



· 文化遗产保护 ·

时间序列下土遗址片状剥离病害量化评估及预测

杜昱民^{1,2}, 董文强¹, 郭亚旭^{1,3}, 陆志恒^{1,4}, 赵泽源^{1,4}, 吴梦雨^{1,5}, 张悦²

1. 西北工业大学 文化遗产研究院/考古探测与文物保护技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072;

2. 上海大学 文化遗产与信息管理学院/硅酸盐质文物保护教育部重点实验室, 上海 200444;

3. 西北工业大学 公共政策与管理学院, 陕西 西安 710072;

4. 西北工业大学 伦敦玛丽女王大学工程学院, 陕西 西安 710072;

5. 西北工业大学 力学与交通运输工程学院, 陕西 西安 710072

摘要 片状剥离作为土遗址最为典型且严重的病害类型, 严重威胁遗址的安全赋存。在环境与遗址土协同作用下, 片状剥离具有明显的时空发育特征, 针对时间维度下片状剥离病害开展量化评估与预测研究是对其实地加固保护的重要前提和指南。研究遴选陕西省内半干旱、半湿润环境下, 战国、汉、隋、唐、宋、明、清等7个历史朝代修筑的19处土遗址发育的片状剥离作为研究对象, 通过现场调查测试收集病害平面和剖面发育指标、土体水盐含量、土体表面硬度、遗址修筑时期历史温度变化等评估指标, 结合热力图和层次分析法(AHP)计算指标权重, 利用逼近理想解排序法(TOPSIS)实现对土遗址片状剥离发育程度的量化评估, 进而应用LSTM算法实现时间序列下片状剥离病害的智能预测。研究结果表明, 19处土遗址中有3处片状剥离发育等级为高级, 2处为低级, 其余14处为中等程度。基于评估结果, 利用LSTM模型对前90%的样本点进行训练, 并对最后2处遗址进行预测, 预测结果的均方根误差(RMSE)为0.044 424, 平均绝对误差(MAE)为0.037 046, 平均绝对百分比误差(MAPE)为14.803 1%, 决定系数(R^2)为0.844 23, 评估及预测结果具有较高准确性和合理性, 为后续土遗址片状剥离的保护加固工作提供了科学依据和实践指导, 并为其他土遗址典型病害的量化研究提供了模块示范。

关键词 土遗址; 片状剥离; 时间维度; 量化评估; 预测

中图分类号: TU361 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2026-02-007

Quantitative assessment and prediction of the scaling off on earthen sites under the temporal dimension

DU Yumin^{1,2}, DONG Wenqiang¹, GUO Yaxu^{1,3}, LU Zhiheng^{1,4},
ZHAO Zeyuan^{1,4}, WU Mengyu^{1,5}, ZHANG Yue²

1. Key Laboratory of Archaeological Exploration and Cultural Heritage Conservation Technology, Ministry of Education/
Institute of Culture and Heritage, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

收稿日期: 2025-12-01 修回日期: 2026-01-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42202313); 陕西省社会科学基金年度项目(2021G014); 陕西省两链融合重点专项(2022LL-ZD-01)。

第一作者: 杜昱民, 男, 博士, 副教授, 从事土遗址保护研究, duym@nwpu.edu.cn。

通信作者: 董文强, 男, 博士, 研究员, 从事文物保护技术与文化遗产研究, dongwq@nwpu.edu.cn。

2. Key Laboratory of Silicate Cultural Relics Conservation, Ministry of Education/

School of Cultural Heritage and Information Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. School of Public Policy and Administration, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

4. Queen Mary University of London Engineering School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

5. School of Mechanics and Transportation Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract Scaling off is one of the most typical and severe forms of deteriorations on earthen sites, posing a significant threat to their long-term preservation. This phenomenon exhibits distinct spatio-temporal developmental characteristics, influenced by the complex interactions between environmental factors and the intrinsic properties of earthen materials. A comprehensive quantitative assessment and predictive analysis of scaling off under the temporal dimension are essential to guide effective conservation strategies. This study focused on the scaling off observed on the 19 earthen sites in Shaanxi Province, located in semi-arid and semi-humid environments, which were constructed during seven historical dynasties, including the Warring States, Han, Sui, Tang, Song, Ming, and Qing. Through field investigations and geotechnical tests, we collected characteristic indicators of scaling off, including planar and cross-sectional metrics, soil water and salt content, surface hardness, and historical temperature variations corresponding to the construction periods of the sites. Using heat maps and the analytic hierarchy process (AHP), the weight of each indicator was calculated. After that, a quantitative assessment of the scaling-off development level was achieved by using the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). Finally, the long short-term memory (LSTM) algorithm was applied to realize the intelligent prediction of scaling off under the temporal dimension. The results revealed that the scaling off development level for 3 sites was categorized as high, 2 sites in the low level, and other 14 sites in the medium level. By using the first 90% sample points for the training of LSTM model, the last two sites were effectively predicted having the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), mean absolute percentage error (MAPE) and absolute variance (R^2) of 0.044 424, 0.037 046, 14.803 1% and 0.844 23 respectively. The evaluation and prediction results are accurate and reasonable, providing a scientific foundation and practical guidance for subsequent conservation work of scaling off in earthen sites, and it offers a modular demonstration for the quantitative research of other types of deterioration in earthen sites.

Keywords earthen sites; scaling off; temporal dimension; quantitative assessment; prediction

土遗址是以土质材料为主修筑而成的具有极高历史、艺术、科学、社会与文化价值的文化遗产^[1]。中国作为土遗址分布最为广泛的国家之一,拥有长城、交河故城、三星堆、良渚遗址等各种土遗址类型的全国重点文物保护单位 800 余处^[2]。这些土遗址是见证中华文明形成与发展的实物例证,因此,针对土遗址开展科学保护研究,对于传承中华民族优秀传统文化具有重要意义^[3-4]。然而,受自然风雨侵蚀与人类活动破坏的双重影响,土遗址正经历由片状剥离、裂隙、冲沟、掏蚀、坍塌等典型病害发育演化直至消亡殆尽的劣化进程,开展针对性的保护研究工作尤为迫切^[5-6]。

受外部环境 with 遗址土易损特性的协同作用下,土遗址表面发育大规模的片状剥离病害,不断发生“结皮形成→剥离→脱落”这一重复渐进式的破坏模式,致使遗址墙体逐渐变薄变矮,进而时

刻威胁遗址的安全赋存^[7-9]。经大量现场调查发现,片状剥离病害具有由结皮层和疏松层所组成的特殊且复杂的二元结构特征,其中,结皮层土体结构较为致密,与下伏疏松层间明显相脱离,并在后缘处有平行于墙面的裂隙发育。疏松层土体较为松散,且存在大量盐分富集的现象^[10-11]。在片状剥离发育初期,结皮层坚硬的外壳对土遗址抵抗风化具有一定积极作用,然而,在其发育演化的中后期,结皮层与母墙良好的附着关系逐步被打破,其剥离脱落致使墙体表面减薄和形貌变化,造成承载文化信息的表面产生破坏,加剧了遗址的破坏劣化进程^[12]。片状剥离的发育演化主要受“水-盐-热-力”多场耦合作用的影响,在降雨作用下,遗址表面水分由表层迁移至内部,以 NaCl 和 Na_2SO_4 为典型代表的易溶盐分随之迁移至疏松层^[13],对土壤产生团聚作用,进而导致土

体结构变松散,加剧了片状剥离二元结构的形成^[14-15]。在蒸发过程中,水分在遗址表面迅速流失、干燥,造成表层干缩开裂、分层和盐分运移及结晶等活动,进一步破坏土颗粒结构,改变土壤颗粒级配并促进片状剥离的发育演化^[16-17]。通过测试片状剥离结皮层、疏松层土体的盐分含量及缩限,证实片状剥离二元结构存在盐分分异及不均匀收缩,进而印证了降雨与蒸发过程中水盐迁移对片状剥离发育演化的重要影响^[5,10,18]。西北地区强烈的日照条件导致土遗址内外产生巨大温差,而片状剥离结皮层具有更加快速的热响应能力,与疏松层直接存在的热应力会进一步导致遗址表层剥离脱落的破坏进程^[19-21]。通过系统测试对比片状剥离发育区域的墙体表面贯入阻力,证实土体结构的力学性质是反映片状剥离发育程度的重要指标之一^[22-23]。因此,片状剥离病害的形成与“水-盐-热-力”多场耦合作用密切相关。

