

俞莉,张翔,高晓甜,等.嘉峪关典型土遗址裂缝变形气温响应特征研究[J].地震工程学报,2020,42(3):751-758.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.751

YU Li,ZHANG Xiang,GAO Xiaotian,et al.Temperature Response Characteristics of Crack Deformation of Typical Earthen Sites in Jiayuguan[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):751-758.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.751

嘉峪关典型土遗址裂缝变形气温响应特征研究

俞 莉¹,张 翔²,高晓甜¹,陈思雨¹,顾 鑫¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室,甘肃 兰州 730050;

2. 嘉峪关丝路(长城)文化研究院 文化遗产监测中心,甘肃 嘉峪关 735100)

摘要: 裂隙、冲沟、掏蚀、片状剥离等是中国西北地区土遗址发育典型病害,为探求土遗址本体及其赋存环境变化的内在本质规律,开展土遗址变形监测的研究与实践至关重要。以嘉峪关土遗址烽火台裂缝 1 号、2 号为研究对象,通过分析 2016 年裂缝变形和环境气温监测数据,寻找其响应关系,探索环境气温影响裂缝发育的规律;利用相关性分析、归一化处理数据,结合支持向量机(SVM)机器学习方法对裂缝发展趋势进行预测,为土遗址裂缝发育趋势研究提供理论依据。

关键词: 土遗址;裂缝;赋存环境;支持向量机;趋势预测

中图分类号: P319.56

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)03-0751-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.751

Temperature Response Characteristics of Crack Deformation of Typical Earthen Sites in Jiayuguan

YU Li¹, ZHANG Xiang², GAO Xiaotian¹, CHEN Siyu¹, GU Xin¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. Cultural Heritage Monitoring Center, Jiayuguan Silk Road (Great Wall) Culture Research Institute, Jiayuguan 735100, Gansu, China)

Abstract: Fractures, gullies, gouges, and stripping are typical distortions of earthen sites in Northwest China. To explore the change laws of earthen sites and their occurrence environment, it is important to theoretically and practically investigate the deformation monitoring of these sites. In this study, two cracks of the Jiayuguan earthen site are investigated. By analyzing the monitoring data of fracture deformation and environmental temperature in 2016, the response relationship between them was found, and the influence law of environmental temperature on fracture development was explored. By using correlation analysis and normalization processing data and combining the support vector machine method, the fracture development trend was predicted, thus providing a theoretical basis for studying the fracture development trend of earthen sites.

Keywords: earthen sites; crack; occurrence environment; support vector machine; trend prediction

收稿日期:2019-01-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51208245,41562015);嘉峪关夯土长城病害监测研究课题

第一作者简介:俞 莉(1984—),女,甘肃兰州人,博士研究生,研究方向:岩土工程、文物保护工程。E-mail:509995181@qq.com。

0 引言

土遗址是指以土作为主要建筑材料的人类历史上生产、生活等各种活动遗留下来的遗迹,是一种重要的文物资源^[1]。我国西北地区气候干燥、自然环境恶劣,受降雨、降雪、风沙等自然因素的侵蚀,形成裂隙、冲沟、掏蚀、片状剥离等土遗址发育的主要病害^[2-9]。为研究土遗址本体与赋存自然环境之间的响应关系,对二者进行长期监测研究是一项至关重要的工作。

目前已经有很多学者在土遗址监测方面开展了大量研究工作。卫国^[10]通过对文物保存环境的温度、湿度、光照、降尘和有害气体等进行长期监测和控制,对文物保存室内、外环境进行数据对比分析,揭示了文物与环境影响因素的变化规律。张小红等^[11]以陕西唐顺陵天禄石刻为研究对象,采用灰色系统理论来预测文物裂隙发展趋势,建立裂隙 GM((1,1)模型和 Verhulst 模型对唐顺陵石刻文物的裂隙进行了预测。黄继忠等^[12]针对我国砂岩类石窟寺普遍存在的共性关键技术问题,进一步深入研究砂岩类石窟病害的机理,研发了监测、检测技术手段和装备以及文物加固、保护材料和工艺。罗兴贤等^[13]分析了破坏地质遗迹的非人为因素的监测需求,设计了基于 ZigBee 协议的无线传感器网络的地质遗迹监测平台,以此来实现对地质遗迹的有效保护。王继伟等^[14]对目前“丝绸之路”遗址中存在的大气污染、水环境污染等问题进行了分析和预测,并制定相关的防治和监测规划,为促进“丝绸之路”旅游业和文物古迹保护的和谐及可持续发展奠定基础。张健等^[15]使用基于高精度全球卫星定位系统 GPS 与远程遥测终端 RTU 的高精度变形监测预警系统,结合无线通讯方式对遗址保护区陵墓边坡进行安全监测,实现了有效的滑坡监测与预警防范。付菲等^[16]引入大数据机器学习领域的极限学习机方法对遗址温度进行系统分析和建模预测,为遗址预防性保护和管理提供参考。张钰等^[17]利用无线传感监测系统对文物保存环境进行监测,监测参数包括展柜内的温湿度、光照度、紫外线和空气污染物,并对文物保存环境监测和控制方面的若干问题进行了探讨。

