•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.202600480

本刊网刊

积雪–冻融作用下土遗址片状剥落宏–微观演化特征

杜吉安[1]，张理想[1,2,3,4*]，张景科[1,2,3,4]，崔庆飞[1]，齐博嘉[1]，王彦武[4,5]，张　博[4,5]，DUISHANALIEVA Aisin[4,6]

(1.兰州大学 土木工程与力学学院，甘肃 兰州 730000；2.兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000；3.兰州大学 环境考古与文物科学中心，甘肃 兰州 730000；4.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；5.敦煌研究院，甘肃 敦煌 736200；6.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：为揭示融雪入渗、水盐迁移和冻融循环耦合作用下土遗址片状剥落的宏–微观演化特征，以甘肃天祝乌鞘岭长城遗址为原型，制备80°倾角的缩尺试样，开展“积雪覆盖–升温融化”冻融循环模拟试验。每次循环后，记录立面和斜面形貌，测试表面硬度、色差等宏观指标，并分层测试易溶盐离子浓度、粒度组成和常量元素等微观指标，采用灰色关联法分析宏–微观指标关联程度。试验结果表明：片状剥落主要发育于融雪入渗直接作用的顶层，第3、4次冻融循环由潜伏劣化转入显性剥落，6次冻融循环后，立面和斜面顶层硬度损失率达16.2%～16.3%，总色差分别为8.38和8.65，斜面劣化程度整体重于立面。微观指标显示：第3次循环顶层CaO含量率先达到峰值、SiO_2含量同步降至低值，反映钙质组分迁移和结构稳定性下降；第4次冻融循环易溶盐总量、钠吸附比（SAR）和Na_2O同步达到峰值，并与硬度损失、色差突变和片状剥落显化相对应；粒度组成表现为细粒组分降低、砂粒组分相对富集。灰色关联结果表明：硬度损失主要与SAR/Na^+升高所指示的颗粒分散、细粒组分降低，以及CaO富集与SiO_2相对降低所指示的钙质胶结/骨架组分调整有关；色差变化主要与SO_4^{2-}、CaO和Na_2O等可溶盐及相关元素迁移富集有关。片状剥落演化过程可概括为融雪入渗与表层结构弱化—水盐迁移与盐分/元素富集—结构分异与片状剥落显化—疏松层流失与剥落扩展4个阶段。研究结果可为高寒地区土遗址片状剥落的阶段识别和预防性保护提供依据。

关键词：土遗址；冻融循环；片状剥落；多场耦合；灰色关联法

中图分类号：TU448　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3246(2026)06-0041-16

土遗址是人类历史活动的重要实物遗存，是不可再生的文化遗产资源。中国西北地区分布着大量以夯土为主要构筑形式的土遗址，如长城、古城址、烽燧等，具有重要的历史、艺术和科学价值[1–2]。受干湿循环、冻融循环、盐分迁移、风蚀冲刷等作用影响，土遗址表层病害普遍发育，且具有类型多样、成因复杂等特点，严重威胁遗址本体长期保存。西北高寒地区冬季严寒漫长，昼夜温差大[1]。冬季降雪后，融雪入渗与冻融循环共同作用可促进水盐在夯土遗址浅表层迁移富集，加剧遗址表层劣化[3]。刘怀玉等[4]将夯土遗址风化病害归纳为片状剥蚀、裂隙、冲沟、掏蚀、生物破坏和人为破坏。其中，片状剥落是西北高寒地区土遗址表面普遍发育且危害显著的典型病害之一。Cui等[5]对青海、甘肃的18处土遗址的调查表明，所调查的遗址均存在不同程度的片状剥落。该病害表现为遗址表层土体沿近似平行于墙面方向呈薄片状逐层剥落，剥落后下伏疏松层直接暴露，进一步加剧水盐迁移、冻融循环和风蚀冲刷作用，从而加速遗址本体劣化[6]。在高寒地区，片状剥落受融雪入渗、盐分迁移和冻融损伤等多因素共同控制[5–7]，仅依赖形貌观察难以准确识别其在多场耦合作用下的劣化过程。因此，有必要结合宏观损伤和微观物质迁移等多尺度表征方法，对片状剥落劣化过程进行综合评价。

近年来，关于冻融作用下土遗址的劣化过程与表征方法已有较多研究。在宏观表征方面，严耿升等[8]以交河故城土遗址为对象，采用了质量变化、抗压强度

收稿日期：2026－06－03　　**修回日期：**2026－08－03　　**网络出版日期：**2026－08－20

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFF0905900；2025YFE0211600）；甘肃省创新平台计划项目（26JDWF001）

作者简介：杜吉安（2003—），男，硕士生．研究方向：岩土质不可移动文物保护．E-mail：duja2025@lzu.edu.cn

* **通信作者：**张理想，实验师，E-mail：zhanglixiang@lzu.edu.cn

和风蚀量等指标评价了冻融循环对土体耐久性的影响，发现随冻融次数增加，原状土微结构损伤加剧且强度持续衰减。李亚鹏等[9]以甘肃天祝明长城夯土遗址为研究对象，引入“盐分富集梯度”指标定量表征盐分迁移趋势，并结合质量损失率和抗压强度等宏观指标评价冻融作用下遗址表层劣化特征，同步揭示了热导率随冻融循环的衰退规律。Chen 等[10]以甘肃永昌明长城土样为对象，采用RGB颜色空间评价复合加固材料处理前后土样颜色变化，并通过表面硬度测试分析滴渗加固后土样表面力学性能变化，表明颜色变化和表面硬度可作为土遗址表层状态及加固效果评价的重要指标。在微观表征方面，张虎元等[11]利用X射线衍射、离子色谱与激光粒度分析研究交河故城土遗址表面结皮，发现结皮层较下伏母墙具有粒度偏细和易溶盐含量偏低的特征，并指出结皮后期易发生剥离脱落。相关孔隙结构研究表明，风化程度升高时土体孔隙结构趋于复杂，孔隙分形维数增大，可用于表征风化劣化状态[12]。

在多场耦合作用方面，已有研究开始关注融雪入渗和冻融循环共同作用下土遗址的劣化响应。谌文武[3,13]和Pu[14]等研究了融雪入渗条件下含盐土遗址的冻融劣化特性，发现融雪缓慢入渗有助于盐分弥散，冻融循环可促进水盐耦合迁移，二者共同作用会显著加速土体表层结构破坏。白玉书[15−16]等基于新疆北庭故城原位夯土试验墙，研究了积雪突融环境下土遗址顶缘的滑移破坏，指出其存在雪水渗透入渗—冻结膨胀—融化疏松—突融侵蚀的阶段性破坏过程。

尽管上述研究已取得重要进展，但仍有不足。当前研究多采用单一或少数几种表征手段，宏观指标与微观指标间的时序对应关系尚未系统建立，导致难以识别片状剥落不同发育阶段，也难以解释剥落前后微观物质的变化过程，从而限制了病害分阶段评价和预防性保护措施制定。此外，现有试验中试样多为规则小尺寸试块，尚未考虑墙面实际倾角对片状剥落分布的影响，不同倾角墙面会改变积雪覆盖范围和融雪入渗强度，进而影响片状剥落的空间分布及发展程度，导致试验结果与现场病害特征存在一定偏差。现有研究围绕冻融循环、干湿循环、融雪入渗等作用下的土遗址劣化开展了相关探索，但多侧重单因素或简化耦合条件；传统的室内试验虽参数可控，也常采用恒温冻融等简化制度，但尚难以反映积雪累积、升温融化、融雪入渗和冻融交替作用下水分输入、冻融损伤与水盐迁移的多场耦合过程。原位遗址受限于最小干预原则，难以通过连续取样和破坏性内部监测获得病害形貌、力学状态与盐分、粒度、元素组成等指标的同步关系。

为此，本文依托国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心多场耦合环境模拟实验室冬季仓，以甘肃天祝乌鞘岭长城夯土遗址为原型，采用整体夯筑工艺制备包含垂直立面和80°斜面的缩尺试样，开展“冬季积雪覆盖—春季升温融化”条件下的冻融循环试验。试验通过宏观形貌、表面硬度和色差表征表层宏观劣化，并结合易溶盐离子、粒度组成和常量元素测试揭示微观物质变化过程；建立宏观指标和微观指标的时序对应关系，分析立面和斜面不同高度层宏–微观指标的差异规律，探讨冻融诱发浅表层片状剥落的宏–微观协同演化规律和关联关系。研究成果旨在为土遗址浅表层片状剥落的阶段识别、劣化评价和预防性保护提供科学依据。

1 试验概况

1.1 试样制备

试验用土取自甘肃省武威市天祝藏族自治县乌鞘岭长城遗址附近(102.85°E,37.20°N)，土样类型为粉土，其基本物理性质与文献[17]中乌鞘岭长城遗址土相近，遗址土与试验土的基本物理性质对比如表1所示。表1中，w为天然土中水的质量分数，ρ为天然密度，w_{op}为最佳状态土中水的质量分数，ρ_d为最大干密度，W_L为液限，W_p为塑限。该区域海拔约3 562 m，平均气温为0.8 ℃，平均相对湿度为72.40%[17]。遗址区冬季积雪覆盖时间长，春季气温回暖后积雪集中融化，墙体浅表层片状剥落病害发育明显。

表 1 遗址土与试验土的基本物理性质对比[17]

Tab. 1 Comparison of basic physical properties between site soil and test soil[17]

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

根据现场实测墙体高度及夯层厚度，按1∶2比例尺确定模型总高为80 cm，夯层厚度为24 cm，斜面倾角按现场墙体倾角设置为80°。试样制备和试验流程如图1所示。图1中，T为温度，t为时间，采用整体夯筑工艺，在底座尺寸为50 cm×50 cm的模具中制样，成型后削切两侧多余土体，制成含一对垂直立面和一对80°斜面的试样。其中，一组垂直面和斜面用于表面形貌观察，另一组对应垂直面和斜面用于宏微观指标测试。为便于结果描述，本文将垂直立面编号为A面，将80°斜面编号为B面。试样随后在室内自然通风条件下养护至质量恒定。