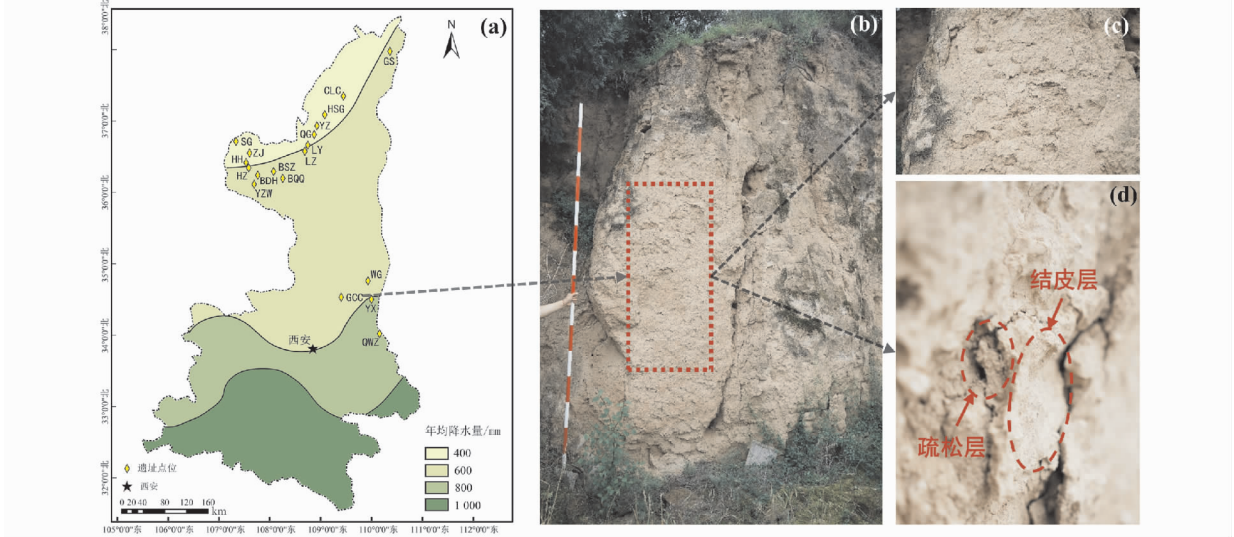
基于片状剥离病害发育特征及成因,结合环境因素、土体性质参数及片状剥离表征数据,初步构建片状剥离发育程度的量化评估模型,并应用模糊层次分析法(Fuzzy-AHP)实现了土遗址片状剥离发育程度的量化评估,进一步揭示了干旱程度对片状剥离发育演化的影响机制^[13]。同时,将模型进一步扩展应用,通过对西北地区极干旱、干旱、半干旱环境下 15 处土遗址阴阳坡发育的片状剥离进行评估,从量化角度揭示了片状剥离阳坡片状剥离发育程度更大,水盐迁移和不均匀收缩更为剧烈^[18]。然而,片状剥离的量化评估模型仅

停留在半量化阶段,其模型构建亟需综合考虑“水-盐-热-力”多场耦合对二元结构的影响,同时针对片状剥离的预测模型尚未开展针对性研究工作。

针对时间序列下片状剥离病害开展量化评估与预测研究,是对其实施加固保护的重要前提和指南。因此,本研究以陕西境内半干旱、半湿润环境为空间维度,以战国、汉、隋、唐、宋、明、清等 7 个历史修筑朝代时间为时间维度,综合遴选出 19 处土遗址片状剥离作为研究对象,结合 AHP-热力图分析-TOPSIS 综合构建量化评估模型,并利用 LSTM 算法实现片状剥离的有效预测,从定量角度揭示该病害的发育演化规律及趋势,进而为片状剥离的预防性保护提供科学依据。

1 研究区域

作为中华文明的发祥地之一,陕西省境内赋存有大量不同历史时期修筑的土遗址^[24]。依据年降雨量的不同,陕西省主要环境分区为半干旱环境(200 ~ 400 mm)和半湿润环境(400 ~ 800 mm)。本研究遴选陕西省内半干旱、半湿润环境下战国(魏、秦)、汉、隋、唐、宋、明、清等 7 个历史时期的 19 处土遗址[见图 1(a)]发育的片状剥离[见图 1(b)]作为研究对象,经大量现场调查发现,在遗址表面大量发育的片状剥离病害[见图 1(c)]具有由结皮层和疏松层[见图 1(d)]组成的二元结构特性。遗址具体信息如表 1 所示。



注:(a)研究区遗址分布^[25]; (b)土遗址片状剥离发育现状; (c)片状剥离二元结构平面图; (d)片状剥离剖面图。
图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表 1 研究区内土遗址基本信息

Tab. 1 Basic information of earthen sites in the study area

序号	遗址名称(缩写)	经度	纬度	修筑时间(朝代)	赋存环境类型
1	魏长城 (WG)	110°9′58″E	35°22′27″N	公元前 352 年 战国(魏)	半湿润
2	秦长城 (QG)	109°11′1″E	37°47′28″N	公元前 325 年 战国(秦)	半干旱
3	龙眼城址 (LY)	109°2′24″E	37°37′26″N	206 年 汉朝	半干旱
4	隋长城 (SG)	107°30′56″E	37°43′21″N	585 年 隋朝	半干旱
5	秦王寨遗址 (QWZ)	110°20′46″E	34°30′23″N	627 年 唐朝	半湿润
6	银州故城 (YZ)	109°15′7″E	37°55′49″N	758 年 唐朝	半干旱
7	黄花城 (HH)	107°43′3″E	37°22′28″N	960 年* 宋朝	半干旱
8	白石咀烽火台 (BSZ)	108°17′38″E	37°12′58″N	960 年* 宋朝	半湿润
9	窑子湾烽火台 (YZW)	107°52′30″E	37°1′6″N	960 年* 宋朝	半湿润
10	古城村遗址 (GCC)	109°35′54″E	35°7′47″N	1371 年 明朝	半湿润
11	砖井堡 (ZJ)	107°47′49″E	37°31′41″N	1437 年 明朝	半干旱
12	龙州堡 (LZ)	108°58′22″E	37°31′35″N	1469 年 明朝	半湿润
13	明长城边墙渠段 (BQQ)	108°28′57″E	37°5′59″N	1473 年 明朝	半湿润
14	明长城横山段 (HSG)	109°25′35″E	38°6′23″N	1474 年 明朝	半干旱
15	把都河堡 (BDH)	107°57′27″E	37°9′50″N	1475 年 明朝	半湿润
16	常乐堡 (CLC)	109°50′45″E	38°23′33″N	1489 年 明朝	半干旱
17	孤山堡 (GS)	110°53′56″E	39°4′42″N	1575 年 明朝	半湿润
18	黄掌堡 (HZ)	107°46′13″E	37°17′15″N	1731 年 清朝	半干旱
19	义学古城 (YX)	110°13′5″E	35°4′18″N	1903 年 清朝	半湿润

注: * 代表部分土遗址修筑时间不详,故以修筑朝代的起始年份取代。

2 研究方法

团队在 2023 年夏季对 19 处土遗址开展了现场调查工作,系统收集病害数据及土体表面硬度数据,同时对片状剥离二元结构及母墙进行了系统取样,在室内进行土工测试,获取遗址土体含水率及易溶盐含量。结合竺可桢温度变化曲线,获取遗址修筑时代的温度变化数值,由此获得土遗址片状剥离“水-盐-热-力”4 个方面的基础指标,为病害评估及预测模型的构建提供数据支撑。

2.1 病害调查及室内测试

病害调查区域为墙体 1 m² 的窗格,利用游标卡尺测量结皮层、疏松层厚度,二者厚度总和为二元结构的厚度,该指标作为片状剥离发育的剖面表征指标。同时,利用手持式三维扫描仪(EinScan Pro 2X 2020)扫描窗格内片状剥离发育区域,通过 EXScan Pro 软件获取点云数据,导入 CloudCampare 中进一步处理得到 las 格式的数据,并导入 ArcGIS 中获得窗格中片状剥离发育区域的粗糙度,作为片状剥离发育的平面表征指标^[26]。

