汞法，从宏观损伤、迁移过程及微观结构3个层面分析粉化剥落的演化特征。结果表明：循环作用下，试验墙表层硬度持续下降并表现出明显的阶段性与空间差异，阳面劣化启动更早、衰减幅度更大；浅表层温度反复跨越0 ℃，含水率与电导率显著波动，阳面更易形成局部融雪入渗与盐分富集区，阴面更易维持高湿和冻结状态。微观上，循环作用并未诱发表层材料的均匀退化，而是推动近表层逐步形成由相对致密壳层和下伏疏松粉化层组成的分层结构，其中壳层颗粒排列相对紧密，粉化层为颗粒脱开、孔隙暴露增加和结构疏松化。土遗址表层粉化剥落并非单次冻融或单一环境因素直接作用的结果，而是由水分迁移、温度变化和盐分活动共同驱动的渐进损伤过程，其本质表现为近表层颗粒间黏结失效、壳层–粉化层界面失稳并最终诱发粉化剥落的连续演化路径。研究结果揭示了冻融–干湿循环条件下黏结失效—界面失稳—粉化剥落的破坏路径，可为高寒高海拔地区土遗址粉化剥落病害的识别、风险判断与保护提供理论依据。

关键词：土遗址；冻融–干湿循环；水–热–盐迁移；粉化剥落；微观结构演化

中图分类号：TU411　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3246(2026)06-0015-13

中国西北干旱与半干旱地区分布着大量夯土遗址，如长城遗址，具有重要的历史、文化和科学价值[1–2]。在长期恶劣环境作用下，土遗址表层普遍发育裂隙、冲沟、粉化剥落和掏蚀等病害[3]，其中，粉化剥落因直接削弱表层结构完整性并易向片状剥落发展，已成为影响遗址长期稳定性的重要问题[4]。已有研究表明，表层粉化剥落与可溶盐迁移及结晶作用密切相关，可溶性盐随水分迁移至近表层后，在蒸发作用下逐渐达到过饱和状态，并在孔隙中析晶，从而诱发表层剥落[5–6]；与此同时，风蚀及干湿交替过程也会进一步促进表层颗粒松散与粉化[7–8]。

季节性冻土区反复发生的冻融与干湿交替是驱动土遗址浅表层粉化剥落发育的重要环境作用[9–10]。冻融循环可诱发孔隙结构重组和颗粒胶结削弱，干湿循环则通过湿度扩散、收缩变形和裂隙发育促进表层风化，并强化水盐迁移及表层组分再分配[11–13]；对于黄土类材料，干湿–冻融耦合作用还会引起中、大孔扩展及宏微观结构劣化[14]。虽然水结冰后体积膨胀约9%，但在不饱和且约束较弱的土体中，这一变化并不必然转化为直接破坏应力，因为液态水仍可能向未冻结孔隙迁移或向表面排出[15–16]。因此，土遗址表层粉化剥落并非单一冻胀效应的直接结果，而更可能是水分迁移、相变作用与结构演化共同控制的耦合过程[17]。近年来，扫描电子显微镜(SEM)、压汞法(MIP)和X射线计算机断层扫描(X–ray CT)等方法已被用于揭示土遗址劣化过程中颗粒排列、孔隙结构及材料损伤特征[18–19]，相关研究也指出冻融循环和降雪入渗能够通过增强孔隙重组、胶结削弱和水盐迁移而加速表层病害发展[20]。然而，现有研究多停留于单一因子、小尺度或表层现象层面的分析，对于宏观劣化表征、水–热–盐响应与微观孔隙结构演化之间的对应

收稿日期：2026 – 05 – 15　　**修回日期：**2026 – 07 – 15　　**网络出版日期：**2026 – 08 – 20

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFF0905900)；甘肃省重大专项项目(23ZDGF001)

作者简介：韦　鑫(1997—)，男，助理馆员，硕士. 研究方向：文物保护与土遗址. E-mail：weixin201954@163.com

* **通信作者：**张　博，副研究馆员，E-mail：dhazhangbo@163.com

关系，仍缺乏研究[21–22]。

基于此，本文结合乌鞘岭长城遗址冬季环境特征，在多场环境模拟耦合实验室内开展缩尺试验墙加速冻融–干湿循环试验，连续监测浅表层温度、含水率和电导率变化，并结合表面硬度测试、SEM及MIP，从宏观响应、迁移过程和微观结构演化3个层面开展分析，旨在阐明冻融–干湿循环作用下土遗址表层粉化剥落的形成过程，识别表层结构差异与病害发育之间的内在联系，并为高寒高海拔地区土遗址表层病害的机理认识与治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 土壤性质

试验用土取自天祝乌鞘岭长城遗址附近，对其进行击实试验，确定土体最佳含水率为12.15%。试验土与原遗址土的基本物理力学性质相近，主要物理性质见表1。遗址土体与试验土体的可溶盐成分及其离子含量见表2，土样中检测出K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-等多种可溶性离子。试验土与遗址土中的可溶盐含量分别为0.203 5%和0.800 8%。XRD物相分析显示，试验土的主要矿物组成为SiO_2和$CaCO_3$，与遗址土矿物组成基本一致。

表1 遗址土与试验土的基本物理性质对比

Tab. 1 Comparison of the basic physical properties between the site soil and the test soil

类型	w/%	ρ/(g·cm^{-3})	w_{op}/%	ρ_d/(g·cm^{-3})	W_L/%	W_P/%
遗址土	2.95	1.65			35.64	21.24
试验土	1.28	1.40	12.15	1.69	27.65	20.42

注：w为天然含水率，ρ为天然密度，w_{op}为最佳含水率，ρ_d为最大干密度，W_L为液限，W_P为塑限。

表2 遗址土体与试验土体的可溶盐成分及其离子含量

Tab. 2 Soluble salt composition and ion contents of the site soil and the test soil

mg/(1 000 g)

类型	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
遗址土	1.649	156.127	7.085	27.589	573.645	34.721	0
试验土	1.006	47.942	28.313	8.140	46.150	70.389	0.735

1.2 样品制备

根据现场遗址形貌，采用分层夯筑试验墙（每层厚10 cm），具体流程如图1所示。在预制底座内夯筑，夯筑区域底部依次铺设标准砂、透水石及滤纸，以保证基础的透水性。按土料最优含水率进行配料，拌合后密封静置24 h，使水分充分均匀分布。随后，将土料均匀铺设于夯筑区域并刮平，控制单层铺土厚度为18 cm。铺土完成后，采用“纳虚盘踩”方式进行初步踏实，以提高夯筑效率并减少土料飞溅。然后，人工夯实，每层夯击6遍，夯筑顺序遵循由左至右、由前至后的原则，以确保夯实均匀性与密实度。底层夯筑完成后，在墙体上部四周搭建模板支护，以控制墙体尺寸。夯筑完成后拆除模板，并按设计尺寸对墙体边缘进行修整，最终完成试验墙制备。

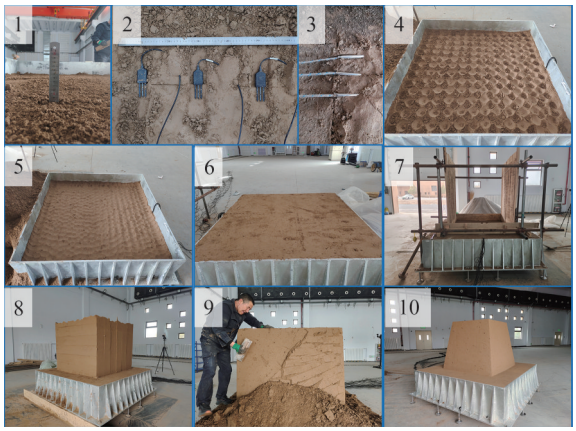


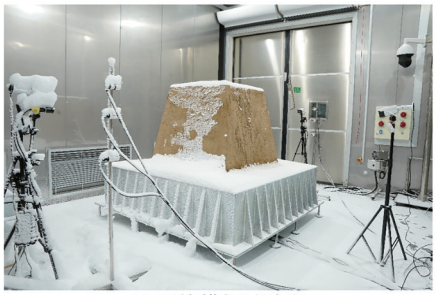
图1 试验样品的制备过程

Fig. 1 Preparation process of test samples

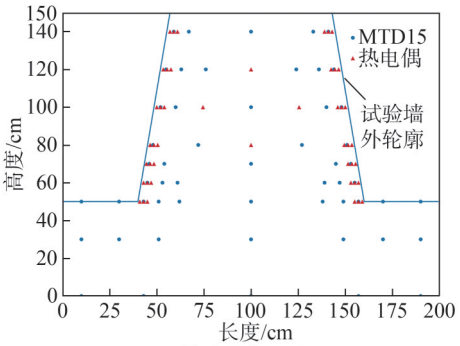
1.3 试验装置

1）加载设备

为了模拟现场环境气候，在多场环境模拟耦合实验室冬季舱进行试验（图2(a)）。冬季舱整体尺寸为7.0 m（长）×5.0 m（宽）×5.5 m（高），可开展温度、湿度、降雪及日照融雪等环境因素耦合作用下的室内模拟试验。舱内配备人工降雪系统，采用低温喷雾结晶方式实现降雪，喷头为水–空气二流体喷头。冬季舱温度调控范围为−30～20 ℃，控制精度为±0.5 ℃，日照融雪系统最大辐射强度小于800 W/m^2，降雪强度可在0～50 mm/h范围内连续调节，降雪均匀度大于80%。