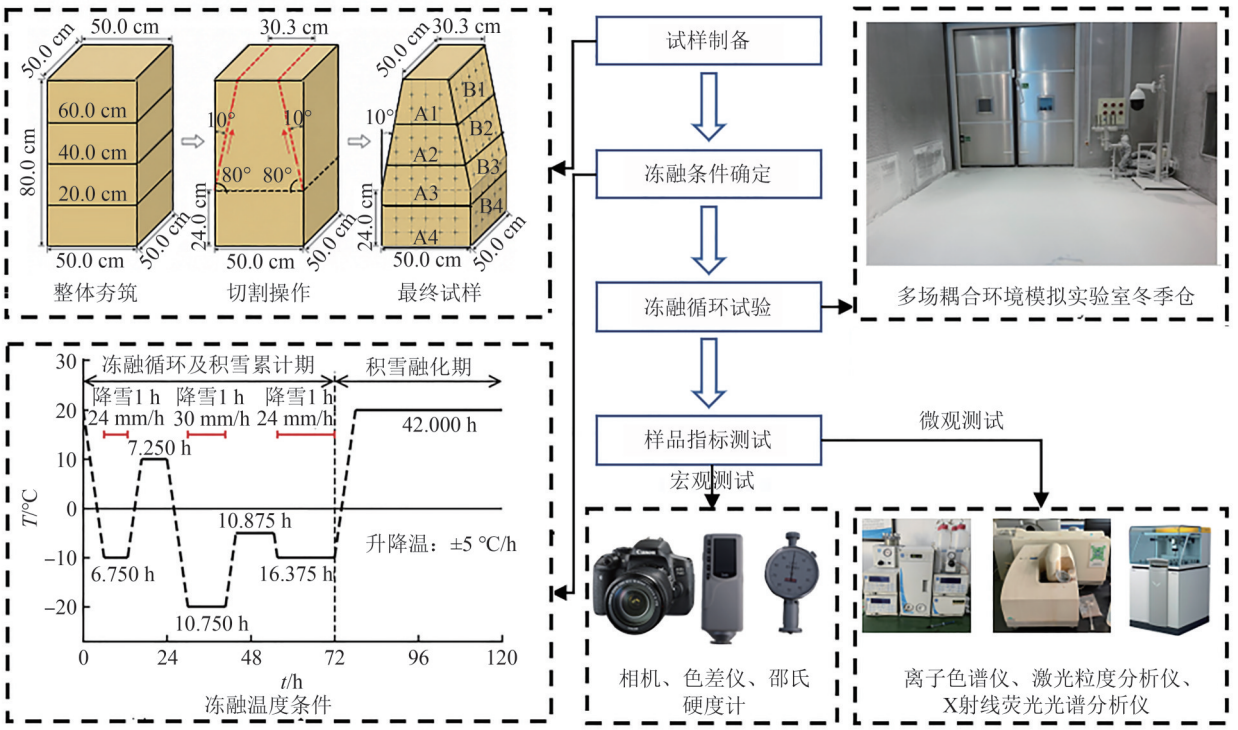


图 1　试样制备和试验流程

Fig. 1　Specimen preparation and experimental procedure

1.2　冻融循环试验设计

本试验在多场耦合环境模拟实验室冬季仓进行，如图 1 所示。依据乌鞘岭现场 2005—2020 年的气象监测数据，该区域环境温度波动范围为 −20～20 ℃，年平均积雪 48 d，平均冻融期为 222 d，其中全冻期为 95 d，冻融循环期为 127 d。根据温度变化特征，可将冻融过程划分为积雪累积及冻融循环期、积雪融化期两个阶段[17]。依据乌鞘岭现场环境阶段持续比例，对自然环境过程进行时间尺度压缩，设计单次循环周期为 5 d（图 1），共进行 6 次冻融循环。其中，现场冻融循环及积雪累计期与积雪融化期持续时间比例约为 222 d∶143 d≈1.55∶1.00，因此室内循环中冻融循环及积雪融化期设置为 72 h，积雪融化期设置为 48 h，两阶段时间比例为 72 h∶48 h=1.5∶1.0，与现场环境阶段比例基本一致。冻融循环及积雪累计期内设置 3 次降雪事件，温度在 −20～10 ℃间波动，升降温速率为 5 ℃/h，降雪强度为 24～30 mm/h。该降雪强度依据乌鞘岭气象监测数据选取典型较大降雪事件作为试验输入条件，用于模拟高寒地区阶段性降雪导致的积雪累积过程。积雪融化期升温至 20 ℃并保持恒温，用于模拟积雪融化后的入渗和冲刷过程。

1.3　宏微观指标测试

1.3.1　宏观指标测试方法

本文结合表面形貌观察、硬度变化和色差变化对冻融循环过程中土遗址表层劣化特征进行综合评价。其中，表面形貌用于记录片状剥落演化过程，硬度用于表征表层结构弱化程度，色差用于反映表面颜色变化和风化特征。在初始状态及每次循环结束后，采用硬度计按横、纵向间隔 10 cm 进行网格化布点，测试表面硬度；采用色差仪按 4 行 3 列网格采集色度值。宏观测试设备如图 1 所示。同步采用相机对 A、B 面进行拍照记录，获取不同循环阶段的表观形貌特征。为便于分层分析，将试样沿高度方向按约 20 cm 间隔自上而下划分为 4 层。A 面各层编号为 A1～A4，B 面各层编号为 B1～B4。其中，A1、B1 为顶层，A2、A3、B2、B3 为中层，A4、B4 为底层，分层命名示意图见图 1。

1.3.2　微观指标测试方法

在初始状态及每次循环后，分别在 A、B 面沿高度方向分 4 层采集试样。采用离子色谱仪测定易溶盐离子含量，采用激光粒度分析仪测定粒度组成，采用 X 射线荧光光谱分析仪（XRF）测定常量元素氧化物含量。微观测试设备如图 1 所示。

2　试验结果与分析

2.1　宏观试验结果分析

2.1.1　宏观劣化特性

立面 A 与斜面 B 的宏观劣化特征如图 2 所示。图 2 中，N 为冻融循环次数，N=0～6。初始状态下（图 2（a）），两面表面平整、质地均匀，整体呈黄褐色。仅留存制样过程中形成的轻微划痕，试样整体结构完整。经

历第 1、2 次冻融循环后，两面均未见明显劣化（图 2(b)、(c)）。第 3 次冻融循环时（图 2(d)），仅顶层积雪直接作用区出现色泽加深，但表面仍保持平整且未见明显的结构性损伤。该现象表明，在片状剥落显化前，受融雪水直接作用的顶层已发生含水状态改变和颜色变化，宏观病害处于潜伏劣化阶段。

第 4 次冻融循环时，两面顶部均出现显著的宏观劣化（图 2(e)），且损伤均始发于顶部融水入渗的核心作用区。A 面顶部形成连续片状剥落带 P1，剥落带两侧伴随发育结壳区 K1、K2，带内首次出现孔洞缺陷 D1，剥落带及结壳区附近可见大量白色晶体附着。B 面顶部形成连续结壳带 K1，其内侧同步发育片状剥落区 P1，并出现孔洞 D1，表面同样可见明显白色晶体。与 A 面相比，B 面结壳带更宽、连续性更强，损伤范围更大，体现出斜面 B 对耦合劣化作用的响应更敏感。该阶段标志着片状剥落由潜伏劣化转入显性剥落。第 5、6 次冻融循环期间（图 2(f)、(g)），试样加速劣化。第 5 次冻融循环时，A 面剥落带 P1 范围扩大，孔洞数量增至 3 处（D1～D3）；B 面剥落带分裂为 P1、P2 两段，孔洞 D1 尺寸增大，劣化区域向下扩展。此时，两面表面白色晶体较第 4 次冻融循环明显减少，表明剥落后疏松层及白色结晶物可能在融雪冲刷作用下流失。至第 6 次冻融循环，A 面各缺陷尺寸进一步增大；B 面剥落带 P1 与 P2 贯通，结壳区呈连片分布，孔洞增至 2 处（D1、D2），顶部表层完整性受到明显破坏，中层和底层整个循环无明显损伤。

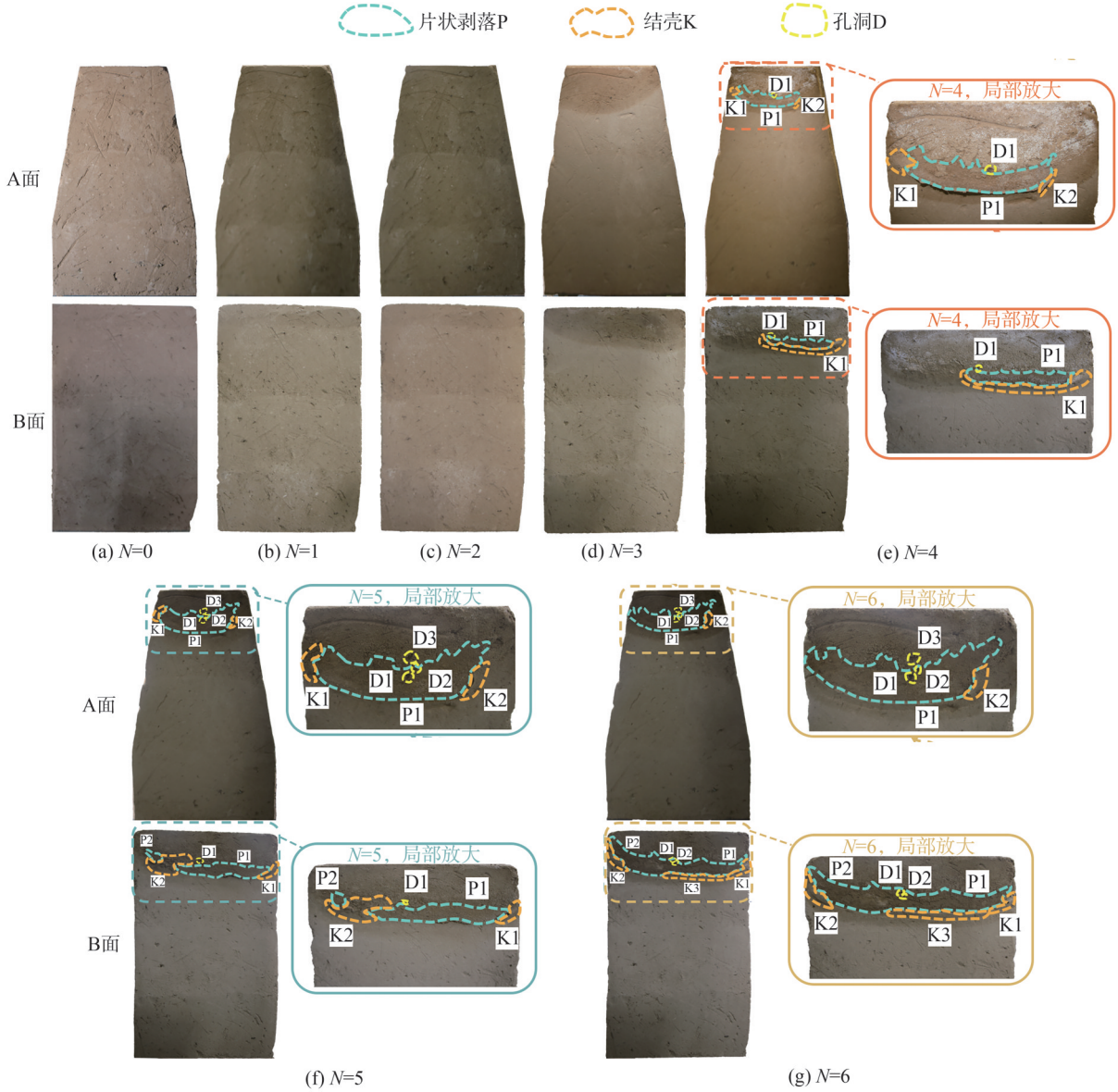


图 2　不同冻融循环次数下 A、B 面的宏观劣化特征

Fig. 2　Macroscopic deterioration characteristics of Surfaces A and B after different freeze–thaw cycles