土体表面硬度是其力学强度的重要指标之一^[27],但考虑到片状剥离土体结构的易碎性,很

难直接将其完整的结构放置实验室进行力学测试。因此,在病害调查中,使用邵氏硬度计(LX-A-Y)对片状剥离的结皮层、疏松层、母墙硬度进行测量,获取其硬度数据。依据土工试验标准(GB/T 50123—2019),利用烘干法测定土体含水率,利用离子色谱仪测定土体易溶盐含量^[28]。

2.2 基于 AHP-热力图分析-TOPSIS 的片状剥离评估模型

层次分析法(AHP)是将决策问题按总目标、评价准则、方案分解为不同层次结构,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法,该方法因方便高效被广泛应用于文物保护领域^[29]。在前期研究中,已针对片状剥离病害发育指标及遗址修筑时期温度变化值、二元结构和夯土层土体水盐含量、土体表面硬度等环境和土体性质指标进行了热力图分析(见图 2),并结合层次分析法构建了西北干旱区片状剥离的递阶层次结构模型,在此基础上对该模型进一步优化,融入“水-热-盐-力”多场耦合因素,以片状剥离发育程度为目标层,片状剥离表面粗糙度、结皮层和疏松层厚度为准则层,遗址土体的水盐含量、构筑时期温度变化、土体表面硬度为指标层,其递阶层次结构模型如图 3 所示。

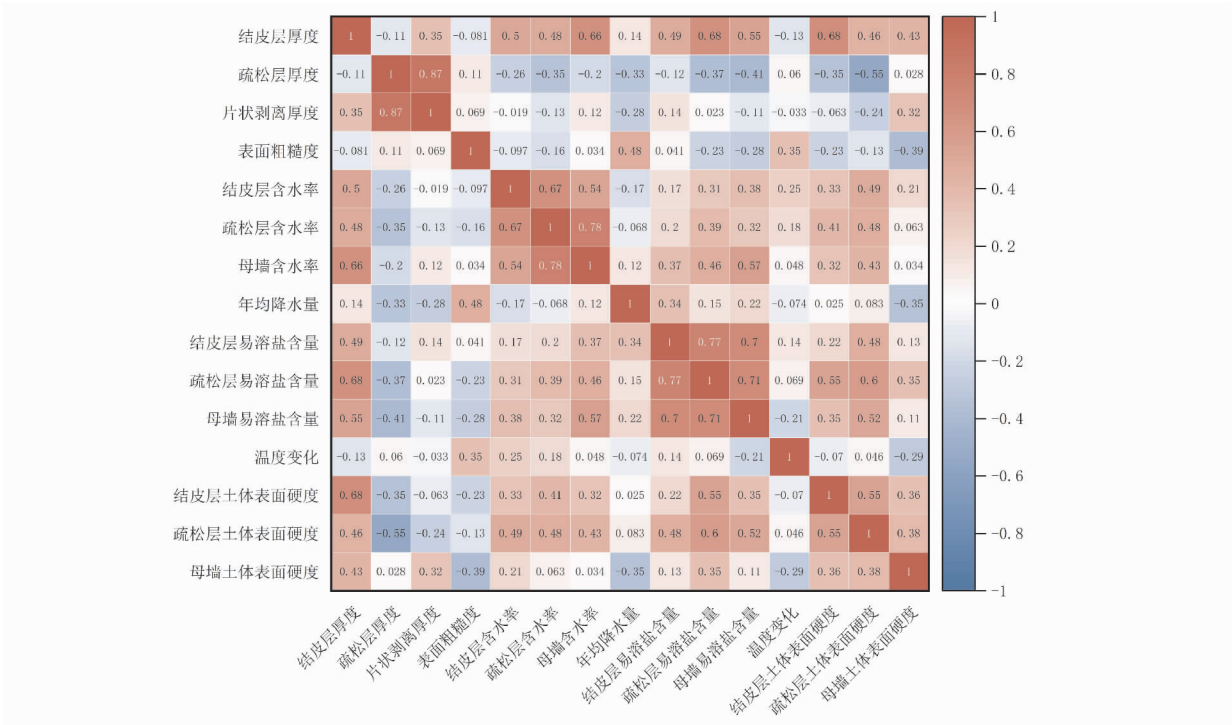


图 2 土遗址片状剥离与环境、土体性质的热力图

Fig. 2 Heatmap-based analysis of the relationship between scaling off on earthen sites and environmental factors as well as soil properties

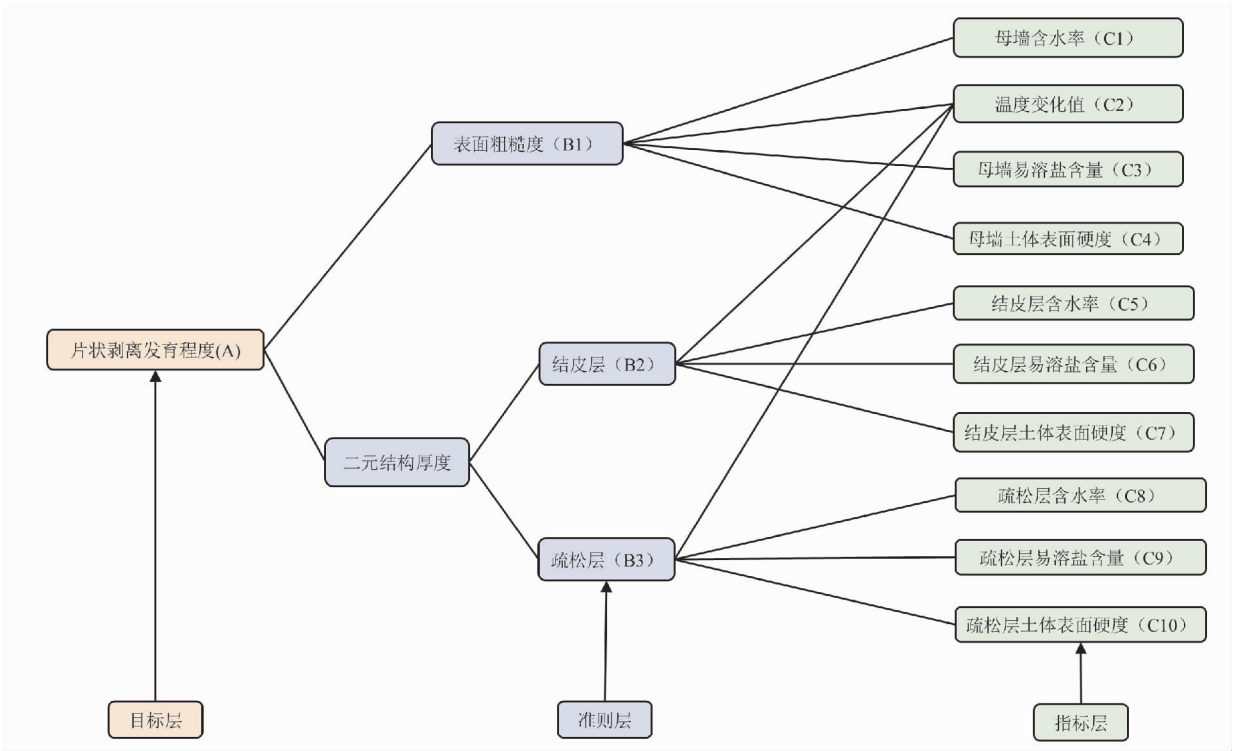


图 3 土遗址片状剥离递阶层次结构模型

Fig. 3 Hierarchical structural model of scaling off on earthen sites

基于土遗址片状剥离与环境、土体性质的热力图(见图 2),结合图 3 中土遗址片状剥离递阶层次结构模型确定的 10 个基础性评价指标,利用信息量权重计算指标层权重。准则层权重参考前期片状剥离量化评估模型中 AHP 确定的准则层

各指标权重,该方法克服了 AHP 中计算权重过于主观的缺点,同时综合了“水-热-盐-力”多场耦合作用对片状剥离的客观因素。指标层权重基于图 2 热力图分析结果,通过以下步骤计算得出。

通过下式计算斯皮尔曼相关系数矩阵,

$$l = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [R(x_i) - \overline{R(x)}] \cdot [R(y_i) - \overline{R(y)}]}{\sqrt{[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R(x_i) - \overline{R(x)})^2] \cdot [\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R(y_i) - \overline{R(y)})^2]}} \tag{1}$$

式中: l 为相关系数; $R(x_i)$ 和 $R(y_i)$ 分别是 x 和 y 的位次; $\overline{R(x)}$ 和 $\overline{R(y)}$ 为平均位次。采用 Pairwise 方法进行排序。