(a) 环境模拟试验室



(b) 传感器布置图

图2 试验环境与传感器布置

Fig. 2 Experimental environment and sensor arrangement

2）传感器

试验采用MTD15传感器和CR1000X数据采集仪对试验墙浅表层温度、含水率和电导率进行连续监测。MTD15传感器用于获取墙体内部温度、土壤水分及电导率数据，其中，温度测量精度为±0.5 ℃，能够满足冻融循环条件下温度监测需求。同时，采用HOBO传感器监测环境温度、相对湿度。

1.4　试验方法

土遗址表层粉化剥落受外部环境作用与土体内部结构状态共同影响。外部环境因素主要包括温度变化、冻融循环、降雪或融雪补水、太阳辐射、风场作用及干湿交替过程；内部因素主要包括含水状态、盐分迁移与结晶、孔隙结构变化、颗粒胶结状态及表层强度衰减等。上述因素通过水分迁移、热量传递和盐分再分布共同作用于土体浅表层，进而诱发粉化、起壳和剥落等病害现象。因此，粉化剥落可从过程响应、宏观劣化和微观结构3个层面进行评价：过程响应指标包括温度、含水率和电导率，分别表征冻融转换、水分迁移和盐分活动特征；宏观劣化指标包括表面图像和表面硬度，用于评价病害形态演化及表层强度衰减特征；用压汞法（MIP）和扫描电子显微镜（SEM）测定微观结构指标，分析孔隙结构、颗粒排列及胶结状态变化。

试验墙布置于多场环境模拟耦合实验室冬季舱内，在设定工况下进行冻融–干湿循环加载[23]。试验重点监测浅表层温度、含水率和电导率，并在循环前后开展表面图像记录和表面硬度测试，以识别粉化剥落区域、形态变化及表层强度衰减。试验结束后，对典型粉化剥落区域取样，采用MIP和SEM分析孔径分布、孔隙形态、颗粒排列及微观结构特征。

1）表面硬度

表面硬度用于表征试验墙表层局部强度变化及其风化剥落程度。测试采用Shore A型硬度计进行。试验墙分为阳面和阴面，每个面划分为25个测试区域。每个区域选取3个不同位置进行独立测量，并以平均值表征区域表面硬度，以降低局部离散性对结果的影响。

2）MIP

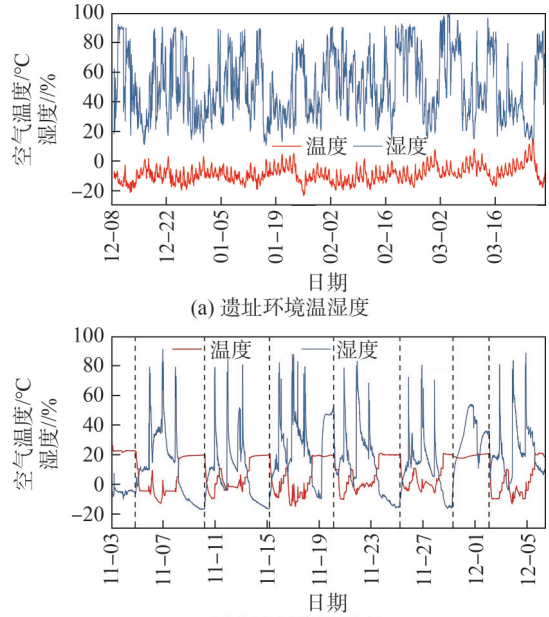
采用MIP测试冻融–干湿循环作用后样品的孔隙结构变化。试验结束后，从典型粉化剥落区域取样，并切割为10 mm×10 mm×10 mm的小立方体，采用液氮冻干法进行干燥，以减少制样过程对原始孔隙结构的扰动。测试采用AutoPore 9510自动压汞仪进行，根据压汞过程中汞侵入量随压力变化的关系获得样品孔径分布（PSD）数据，用于表征孔隙结构特征。

3）SEM

采用SEM观察典型粉化剥落区域的微观结构变化。试样取自试验墙典型粉化剥落区域，用薄刃小刀缓慢切取小尺寸块状样品，以尽量减少取样过程中对颗粒排列和孔隙结构的人为扰动。样品尺寸约为10 mm×10 mm×10 mm，经液氮冻干后轻微清理表面浮土，并进行喷金处理。每类样品选取3组平行试样进行观察，以降低局部偶然性影响。最后，使用Thermo Fisher Quattro S热场发射扫描电子显微镜获取不同放大倍数下的显微图像，用于分析颗粒排列、孔隙形态及结构特征。

1.5　试验工况

冻融–干湿交替是诱发土遗址表层粉化剥落的重要环境作用，其中降雪补水与温度跨越0 ℃的变化过程具有主导意义。基于此，试验以降雪和温度为主要控制条件，以0 ℃作为冻融判据，对次要因素进行适当简化，提取影响表层病害发育的关键环境参数。试验工况的设定主要依据前期乌鞘岭长城遗址及夯筑试验墙的现场监测结果，并结合冬季舱环境控制能力和室内加速试验的可操作性确定。图3为现场监测数据提取的冬季环境温湿度工况。由图3可知，表层粉化剥落通常经历低温冻结、积雪覆盖、融雪入渗、升温消融、蒸发失水和盐分向表层迁移等连续过程，其发展具有明显的阶段性和累积性。因此，本试验并非完全复现单一自然冻融事件，而是将冬季和初春阶段的主要环境作用概化为连续加载过程。



(a) 遗址环境温湿度

(b) 试验墙环境温湿度

图3　冬季环境温湿度工况提取

Fig. 3　Extraction of environmental temperature and humidity conditions in winter

冬季舱内环境加载划分为5个典型阶段，依次为舱体预冷、初冬冻融循环、低温常冻、初春冻融循环和干燥养护。各阶段持时主要根据现场冬季环境过程的相对持续关系、温度场稳定所需时间以及水分入渗—

迁移—蒸发过程的响应时间确定。考虑不同加载阶段下试验墙内部响应存在一定滞后性，同时满足试验墙内部温度、含水率和电导率连续监测及后续表层硬度、微观结构测试的需要，每个阶段持时控制为约 1 d，5 个阶段构成 1 次完整加载循环，整个试验共进行 6 次循环，用以模拟多个冬季条件下表层损伤的累积过程。各阶段设置如下：1）舱体预冷阶段，舱内温度由室温（约 30 ℃）均匀降至−5 ℃并保持稳定，以消除初始温度场差异；2）初冬冻融循环阶段，降雪 24 mm，随后施加 2 次冻融循环，温度在−5～10 ℃范围内周期性变化，用于模拟初冬阶段气温频繁跨越 0 ℃的环境特征；3）低温常冻阶段，先将环境温度降至约−15 ℃并降雪 30 mm，随后施加 500 W/m^2 的模拟太阳辐射，同时设置西北风、风速为 5 m/s，以形成阳面积雪融化、阴面积雪持续累积的差异化作用，模拟严寒期实际环境；4）初春冻融循环阶段，降雪 24 mm，再施加 1 次冻融循环，温度区间由−15 ℃逐步抬升至 10 ℃，用于模拟初春回暖条件下逐渐增强的冻融作用；5）干燥养护阶段，完成上述加载后，将舱内温度升至 20 ℃，对试验墙进行干燥养护。