基于此,本文以甘肃省嘉峪关土遗址为研究对象,通过对土遗址裂缝变形监测数据、环境监测数据的分析,寻求裂缝变形与气温的响应关系;经过相关

性分析和归一化处理,利用支持向量机 SVM 模型对裂缝发育趋势进行预测,为土遗址裂缝变形发育趋势预测提供一定的理论依据。

1 数据采集

1.1 烽火台裂缝、三个气象站监测布设

嘉峪关关城位于距嘉峪关市区西南 6 km 处,始建于明洪武五年(公元 1372 年),是明代长城沿线九镇所辖千余个关隘中最雄险的一座。对嘉峪关关城进行监测研究,探求环境与遗址本体间的响应关系,可达到防治、保护土遗址的目的,从而更好地传承关城的历史价值、社会价值、文化价值和艺术价值。烽火台位于关城北侧,关城气象站、第一墩气象站、东北长城气象站分别位于关城西侧、南侧和北侧,具体布设位置如图 1 所示。

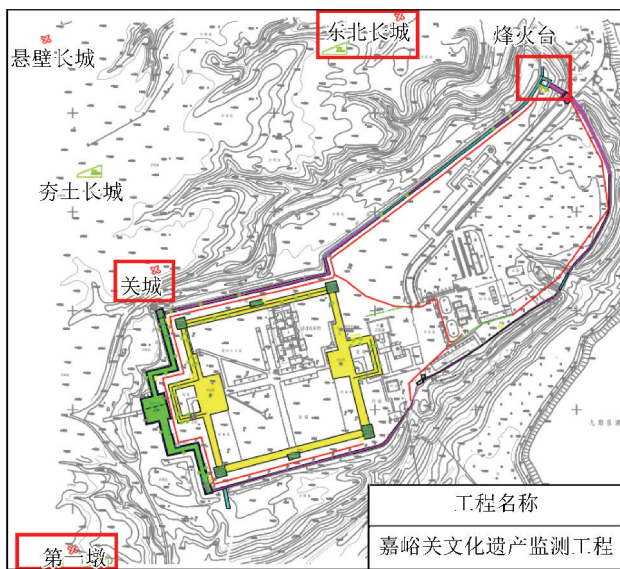


图 1 烽火台、三个气象站监测点布设平面图

Fig.1 Layout plan of the beacon tower and three weather stations

1.2 监测数据采集方式

本次研究的监测数据为:2016 年烽火台裂缝 1 号、2 号宽度变化值,关城、第一墩、东北长城三个气象站气温监测数据,共计 43 920 个。监测数据采集每隔 1 h 进行一次。气象站的监测包括风速、风向、气温、湿度、气压、蒸发量等 8 个环境因素。裂缝监测采用 VJ400 型振弦式测缝(位移)计(图 2),其在土遗址修复后埋设于本体内部,用于监测结构物伸缩缝或周边缝的开合度(变形)。烽火台裂缝监测布设如图 3 所示。



图 2 烽火台裂缝监测设备

Fig.2 Equipment for monitoring the beacon tower crack

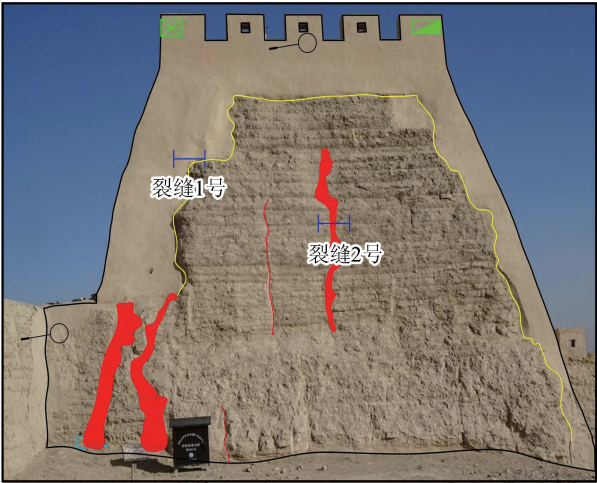


图 3 烽火台裂缝监测布设图

Fig.3 Monitoring layout for cracks on the beacon tower

表 1 2016 年烽火台裂缝宽度变化及三个气象站气温月均值

Table 1 Monthly mean value of crack width change of beacon tower and temperature of three weather stations in 2016