根据式(1) 计算得出斯皮尔曼相关系数矩阵(见图 2),2 个变量之间的斯颇曼相关系数 l 定义为 2 个变量之间的协方差和标准差的商。因而,图 2 中任一 (x_i, y_i) 位置则表示 x 与 y 两者之间的相关性的正负性和相关强度。例如,表面粗糙度(B1)准则层下的母墙含水率(C1)、温度变化值(C2)、母墙易溶盐含量(C3)、母墙土体表面硬度(C4),这四大指标层因子同表面粗糙度(B1)的斯皮尔曼相关系数由图 2 可直接读出,分别为 0.034、0.35、-0.28、-0.39,将其全部取绝对值后便可进行重要性的量化比较与计算。

通过相关系数权重确定法,将相关系数绝对

值按下式归一化后,再按照占比分配权重。

$$X' = 1/(1 - X) \quad (0 < X < 1) \tag{2}$$

式中: X 为取绝对值后的相关系数; X' 为归一化后的相关系数。

通过式(2) 进行标准化归一处理,将所有因子的相关系数投射到统一尺度下,进而得到 X' 。最后按照各 X' 值所占 X' 值总和的比例计算得出其占比,量化因子之间的重要性即可得到所需要的权重。

在确定土遗址片状剥离递阶层次结构模型准则层和指标层评价指标权重后,结合逼近理想解排序法(TOPSIS)对 19 处土遗址的片状剥离进行综合评估。TOPSIS 依据有限评价对象与理想化目标的接近程度进行排序,可用于弥补 AHP 主观性强、样本容量限制及不能有效利用已有数据等

问题^[30],该方法已广泛应用于岩土质文物保护领域中^[6,31]。主要步骤如下。

1) 基于各影响因素的权重得出加权标准化决策矩阵 C ;

2) 确定正负理想解、评判对象欧氏距离,进而确定评判对象贴进度;

3) 对 19 处土遗址片状剥离发育程度进行综合评估计算,确定病害发育严重程度。

2.3 基于 LSTM 算法的预测模型

利用多准则决策法计算不同时代构筑的土遗址片状剥离发育程度之后,亟需捕捉土遗址片状剥离时间序列数据中的模式,从而对数据未来趋势进行智能预测,随着人工智能技术的快速发展,以长短期记忆网络(long short term memory, LSTM)为代表的深度学习算法对时序数据的分析得到了广泛的应用。因此,本文引入了 LSTM 算法,旨在对时间序列下片状剥离发育的量化数据进行预测。

LSTM 作为一种特殊的递归神经网络,解决了一般循环神经网络(recurrent neural network, RNN)存在的长期依赖问题(梯度消失、梯度爆炸等),可利用时间序列对输入进行分析。LSTM 算法与其他相关机器学习算法的融合已在文物保护领域得到初步应用,如基于分组 LSTM 与卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)在青铜器锈蚀类别的智能标识中取得较好效果^[32],通过经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)对云岗石窟壁温、环境湿度、环境温度等实测时序数据进行分解,并构建 EMD-LSTM 的人工神经网络,实现了石窟环境参数的智能预测^[33]。LSTM 算法在文物知识图谱的构建与应用方面也展现出显著的优势^[34-36]。然而,以上研究更多聚焦在通过该算法与其他机器学习方法的有机融合探寻可移动文物保护技术及方法的创新,针对土遗址保护领域中的典型病害的定量评估及有效预测问题,目前该方法尚待进一步和多准则决策等半定量方法进行深度结合并进行有效创新实践。LSTM 单元结构如图 4 所示,该模型具有记忆细胞(cell)、输入门(i_t)、遗忘门(f_t)、输出门(o_t)等结构,由于其特殊门机制作用,在时间序列下的预测任务方面具有出色表现^[37]。

LSTM 模型结构各单元计算公式如下:

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (3)$$

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (5)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (6)$$

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \quad (7)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t) \quad (8)$$

式中: f_t 、 i_t 、 o_t 分别为时间 t 的遗忘门、输入门和输出门; x_t 为时间 t 的信息输入; h_{t-1} 为时间 $t-1$ 的信息输出; h_t 为时间 t 的信息输出; c_{t-1} 和 c_t 分别为当前和下一时间的细胞状态,用来存储记忆信息; $\tilde{c}_t$ 为上一时间的细胞状态; σ 为 Sigmoid 激活函数; $\tanh$ 为双曲正切函数; W_i 、 W_f 、 W_o 分别为输入门、遗忘门、输出门对应的输入权重; U_i 、 U_f 、 U_o 分别为输入门、遗忘门、输出门对应的输出权重; b_i 、 b_f 、 b_o 为偏差; $\odot$ 为向量乘积运算。

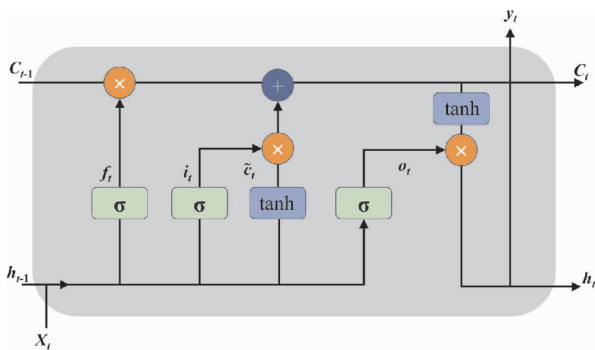


图 4 LSTM 模型结构图

Fig. 4 Illustration of LSTM model structure

LSTM 作为一种特殊的循环神经网络(RNN),与传统 RNN 算法相比具有如下优势^[38]: ①引入门控机制,可以有效缓解梯度消失问题,从而能够处理更长的序列数据;②具有更好的记忆性能,在处理序列数据时保留较远的上下文信息;③具有对时间的敏感性优势,能够学习时序数据中的模式和特征。因此,LSTM 算法在时间序列预测、信号处理等任务中具有显著的优势。本研究将 LSTM 算法与多准则决策方法有机结合,实现时间序列下土遗址片状剥离病害的量化评估及智能预测。

3 评估及预测结果

3.1 病害指标及土体性质、环境相关数据

基于现场调查、室内土工测试及竺可桢温度变化曲线的提取结果,研究涉及的土遗址病害指标及土体性质、环境相关数据如表 2 所示。

表 2 病害指标及土体性质、环境相关数据

Tab. 2 Deterioration indicators and related data on soil properties and environmental factors

遗址	准则层指标			指标层指标									
	B1	B2	B3	C1	C2	C3/	C4	C5	C6/	C7	C8	C9/	C10
		/mm	/mm	/%	/℃	(mg·mg ⁻¹)/HA		/%	(mg·mg ⁻¹)/HA		/%	(mg·mg ⁻¹)/HA	
WG	1. 17	12. 63	7. 76	4. 78	1. 53	2 891	55. 13	2. 80	4 210	29. 63	3. 68	9 310	12. 31
QG	1. 13	4. 61	16. 20	0. 99	1. 48	803	27. 06	1. 05	686	5. 46	1. 25	748	3. 01
LY	1. 07	7. 19	10. 01	0. 97	-0. 27	596	48. 08	1. 06	663	34. 22	2. 38	776	8. 65
SG	-	7. 18	22. 05	1. 44	1. 08	782	47. 96	1. 13	1 075	19. 17	2. 45	1 589	5. 54
QWZ	1. 23	7. 62	6. 46	2. 03	1. 23	857	15. 56	2. 25	869	20. 61	4. 93	2 525	8. 11
YZ	1. 17	13. 77	20. 80	1. 44	1. 22	680	48. 85	3. 37	725	32. 76	1. 78	1 805	6. 78
HH	-	6. 92	18. 47	0. 86	1. 05	839	52. 72	1. 40	808	16. 54	0. 95	921	6. 79
BSZ	-	8. 92	21. 40	1. 61	1. 05	785	36. 00	2. 10	860	19. 81	1. 67	718	3. 58
YZW	1. 28	8. 06	27. 33	2. 28	1. 05	846	34. 93	0. 88	890	16. 33	1. 43	916	6. 04
GCC	1. 09	14. 42	12. 02	2. 22	-1. 42	20 298	59. 84	1. 75	22 927	25. 19	2. 54	25 997	12. 91
ZJ	1. 11	11. 30	19. 47	1. 48	-1. 14	3 539	52. 65	1. 54	3 122	25. 33	1. 36	5 640	7. 49
LZ	1. 07	8. 63	13. 23	1. 46	-1. 38	892	41. 26	1. 03	804	27. 63	1. 49	3201	4. 32
BQQ	1. 17	7. 25	23. 83	0. 98	-1. 40	60	51. 60	0. 96	153	21. 38	1. 00	124	4. 42
HSG	1. 11	10. 97	12. 00	3. 20	-1. 40	4 043	48. 26	2. 03	865	27. 74	3. 02	5 519	6. 53
BDH	1. 18	7. 05	10. 77	0. 80	-1. 40	445	45. 10	0. 79	423	10. 40	0. 93	383	4. 36
CLC	1. 13	7. 88	12. 50	5. 91	-1. 36	965	40. 10	3. 69	139	21. 54	6. 39	365	7. 24
GS	1. 19	8. 72	13. 49	1. 10	-0. 89	1 308	39. 25	1. 06	876	31. 17	1. 29	1 137	5. 28
HZ	1. 13	5. 69	12. 94	0. 54	-0. 96	967	35. 00	1. 32	875	15. 11	1. 12	731	5. 64
YX	1. 16	10. 80	7. 40	1. 94	-0. 83	8 498	38. 33	1. 25	6 367	35. 75	1. 41	23 328	16. 13