2 试验结果

2.1 宏观指标

2.1.1 试验墙表层破坏特征与硬度变化

图 4 为试验墙阳、阴面在试验前及第 1～6 次循环后的外观变化及对应表面硬度分布，其中红线圈定区域为表层明显损伤区。试验前，两侧表层整体较完整，

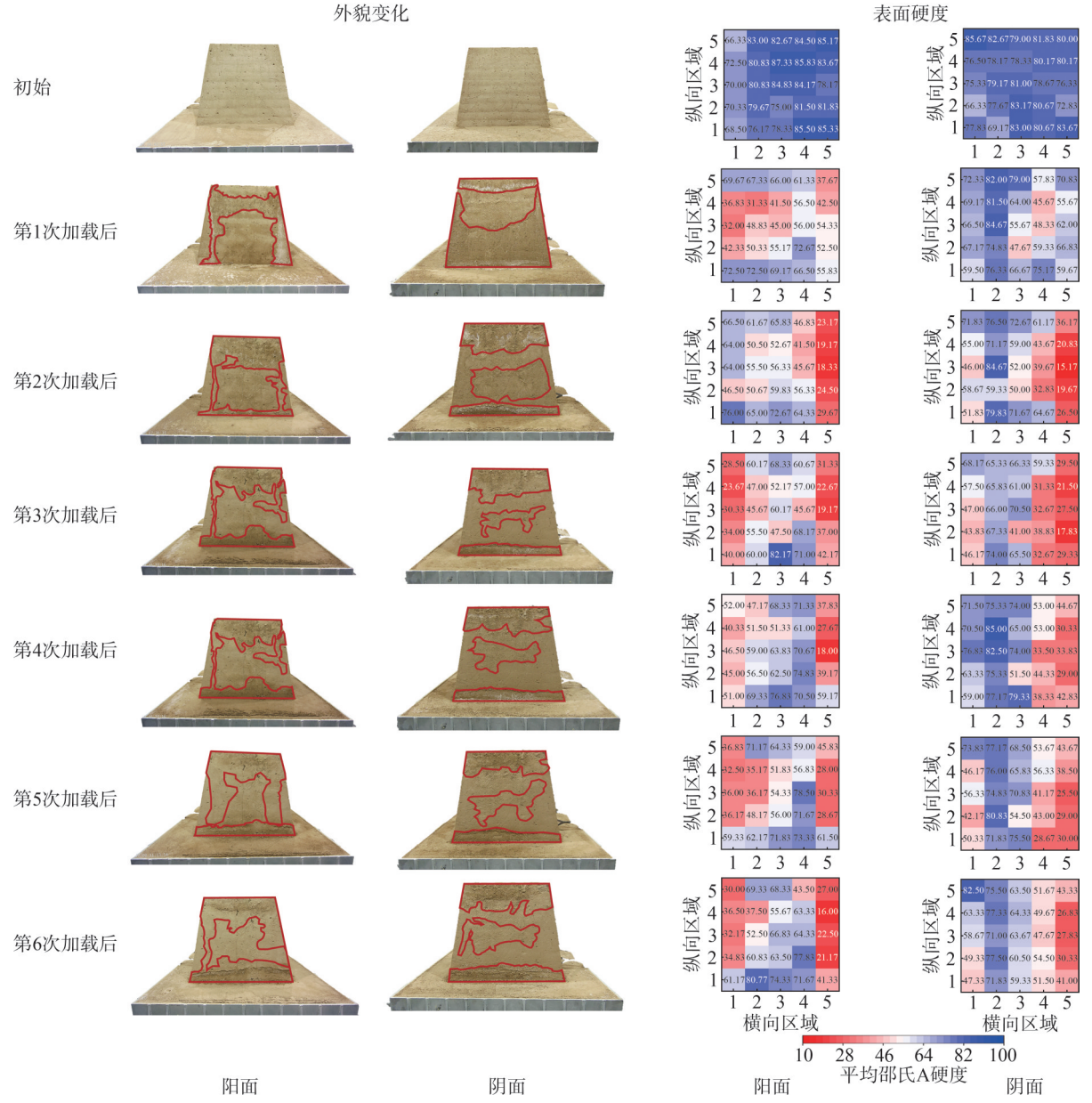


图 4 循环作用下试验墙阳、阴面外观及表面硬度变化

Fig. 4 Appearance and surface hardness changes on the sun-facing and shaded sides of the test wall under cyclic loading

外观和硬度分布均较均匀，阳面和阴面的平均邵氏 A 硬度分别为 79.68 和 78.72。

经冻融–干湿循环加载后，阳、阴面均出现明显表层损伤，并伴随硬度持续下降。第 1 次循环后，阳面损伤主要分布于顶部、边缘及根部区域，阴面以上部位带状损伤为主；对应平均邵氏 A 硬度分别降至 54.25 和 65.93。第 3 次循环后，两侧损伤范围进一步扩大，局部损伤区开始连通，硬度低值区同步向边缘和上部扩展，局部已降至 15～30。第 6 次循环后，两侧均形成相对稳定的损伤分布格局，损伤主要集中于顶部、边缘及根部部位，部分区域由离散斑块演化为连续片状区域；平均邵氏 A 硬度分别降至 50.92 和 56.40，较初始值下降约 36.1% 和 28.4%。

试验墙表层破坏未表现为整体均匀发展，而是由局部起始、逐步扩展并最终形成分区化分布的累积演化过程。与阴面相比，阳面外观劣化更为严重，硬度衰减幅度更大，对循环加载表现出更强的响应。

2.1.2　水–热–盐响应特征

1）浅表层温度响应特征

图 5 为试验墙阳、阴面浅表层温度随时间变化曲线。图 5 中：X–9–3 的 X 表示阳面；9 表示夯层第 9 层，每层 10 cm；3 表示传感器距墙体表面 3 cm，其他同理。各测点温度均呈现与环境加载工况相对减弱的周期性波动特征，在多次降温冻结与升温融雪过程中反复跨越 0 ℃。表层温度整体表现为峰谷交替变化，升温阶段温度快速回升，降温阶段温度迅速降低后在低温区间短时维持，表层土体在整个模拟过程中持续经历冻结–融化交替作用。

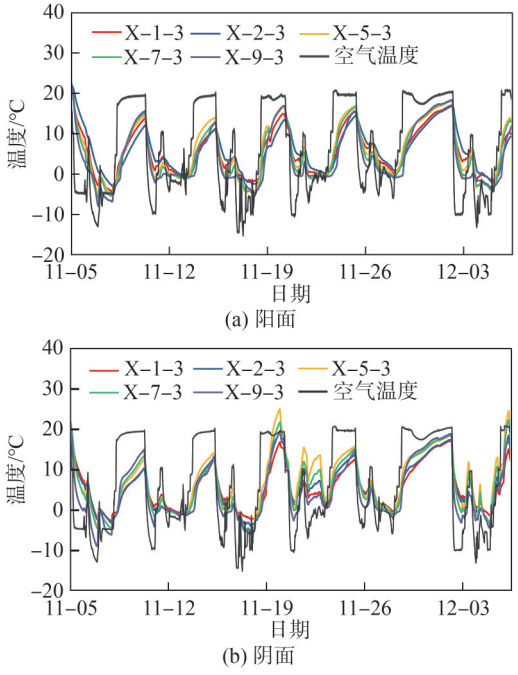


图 5　试验墙阳、阴面浅表层温度随时间变化

Fig. 5　Temporal variations in the near-surface temperature on the sun-facing and shaded sides of the test wall

图 5(a)中，阳面各测点温度变化趋势较为一致，曲线整体重合度较高，峰值与谷值出现时间基本同步。各测点最高温度主要分布于 13～18 ℃，最低温度约为 −7～−2 ℃，单次循环温差约 15～22 ℃。在若干降温阶段的低温响应略强，X–5–3 在部分升温阶段峰值略高，但不同测点之间的温差总体较小，多数时段控制在 2 ℃ 以内。阳面表层温度场空间差异相对有限，外部热边界变化向浅表层的传递较为直接。图 5(b)中，阴面各测点温度同样呈现明显的周期性起伏，但测点间离散性较阳面更为突出。常规峰值主要位于 12～19 ℃，谷值约为 −8～−2 ℃，个别时段出现短时温度突升，局部峰值可达 24～25 ℃。第 3 次循环的干燥养护阶段及第 6 次循环的初冬冻融循环阶段，阴面曲线出现多次突升与快速回落，Y–5–3 和 Y–9–3 的波动幅值相对更大，局部测点间瞬时温差明显增加。阴面表层温度场均匀性弱于阳面，局部热响应差异更为显著。

浅表层温度随外部环境加载发生周期性波动，多次跨越 0 ℃，为液态水与冰之间的相态转换提供了热力条件。阳面各测点变化较为同步，外部热扰动直接向表层传递；阴面测点间差异较大，与积雪覆盖、局部滞水及无太阳辐射有关。温度场的周期性变化和空间差异，进一步影响浅表层冻结–融化转换频次，并为水分迁移、盐分再分布及局部劣化区形成提供条件。

2）含水率响应特征

图 6 为试验墙阳、阴面浅表层含水率随时间变化曲线。

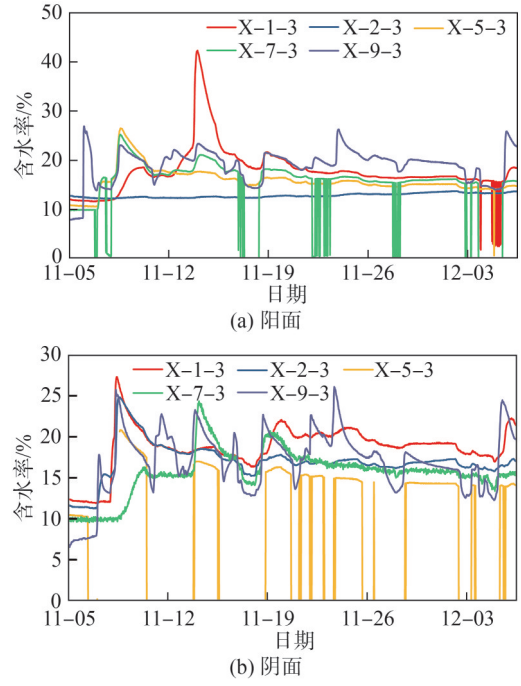


图 6　试验墙阳、阴面浅表层含水率随时间变化

Fig. 6　Moisture-content variations in the near-surface layer on the sun-facing and shaded sides of the test wall over time