综上，片状剥落发生于融雪入渗直接作用的顶层，并表现为由色泽加深、白色晶体析出到剥落显化和孔洞扩展的渐进特征。斜面劣化程度高于立面，说明坡面形态增强了积雪汇集、融水入渗和径流冲刷作用，加剧了浅表层片状剥落发展。

2.1.2　硬度变化

1）不同倾角面硬度时空演化特征

为表征冻融循环下试样表面硬度的时空演化规律，基于A、B两面网格化布点测试结果绘制硬度云图，如图3所示。

整体来看，立面A与斜面B均呈现“先整体硬化、后顶层持续劣化、中底层相对稳定”的演化特征，并以第3次冻融循环为损伤拐点。初始状态下，A、B面平均邵氏C（HC）硬度分别为80.98、84.14。1次冻融循环后，A面硬度增幅达5.79%，B面增幅为1.05%，两面均出现短期硬化现象，可能与冻融初期水分相变引起的颗粒重排和局部压密有关[18–19]。第2、3次冻融循环之间，A面整体硬度变化较小，B面硬度略有下降，此时宏观形貌上仅顶层出现色泽加深，尚未发生明显片状剥落。第4次冻融循环时，A、B面顶层出现明显的连续低硬度带（图3(e)），与宏观片状剥落的发生时间同步，说明顶层硬度下降可反映剥落前后浅表层结构弱化过程。第5、6次冻融循环期间，低硬度区进一步向中下部延伸（图3(f)、(g)），对应片状剥落带范围的持续发展。相较于A面，B面顶层硬度劣化区范围更大、扩展更快，斜面可能因积雪更易汇集而劣化更明显。

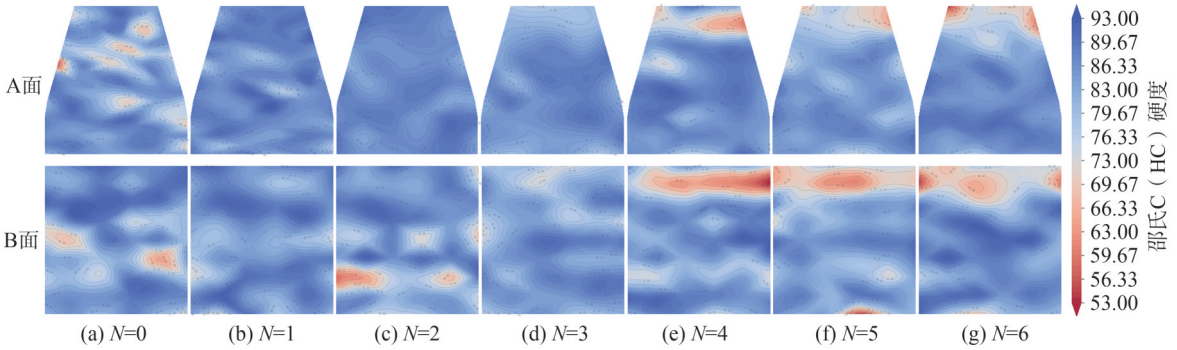


图 3　不同冻融循环次数下A、B面的硬度时空演化特征

Fig. 3　Spatiotemporal evolution of surface hardness on Surfaces A and B during freeze–thaw cycles

2）分层硬度损失率演化规律

为评估夯土在多场耦合冻融作用下的劣化程度及其演变规律，引入硬度损失率对试样不同高度层劣化进行量化表征[20]，其计算式为：

$$\eta_N = \frac{H_0 - H_N}{H_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中：η_N为第N次冻融循环后的硬度损失率，%，当$\eta_N > 0$时，表示土体损伤，当$\eta_N < 0$时，表示土体硬化；H_0、H_N分别为第0、N次冻融循环后的平均邵氏C（HC）硬度。

A、B面不同层硬度损失率与冻融循环次数关系如图4所示，顶层是唯一全程表现为损伤的层位，其硬度损失率近似线性上升且在第2、3次冻融循环期间变化幅度显著增大。A1层硬度损失率在此阶段由负转正，增幅达9.76%，完成从硬化到损伤的拐点跨越，B1层损伤速率同步加快，增幅为4.31%。该节点与宏观形貌中顶层因融雪入渗出现色泽加深的阶段吻合，融雪入渗补给的水分使试样的结合水膜变厚，土颗粒间黏聚力下降，试样强度显著降低[3]。此后，损伤持续加速，A1层至第6次冻融循环时硬度损失率达16.2%，B1层同期达到16.3%，与片状剥落显化和扩展的宏观过程对应。中层以硬化为主，底层变化平稳，分别对应表面保持完整和未出现可见损伤的区域。上述对应关系表明，硬度损失率可作为识别片状剥落由潜伏转入显性破坏的有效宏观力学指标。

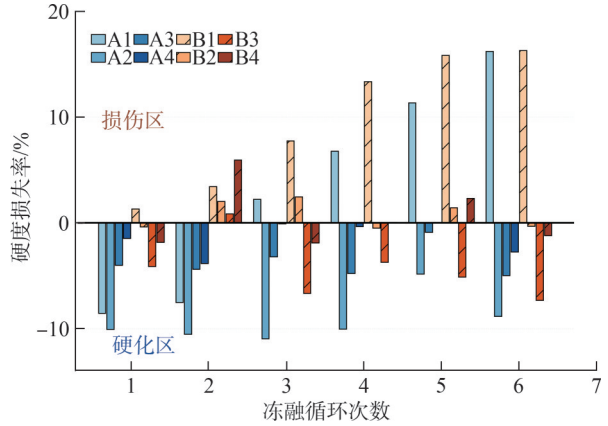


图 4　A、B面不同层硬度损失率与冻融循环次数关系

Fig. 4　Hardness loss rate of different layers on Surfaces A and B during freeze–thaw cycles

2.1.3　颜色差异分析

A、B面不同层色度差值随冻融循环的变化情况如图5所示。图5中：ΔE^*为总色差，数值越大，色差越明显；Δa^*为红绿色品差，正值表示偏红；Δb^*为黄蓝色品差，正值表示偏黄；ΔL^*为明度差，表示颜色的明暗差异，正值表示偏亮。

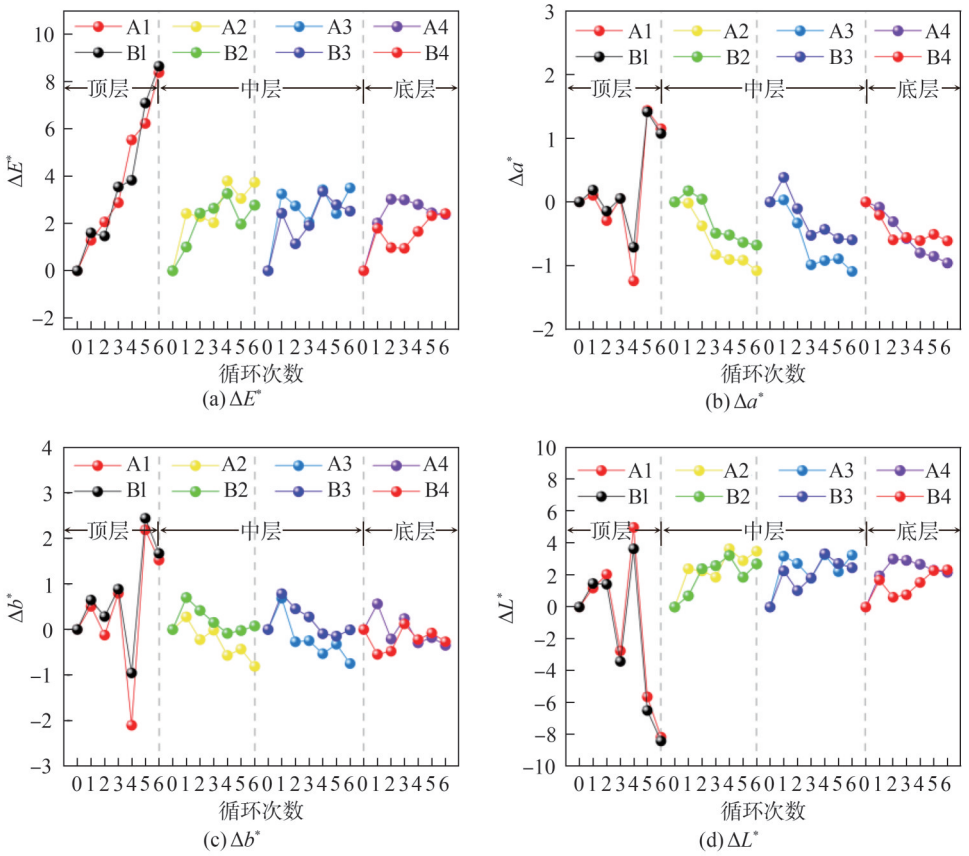


图 5　A、B 面不同层色度差值与冻融循环次数关系

Fig. 5　Color difference of different layers on Surfaces A and B during freeze–thaw cycles

图 5(a)中，总色差呈现顶层剧烈劣化—中层缓慢变化—底层基本稳定的分布特征。6 次冻融循环后，A1、B1 的 ΔE^* 分别达到 8.38 和 8.65，是中底层最大值的 2.25～2.32 倍，且 ΔE^* 随着深度递减。这一现象表明冻融损伤主要集中在顶层，与实际发生冻融剥落病害的位置高度吻合。A1 层在第 3、4 次冻融循环期间出现突变式增长，增幅达 92.36%，与宏观形貌中片状剥落发生时间基本同步。B1 层在多数循环中色差均高于同期 A1 层，与 B 面硬度云图劣化区域范围更大规律一致。李新明等[21]对改良遗址土的研究也发现，色差值与冻融循环次数、含水率呈正相关，进一步表明了水分对表层颜色劣化的控制作用。

Δa^* 与 Δb^* 变化趋势相近(图 5(b)、(c))，顶层在第 4 次冻融循环突变负值，与大量白色晶体在表面析出和剥落暴露内部土体的宏观过程一致，第 5、6 次冻融循环反弹为正值。ΔL^*(图 5(d))在第 0～2 次冻融循环期间为正值，此时表面尚未出现大量水分入渗。从第 3 次冻融循环起，随融雪入渗加剧，表面含水率升高，土壤反射率降低、颜色加深[22]，导致 ΔL^* 显著下降。第 4 次冻融循环中 ΔL^* 短暂回升至正值，此阶段表面大量白色晶体析出，形成高反射性盐霜[23]，与宏观观察中白色晶体大量出现的现象吻合。第 5、6 次冻融循环中 ΔL^* 再次转为负值，对应白色晶体明显减少的过程。中底层各色度分量始终变化平缓，反映中底层受冻融影响微弱。