注:遗址点 SG 破坏极为严重,仅剩部分基础;遗址点 HH 和 BSZ 处于山险位置,难以直接开展三维扫描工作。因此,以上 3 处遗址表面粗糙度数据缺失。

3.2 片状剥离评估结果

3.2.1 权重计算结果

通过斯皮尔曼相关系数矩阵可得各指标层与准则层之间的相关系数,其中 C3、C4 与 B1 为负相关关系,C2 与 B2 为负相关关系,C8、C10 与 B3 为负相关关系(其余为正相关关系),将负的相关

系数取绝对值后,再进行标准化处理,最后按照各因子相关系数所占的比例,计算出对应的权重(见表 3),其计算权重具体步骤为:① 基于图 2 得出相关系数 l ;② 计算绝对值 X ;③ 根据式(2)进行归一化处理计算 X' ;④ 依据 X' 的总和及其各因子所占比计算权重。

表 3 权重计算结果

Tab. 3 Results of weight calculation

目标层	准则层	权重	指标层	相关系数 l	相关系数绝对值 X	相关系数归一化 X'	权重
A	B1	0. 630 1	C1	0. 034	0. 034	1. 04	0. 05
			C2	0. 350	0. 350	1. 54	0. 08
			C3	-0. 280	0. 280	1. 39	0. 07
			C4	-0. 390	0. 390	1. 64	0. 08
	B2	0. 218 4	C2	-0. 130	0. 130	1. 15	0. 06
			C5	0. 500	0. 500	2. 00	0. 10
			C6	0. 490	0. 490	1. 96	0. 10
			C7	0. 680	0. 680	3. 13	0. 15
	B3	0. 151 5	C2	0. 060	0. 060	1. 06	0. 05
			C8	-0. 350	0. 350	1. 54	0. 08
			C9	-0. 370	0. 370	1. 59	0. 08
			C10	-0. 550	0. 550	2. 22	0. 11

3.2.2 评估结果

首先,对基础数据进行归一化处理,经处理得

到归一化数据之后,基于各影响因素的权重得出
加权标准化决策矩阵 C 。

$$C = \begin{bmatrix} 0.025 & 0.047 & 0.037 & 0.005 & 0.000 & 0.015 & 0.003 & 0.026 & 0.008 & 0.005 & 0.007 & 0.004 \\ 0.002 & 0.047 & 0.041 & 0.037 & 0.000 & 0.001 & 0.000 & 0.000 & 0.007 & 0.010 & 0.011 & 0.016 \\ 0.002 & 0.018 & 0.042 & 0.013 & 0.007 & 0.002 & 0.000 & 0.032 & 0.003 & 0.008 & 0.011 & 0.009 \\ 0.005 & 0.040 & 0.041 & 0.013 & 0.001 & 0.002 & 0.000 & 0.015 & 0.006 & 0.008 & 0.011 & 0.013 \\ 0.008 & 0.043 & 0.041 & 0.051 & 0.001 & 0.010 & 0.000 & 0.016 & 0.007 & 0.003 & 0.010 & 0.010 \\ 0.005 & 0.042 & 0.041 & 0.012 & 0.001 & 0.019 & 0.000 & 0.030 & 0.007 & 0.009 & 0.011 & 0.011 \\ 0.001 & 0.040 & 0.041 & 0.008 & 0.002 & 0.004 & 0.000 & 0.012 & 0.006 & 0.011 & 0.011 & 0.011 \\ 0.006 & 0.040 & 0.041 & 0.027 & 0.002 & 0.009 & 0.000 & 0.016 & 0.006 & 0.010 & 0.011 & 0.015 \\ 0.010 & 0.040 & 0.041 & 0.028 & 0.002 & 0.000 & 0.000 & 0.012 & 0.006 & 0.010 & 0.011 & 0.012 \\ 0.010 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.012 & 0.007 & 0.021 & 0.022 & 0.000 & 0.008 & 0.000 & 0.004 \\ 0.005 & 0.004 & 0.035 & 0.008 & 0.011 & 0.005 & 0.002 & 0.022 & 0.000 & 0.010 & 0.009 & 0.010 \\ 0.005 & 0.000 & 0.041 & 0.021 & 0.012 & 0.001 & 0.000 & 0.024 & 0.000 & 0.010 & 0.010 & 0.015 \\ 0.002 & 0.000 & 0.043 & 0.009 & 0.012 & 0.001 & 0.000 & 0.017 & 0.000 & 0.011 & 0.011 & 0.014 \\ 0.016 & 0.000 & 0.034 & 0.013 & 0.012 & 0.009 & 0.000 & 0.024 & 0.000 & 0.007 & 0.009 & 0.012 \\ 0.001 & 0.000 & 0.042 & 0.017 & 0.012 & 0.000 & 0.000 & 0.005 & 0.000 & 0.011 & 0.011 & 0.014 \\ 0.032 & 0.000 & 0.041 & 0.022 & 0.012 & 0.021 & 0.000 & 0.017 & 0.000 & 0.000 & 0.011 & 0.011 \\ 0.032 & 0.000 & 0.041 & 0.022 & 0.012 & 0.021 & 0.000 & 0.017 & 0.000 & 0.000 & 0.011 & 0.011 \\ 0.000 & 0.007 & 0.041 & 0.028 & 0.010 & 0.003 & 0.000 & 0.010 & 0.001 & 0.011 & 0.011 & 0.013 \\ 0.008 & 0.009 & 0.025 & 0.024 & 0.009 & 0.003 & 0.005 & 0.033 & 0.001 & 0.010 & 0.001 & 0.000 \end{bmatrix} \quad (9)$$