从图6中可看出，各测点含水率均随降雪、融雪及温度跨越0 ℃发生阶段性变化，曲线中多次降至0的现象对应局部冻结条件下液态水响应消失，表层水分经历了积聚、冻结和融化释放的反复转换。

阳面浅表层含水率离散性较强，测点间差异明显。X–1–3在第2次循环的初春冻融循环阶段快速升高，远高于其他测点，对融雪入渗最为敏感，局部存在较强的水分汇集效应；试验墙顶部融雪入渗补给，X–9–3含水率长期维持在18%～25%之间的较高水平；X–2–3始终稳定在12%～13%左右，波动幅度最小，水分状态相对稳定；X–7–3多次降至0，冻结响应最为频繁。阳面表层水分变化并不均衡，局部快速增湿与阶段性冻结交替出现，模拟太阳辐射作用下的融雪补水呈现出较强空间差异性。阴面浅表层含水率整体集中于15%～20%，基础值相对较高。Y–1–2在前期迅速升至约27%，后期维持在较高水平；Y–7–3与Y–9–3在中后期仍存在多次升高过程，其中，Y–9–3波动最为明显，峰值接近26%；Y–5–3则频繁降至0，冻结特征突出。

为识别第1个模拟循环中试验墙浅表层液态水场的空间演化过程，选取6个典型时刻绘制含水率等值线图。图7为室内试验墙在冻融循环不同时间点的含水率空间分布。初始状态下，墙体含水率整体呈现由下向上的递减分布，中下部以14%～15%为主，上部多为8%～12%，顶部及边界相对偏低，浅表层垂向水分梯度较为明显。第1次降温冻结阶段，液态水迁移尚不显著。第1次升温融雪阶段，墙体左上部形成明显高值区，局部含水率接近29%，高值区沿顶部向中部扩展，融雪水可能优先沿墙体上缘及近表层进入墙体。第

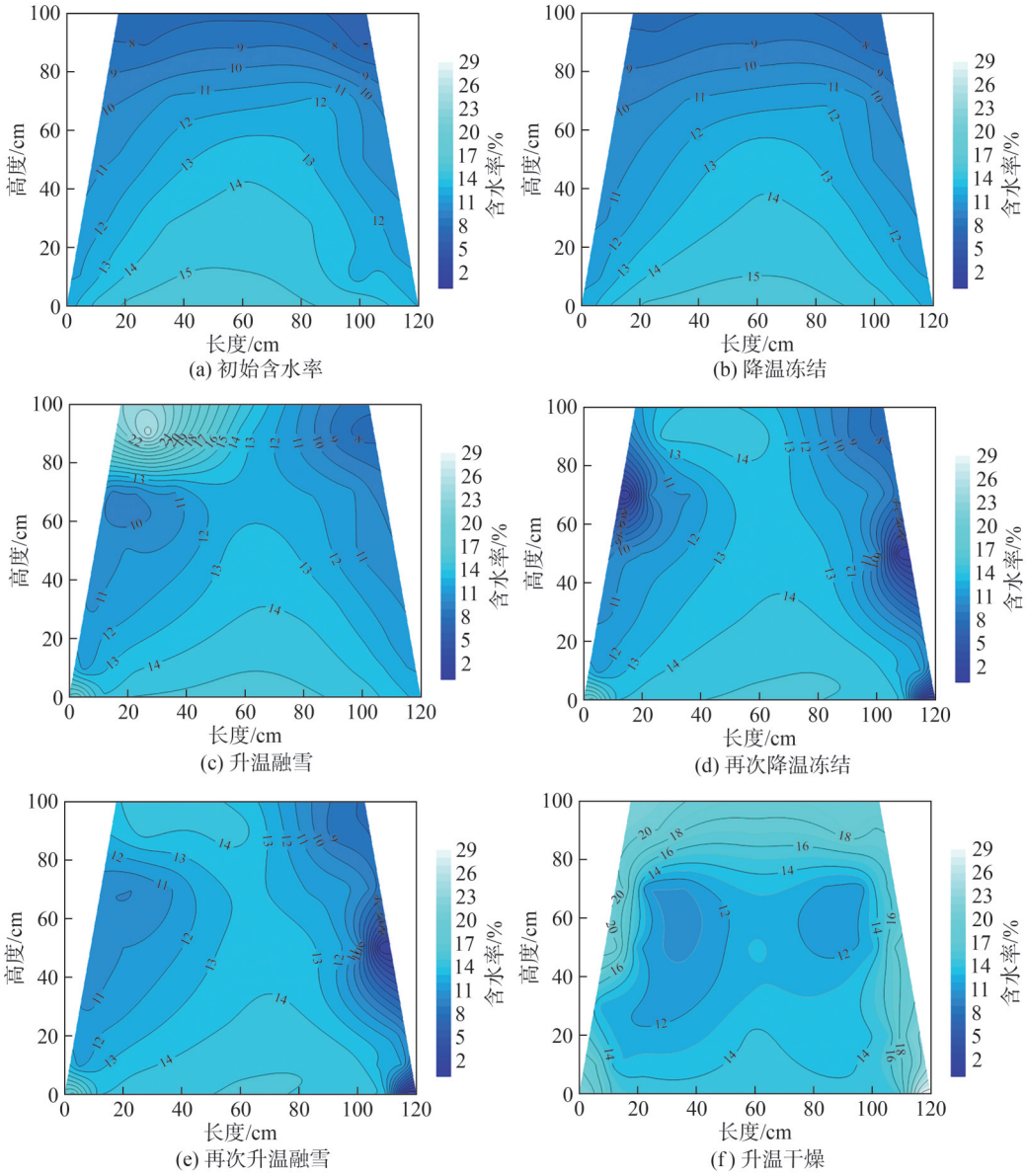


图7 第1个模拟循环中试验墙含水率空间分布变化

Fig. 7 Spatial distribution of moisture content in the test wall during the first simulated cycle

2 次降温冻结后，左上部及右侧中上部出现 2%～5% 的低值区，前期积水部位在降温过程中优先进入冻结状态，含水率空间差异进一步增强。再次升温后，左侧低值区明显收缩并恢复至 10%～13% 左右，而右侧中上部仍保留低值分布，墙体不同部位的融化恢复过程存在明显差异。升温干燥阶段，前期冻结低值区基本消失，含水率分布转为边界偏高、中部偏低，上部及两侧多为 14%～20%，中部主要维持在 11%～13%。

冻融–干湿循环过程中，浅表层水分迁移呈现较强的局部性和阶段性。阳面积雪融化较快，融雪水沿顶部、边缘及局部优势通道进入墙体，局部含水率在短时间内升高并形成富水区；阴面整体维持较高含水率，与较弱蒸发和较长冻结时间相关。含水率多次降至 0，对应局部冻结条件下液态水响应消失，升温后解冻并参与迁移。含水率异常区通常为水分反复积聚、冻结和再分布活跃部位，易成为表层强度衰减和粉化剥落起始区域。

3）电导率响应特征

图 8 为试验墙阳、阴面浅表层电导率随时间变化曲线。试验墙浅表层电导率高值主要集中于 11 月上旬至中旬。电导率变化并非单纯随时间波动，而是液态水存在条件下离子迁移通道的建立与衰减过程。阳面浅表层电导率空间差异最为显著，X–1–3 于第 2 次循环的初春冻融循环阶段迅速升至约 2.8 S/m，明显高于其余测点，后期虽逐步下降，但仍维持相对高值，融雪

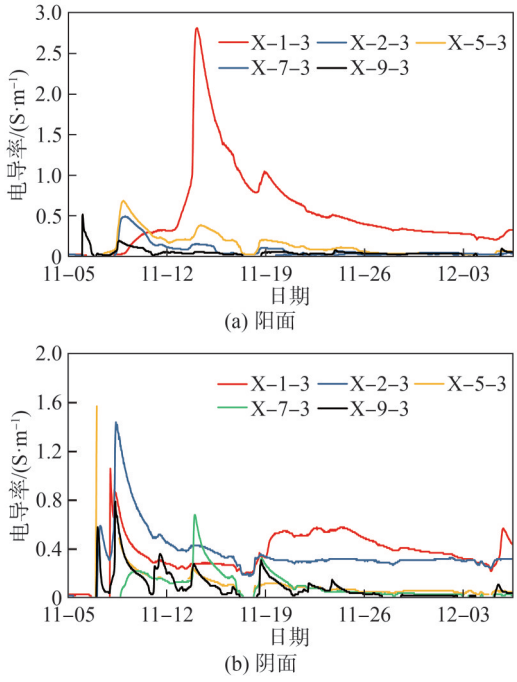


图 8　试验墙阳、阴面浅表层电导率随时间变化

Fig. 8　Electrical-conductivity variations in the near-surface layer on the sun-facing and shaded sides of the test wall over time