时间	裂缝 1 号宽度变化 月均值/mm	裂缝 2 号宽度变化 月均值/mm	关城气象站 月均气温/℃	第一墩气象站 月均气温/℃	东北长城气象站 月均气温/℃
2016-01	-0.405 82	-0.038 04	-9.536 71	-10.088 51	-10.106 55
2016-02	-0.481 32	-0.132 79	-4.265 86	-5.873 05	-4.063 65
2016-03	-0.636 77	-0.383 23	4.717 26	4.203 89	4.921 51
2016-04	-0.719 84	-0.617 1	12.192 61	10.916 55	13.082
2016-05	-0.745 24	-0.670 9	14.388 98	14.488 79	15.446 68
2016-06	-0.856 81	-0.858 76	21.723 07	21.640 03	22.591 26
2016-07	-0.909 33	-0.915 13	24.622 76	23.903 01	25.249 22
2016-08	-0.905 15	-0.886 31	22.456 35	20.988 19	22.363 86
2016-09	-0.927 51	-0.922 29	18.850 46	18.258 06	19.668 36
2016-10	-0.812 53	-0.770 7	8.335 22	7.867 38	8.886 4
2016-11	-0.692 04	-0.496 71	0.622 73	0.310 4	0.491 86
2016-12	-0.619 68	-0.374 48	-2.585 65	-2.833 37	-3.331 47

形发育趋势提供了理论依据。

3 数据处理分析

3.1 相关性分析^[18-20]

根据气温与裂缝变形的响应关系,可以看出两

2 裂缝变形发育与气温响应关系

2.1 裂缝、气温监测数据处理

对 2016 年烽火台裂缝 1 号、2 号宽度变化值及三个气象站气温监测数据进行甄别、剔除、统计、整理,剔除缺失数据、异常数据点、数据跳跃点,并将数据以月为单位维度进行平均处理(表 1)。

2.2 响应关系

根据表 1 中烽火台裂缝宽度变化月均值、气象站气温的月均值绘制其响应关系于图 4。从图 4 中可以看出,2016 年 1—12 月,三个气象站月平均气温发展趋势基本相同:均呈倒“U”型;3—5 月为春季,月均温在 4.2~15.4℃;6—8 月为夏季,月均温在 20.9~25.2℃;9—10 月为秋季,月均温在 7.822.4℃;1—2 月和 12 月为冬季,月均温在 -10.1~0.62℃。其中 1 月、7 月分别出现全年最低、最高月均温。

烽火台裂缝 1、2 号宽度变化月均值的发展趋势为“U”型,先变小后增大,呈先收缩后扩张的趋势。由于春季到夏季气温逐渐升高,土遗址本体也随之膨胀,使得裂缝空间缩小,裂缝监测数值随气温的升高呈逐渐减小的趋势,表现为负值;秋季到冬季气温逐渐降低,土遗址本体也开始收缩,使得裂缝空间增大,裂缝监测数值随气温的降低呈逐渐增大的趋势。1 月、7 月出现全年最低、最高月均温时,裂缝宽度变化也出现全年最大和最小月均值,符合土体热胀冷缩规律。这也为后续根据气温变化预测裂缝未来变

者之间确实存在一定联系,符合一定规律。为了探求烽火台裂缝变形与环境气温的响应规律,运用 Pearson 相关系数法对三个气象站气温、烽火台裂缝宽度变化值进行相关性分析,通过相关性系数 r 值的大小来反映裂缝变形与气温因素的关联性。