计算评判对象的贴进度,首先确定理想解 C^+ 、 C^- ;其次评判对象与理想解的距离 S_i^+ 、 S_i^- ;最

后根据评判对象与理想解的距离计算得出相对贴
近度 E^* (见表 4)。

表 4 评判对象与正负理想解的距离及相对贴进度

Tab. 4 Distances of the evaluated objects to the positive and negative ideal solutions and their relative closeness									
遗址点	表面粗糙度			结皮层厚度			疏松层厚度		
	S_1^+	S_1	E_1^*	S_2^+	S_2	E_2^*	S_3^+	S_3	E_3^*
WG	0.038 2	0.071 1	0.650 6	0.019 8	0.033 4	0.627 8	0.010 7	0.015 9	0.597 4
QG	0.063 5	0.049 0	0.435 5	0.044 1	0.012 3	0.218 6	0.023 0	0.007 9	0.254 7
LY	0.060 7	0.041 9	0.408 5	0.029 5	0.032 4	0.523 7	0.017 9	0.008 4	0.319 1
SG	0.051 9	0.055 5	0.516 5	0.033 4	0.018 7	0.359 0	0.019 4	0.008 2	0.296 1
QWZ	0.069 9	0.043 9	0.385 8	0.028 6	0.022 9	0.445 0	0.015 1	0.012 8	0.458 8
YZ	0.051 6	0.057 7	0.528 1	0.021 0	0.037 6	0.641 1	0.018 9	0.008 8	0.316 6
HH	0.052 7	0.058 7	0.527 2	0.034 2	0.016 8	0.328 6	0.020 1	0.008 2	0.289 7
BSZ	0.056 7	0.047 0	0.453 0	0.029 6	0.021 4	0.419 4	0.022 1	0.006 9	0.237 7
YZW	0.055 5	0.047 1	0.458 9	0.036 4	0.016 0	0.304 9	0.020 2	0.007 8	0.278 1
GCC	0.052 7	0.067 6	0.561 8	0.022 4	0.031 3	0.583 4	0.012 1	0.017 5	0.592 1
ZJ	0.062 7	0.044 0	0.412 3	0.029 2	0.023 0	0.440 5	0.019 3	0.006 3	0.245 9
LZ	0.071 6	0.030 2	0.296 6	0.032 3	0.024 7	0.433 6	0.022 4	0.002 4	0.097 5
BQQ	0.071 3	0.041 6	0.368 5	0.035 6	0.017 8	0.333 0	0.023 5	0.001 8	0.071 0
HSG	0.062 4	0.041 8	0.401 0	0.028 3	0.026 5	0.483 0	0.018 7	0.006 7	0.264 0
BDH	0.072 6	0.034 1	0.319 4	0.043 0	0.005 5	0.113 5	0.023 6	0.001 7	0.067 7
CLC	0.066 5	0.042 9	0.392 2	0.029 1	0.028 0	0.490 9	0.018 1	0.012 7	0.412 8
GS	0.067 6	0.029 0	0.299 8	0.030 5	0.028 8	0.485 4	0.021 8	0.003 3	0.132 1
HZ	0.072 1	0.023 7	0.247 2	0.037 0	0.011 6	0.239 1	0.021 9	0.003 6	0.140 5
YX	0.057 2	0.034 3	0.374 7	0.025 8	0.034 5	0.572 2	0.012 3	0.019 8	0.615 9

计算评估结果分值,

$$H = W_{2i} \times E \quad (10)$$

式中: W_{2i} 是准则层中的权重向量; E 是由各指标

评判相对贴进度构造的评判矩阵。当 $0 \leq H < 0.25$ 时,发育程度低(L);当 $0.25 \leq H < 0.5$ 时,发育程度为中等(M);当 $0.5 \leq H < 0.75$ 时,发育

程度高(H);当 $0.75 \leq H < 1$ 时,发展程度极高(VH),以上分级标准主要参考团队此前针对西北地区土遗址片状剥离定量评估研究中所采用的分级方法及标准^[13]。

通过计算表明,19处土遗址中有3处遗址片状剥离发育等级为高,2处为低级,其余14处为中等程度(见图5)。

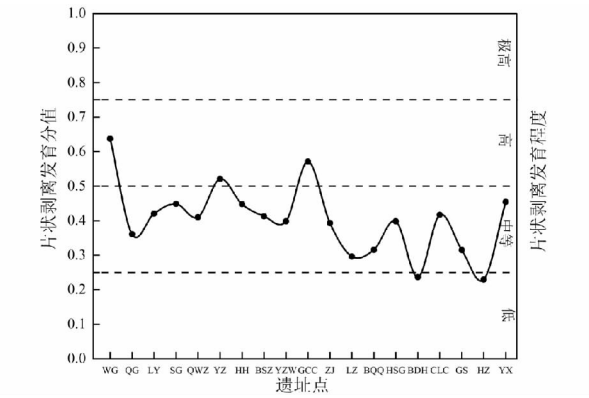


图5 片状剥离发育分值及评估等级

Fig.5 Development scores and evaluation levels of scaling off

3.3 时间序列下片状剥离的预测结果

在 LSTM 模型中,相关的参数设置如下:数据的特征维度为10,模型隐藏单元数量为300,模型最大训练周期为300个epoch,学习率下降的周期数为200个epoch,相应的下降倍数为0.2。

本文在时间序列下选择前90%的样本点作为训练样本,剩下10%的作为检验样本(清朝修筑的HZ和YX遗址),训练及预测数据如表5所示。通过预测得出训练集数据的均方根误差(RMSE)为0.012 471,平均绝对误差(MAE)为0.005 587 4,平均绝对百分比误差(MAPE)为1.166 1%,决定系数(R^2)为0.983 172(见图6)。检验集数据的均方根误差(RMSE)为0.044 424,平均绝对误差(MAE)为0.037 046,平均绝对百分比误差(MAPE)为14.803 1%,决定系数(R^2)为0.844 23(见图7),预测精度具有一定的准确性和可靠性。

表5 片状剥离训练及预测结果

Tab.5 Training and prediction results of scaling off

样本集	遗址点	模拟值	训练/预测阶段精度指标			
			RMSE	MAE	MAPE	R^2
训练集	WG	0.592 509 197	0.012 471	0.005 587 4	1.166 1%	0.983 172
	QG	0.339 794 913				
	LY	0.411 848 182				
	SG	0.439 639 895				
	QWZ	0.405 499 882				
	YZ	0.519 945 091				
	HH	0.448 027 60				
	BSZ	0.413 763 695				
	YZW	0.398 797 532				
	GCC	0.571 998 784				
	ZJ	0.394 358 591				
	LZ	0.297 228 989				
	BQQ	0.316 077 684				
	HSG	0.398 712 914				
	BDH	0.236 761 914				
	CLC	0.417 110 271				
检验集	GS	0.315 141 705	0.044 424	0.037 046	14.803 1%	0.844 23
	HZ	0.290 854 935				
	YX	0.466 937 472				