入渗后局部形成了持续性的盐分富集区。其余测点多表现为短时峰值后快速衰减。阳面电导率以局部突增和集中富集为主要特征。阴面浅表层电导率整体峰值低于阳面，但持续性更强。Y–2–3 前期电导率升至约 1.4 S/m 后，较长时段维持在 0.3～0.4 S/m；Y–1–3 在中后期仍有再次回升现象；Y–5–3 虽出现瞬时高值，但很快降至低值。阴面盐分迁移过程更平缓，导电响应以中低值持续维持为主。

电导率变化与液态水通道的形成和衰减关系密切。阳面局部测点出现高电导率峰值并持续保持相对高值，表明融雪入渗为可溶性离子迁移和近表层富集提供了水分条件；阴面电导率峰值较低但持续时间较长，盐分迁移过程相对缓慢且持续。随着水分在冻结、融化和蒸发过程中反复迁移，可溶盐在近表层局部富集，并在水分减少阶段发生析晶，进而削弱颗粒间胶结并改变孔隙结构。电导率高值区与含水率异常区、硬度低值区的空间对应关系进一步指向水盐耦合迁移对表层劣化分布的控制作用。

2.2　微观指标

2.2.1　粉化剥落区的微观形貌特征

图 9 为原始黄土及试验墙阳、阴面粉化剥落区不同层位样品的 SEM 图像和孔隙面积比统计结果。采用 IPP 6.0 软件对 SEM 图像进行处理，其中深色区域表示颗粒骨架，蓝色区域表示孔隙。不同样品在颗粒排列方式、孔隙暴露程度和孔隙面积比例上均表现出明显差异。

原始黄土颗粒以棱角状和次棱角状为主，粒径差异较大，颗粒之间以点接触为主，局部可见面接触，孔隙分布较为开放，细颗粒多附着于粗颗粒表面或填充于粒间空隙。与原始黄土相比：图 9(a) 阳面壳层样品中颗粒排列相对紧密，颗粒间孔隙暴露程度降低，部分粗颗粒表面可见附着物，局部孔隙被填充；图 9(b) 阳面粉化层样品中颗粒间分离现象更为明显，孔隙暴露程度增大，碎屑颗粒数量增加，整体结构较壳层更为疏松，阴面样品同样表现出壳层与粉化层之间的差异；图 9(c) 阴面壳层中颗粒表面附着物较为明显，局部区域颗粒排列相对紧密，但不同部位形貌差异较大；图 9(d) 阴面粉化层中小颗粒和碎屑颗粒含量增加，颗粒间接触减弱，孔隙暴露更为明显，整体结构较阴面壳层更为疏松。与阳面样品相比，阴面两类样品的孔隙分布更不均匀，较大孔隙暴露更为突出。图 9(f) 的孔隙面积比统计结果显示，不同样品均以颗粒内孔为主要组成，但壳层与粉化层之间的孔隙组成存在明显差异。相较于原始黄土，阳面壳层的孔隙面积分布更集中，阳面粉化层的颗粒间孔比例下降而较大孔隙比例增加；阴面粉化层和阴面壳层中较大孔隙所占比例均高于原始黄土，其中阴面粉化层最为明显。

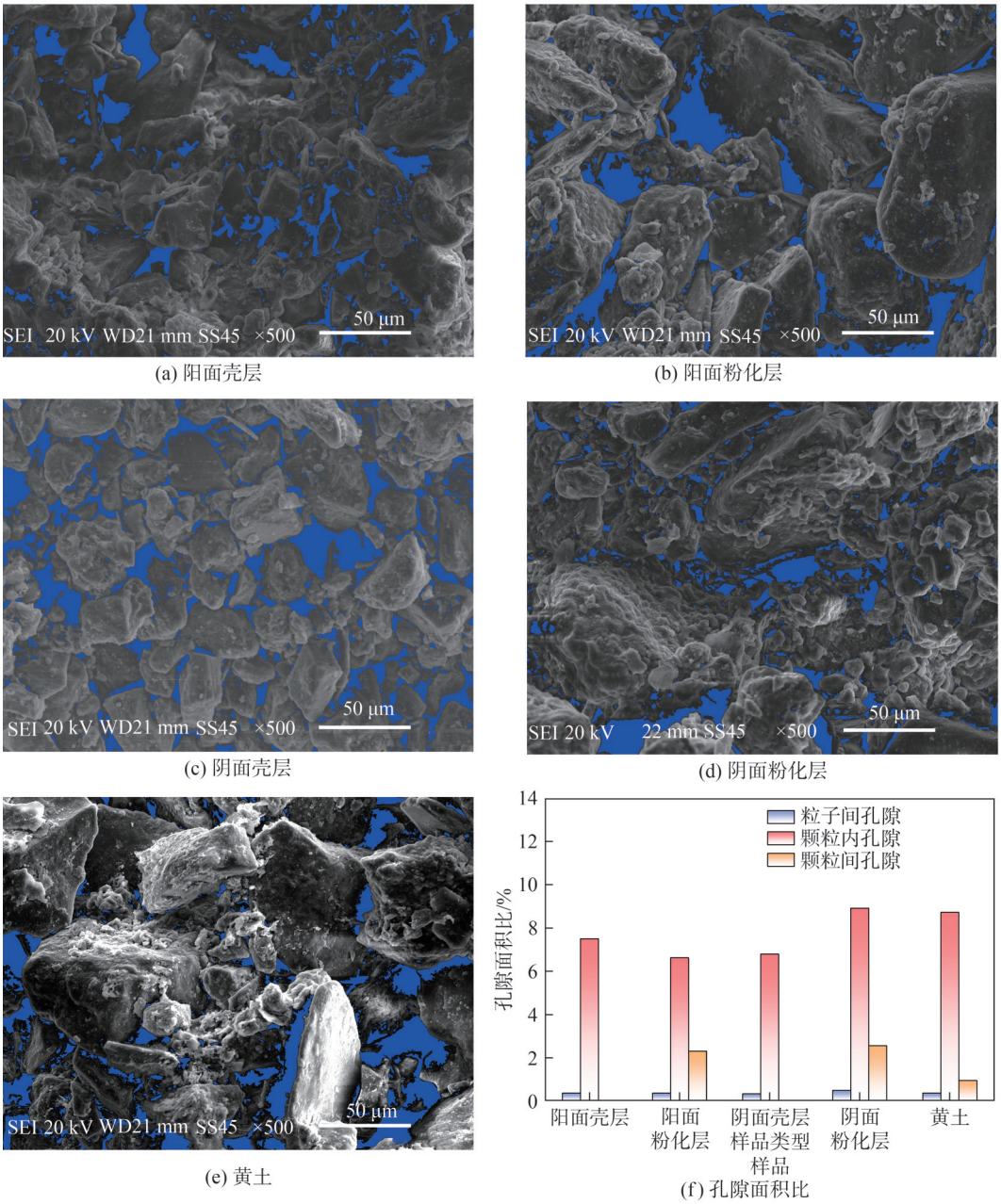


图 9　粉化剥落区样品的 SEM 图像及孔隙面积比统计

Fig. 9　SEM images and pore-area ratio statistics of samples from the pulverization-spalling zone

2.2.2　孔隙分布特征

图 10 为初始黄土及试验墙阳、阴面粉化剥落区不同层位样品的孔径分布曲线及各类孔体积统计结果。依据 Shear 等[24]的分类标准，孔隙可划分为粒内孔（[0, 0.014) μm）、粒间孔（[0.014, 1.800) μm）、颗粒内孔（[1.800,70.000) μm）和颗粒间孔（[70.000,+∞) μm）。由图 10(a)可见，各样品孔径分布主峰均位于 10～20 μm 范围内，为样品的优势孔径范围。初始黄土主峰约位于 15 μm，峰值约为 0.45 mL/g，峰后下降较快，曲线分布相对集中。

冻融–干湿循环后，各样品主峰位置和峰形均发生不同程度变化。阳面粉化层主峰位于约 17.1 μm，峰值约为 0.41～0.42 mL/g；阳面壳层主峰略向大孔径方向偏移至约 18.8 μm，峰值约为 0.44～0.45 mL/g。与阳面壳层相比，阳面粉化层在 20～40 μm 范围内保持较高分布值。阴面样品的主峰值整体低于阳面，其中阴面粉化层和阴面壳层主峰值分别约为 0.24 mL/g 和 0.31 mL/g。与阳面样品相比，阴面样品在较大孔径区间下降更缓，在 100～300 μm 范围内仍保持一定分布值，其中阴面粉化层约为 0.07～0.10 mL/g，阴面壳层约为 0.05～0.08 mL/g。