2.2　微观试验结果分析

2.2.1　易溶盐变化分析

1)易溶盐总量的层位分布与演化

图 6 为 A、B 面不同层易溶盐总量与冻融循环次数关系，初始状态下 A 面各层的易溶盐总量范围为 2 430～10 123 mg/L，B 面为 4 464～6 568 mg/L，均属于高含盐土体。A 面呈现“上低下高”的倒置分布，可能与养护阶段水盐再分布导致底层相对滞留富集有关；B 面蒸发方向与重力方向呈一定夹角，盐分分布较均匀。

两次冻融循环后，A1、B1 层易溶盐总量分别降低 29.05% 和 59.73%，其中 B1 层降幅更大，说明循环初期顶层盐分可能在融雪入渗引起的淋洗迁移和表面径流冲刷作用下发生流失[3,24]。第 3、4 次冻融循环期间，A1、B1 层易溶盐总量连续升高，并在第 4 次循环达到峰值，可能反映了前期融雪入渗补水和后续蒸发失水共同作用下，盐分随水分向浅表层迁移并集中富集的过程[25]。结合宏观形貌可知，第 4 次冻融

循环时顶层片状剥落开始显化，并伴随白色晶体出现和色差突变。因此，第4次冻融循环中，顶层易溶盐总量峰值可能是盐分向浅表层迁移富集与高盐疏松层[26]暴露共同作用的结果。第5次冻融循环时，顶层易溶盐总量明显降低，与宏观观察中疏松层携带白色晶体明显减少的现象相吻合，说明该阶段可能发生了表层可溶盐及疏松物质的共同流失。第6次冻融循环后，顶层易溶盐总量再次回升，表明在后续融雪入渗和蒸发作用下，盐分仍可继续向浅表层迁移富集。中下层易溶盐总量在第6次冻融循环后整体降低。朱晶等[25]基于夯土水盐运移的试验指出，失水过程中盐分随水分向表层迁移，导致表层盐分含量增加，而内部盐分含量降低。因此，中下层盐分降低可能与其在蒸发阶段伴随水分向顶层迁移有关。

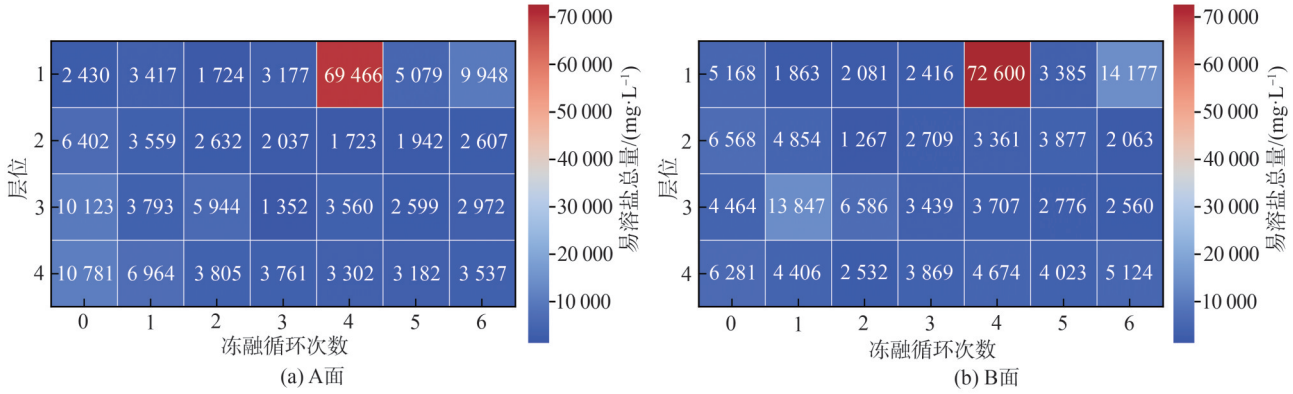


图 6　A、B面不同层易溶盐总量与冻融循环次数关系

Fig. 6　Total soluble salt contents of different layers on Surfaces A and B during freeze–thaw cycles

2）钠吸附比（SAR）的演化规律

钠吸附比（SAR，记为 S_{AR}）是评价土体分散性的关键化学指标[27–28]，其计算式为：

$$S_{AR}=\frac{C_{Na^+}}{\frac{\sqrt{C_{Ca^{2+}}+C_{Mg^{2+}}}}{2}} \tag{2}$$

式中：S_{AR} 为钠吸附比；C_{Na^+}、$C_{Ca^{2+}}$、$C_{Mg^{2+}}$ 分别为 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 离子浓度，mmol/L。

A、B面平均易溶盐总量、平均SAR与冻融循环次数关系如图7所示，SAR与易溶盐含量协同演化。初始状态下，A面 S_{AR} 为10.45，B面 S_{AR} 为17.08，B面土体分散性显著高于A面。在0～2次s冻融循环期间，SAR与易溶盐总量同步下降，A、B面 S_{AR} 降幅分别为19.62%和50.29%。Zhao等[29]的研究证实 Na^+ 的迁移能力强于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}，淋溶过程中 Na^+ 被优先淋失，Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 相对比例上升，SAR随之下降，土体分散性暂时减弱，与整体硬度上升阶段对应。第4次冻融循环SAR和易溶盐总量同步达到高点，此时顶层易溶盐含量显著高于其他层，与宏观观察中仅顶层发生明显劣化一致。这源于融雪水主要沿试样顶部入渗，盐分伴随水分向顶部迁移并富集[30]，可能使顶层土体分散性显著增强，并促进浅表层结构弱化，这一变化与低硬度带形成、片状剥落显化和高盐疏松层暴露相对应。第5、6次冻融循环期间，疏松层流失后SAR并未随着易溶盐总量骤降，暴露面 Na^+ 仍占优势，土体分散性持续较强，对应宏观观察的低硬度带和剥落区向中下部扩展。综上，SAR可能与硬度损失有较强关联性。

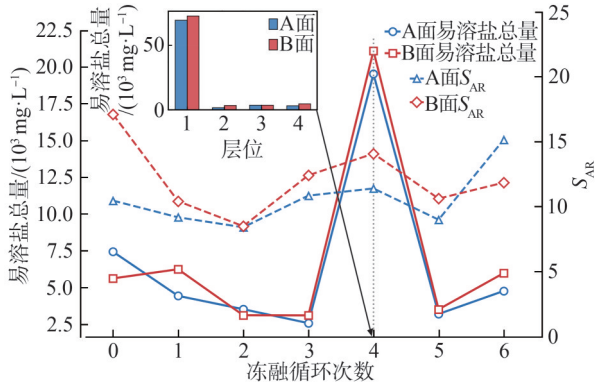


图7　A、B面平均易溶盐总量、平均SAR与冻融循环次数关系

Fig.7　Average total soluble salt contents and SAR of Surfaces A and B during freeze–thaw cycles

整个过程B面SAR高于A面，淋溶阶段降幅更大、富集阶段回升更显著，与B面易溶盐总量变化更剧烈，片状剥落更严重的规律一致。

2.2.2　粒径组成变化分析

冻融循环通过颗粒破碎与团聚改变土体粒度组成，融水入渗携带的盐分迁移进一步加剧了这一重组过程[31]。初始状态下，A、B面顶层粒度组成相近，均以粗粉粒和砂粒为优势粒级，构成土体物理骨架。而起到填充与黏聚作用的胶粒与黏粒含量较低，属典型粉细砂质土。

在初始粒度特征基础上，A、B面顶层在冻融循环过程中表现出不同的粒度响应（图8）。本文将胶粒、黏粒和

细粉粒归为细粒组分，与砂粒组分进行对比。A 面顶层粒度变化较为明显，细粒组分由初始的 19.2% 降至第 4 次冻融循环的 14.1%，砂粒组分由 26.6% 升至 34.7%，第 4 次冻融循环达到最大变化幅度。该阶段与 A 面顶层片状剥落显化、硬度降低和色差突变相对应，表明宏观病害显化过程中，浅表层颗粒级配同步发生调整。

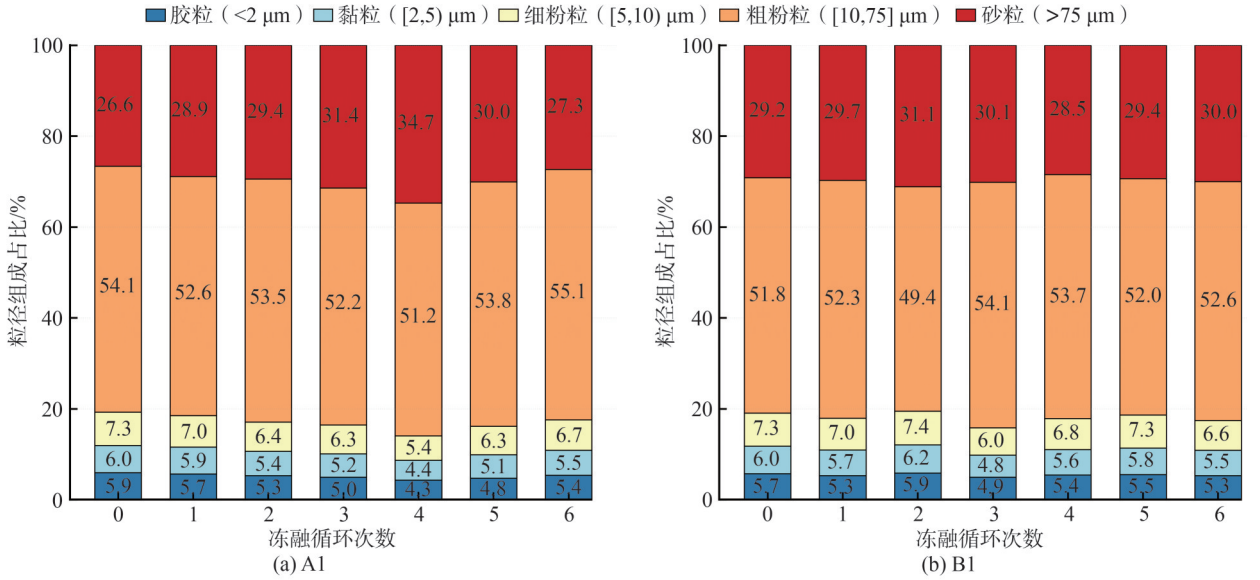


图 8　A、B 面顶层粒径组分与冻融循环次数关系

Fig. 8　Particle-size composition of the top layers on Surfaces A and B during freeze–thaw cycles