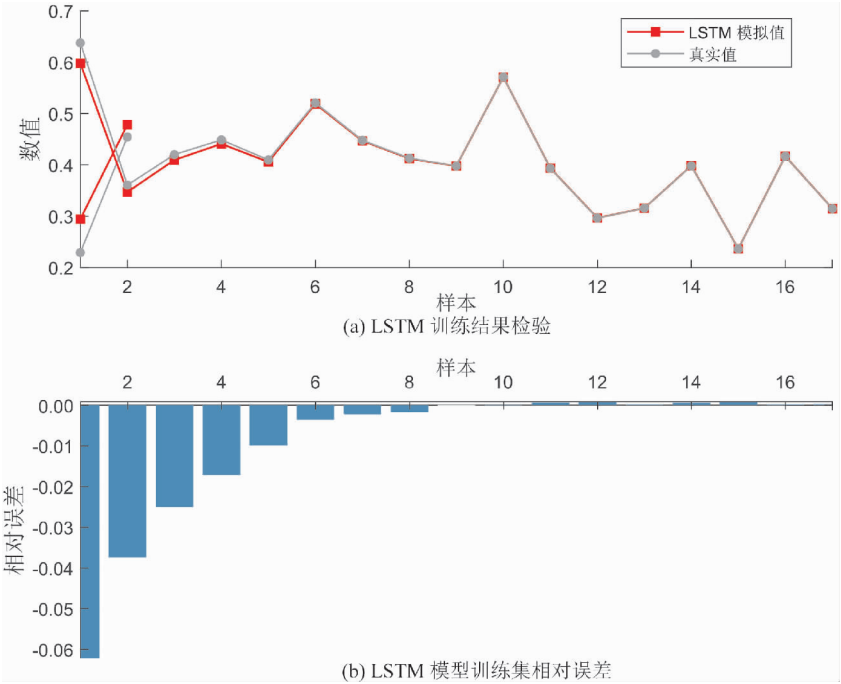


图 6 LSTM 预测模型训练结果

Fig. 6 Training results of the LSTM prediction model

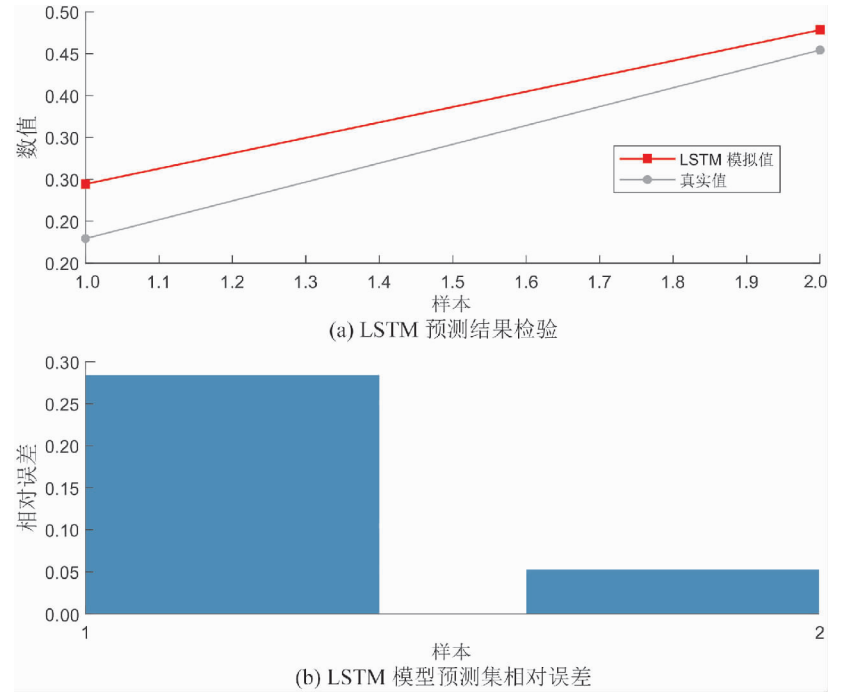


图 7 LSTM 预测模型检验结果

Fig. 7 Validation results of the LSTM prediction model

4 讨论

结合“AHP – 热力图分析 – TOPSIS”的片状剥离评估模型计算得出 19 处土遗址的片状剥离发育程度具体分值,通过与片状剥离表面粗糙度

和二元结构厚度相关数据进行对比,旨在对计算结果的科学性和准确性进行验证。计算得出战国、汉、隋、唐、宋、明、清等 7 个历史朝代修筑的土遗址片状剥离发育平均值,并拟合出片状剥离发育曲线,同时对以上 7 个朝代的片状剥离表面粗糙度和二元结构厚度平均值同时进行拟合,发现

3 条拟合曲线在时间序列下具有增减趋势的一致性(见图 8),自战国修筑的土遗址片状剥离发育程度在时间序列下开始减小,而在汉朝到达谷底之后,又在隋、唐、宋时期开始增大并到达峰值,在宋朝之后又开始减小直至清朝。以上规律是将本研究的 19 处土遗址通过拟合手段简化为 1 处,进

而从宏观角度分析片状剥离病害在时间序列下的演化规律。由片状剥离发育分值曲线、片状剥离表面粗糙度曲线和二元结构厚度曲线在时间序列下的趋势规律,可以进一步验证本评估模型及计算结果具有较高的准确性。

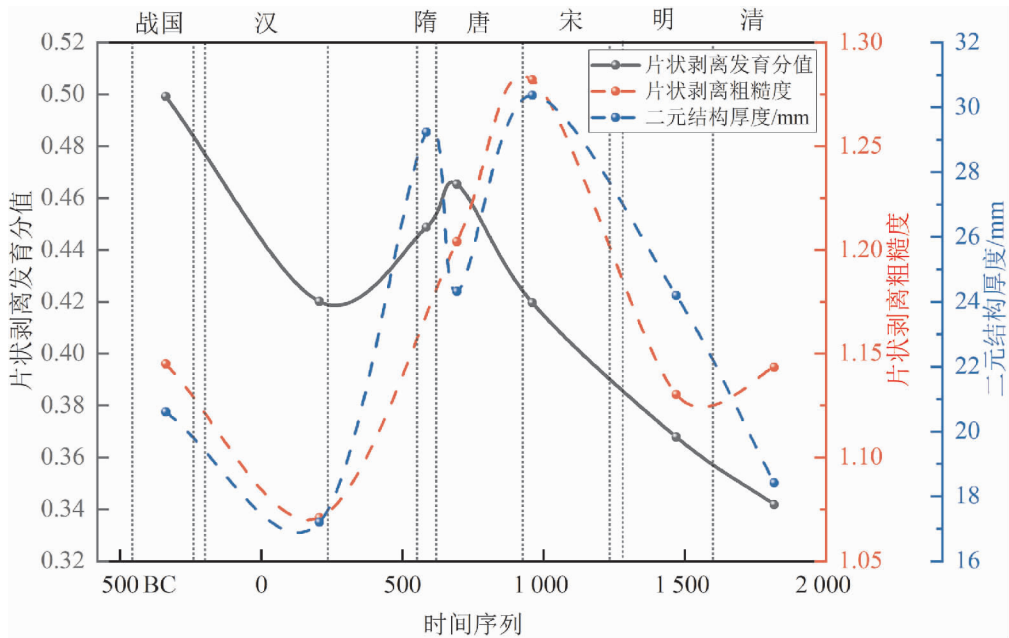


图 8 片状剥离时间序列下的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of scaling off under the temporal dimension

团队前期研究发现,上述规律可能与历史温度变化存在相关性,即本研究模型中的评价指标 C2。因此,通过获取未来气候变化的预测值,构建 LSTM 预测模型可以进一步实现在气候变化背景下的片状剥离发育演化趋势预测,然而,由于目前样本量较少,特别是在各个历史时期获取的土遗址样本点亟需进一步扩充,不断改进评估模型及其影响权重,从而实现在时间序列下土遗址片状剥离发育演化更加精准地预测,为揭示“水-盐-热-力”多场耦合作用下片状剥离的发育及演化机制奠定重要理论基础。

本研究构建的时间序列下土遗址片状剥离病害量化评估及预测模型综合考虑了片状剥离病害平、剖面表征指标及“水-盐-热-力”4 个层次的影响因素,定量评估并预测了时间序列下片状剥离的发育程度,该评估/预测模型对土遗址其他典型病害的量化研究具有重要示范及参考作用;其次,本模型通过引入 7 个历史朝代的时间序列,揭示了片状剥离病害在时间维度下的发展态势,并证明了古气候对土遗址表面风化的影响机制,

这对于深刻揭示环境陈化对土遗址病害发育演化的作用规律具有重要价值。未来应在进一步明晰古气候重建数据与片状剥离病害发育之间的内在规律基础上,对本模型结构及指标不断进行优化,积极探索气候变化背景下土遗址病害的发育发展规律,从而为土遗址保护基础理论进行有益补充和完善。

5 结论

本研究遴选陕西境内半干旱、半湿润环境下,战国、汉、隋、唐、宋、明、清等 7 个历史朝代修筑的 19 处土遗址发育的片状剥离作为研究对象,通过现场调查测试收集病害平面和剖面发育指标、土体水盐含量、土体表面硬度、遗址修筑时期历史温度变化等评估指标,结合热力图和层次分析法(AHP)计算指标权重,利用逼近理想解排序法(TOPSIS)实现对土遗址片状剥离发育程度的量化评估,基于评估结果利用 LSTM 模型实现了时间序列下片状剥离发育程度的有效预测,主要结

论如下。

1) 土遗址片状剥离病害的发育演化与“水-盐-热-力”多场耦合作用相关,通过综合分析片状剥离平剖面发育指标与“水-盐-热-力”四方面因素的热力图,得出影响片状剥离发育演化的 10 个评价指标及其影响权重,即母墙含水率、温度变化值、母墙易溶盐含量、母墙土体表面硬度、结皮层含水率、结皮层易溶盐含量、结皮层土体表面硬度、疏松层含水率、疏松层易溶盐含量、疏松层土体表面硬度。

2) 结合热力图、层次分析法(AHP)、逼近理想解排序法(TOPSIS)综合实现对 19 处土遗址片状剥离发育程度的量化评估,计算结果表明,19 处土遗址中有 3 处片状剥离发育等级为高,2 处为低,其余 14 处为中等程度。

3) 在时间序列下通过将前 90% 样本点作为训练样本,剩余 10% 的样本点作为检验样本,得出训练集数据的均方根误差(RMSE)为 0.012 471,平均绝对误差(MAE)为 0.005 587 4,平均绝对百分比误差(MAPE)为 1.166 1%,决定系数(R^2)为 0.983 17;检验集数据的均方根误差(RMSE)为 0.044 424,平均绝对误差(MAE)为 0.037 046,平均绝对百分比误差(MAPE)为 14.803 1%,决定系数(R^2)为 0.844 23。预测具有较高的准确性和可靠性。

4) 通过在时间序列下对 7 个朝代修筑的土遗址片状剥离评估结果平均值进行曲线拟合,同时对片状剥离表面粗糙度和二元结构厚度平均值拟合曲线进行对比,发现 3 条曲线在时间序列下的增减趋势具有一致性,因而从宏观角度证明了评估模型及结果具有准确性,对揭示“水-盐-热-力”多场耦合作用下片状剥离的发育及演化机制具有重要参考。

参考文献

[1] 郭青林,裴强强,王彦武,等.我国土遗址保护研究新进展[J].石窟与土遗址保护研究,2024,3(3):18-31.