如图 10(b)所示，不同样品的孔体积仍以颗粒内孔为主，但循环后各类孔体积比例发生调整。与初始黄土相比，阳面粉化层和阳面壳层的颗粒内孔体积均有所

增加，其中阳面粉化层增幅更为明显；阴面粉化层和阴面壳层的颗粒间孔体积增加更为突出。循环后样品的孔径分布较初始黄土明显展宽，较大孔径区间的分布值增加，不同层位之间的孔结构差异也随之增大。结合阳面与阴面样品对比可见，阳面壳层表现为主峰更集中，阴面样品则在较大孔径区间保留更高分布值。

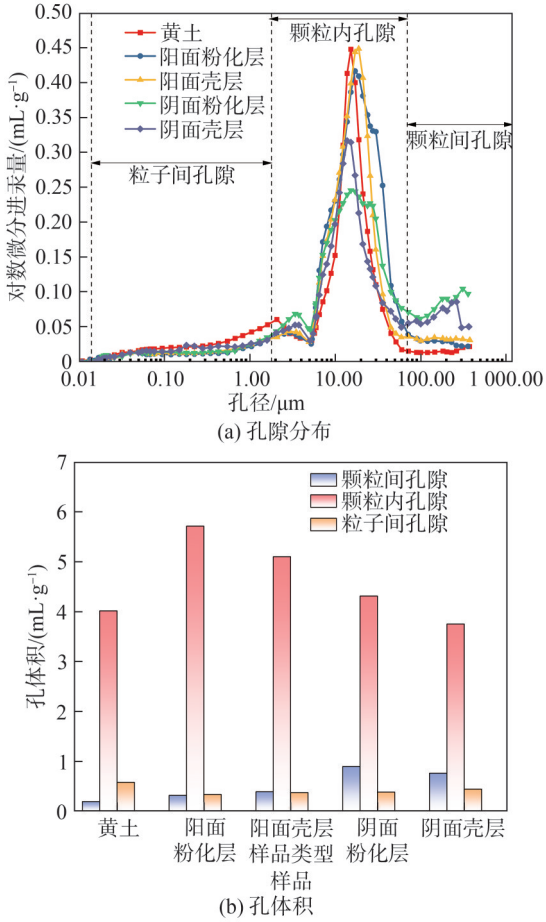


图 10　粉化剥落区样品孔径分布及孔体积统计

Fig. 10　Pore-size distribution and pore-volume statistics of samples from the pulverization-spalling zone

3　讨　论

3.1　宏微观指标关联关系

表面硬度、含水率、电导率与微观结构变化之间呈现出较清晰的对应关系[9,25]。前 3 次循环中，试验墙表面硬度快速下降，后期转为缓慢累积，且低值区持续保留并发生局部重分布，说明表层损伤具有明显的阶段性和空间选择性。与此同时，含水率局部突增、冻结归零及电导率高值区在时空分布上与硬度低值区基本对应，表明宏观性能衰减主要发生在水盐活动较强、冻融转换频繁的近表层区域[13]。

含水率变化揭示了表层损伤的起始位置与发展路径。阳面在辐射作用下更易形成短时融雪入渗和局部富水区，阴面则维持较高基础含水率并具有更长冻结持续时间。液态水在浅表层并非均匀分布，而是沿顶部、边界及局部优势路径汇集，并在温度跨越 0 ℃时经历冻结与融化。硬度低值区主要分布于边缘和上部，与含水率异常区的位置基本一致，说明水分再分配对表层弱化部位具有重要控制作用。电导率变化为盐分参与该过程提供了间接证据。其高值主要出现在融雪补水和冻融转换阶段，说明导电响应增强受制于液态水通道的存在；阳面局部测点持续高值，可溶盐随水入渗向近表层迁移并在局部富水区相对富集[26]。

SEM 与 MIP 结果从微观尺度支撑宏观响应。SEM 显示，循环作用后表层并未整体松散，而是形成了壳层与粉化层并存的分层结构：壳层表现为颗粒趋于紧密、附着物增多及孔隙局部填充，下伏粉化层则表现为胶结减弱、颗粒脱开和孔隙张开[27]。MIP 样品优势孔径仍集中于 10～20 μm，但循环后中等孔径进一步发育、较大孔径占比增加，表层与下伏层之间的孔结构差异持续扩大。表面硬度下降并非单纯的表层软化结果，而是表层重组与下伏层疏松化同步发展的宏观表现。

综上，表面硬度用于表征宏观力学性能衰减，含水率和电导率用于刻画近表层水盐迁移过程，SEM 与 MIP 则用于揭示结构重组特征。三类证据相互印证，表明粉化剥落的本质并非表层材料的均匀退化，而是水分迁移驱动下壳层–粉化层分层演化持续发展，并最终以界面失稳的形式表现出来。

3.2　损伤演化机制

试验墙表层损伤并未表现为整体均匀发展，而是呈现出阶段性累积和空间差异。表面硬度低值区主要分布于顶部、边缘及近根部区域，并与含水率异常波动区和电导率高值区在空间上具有较好的对应关系[28–29]。由试验墙表面硬度变化可知，阳面和阴面平均邵氏 A 硬度由试验前的 79.68 和 78.72 分别降至第 6 次循环后的 50.92 和 56.40，降幅约为 36.1% 和 28.4%，其中，阳面衰减更为突出。表面硬度由局部衰减逐步扩展至分区化分布，与表层损伤的空间演化过程相对应。表层病害并非材料表面同步弱化，而是边界条件差异下近表层水分再分配、盐分迁移和局部结构弱化共同作用的结果。

图 11 为土遗址粉化剥落演化机制示意图。温度反复跨越 0 ℃并未简单转化为均质冻胀破坏，而是通过水分相变、迁移势变化和颗粒接触调整，持续改变浅表层结构状态。阳面在辐射作用下更易发生短时融雪入渗和局部盐分富集，电导率峰值可达约 2.8 S/m；阴面则因含水率较高和冻结持续时间较长，盐分迁移过程相对缓慢但更具持续性。水分在冻结、融化和蒸发过程中反复迁移，使可溶盐在近表层局部富集并析出结晶，进而削

弱颗粒间胶结，推动颗粒接触由相对稳定状态向松散接触转变[30]。浅表层逐渐形成上部相对致密壳层和下伏疏松粉化层的分层结构；表层在融雪补水、蒸发失水以及细颗粒和盐分局部富集作用下，逐渐形成相对致密的壳层[31]；下伏层则在反复冻融扰动、水分往复迁移和盐分结晶作用下，经历颗粒间黏结失效、颗粒脱开与孔隙扩展，逐渐演化为疏松化的粉化层。阳面损伤发展较快，主要与融雪入渗、蒸发和局部盐分富集较强有关；阴面弱化相对缓慢，但较高含水率和持续冻结使其结构劣化具有持续性。两者的水—热—盐响应路径虽存在差异，但最终均指向壳层–粉化层分层结构的形成。随着下伏粉化层中颗粒间黏结持续减弱，上部壳层与下伏粉化层之间的结构差异不断扩大，层间界面逐渐成为变形不协调和损伤集中的部位，并在后续冻融–干湿循环作用下发生局部失稳，最终诱发表层持续粉化剥落。SEM图像中壳层颗粒排列相对紧密、粉化层颗粒脱开和孔隙暴露增加的特征，以及MIP曲线中孔径分布展宽、较大孔径区间分布值增加的现象，均与这一分层演化过程相对应。