2.2.3　XRF 变化分析

为探究片状剥落显化过程中顶层元素组成的响应特征，选取 A、B 面顶层 CaO、SiO_2 和 Na_2O 含量进行对比分析，结果如图 9 所示。

由图 9 可知，A1、B1 顶层氧化物组分具有明显阶段性。CaO 在第 3 次冻融循环达到峰值（图 9(a)），A1、B1 层较初始状态分别增加 10.64% 和 14.35%。同阶段 SiO_2 降至低值（图 9(b)），较初始状态分别降低 2.07% 和 2.84%。此时宏观形貌尚未出现明显片状剥落，但顶层已表现为硬度降低和色差变化增强，说明浅表层劣化早于可见剥落发生。已有研究表明，片状剥落具有表层结壳层和下伏疏松层组成的二元结构，其形成与盐分迁移、颗粒胶结状态变化、表层结构分异有关[5–6]。Ca^{2+} 等离子参与水盐迁移过程，盐分作用可促进土遗址表层裂隙结壳形成与脱落[32]。因此，CaO 先期富集可理解为剥落前钙质盐分和相关胶结组分调整的元素响应，可能为后续表层结壳发育和剥落界面形成提供物质基础。同时，相关夯土墙体矿物组成研究表明，石英（SiO_2）是夯土材料中常见的主要矿物之一，可作为硅质骨架组分的重要表征，对材料整体稳定性具有重要作用[33]。结合第 3 次循环硬度降低结果可知，剥落显化前浅表层已出现化学分异和结构稳定性下降。

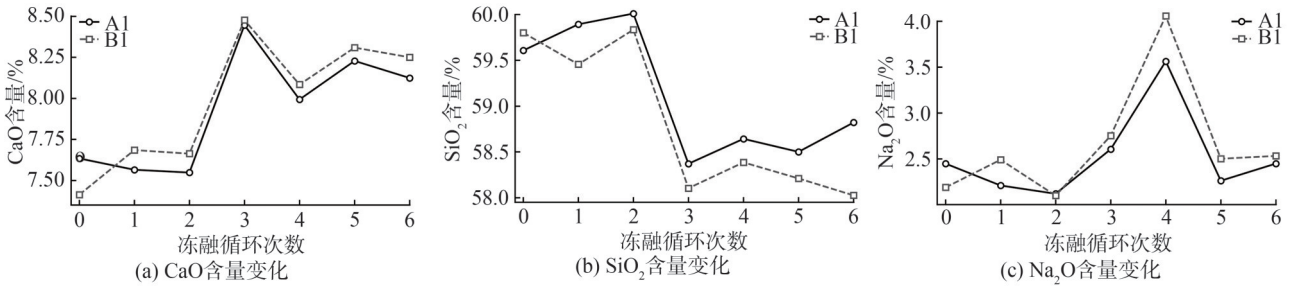


图 9　A、B 面顶层氧化物组分含量随冻融循环次数的变化

Fig. 9　Variations of oxide component contents of the top layers on Surfaces A and B with freeze–thaw cycles

Na_2O 含量峰值滞后于 CaO，A1、B1 顶层 Na_2O 含量在第 4 次冻融循环达到峰值（图 9(c)），较初始状态分别增加 45.59%、85.51%。该阶段对应顶层色差突变、硬度损失持续、片状剥落显化、易溶盐总量和 SAR 升高。融雪/降雨入渗可促进冻融过程中土遗址浅表层水盐迁移，盐分随水分迁移并发生重新分布与富集[7]，多场耦合作用可导致土体胶结削弱、结构松散和表层剥落[34]。因此，Na_2O 含量后期峰值可能反映钠盐相关组分在顶层发生集中富集，并与片状剥落由潜伏劣化转入显性剥落的时间节点相一致。坡面差异上，B1 中 CaO、SiO_2 和 Na_2O 含量变化幅度均大于 A1，说明斜面 B 顶层受融雪径流和水盐运移影响更显著，与 B 面硬

度损失和剥落程度及SAR变化更明显的结果一致。

3　分析与讨论

3.1　基于灰色关联法的宏–微观指标关系评价

为进一步明确顶层宏观劣化指标与微观指标之间的关联程度，采用灰色关联法分析主要关联因子。灰色关联分析的主要思路是通过比较不同曲线的相似程度（趋势）来判断其间是否存在密切关系[35]。鉴于片状剥落主要发生于顶层，本文以顶层硬度损失率和总色差 ΔE^* 为参考序列，以易溶盐离子、粒径组分和常量元素为比较序列。首先，对各指标序列进行无量纲化处理，以消除不同指标量纲差异的影响；随后，计算参考序列与比较序列之间的灰色关联系数，并进一步求取关联度，以评价不同微观指标与宏观劣化指标之间的关联程度。关联度越高，表明微观指标与宏观劣化指标在冻融循环过程中的变化趋势越一致。

易溶盐各离子含量与宏观劣化指标的关联结果如图10所示。A1层SAR与硬度损失率和总色差的关联度均最高，SO_4^{2-} 和 Na^+ 次之，说明A1层宏观劣化与钠盐相对富集和硫酸盐作用关系密切，这与SAR在第4次冻融循环达到峰值并与色差突变、低硬度带形成和剥落显化结果一致。相比之下，B1层高关联因子转为 K^+、SO_4^{2-} 和 Ca^{2+}，SAR关联度较低，表明斜面顶层劣化并非受单一钠盐分散作用控制，而更可能受多离子迁移共同影响。该结果与B面易溶盐波动更明显、剥落程度重于A面的宏观现象相对应。

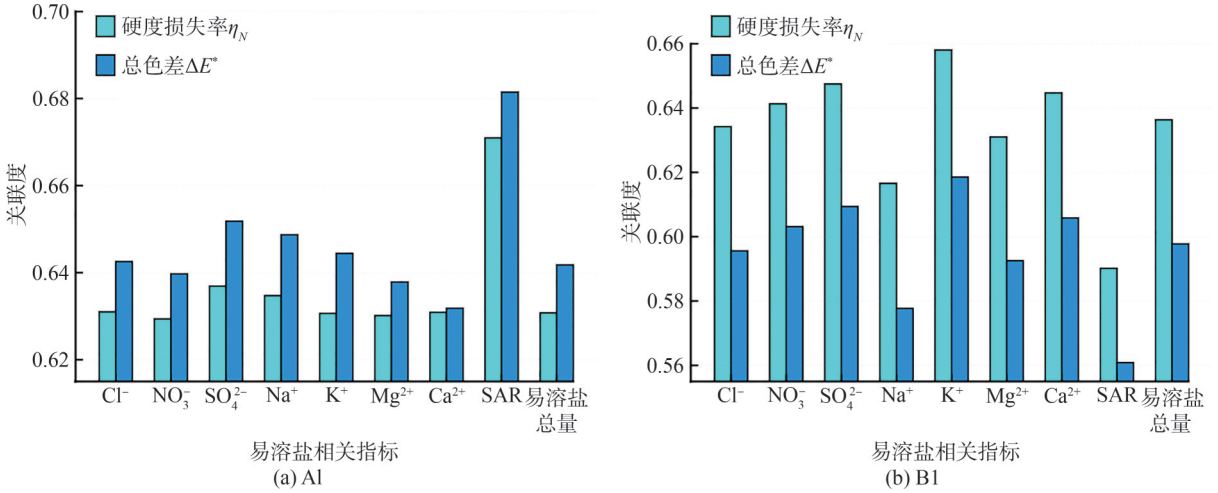


图 10　A1与B1冻融循环作用下宏观劣化指标与易溶盐各离子含量关联度

Fig. 10　Grey relational degrees between macroscopic deterioration indicators and soluble salt indices under freeze–thaw cycles for Layers A1 and B1

顶层主控离子的差异可能与墙面倾角引起的融雪水迁移路径及盐分迁移特征差异有关。A面缺少明显坡面汇流条件，融雪水主要以入渗方式补给表层，表面径流及盐分淋洗作用相对较弱。在冻融循环和水分迁移作用下，Na^+ 等迁移性较强离子易发生迁移并相对富集，使SAR、Na^+、SO_4^{2-} 与宏观劣化指标表现出较高关联性。相比之下，80°斜面B更易形成坡面汇雪和沿坡融雪径流，增强表层水分交换及盐分淋洗作用，使 Na^+ 等易迁移离子的表层富集趋势减弱，同时改变 K^+、Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 等离子的分布特征。

图11为A1与B1冻融循环作用下宏观劣化指标与粒径关联度。

由图11可知，A1层胶粒、黏粒和细粉粒与两项宏观劣化指标均具有较高关联度，说明细颗粒组分调整是立面硬度和色差变化的重要微观特征。现有研究表明，冻融循环可引起土矿物颗粒破碎、团聚和粒度组成重构[36]。因此，A1层细颗粒组分与宏观指标的高关联度，可解释为冻融循环下浅表层颗粒级配调整对宏观劣化的响应。B1层关联度峰值由胶粒转为细粉粒，说明斜面顶层宏观劣化对细粉粒变化更敏感。但胶粒、黏粒和细粉粒均保持较高关联度，表明B1层劣化仍受细颗粒组分调整控制。结合B面融雪水更易汇集和冻融扰动作用更强的条件，该差异可能反映了斜面顶层细颗粒组分在剥落显化过程中的局部重组。

A1与B1冻融循环作用下宏观劣化指标与常量元素组成关联度如图12所示。

由图12可知，A1层CaO与硬度损失率和总色差的关联度均最高，说明立面顶层宏观劣化程度与钙质组分变化关系密切，该结果与CaO在第3次冻融循环先期峰值、SiO_2 同步低值的XRF结果一致，表明剥落显化前A1层已出现钙质组分迁移和元素相对组成调整。B1层中 SiO_2 与硬度损失率关联度最高，而CaO和总色差 ΔE^* 的关联度最高，说明斜面顶层硬度损失对

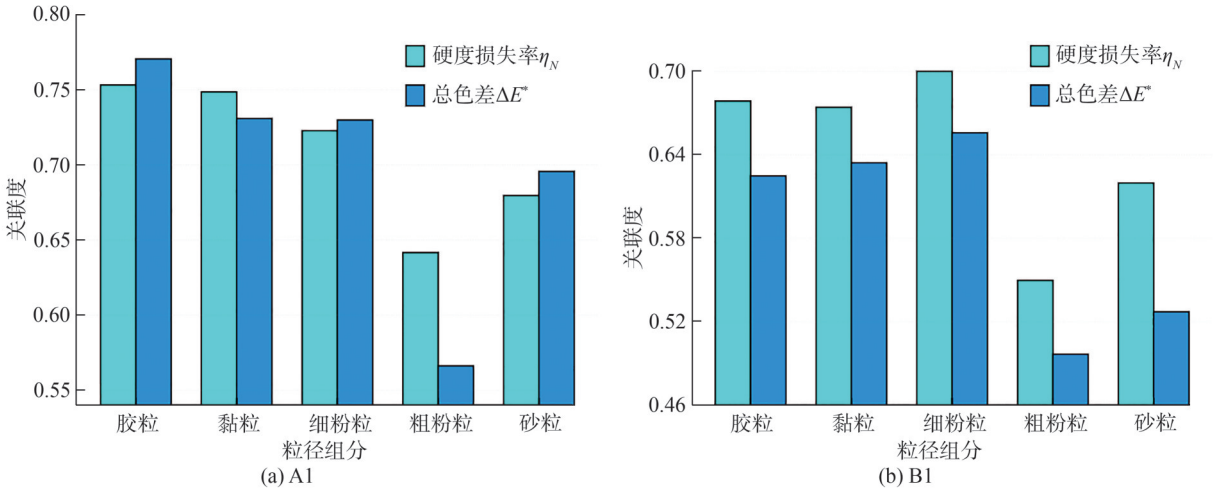


图 11 A1 与 B1 冻融循环作用下宏观劣化指标与粒径组分关联度

Fig. 11 Grey relational degrees between macroscopic deterioration indicators and particle-size fractions under freeze–thaw cycles for Layers A1 and B1