GUO Q L, PEI Q Q, WANG Y W, et al. New progress in the conservation research on the earthen sites of China [J]. Research on Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2024, 3(3): 18-31.

[2] GUO Q L, WANG Y W, CHEN W W, 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.

- [3] 孙满利,沈云霞.丝绸之路土遗址的保护现状及对策研究[J].石窟与土遗址保护研究,2022,1(1): 70-79.
- SUN M L, SHEN Y X. Research on the actualities and countermeasures of the protection of the earthen sites along the silk road [J]. Research on Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2022, 1(1): 70-79.
- [4] 谌文武,祁强,郭志谦,等.甘肃省单体土遗址的时空分布特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2024,60(2): 205-213.
- CHEN W W, QI Q, GUO Z Q, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of single earthen heritage sites in Gansu Province [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2024, 60(2): 205-213.
- [5] 崔凯,陈蒙蒙,谌文武,等.干湿与盐渍耦合作用下土遗址强度劣化机理[J].兰州大学学报(自然科学版),2017,53(5): 582-587.
- CUI K, CHEN M M, CHEN W W, et al. Mechanism and processes of intensity deterioration of earthen ruin's soil undergoing salinized and dry-wet coupling effect [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(5): 582-587.
- [6] DU Y M, CHEN W W, CUI K, et al. Study on damage assessment of earthen sites of the Ming Great Wall in Qinghai Province based on fuzzy-AHP and AHP-TOPSIS [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2020, 14(6): 903-916.
- [7] 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.
- ZHANG H Y, LIU P, WANG J F, et al. Generation and detachment of surface crust on ancient earthen architectures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1883-1891.
- [8] 谌文武,杨光,张迎敏,等.青海地区苔藓结皮对土遗址片状剥离的影响[J].工程科学与技术,2017,49(5): 22-27.
- CHEN W W, YANG G, ZHANG Y M, et al. Effect of moss soil crust on the scaling off of earthen sites in Qinghai [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(5): 22-27.
- [9] DU Y M, DONG W Q, CUI K, et al. Research progress on the development mechanism and exploratory protection of the scaling off on earthen sites in NW

- China[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(8): 2183-2196.
- [10] 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.
- CUI K, ZHANG Y H, CHEN W W, 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.
- [11] SHAO M S, LI L, WANG S J, et al. Deterioration mechanisms of building materials of Jiaohe Ruins in China[J]. Journal of Cultural Heritage, 2013, 14(1): 38-44.
- [12] 王旭东. 土遗址保护关键技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [13] CUI K, DU Y M, ZHANG Y H, 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: 14.
- [14] 许健, 郑翔, 王掌权. 黄土边坡盐蚀剥落病害特征调查及其水盐迁移规律研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 741-748.
- XU J, ZHENG X, WANG Z Q. Investigation for water and salt migrations on spall[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 741-748.
- [15] 谌文武, 吕海敏, 崔凯, 等. 氯盐和硫酸盐对遗址土体颗粒级配和界限含水率影响的对比[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(3): 334-338.
- CHEN W W, LYU H M, CUI K, et al. Comparative study of the influence of chlorine and sulfate salt on grain size distribution and limit moisture content in site soils[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, 51(3): 334-338.
- [16] MATERA F, MOSS E. Temporary site protection for earthen walls and murals at çatalhöyük, Turkey[J]. Conservation and Management of Archaeological Sites, 2004, 6(3/4): 213-227.
- [17] CAMPIANI A, LINGLE A, LERCARI N. Spatial analysis and heritage conservation: Leveraging 3-D data and GIS for monitoring earthen architecture[J]. Journal of Cultural Heritage, 2019, 39: 166-176.
- [18] DU Y M, CUI K, CHEN S Y, 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.
- [19] 陈毅. 干旱土遗址劣化的日照温度效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [20] 刘洪丽, 张正模, 郭青林, 等. 面向材料老化的遗址土特性研究: 以锁阳城遗址为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2023, 53(1): 96-104.
- LIU H L, ZHANG Z M, GUO Q L, et al. The properties of earthen monument soil oriented the material aging: A case study of the Suoyang ancient city [J]. Journal of Northwest University (Natural Sciences Edition), 2023, 53(1): 96-104.
- [21] 孙丽娟, 屈亚婷, 赵丛苍, 等. 杨官寨遗址土遗迹表面防风化保护材料研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2012, 42(3): 477-482.
- SUN L J, QU Y T, ZHAO C C, et al. Study on surface anti-weathering protective materials for earthen relics at Yangguanzhai Site[J]. Journal of Northwest University (Natural Sciences Edition), 2012, 42(3): 477-482.
- [22] 谌文武, 杨光, 崔凯, 等. 土遗址片状剥离加固现场渗透试验[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 309-315.
- CHEN W W, YANG G, CUI K, et al. Field penetration tests to strengthen the scaling-off of earthen sites [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(3): 309-315.
- [23] 崔凯, 程福强, 谌文武, 等. 电渗注浆加固土遗址片状剥离实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 390-398.
- CUI K, CHENG F Q, CHEN W W, et al. Experimental study on electro-osmosis grouting reinforcement of scaling-off earthen sites[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 390-398.
- [24] 王永进, 纪娟, 石美荣, 等. 陕西境内遗址表面 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 产生之水盐运移规律研究[J]. 文物保护与考古科学, 2023, 35(2): 90-96.
- WANG Y J, JI J, SHI M R, et al. Research on water and salt transport of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ generated on the surfaces of archaeological sites in Shaanxi Province [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2023, 35(2): 90-96.
- [25] 王旭东. 丝绸之路重要古迹遗址赋存环境图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2016.
- [26] GUO Z Q, WU C, ZHANG S, 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.
- [27] PHAM T A, NADIMI S, SUTMAN M. Critical review of physical-mechanical principles in geostructure-soil interface mechanics[J]. Geotechnical and Geological

Engineering, 2024, 42(8): 6757-6808.

[28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

[29] 杜昱民. 青海明长城防御体系及典型遗址易损性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.

[30] CHAKRABORTY S. TOPSIS and modified TOPSIS: A comparative analysis[J]. Decision Analytics Journal, 2022, 2: 100021.

[31] ZHANG L X, WANG Y W, ZHANG J K, et al. Rockfall hazard assessment of the slope of Mogao Grottoes, China based on AHP, F-AHP and AHP-TOPSIS[J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(14): 377.

[32] 王珺, 孙进越, 俞凯, 等. 基于分组 LSTM 与 CNN 的青铜器锈蚀类别智能标识方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(5): 778-786.

WANG J, SUN J Y, YU K, et al. Intelligent identification method for bronze rust category based on grouping LSTM and CNN[J]. Journal of Northwest University (Natural Sciences Edition), 2021, 51(5): 778-786.

[33] 卢宝明, 徐金明. 基于 EMD-LSTM 人工神经网络的云冈石窟环境参数预测[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2024, 30(1): 1-16.

LU B M, XU J M. Estimation of environmental parameters of Yungang Grottoes based on empirical mode decomposition and long short-term memory artificial neural network[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2024, 30(1): 1-16.

[34] 单天昊. 西藏文物知识图谱的构建与应用研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2024.

[35] 冯强. 文物藏品知识图谱构建技术研究[D]. 西安: 西北大学, 2022.

[36] 李琳. 基于知识图谱的文物数字化系统构建研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

[37] 欧阳红兵, 黄亢, 闫洪举. 基于 LSTM 神经网络的金融时间序列预测[J]. 中国管理科学, 2020, 28(4): 27-35.

OUYANG H B, HUANG K, YAN H J. Prediction of financial time series based on LSTM neural network[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(4): 27-35.

[38] 王思齐, 蒋玮, 董长帅. 神经网络在常用标准件理论应力集中系数中的预测研究[J]. 机械设计与制造, 2025(9): 23-27.

WANG S Q, JIANG W, DONG C S. Research on prediction of theoretical stress concentration coefficient of common standard parts by neural network[J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(9): 23-27.

(编辑 李波)