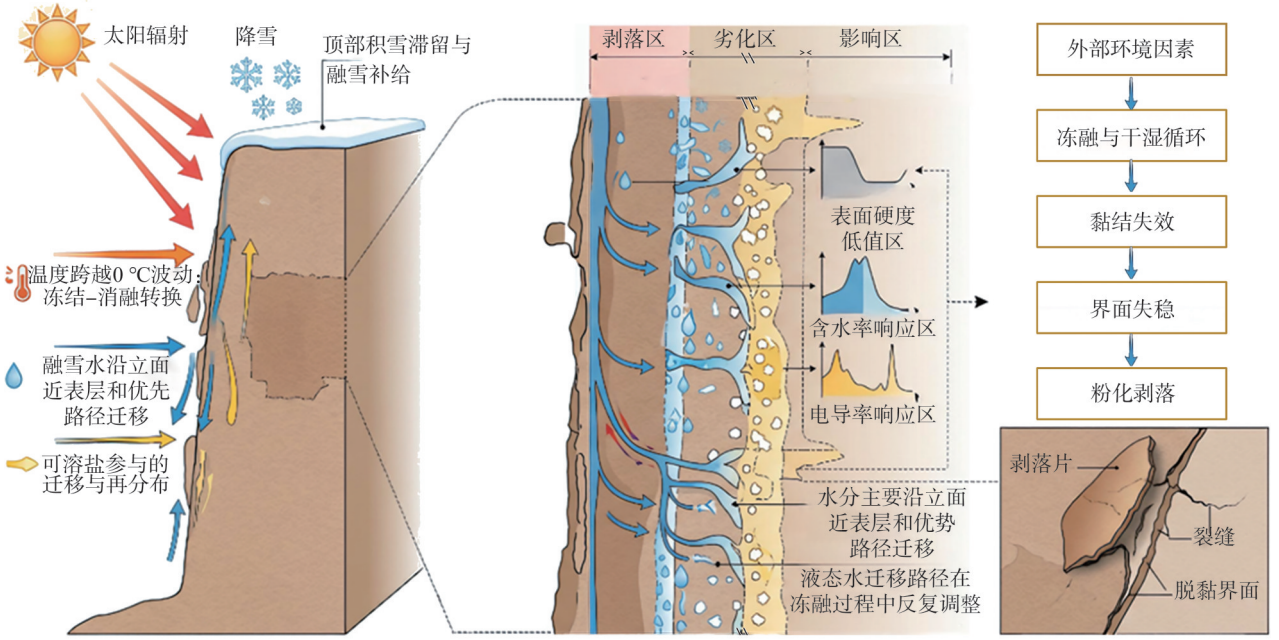


图 11　土遗址粉化剥落演化机制示意图

Fig. 11　Evolution mechanism of pulverization and spalling in earthen sites

因此，土遗址表层粉化剥落不宜简单归结为单一冻融效应，而应理解为水分迁移、温度变化、盐分活动和微观结构分化共同控制的渐进损伤过程。其机理路径可概括为：水–热–盐迁移重组近表层环境，冻融扰动和盐分富集诱发颗粒间黏结失效，壳层–粉化层结构差异放大并形成弱界面，最终发生界面失稳和粉化剥落。顶部、边缘及根部等水分输入、蒸发失水和盐分迁移较活跃的浅表层部位，应作为现场监测和风险识别的重点区域；含水率、电导率和表面硬度可作为粉化剥落早期识别的重要指标。研究成果可为高寒高海拔地区土遗址粉化剥落病害的早期识别、风险判断与保护措施制定提供参考。

4　结　论

1）冻融–干湿循环作用下，试验墙表层硬度持续下降，并表现出明显的阶段性和空间差异，其中阳面劣化启动更早、衰减幅度更大，对循环作用更为敏感。

2）循环过程中，浅表层温度反复跨越0 ℃，含水率与电导率呈显著波动。含水率异常区、电导率高值区与硬度低值区在空间上基本对应，表层损伤主要集中于水盐迁移活跃、冻融转换频繁的近表层区域。

3）粉化剥落区形成了较清晰的壳层–粉化层分层结构。壳层颗粒排列相对紧密，粉化层则表现为颗粒脱开、孔隙暴露增加和结构疏松化；同时，循环后样品孔径分布展宽，层间孔结构差异进一步扩大。

4）土遗址表层粉化剥落并非单次冻融或单一环境因素直接引起的均匀退化，而是水分迁移、温度变化与结构分化共同作用下的渐进损伤过程。多循环作用促使近表层逐步形成由上部相对致密壳层和下伏疏松粉化层组成的分层结构，并表现出明显的界面控制失稳特征。

参考文献：

[1] Richards J, Bailey R, Mayaud J, et al. Deterioration risk of dryland earthen heritage sites facing future climatic uncer-

tainty[J].Scientific Reports,2020,10:16419.

[2] Chen Haoxin, Chen Wenwu, Li Xiang, et al. The effect of SH-lime composite material on capillary water rise resistance in the Great Wall[J]. Journal of Building Engineering,2024,85:108512.

[3] Sun Manli,Wang Xudong,Li Zuixiong.Issues concerning earthen sites in northwest China[J].Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2010,46(6):41–45.[孙满利,王旭东,李最雄.中国西北土遗址相关问题[J].兰州大学学报(自然科学版),2010,46(6):41–45.]

[4] Zhang Xiyin, Tong Huijun, Li Yapeng, et al. Formation and progression of sheet-like spalling in earthen heritage under freeze-thaw cycles[J/OL]. International Journal of Architectural Heritage, 2026–02–05. https://dov.org/10.1080/15583058.2026.2625997.

[5] Xu Jian,Li Yanfeng,Wang Songhe,et al.Shear strength and mesoscopic character of undisturbed loess with sodium sulfate after dry–wet cycling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2020,79(3):1523–1541.

[6] D'Altri A M,de Miranda S,Beck K,et al.Towards a more effective and reliable salt crystallisation test for porous building materials: Predictive modelling of sodium chloride salt distribution[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304:124436.

[7] Fujii Y,Fodde E,Watanabe K,et al.Digital photogrammetry for the documentation of structural damage in earthen archaeological sites:The case of Ajina Tepa,Tajikistan[J].Engineering Geology,2009,105(1/2):124–133.

[8] Guo Zhiqian,Wu Chong, Zhang Shuai,et al. Characterization on flaking of rammed earthen sites using SMO algorithm and surface topography analysis: A case study of Jiaohe Ruins[J]. Journal on Computing and Cultural Heritage,2024,17(3):1–20.

[9] Jia Bobo, Chen Wenwu, Chen Haoxin, et al. Effects of snowmelt and rainfall infiltration on the water and salt migration of earthen sites during freeze-thaw process[J]. International Journal of Architectural Heritage,2023,17(4):573–584.

[10] Guo Qinglin,Wang Yanwu,Chen Wenwu,et al.Key issues and research progress on the deterioration processes and protection technology of earthen sites under multi-field coupling[J].Coatings,2022,12(11):1677.

[11] Zhang Qi,Guo Qingling,Zhang Huihui,et al.Surface weathering process of earthen heritage under dry–wet cycles: A case study of Suoyang City, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2025,17(8):5224–5239.

[12] Zhang Qiyong,Chen Wenwu,Fan Wenjun.Protecting earthen sites by soil hydrophobicity under freeze–thaw and dry-wet cycles[J].Construction and Building Materials,2020,262: 120089.

[13] Chen Wenwu,Chen Haoxin,Jia Bobo,et al.Study of salt migration on the upper part of the Great Wall under the rainfall-radiation cycle[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2022,81(10):419.

[14] Tian Lei,Bao Weixing,Huang Zhiming,et al.Macro/microstructure deterioration mechanism and constitutive modeling of compacted loess under drying–wetting–freezing-thawing cycles[J].Engineering Geology,2025,359:108442.

[15] Chen Wenwu, Jia Bobo, Shan Xiaokang, et al. Preventing the secondary salt deterioration in the repaired area of basal erosion of earthen sites based on capillary barrier effect[J]. Construction and Building Materials,2023,366:130168.

[16] Chen Mo, Mei Jiaheng, Shen Kai, et al. Response of sandy soil-water migration to different conditions under unidirectional freezing[J].Sustainability,2024,16(9):3597.

[17] Lai Yuanming,Zhang Shimin,Yu Wenbing.A new structure to control frost boiling and frost heave of embankments in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012,79:53–66.

[18] Xu Panpan,Qian Hui,Chen Jie,et al.New insights into microstructure evolution mechanism of compacted loess and its engineering implications[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2023,82(1):36.

[19] Zhang Zhiyong, Bao Weixing, Tian Lei, et al. Study on the effect of pore structure changes induced by freeze–thaw–wetting–drying cycles on water retention characteristics of compacted loess[J]. Construction and Building Materials,2024,455:139213.

[20] Pu Tianbiao, Chen Wenwu, Du Yumin, et al. Snowfall-related deterioration behavior of the Ming Great Wall in the eastern Qinghai–Tibet Plateau[J].Natural Hazards,2016,84(3):1539–1550.

[21] Richards J,Zhao G,Zhang H,et al.A controlled field experiment to investigate the deterioration of earthen heritage by wind and rain[J].Heritage Science,2019,7(1):1–13.

[22] Beckett C, Faria P. Defining a generic accelerated erosion testing method for earthen materials[J]. E3S Web of Conferences,2023,382:05002.

[23] Cui Kai,Wu Guopeng,Du Yumin,et al.The coupling effects of freeze-thaw cycles and salinization due to snowfall on the rammed earth used in historical freeze–thaw cycles relics in northwest China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019,160:288–299.

[24] Shear D L, Olsen H W, Nelson K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay[J]. Transportation Research Record, 1992,1369:130–135.

[25] Cui Kai,Du Yumin,Zhang Yinghui,et al.An evaluation sys-

tem for the development of scaling off at earthen sites in arid areas in NW China[J].Heritage Science,2019,7:1–21.

[26] Liang Chuxin,Liu Ruijing,Li Qixin,et al.Study on the influence of cooling rate on the freeze–thaw deterioration characteristics of salt-contaminated earthen site[J].npj Heritage Science,2025,13:1–11.

[27] Zhao Luqing,Peng Jianbing,Ma Penghui,et al.Microstructure response to shear strength deterioration in loess after freeze–thaw cycles[J].Engineering Geology,2023,323:107229.