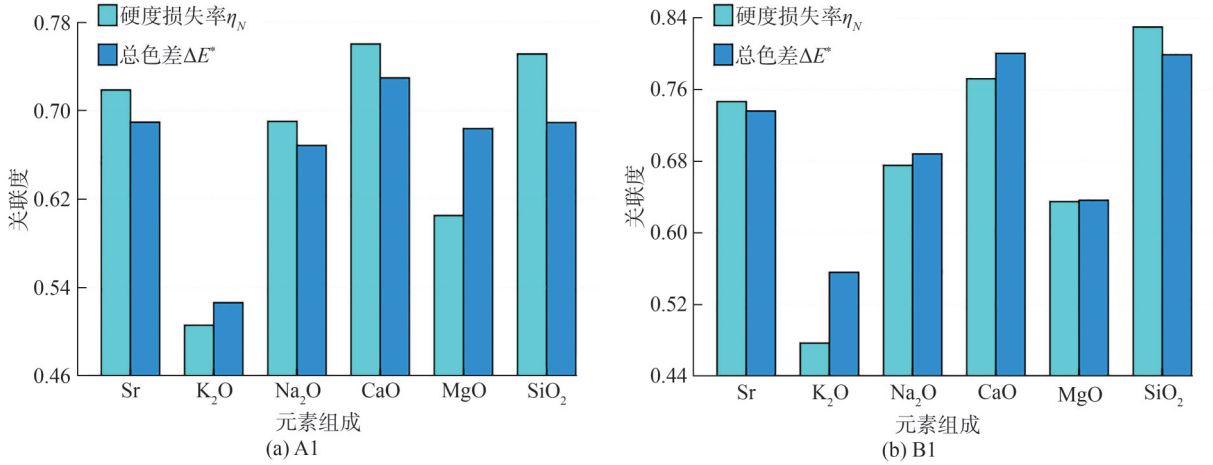


图 12 A1 与 B1 冻融循环作用下宏观劣化指标与常量元素组成关联度

Fig. 12 Grey relational degrees between deterioration indicators and elemental composition under freeze–thaw cycles for Layers A1 and B1

骨架相关组分变化更敏感，表观颜色变化则对钙质盐分及相关胶结物组分变化更敏感。含盐土遗址冻融劣化受盐分结晶、水盐相变和孔隙损伤共同影响[37]，因此，元素组成和宏观指标的高关联度可进一步说明，水盐运移和盐分作用参与了片状剥落显化过程。

A1、B1 层宏观劣化指标的主要关联因子如表 2 所示。A1 与 B1 顶层宏观劣化主控微观因子存在明显差异。A1 层表现为“SAR、SO_4^{2-}、Na^+—细颗粒—CaO、SiO_2”主导的立面劣化模式，B1 层表现为“K^+、SO_4^{2-}、Ca^{2+}—细颗粒—CaO”主导的斜面劣化模式。该结果表明，片状剥落并非由单一因素控制，而是由水盐运移、颗粒级配调整和元素组成分异共同作用的结果。同时也从定量关联角度印证了前文关于第 3 次冻融循环顶层钙质盐分及相关胶结组分富集和结构分异、第 4 次冻融循环盐分集中富集并与片状剥落显化相对应的阶段性认识。

表 2 A1、B1 层宏观劣化指标的主要关联因子

Tab. 2 Main microscopic factors associated with macroscopic deterioration indicators in Layers A1 and B1

劣化指标	A1		B1	
	η_N	ΔE^*	η_N	ΔE^*
易溶盐主要关联因子	SAR、SO_4^{2-}、Na^+	SAR、SO_4^{2-}、Na^+	K^+、SO_4^{2-}、Ca^{2+}	K^+、SO_4^{2-}、Ca^{2+}
粒级主要关联因子	胶粒、黏粒、细粉粒	胶粒、黏粒、细粉粒	细粉粒、胶粒、黏粒	细粉粒、黏粒、胶粒
元素主要关联因子	CaO、SiO_2、Sr	CaO、Sr、SiO_2	SiO_2、CaO、Sr	CaO、SiO_2、Sr

3.2 片状剥落宏–微观协同演化规律分析

由宏观形貌、硬度、色差、易溶盐、粒度组成、常量元素结果分析和灰色关联结果可知，积雪–冻融耦合作

用下夯土浅表层片状剥落并非瞬时发生，而是由外部水分输入诱发并在融雪入渗、水盐迁移、颗粒级配调整和元素组成分异共同作用下逐步发展。为进一步揭示积雪–冻融耦合作用下片状剥落的演化规律，本文梳理了其宏–微观协同演化路径，如图 13 所示。

图 13(a)对应片状剥落发生前的水分输入条件。间歇式降雪后，试样顶部形成积雪覆盖，斜面因 80°倾角较立面更易汇集积雪，而立面仅表现为零星悬挂式积雪。该现象表明，试样顶层和斜面是后续融雪入渗的主要受水部位，也是水盐运移和冻融损伤优先发生区域，这与第 2.1 节宏观形貌、硬度和色差分析中劣化主要集中在 A1、B1 顶层，且 B 面劣化程度重于 A 面的结果一致。

A、B 两面片状剥落参数的差异主要与墙面倾角引起的积雪覆盖状态和水分运移条件差异有关。由于垂直面 A 缺少明显坡面汇流条件，积雪附着和汇集能力相对较弱，融雪过程中水分输入及冻融扰动相对较低，表层结构损伤程度较低；相比之下，80°斜面 B 更易形成积雪汇集及沿坡融雪径流，表层水分交换增强，会经历更显著的冻融作用响应，促进表层结构弱化及疏松层发育，最终导致 B 面片状剥落程度高于 A 面。由此可见，图 13(a)可视为片状剥落主体演化前的前置阶段，主要表现为积雪覆盖与水分输入形成过程，为后续融雪入渗和浅表层劣化提供外部水分条件。

在积雪覆盖形成后，升温融化使融雪水进入浅表层，片状剥落由此进入潜伏劣化过程。融雪水沿顶层及斜面入渗，使浅表层含水状态发生改变，表现为表层色泽加深和湿化范围扩大(图 13(b))。该过程对应第 1、2 次冻融循环，顶层硬度开始降低、色差发生小幅变化，但尚未出现明显片状剥落。因此，该阶段主要表现为融雪入渗与表层结构弱化，是片状剥落由外部水分输入转入潜伏劣化的过程，并为后续水盐迁移提供通道。

随着后续积雪–冻融耦合循环推进，融雪水反复入渗，冻结和融化使水盐迁移作用增强，盐分及相关元素随水分向浅表层迁移，并在局部富集(图 13(c))。第 3 次冻融循环时，宏观剥落尚未显化，但顶层硬度降低和色差变化进一步增强；同时 CaO 达到峰值、SiO_2 降至低值，这表明剥落发生前浅表层已出现钙质组分迁移、元素相对组分调整和结构稳定性下降，CaO 先期峰值可视为后续表层结构分异和界面弱化的早期信号，该阶段主要表现为水盐运移与盐分/元素富集，是片状剥落由潜伏劣化向显性破坏转变的物质积累过程。

当水盐富集、冻融扰动和颗粒级配调整持续发展时，浅表层结构分异增强，片状剥落开始显化。图 13(d)中浅表层逐渐形成相对致密层，下伏土体变得疏松，并形成潜在剥离界面。随着剥离界面进一步发展并局部贯通，表层土体沿近似平行于坡面的方向发生薄片状剥离。第 4 次冻融循环时，顶层色差突变、硬度损失加剧并出现片状剥落和下伏疏松层。与此同时，易溶盐总量、SAR 和 Na_2O 同步达到峰值，该峰值可能与片状剥落后高盐疏松层[26]的暴露有关。灰色关联结果也表明，SAR、SO_4^{2-}、细颗粒组分、CaO 和 SiO_2 等指标与硬度损失和色差变化具有较高关联度。因此，第 4 次循环可作为片状剥落显化的关键节点，该阶段主要表现为结构分异与片状剥落显化。

片状剥落显化后，新暴露的疏松层进一步受到融雪入渗和坡面冲刷作用，剥落过程进入疏松层流失与扩展阶段。融雪水沿剥落面和坡面继续入渗、冲刷，使剥落区由局部片状剥落进一步发展为疏松层流失和凹

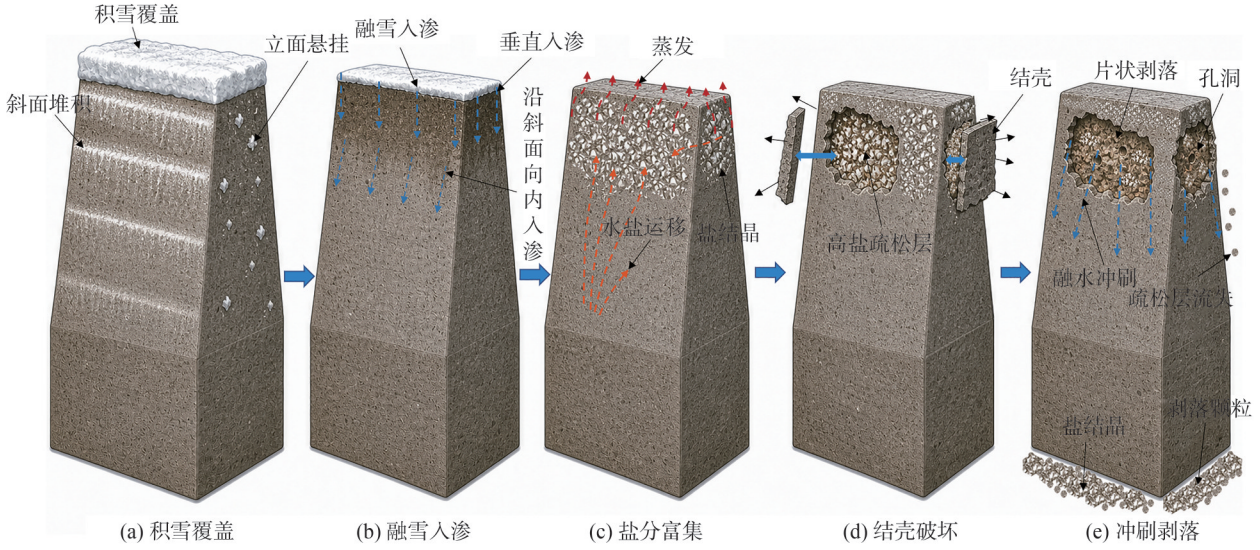


图 13　积雪–冻融耦合作用下夯土片状剥落劣化演化机制示意图

Fig. 13　Evolution mechanism of flake spalling in rammed earth under snow–freeze–thaw coupling

陷扩展(图 13(e))。对应第 5 次冻融循环中 CaO、Na_2O 和易溶盐含量较第 4 次峰值回落,说明前期富集的盐分及相关组分在剥落及融雪冲刷作用下发生流失或重新分配。第 6 次冻融循环后,盐分指标再次出现富集趋势,表明新暴露层已进入下一轮融雪入渗和水盐迁移过程。由此可见,片状剥落具有剥落显化–疏松层流失–新暴露层再富集–再次剥落的渐进式循环扩展特征。

综上,积雪覆盖为片状剥落提供外部水分条件,融雪入渗触发浅表层结构弱化和水盐迁移。在此基础上,片状剥落主体过程可概括为融雪入渗与表层结构弱化—水盐迁移与盐分/元素富集—结构分异与片状剥落显化—疏松层流失与剥落扩展 4 个阶段。其全过程演化规律可进一步归纳为水分输入—表层结构弱化—水盐迁移—结构分异—片状剥落显化—疏松层流失—循环扩展。

4 结 论

本文以甘肃天祝乌鞘岭长城土遗址为原型,开展积雪–冻融耦合循环试验,结合宏观形貌、硬度、色差、粒度、易溶盐、XRF 和灰色关联法,研究了土遗址浅表层片状剥落的宏–微观协同演化规律,主要结论如下:

1)积雪–冻融耦合作用下,片状剥落主要发生于融雪入渗直接作用的顶层,并表现出由潜伏劣化向显性剥落发展的阶段性特征。第 3 次冻融循环时,顶层出现色泽加深和硬度下降;第 4 次冻融循环时,连续低硬度带、色差突变和片状剥落显化同时出现;第 5、6 次冻融循环中,剥落区进一步扩展。6 次冻融循环后,A、B 面顶层的硬度损失率分别达到 16.2% 和 16.3%,总色差分别达到 8.38 和 8.65。斜面顶层对积雪覆盖、融雪入渗和冻融循环的耦合作用响应更敏感。

2)顶层易溶盐、SAR 和 Na_2O 的阶段性变化与宏观病害发展过程具有良好对应关系。第 4 次冻融循环时,顶层易溶盐总量、SAR 和 Na_2O 同步达到峰值,并与低硬度带出现、色差突变和片状剥落显化相对应;第 5 次冻融循环后,顶层易溶盐含量回落,与白色晶体减少和疏松层流失现象一致,表明显性剥落阶段水盐迁移及盐分/钠盐相关组分富集特征明显。

3)片状剥落显化前后,浅表层常量元素和粒度组成发生明显调整。CaO 在第 3 次冻融循环先期达到峰值,SiO_2 同步降至低值,表明剥落显化前浅表层出现钙质组分相对升高和硅质骨架组分相对降低,并与宏观结构弱化过程相对应。粒度组成整体表现为细粒组分降低、砂粒组分相对保持或略有升高。上述变化与片状剥落由潜伏劣化向显性剥落转变的节点一致。

4)结合阶段性变化和灰色关联结果,硬度损失率与 SAR、Na^+、细颗粒组分及 SiO_2 等指标具有较强同步性,对应钠盐相关组分富集、细颗粒组分减少和硅质骨架组分相对降低过程;总色差 ΔE^* 与 SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Na^+、易溶盐总量、CaO、Na_2O 等指标具有较强同步性,对应盐分及相关元素在浅表层迁移富集的过程。与 A1 相比,B1 层多离子指标关联更突出,说明斜面顶层对水盐迁移响应更敏感。

5)积雪–冻融耦合作用下,片状剥落主体过程可概括为融雪入渗与表层结构弱化—水盐迁移与盐分/元素富集—结构分异与片状剥落显化—疏松层流失与剥落扩展 4 个阶段。其中,融雪入渗与冻融作用加剧浅表层结构弱化;蒸发失水阶段盐分/元素向浅表层富集并伴随颗粒级配调整,进而形成结构分异和剥离界面;剥离界面贯通后发生片状剥落;暴露疏松层在融雪入渗和坡面冲刷下继续流失,使新暴露层继续进入下一轮入渗—迁移—富集—剥落过程。该结果可为高寒地区夯土遗址片状剥落的阶段识别和预防性保护提供依据。

未来研究可进一步结合长期温湿度、水盐含量及盐分迁移监测数据,建立环境作用与片状剥落位置、剥落厚度和季节性演化特征之间的关联关系,并探索多场耦合作用下病害预测模型的构建方法,为土遗址片状剥落风险识别和预防性保护提供更加科学的依据。

参考文献:

[1] Zhao Haiying,Li Zuixiong,Han Wenfeng,et al.Main diseases and causes of soil sites in arid areas of northwest China[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(S2):2875–2880.[赵海英,李最雄,韩文峰,等.西北干旱区土遗址的主要病害及成因[J].岩石力学与工程学报,2003,22(S2):2875–2880.]

[2] Sun Manli,Li Zuixiong,Wang Xudong,et al.Classification of deteriorations associated with many earthen heritage sites in arid areas of northwest China[J].Journal of Engineering Geology,2007,15(6):772–778.[孙满利,李最雄,王旭东,等.干旱区土遗址病害的分类研究[J].工程地质学报,2007,15(6):772–778.]

[3] Chen Wenwu,Jia Bobo,Cai Tao,et al.Freeze–thaw deterioration of saline earthen sites under snowmelt or rainfall infiltration[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(2):334–342.[谌文武,贾博博,蔡韬,等.融雪与降雨入渗下含盐土遗址的冻融劣化研究[J].岩土工程学报,2022,44(2):334–342.]

[4] Liu Huaiyu,Chen Yonggui,Li Jiahui,et al.Weathering types,mechanism and protection of rammed earth sites:Progress and prospect[J].Earth Science,2025,50(6):2284–2297.[刘怀玉,陈永贵,李佳卉,等.夯土遗址风化病害类型、机理与保

护加固:现状和展望[J].地球科学,2025,50(6):2284–2297.]

[5] Cui Kai,Du Yumin,Zhang Yinghui,et al.An evaluation system for the development of scaling off at earthen sites in arid areas in NW China[J].Heritage Science,2019,7(1):14.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Yan Gengsheng,Zhang Huyuan,Wang Xiaodong,et al.Freeze–thaw durability of earthen architectural sites in arid areas[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(8):2267–2273.[严耿升,张虎元,王晓东,等.干旱区土建筑遗址冻融耐久性研究[J].岩土力学,2011,32(8):2267–2273.]

[9] Li Yapeng,Zhang Xiyin,Tong Huijun,et al.A study on the surface deterioration characteristics and influential factors under freeze–thaw cycles at earthen sites[J].Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites,2025,4(4):72–83.[李亚鹏,张熙胤,仝慧君,等.冻融作用下遗址土表层劣化特征及影响因素研究[J].石窟与土遗址保护研究,2025,4(4):72–83.]

[10] Chen Wenwu,Zhang Yingmin,Zhang Jingke,et al.Consolidation effect of composite materials on earthen sites[J].Construction and Building Materials,2018,187:730–737.

[11] Zhang Huyuan,Liu Ping,Wang Jinfang,et al.Generation and detachment of surface crust on ancient earthen architectures[J].Rock and Soil Mechanics,2009,30(7):1883–1891.[张虎元,刘平,王锦芳,等.土建筑遗址表面结皮形成与剥离机制研究[J].岩土力学,2009,30(7):1883–1891.]

[12] Zhang Huyuan,Yi Quan,Liu Hongli,et al.Research on the pore structure and fractal characteristics of the Suoyang earthen site[J].Sciences of Conservation and Archaeology,2024,36(4):19–31.[张虎元,易泉,刘洪丽,等.锁阳城土遗址孔隙结构及其分形特征研究[J].文物保护与考古科学,2024,36(4):19–31.]

[13] Chen Wenwu,Jia Bobo,Qin Yilun,et al.Freeze–thaw deterioration characteristics of sulfate-contained earthen site soil under snowmelt infiltration[J].Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2022,58(4):521–527.[谌文武,贾博博,覃一伦,等.融雪入渗下含硫酸盐遗址土的冻融劣化特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2022,58(4):521–527.]

[14] 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.

[15] Bai Yushu,Pei Qiangqiang,Zhang Bo,et al.Full-scale *in-situ* simulation test method for top-edge sliding instability of earthen sites under rapid snowmelt[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2025,47(5):1343–1357.[白玉书,裴强强,张博,等.积雪突融环境下土遗址顶缘滑移失稳现场足尺模拟试验方法[J].冰川冻土,2025,47(5):1343–1357.]

[16] Bai Yushu,Pei Qiangqiang,Zhang Bo,et al.Key hydrothermal processes and top-edge erosional failure characteristics of rammed-earth heritage sites under sudden snowmelt conditions[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2025,44(11):3127–3138.[白玉书,裴强强,张博,等.积雪突融环境下夯土遗址顶缘关键水热过程与侵蚀破坏特征[J].岩石力学与工程学报,2025,44(11):3127–3138.]

[17] Zhang Bo,Wei Xin,Pei Qiangqiang,et al.Field test method for flake spalling of rammed earth sites in high-cold,high-humidity and high-altitude environment[J].Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2026,60(5):935–944.[张博,韦鑫,裴强强,等.高寒高湿高海拔环境下夯土遗址片状剥落现场试验方法[J].浙江大学学报(工学版),2026,60(5):935–944.]

[18] Lu Zheng,Xian Shaohua,Yao Hailin,et al.Influence of freeze–thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil[J].Cold Regions Science and Technology,2019,157:42–52.

[19] Shen Jiejie,Wang Qing,Chen Yating,et al.Evolution process of the microstructure of saline soil with different compaction degrees during freeze–thaw cycles[J].Engineering Geology,2022,304:106699.

[20] Chen Wenwu,Wei Dachuan,Lei Hong,et al.Experimental study on strength deterioration characteristics of earthen sites covered by snow[J].Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2019,55(5):655–660.[谌文武,魏大川,雷宏,等.积雪覆盖下遗址土的强度劣化特征试验研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(5):655–660.]

[21] Li Xinming,He Yongfei,Tan Yunzhi,et al.Freeze–thaw effect of macro-and micro-properties of lime–metakaolin stabilized archaeological soil under varying water contents[J].Rock and Soil Mechanics,2025,46(9):2894–2906.[李新明,何永飞,谈云志,等.不同含水率下石灰–偏高岭土改良遗址土宏微观特性的冻融循环效应[J].岩土力学,2025,46(9):2894–2906.]