[28] Wang Yike,Li Jiaxuan,Xia Yin,et al.A case study investigation-based experimental research on transport of moisture and salinity in semi-exposed relics[J].Heritage Science,2024,12:9.

[29] Chang Bin,Li Jiaxuan,Feng Zhuangbo,et al.Dynamic modeling of the moisture and salt's transport in the unearthed terracotta warriors of emperor Qin's mausoleum museum, China[J].International Communications in Heat and Mass Transfer,2024,156:107664.

[30] Du Yumin,Cui Kai,Chen Siyu,et al.Quantitative research on the development difference of scaling off on the sunward side and nightside of earthen sites[J].Journal of Cultural Heritage,2022,57:107–117.

[31] Zhang Yue.Knowledge of earthen heritage deterioration in dry areas of China: Salinity effect on the formation of cracked surface crust[J].Heritage Science,2023,11:41.

Mechanism of Surface Pulverization and Spalling of Earthen Sites Under Freeze–Thaw and Wetting–Drying Cycles

WEI Xin[1,2,3], *ZHANG Bo*[1,2,3*], *PEI Qiangqiang*[1,3,4], *GUO Qinglin*[1,2,3,4], *BAI Yushu*[3,4], *DUISHANALIEVA Aisin*[3,,5]

(1.Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China;
2.Gansu Mogao Grottoes Cultural Heritage Conservation Design and Consultation Co., Ltd., Dunhuang 736200, China;
3.China–Kyrgyzstan Belt and Road Joint Laboratory on Cultural Heritage Conservation, Dunhuang 736200, China;
4.Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
5.Republican Inspection for the Protection of Historical and Cultural Monuments of the Ministry of Culture, Information, and Youth Policy of the Kyrgyz Republic, Bishkek 720040, Kyrgyz Republic)

Abstract:

Objective Surface pulverization and spalling are common forms of deterioration at earthen heritage sites in seasonally frozen, alpine, and high-altitude regions. Their development is associated with freeze−thaw and wetting−drying cycles, snowmelt infiltration, evaporation, and salt migration. However, these deterioration processes cannot be explained solely by direct frost-heave damage from pore-water expansion during freezing because liquid water in unsaturated and weakly constrained earthen materials may migrate toward unfrozen pores or discharge toward the surface. The key challenge is to clarify how freeze−thaw and wetting−drying cycles reorganize near-surface water−thermal−salt migration, alter surface microstructure, and induce pulverization and spalling. A scaled test wall was therefore used to investigate the formation mechanism of surface pulverization and spalling under environmental conditions extracted from the Wushaoling Great Wall site, to establish the relationship among macroscopic deterioration, water−thermal−salt responses, microstructural reorganization, and interface-controlled instability.

Methods A scaled rammed-earth test wall was constructed using soil collected near the Wushaoling Great Wall site. The soil had an optimum moisture content of 12.15%, and its primary mineral components were SiO_2 and $CaCO_3$. The freeze−thaw and wetting−drying tests were conducted in a multifield coupled environmental simulation laboratory, with test conditions derived from field monitoring at the site. Each loading cycle included precooling, early-winter freeze−thaw cycling, low-temperature continuous freezing, early-spring freeze−thaw cycling, and drying and curing. The winter chamber simulated temperature variation, snowfall, solar-radiation-induced snowmelt, and wind action, with a temperature control range of −30 to 20 ℃. The main loading parameters were: 24 mm of snowfall with two −5 to 10 ℃ freeze−thaw cycles, continuous freezing at approximately −15 ℃ with 30 mm of snowfall, 500 $W\cdot m^{-2}$ solar radiation and 5 $m\cdot s^{-1}$ wind, and one early-spring freeze−thaw cycle from −15 to 10 ℃ following 24 mm of snowfall. Six cycles were conducted to reproduce cumulative deterioration under repeated winter environmental actions. Temperature, moisture content, and electrical conductivity in the shallow surface layer were continuously monitored. Surface appearance and Shore A hardness were recorded before testing and after each loading cycle. After cycling, samples from representative pulverization-spalling zones were analyzed using mercury intrusion porosimetry (MIP) and scanning electron microscopy (SEM).

Results and Discussions The scaled test wall exhibited a clear cumulative deterioration pattern. Before loading, the surface of both sides was relatively intact, and the average Shore A hardness values of the sun-facing and shaded sides were 79.68 and 78.72, respectively. After the first loading cycle, visible damage appeared on both sides. Damage on the sun-facing side was mainly concentrated at the top, edges, and basal regions, whereas damage on the shaded side appeared mainly as a banded deterioration zone in the upper part. The average Shore A hardness values decreased to 54.25 and 65.93, respectively. After the third loading cycle, damaged areas expanded, local deterioration zones began to connect, and Shore A hardness in some low-hardness zones decreased to 15–30. After the sixth loading cycle, the damaged zones became relatively stable and

were mainly distributed at the top, edges, and basal regions. The average Shore A hardness decreased to 50.92 on the sun-facing side and 56.40 on the shaded side, corresponding to reductions of approximately 36.1% and 28.4%,respectively. The results indicate that, rather than developing uniformly, surface deterioration occurred cumulatively, progressing from local initiation to spatially differentiated distribution. The temperature response showed that all shallow surface measuring points repeatedly crossed 0 ℃, indicating repeated freezing and thawing of the near-surface layer. Temperature variation was relatively consistent on the sun-facing side; however, showed greater spatial dispersion and local short-term peaks of 24–25 ℃ on the shaded side. Moisture-content responses revealed uneven liquid-water redistribution. On the sun-facing side, moisture content at X−1−3 increased rapidly during the early-spring freeze−thaw stage of the second cycle, indicating strong local snowmelt infiltration and water accumulation. On the shaded side, moisture content was generally 15%–20%, with a relatively high background value. Electrical conductivity provided indirect evidence of salt migration under liquid-water conditions. On the sun-facing side, conductivity at X−1−3 rapidly increased to approximately 2.8 $S \cdot m^{-1}$ and remained relatively high, indicating sustained local salt enrichment following snowmelt infiltration. The correspondence among moisture-content anomalies, high electrical-conductivity zones, and low-hardness zones suggests that surface weakening primarily occurred in near-surface regions with active water–salt migration and frequent freeze–thaw transitions. SEM observations revealed that cyclic action did not homogeneously loosen the surface layer, instead forming a stratified structure in the pulverization-spalling zone that comprised a relatively dense crust layer and an underlying loose pulverized layer. The crust layer was characterized by compact particle arrangement, reduced interparticle pore exposure, and local pore filling; the pulverized layer exhibited particle separation, increased pore exposure, more abundant debris particles, and a looser structure. These SEM observations were quantitatively supported by the MIP results. All samples exhibited dominant pore-size peaks within the 10–20 μm range. Initial loess had a peak near 15 μm, with a peak value of approximately 0.45 $mL \cdot g^{-1}$. After cycling, the pore-size peaks of the sun-facing pulverized and crust layers were approximately 17.1 μm and 18.8 μm, respectively. The peak values for the shaded pulverized and shaded crust layers were approximately 0.24 $mL \cdot g^{-1}$ and 0.31 $mL \cdot g^{-1}$, respectively. The pore-size distributions widened, distribution values in larger-pore ranges increased, and the pore-structure difference between the layers was amplified.

Conclusions Freeze–thaw and wetting–drying cycles did not induce uniform deterioration of the test-wall surface. Instead, repeated snowmelt infiltration, freezing−thawing transitions, evaporation, and salt migration reorganized the near-surface water−thermal−salt migration process and promoted structural differentiation. Sun-facing regions detriorated more rapidly due to stronger snowmelt infiltration and local salt enrichment, whereas under higher moisture content and a longer freezing duration, shaded regions experienced slower; however, more persistent weakening. The near-surface zone progressively evolved into a stratified structure comprising a relatively dense crust layer and an underlying loose pulverized layer. As the structural mismatch between these layers increased, a weak interface developed and became the locus of instability. Surface pulverization and spalling should therefore be interpreted as a progressive, interface-controlled deterioration process that is jointly governed by moisture migration, temperature variation, salt activity, and microstructural reorganization, rather than as the direct result of a single freeze−thaw event. This process illustrates the failure path under freeze−thaw and wetting−drying cycles: bonding failure−interface instability−pulverization and spalling. The top, edges, and basal regions should be considered priority monitoring areas; moisture content and electrical conductivity can indicate active water–salt migration prior to visible deterioration, whereas surface hardness directly reflects declining surface resistance.

Key words: earthen sites; freeze–thaw–wetting–drying cycles; water–thermal–salt migration; pulverization and spalling; microstructural evolution

（编辑　张　琼）

引用格式: Wei Xin,Zhang Bo,Pei Qiangqiang,et al.Mechanism of surface pulverization and spalling of earthen sites under freeze–thaw and wetting–drying cycles[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):15–27.[韦鑫,张博,裴强强,等.冻融–干湿循环作用下土遗址粉化剥落机理[J].工程科学与技术,2026,58(6):15–27.]