[22] Pillinger G,Ahmed A E E,Bessenyei K,et al.Correlations between moisture content and color spectrum of sandy

soils[J].Journal of Terramechanics,2023,108:39–45.

[23] Dai Jiadong,Zhang Guoming,Liu Lianyou,et al.Effects of efflorescence and subflorescence by different salts on soil physical properties and aeolian erosion[J].Catena,2022,215:106323.

[24] Guo K,Liu X.Salt leaching process in coastal saline soil by infiltration of melting saline ice under field conditions[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,75(4):549–562.

[25] Zhu Jing,Pei Qiangqiang,Guo Qinglin,et al.Distribution characteristics of water and salt transport in rammed earth sites based on size effect[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(5):1481–1494.[朱晶,裴强强,郭青林,等.基于尺寸效应的夯土水盐运移分布特征研究[J].岩土力学,2024,45(5):1481–1494.]

[26] Cui Kai,Zhang Yinghui,Chen Wenwu,et al.Characteristics and formation mechanism of the binary structure in scaling off the surface of rammed earth ruins in arid areas[J].Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2019,55(5):647–654.[崔凯,张影会,谌文武,等.干旱区夯土遗址表面剥离二元结构特征与形成机制[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(5):647–654.]

[27] Shah A N,Zali M A,Nazer N M,et al.The potential of NAA and ICP–MS for determining soil dispersibility in relation to landslide incidents[J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2024,1308(1):012018.

[28] Bourrie G.Swelling clays and salt-affected soils:Demixing of Na/Ca clays as the rationale for discouraging the use of sodium adsorption ratio(SAR)[J].Eurasian Journal of Soil Science(Ejss),2014,3(4):245.

[29] Zhao Hang,Wu Jingwei,Peng Zhenyang,et al.Ion migration at the ice−water interface during the freezing process of salt solution—Experimental investigation[J].Desalination,2024,592:118172.

[30] Li Jifeng,Lang Yongbiao,Zhang Dongwei,et al.Mechanism of water−salt migration and salt-frost heave deformation of saline soil in canal foundation in cold regions[J].Water Resources Planning and Design,2026(2):76–81.[李积锋,郎永彪,张冬伟,等.寒区渠基盐渍土水盐迁移及盐–冻胀变形机理研究[J].水利规划与设计,2026(2):76–81.]

[31] Zhai Jinbang,Zhang Ze,Zhang Shengrong,et al.Study on particle size and morphology of Qinghai−Xizang silt under freeze–thaw action[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2023,45(5):1544–1554.[翟金榜,张泽,张圣嵘,等.冻融作用下青藏粉土颗粒尺寸与形态变化规律研究[J].冰川冻土,2023,45(5):1544–1554.]

[32] 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(1):41.

[33] Zheng Liang,Deng Qingnian,Liang Jingwei,et al.Microchemical analysis of rammed earth residential walls surface in Xiaochikan Village,Guangdong[J].Coatings,2025,15(11):1351.

[34] 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.

[35] Zhi Bin,Wei Yuanjun,Wang Pan,et al.Correlation mechanism between macroscopic strength and microstructure of undisturbed loess containing Na_2SO_4 salt under freeze–thaw cycles[J].Rock and Soil Mechanics,2025,46(S1):106–120.[郅彬,魏园钧,王番,等.冻融循环作用下含Na_2SO_4盐原状黄土宏观强度与微观结构关联机制研究[J].岩土力学,2025,46(S1):106–120.]

[36] Zhang Ze,Ma Wei,Feng Wenjie,et al.Reconstruction of soil particle composition during freeze–thaw cycling:A review[J].Pedosphere,2016,26(2):167–179.

[37] 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,2025,13:105.

Macro-micro Evolution Characteristics of Flake Spalling in Earthen Heritage Sites Under Snow–Freeze–Thaw Coupling

DU Ji'an[1], *ZHANG Lixiang*[1,2,3,4*], *ZHANG Jingke*[1,2,3,4], *CUI Qingfei*[1], *QI Bojia*[1], *WANG Yanwu*[4,5], *ZHANG Bo*[4,5], *DUISHANALIEVA Aisin*[4,6]

(1.School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2.Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
3.Center for Excellence in Archaeological Science and Cultural Heritage, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
4.China-Kyrgyzstan Belt and Road Joint Laboratory on Cultural Heritage Conservation, Dunhuang 736200, China;
5.Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China; 6.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 The macro-micro evolution of flake spalling in earthen heritage sites under snow−freeze−thaw coupling conditions and the associated

correlations remain insufficiently understood, particularly regarding the temporal relationship between macroscopic deterioration characteristics and microscopic indicators at different deterioration stages. Under snow–freeze–thaw coupling conditions, snowmelt infiltration, water–salt migration, and freeze–thaw cycles jointly affect shallow surface deterioration. However, the progressive development from initial surface weakening to visible flake spalling and the corresponding changes in microscopic indicators have not been fully clarified. In addition, wall inclination may modify snow accumulation and meltwater migration, resulting in different deterioration responses on vertical and inclined surfaces. In this study, we aimed to clarify the macro-micro evolution characteristics of flake spalling under snow–freeze–thaw coupling conditions, establish the relationships between macroscopic deterioration characteristics and microscopic indicators, and identify the microscopic indicators associated with deterioration development.

Methods A scaled rammed-earth specimen was prepared using the Wushaoling Great Wall earthen heritage site in Tianzhu, Gansu Province, as the prototype. Considering the actual wall morphology, construction characteristics, and inclination of the heritage site, the specimen was fabricated using an integral rammed-earth method and comprised a pair of vertical surfaces and a pair of surfaces inclined at 80°. The vertical and inclined surfaces were designated as Surface A and Surface B, respectively. Freeze–thaw cycle tests were conducted in a multifield coupled environmental simulation chamber under simulated winter snow-cover and spring-warming conditions. Six snow–freeze–thaw cycles were performed, each consisting of a snow accumulation and freeze–thaw stage followed by a snowmelt stage. The tests were designed to simulate snow accumulation, freeze–thaw alternation, and snowmelt infiltration under cold-region environmental conditions. After each cycle, surface morphology was recorded to characterize the development of flake spalling, and surface hardness and color difference were measured to evaluate macroscopic deterioration. The specimen was divided into four layers along its height, and layered samples were collected after different numbers of freeze–thaw cycles. Microscopic indicators, including soluble salt ion concentrations, particle-size composition, and major element oxide contents, were analyzed using ion chromatography, laser particle-size analysis, and X-ray fluorescence, respectively. Gray relational analysis was used to evaluate the correlations between microscopic indicators and macroscopic deterioration indicators. The hardness loss rate and total color difference were selected as reference sequences, whereas soluble salt ions, particle-size fractions, and major element oxides were selected as comparison sequences to determine the microscopic indicators associated with macroscopic deterioration.

Results and Discussions Flake spalling developed mainly in the top layer directly affected by snowmelt infiltration and progressed from latent deterioration to visible spalling during the third and fourth freeze–thaw cycles. During the first and second cycles, no obvious surface damage was observed on either surface, although slight changes in surface hardness and color occurred in the snowmelt-affected top layer, indicating that shallow deterioration had begun before visible spalling. During the third cycle, the top layer exhibited increased color darkening and reduced hardness, whereas obvious flake spalling had not yet developed. During the fourth cycle, continuous low-hardness zones, abrupt color changes, white crystalline deposits, and visible flake spalling appeared simultaneously, indicating a transition from latent deterioration to visible damage. During the fifth and sixth cycles, the spalling areas expanded further, and the exposed loose layers continued to deteriorate under repeated snowmelt infiltration and freeze–thaw action. After six cycles, the hardness loss rates of the top layers on the vertical and inclined surfaces reached 16.2% and 16.3%, respectively, whereas the total color differences reached 8.38 and 8.65, respectively. The inclined surface exhibited slightly greater deterioration than the vertical surface, potentially owing to differences in snow accumulation, meltwater infiltration, and water migration associated with wall inclination. The microscopic indicators, including soluble salt content, particle-size composition, and major element oxide contents, exhibited stage-dependent variations during deterioration. During the initial stage, soluble salt contents decreased, potentially owing to meltwater infiltration and salt migration, whereas subsequent freeze–thaw cycles promoted salt migration toward the shallow surface and local enrichment. CaO content peaked during the third cycle, before visible spalling occurred, whereas SiO_2 content decreased simultaneously, suggesting changes in the distribution of calcium-bearing components and the compositional characteristics of the shallow surface layer before visible deterioration. During the fourth cycle, total soluble salt content, sodium adsorption ratio (SAR), and Na_2O content reached their peak values simultaneously, corresponding to continued hardness loss, abrupt color changes, and visible flake spalling. The proportion of fine particles decreased, whereas the relative proportion of sand-sized particles increased during deterioration, indicating changes in particle-size composition during the freeze–thaw process. Gray relational analysis revealed differences in the microscopic indicators most strongly correlated with macroscopic deterioration between the vertical and inclined surfaces. The hardness loss rate was strongly associated with SAR, Na^+ content, fine-particle fractions, CaO content, and SiO_2 variations, whereas total color difference was closely associated with the migration and enrichment of soluble salts and related compositional changes, including SO_4^{2-}, CaO and Na_2O. The correlation differences between Surface A and Surface B indicated that wall inclination affected the response of the shallow layers, potentially by modifying snow accumulation and meltwater migration conditions. Overall, deterioration was associated with water–salt migration, changes in particle-size composition, and variations in elemental composition. Based on the macro-micro evolution characteristics, the development of flake spalling was classified into four stages: snowmelt infiltration and surface structural

weakening; water–salt migration and salt/element enrichment; structural differentiation and visible flake spalling; and loose-layer loss and spalling expansion.

Conclusions Snow–freeze–thaw coupling promoted the progressive deterioration of rammed-earth heritage sites through the combined effects of snowmelt infiltration, water–salt migration, freeze–thaw damage, and variations in microscopic indicators. Flake spalling developed from shallow surface weakening to visible surface failure, and the deterioration process was associated with variations in soluble salt content, particle-size composition, and major element oxide contents. Differences between vertical and inclined surfaces revealed that wall inclination affected snow accumulation, meltwater migration, and deterioration characteristics. Macro-micro correlation analysis provides a basis for identifying deterioration stages and informing the preventive conservation of earthen heritage sites under cold-region environmental conditions.

Key words: earthen heritage sites; freeze–thaw cycles; flake spalling; multifield coupling; gray relational analysis

（编辑　周　璇）

引用格式：Du Ji’an,Zhang Lixiang,Zhang Jingke,et al.Macro-micro evolution characteristics of flake spalling in earthen heritage sites under snow–freeze–thaw coupling[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):41–56.[杜吉安,张理想,张景科,等.积雪–冻融作用下土遗址片状剥落宏–微观演化特征[J].工程科学与技术,2026,58(6):41–56.]