Pearson 相关系数是一种线性相关系数,是用来反映两个变量线性相关程度的统计量。相关系数用 r 表示,描述的是两个变量间线性相关程度的强弱。

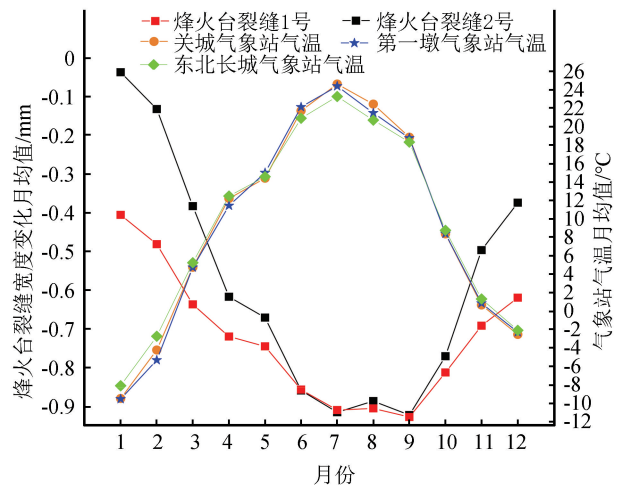


图 4 2016 年烽火台裂缝变形发育与气温响应关系图
Fig.4 Response of crack deformation on the beacon tower to the temperature in 2016

相关性的判定:首先看显著性值,也就是 p 值,它是判断 r 值,也即相关系数有没有统计学意义的标准,其判定标准一般为 0.05。如果 $p > 0.05$,说明

相关性系数无统计学意义;无论 r 值大小,都表明两者之间没有相关性。如果 $p < 0.05$,则表明两者之间有相关性;然后再看 $|r|$ 值, $|r|$ 值越大表明相关性越好,正数指正相关,负数指负相关。

一般认为:(1) $|r| \geq 0.8$ 时两变量间高度相关;(2) $0.5 \leq |r| < 0.8$ 时两变量中度相关;(3) $0.3 \leq |r| < 0.5$ 时两变量低度相关或弱相关;(4) $|r| < 0.3$ 时两变量极弱相关或无相关。所以判断相关性时,先看 p 值,看有没有相关性;再看 r 值,看相关性是强还是弱。

按照上述的分析过程与判定方法对气温与其对应的裂缝宽度变化值进行相关性分析与判别,结果列于表 2。从表 2 可以看出烽火台裂缝 1 号、2 号宽度变化值与三个气象站气温呈高度相关性,说明气温是影响裂缝变化的决定性因素。

3.2 数据归一化处理

从表 2 可以看到气温与裂缝变形高度相关。为了寻找气温影响裂缝的变化规律并进行趋势预测,必须将监测数据进行归一化处理^[21-23]。气温与裂缝宽度具有不同的量纲和量纲单位,归一化处理可以消除指标之间的量纲影响,解决数据指标之间的可比性。原始数据经过归一化处理后,各指标处于同一数量级,适合进行综合对比评价。

表 2 烽火台裂缝宽度变化值及三个气象站气温相关性分析

Table 2 Correlation analysis of crack width of beacon tower and temperature of three weather stations

		裂缝 1 号宽度变化值	裂缝 2 号宽度变化值	相关性
关城气象站气温	Pearson 相关 $ r $	-0.933 7	-0.943 94	高度相关
	p 值	9.02E-006	3.97E-006	
第一墩气象站气温	Pearson 相关 $ r $	-0.936 94	-0.948 32	高度相关
	p 值	7.06E-006	2.66E-006	
东北长城气象站气温	Pearson 相关 $ r $	-0.930 11	-0.942 33	高度相关
	p 值	1.17E-005	4.56E-006	

本次归一化处理运用的是 Origin 中的 min-max 归一化。min-max 归一化是对原始数据的线性变换,使结果值映射到 $[0,1]$ 之间。转换函数公式如下:

$$X^* = \frac{X - \min}{\max - \min} \quad (1)$$

式中: $\max$ 为样本数据的最大值, $\min$ 为样本数据的最小值; X 为原始样本数据, X^* 为归一化结果。

通过对气温、裂缝监测数据进行归一化处理,使更复杂的数据映射到 $[0,1]$ 间,以便于了解数据在各个区间的分布(表 3)。

4 SVM 模型预测

4.1 基于 SVM 支持向量机的预测模型^[24-29]

将裂缝宽度变化值、气温监测数据进行归一化

处理后,利用支持向量机 SVM 模型进行趋势预测。设 2016 年 1—9 月数据为 Training 训练集(约占总样本数的 75%),2016 年 10—12 月数据为 Test 测试集(约占总样本数的 25%),对 2017 年 1—6 月烽火台裂缝宽度变化值进行预测,结果列于表 4。由表 4 可以看出,SVM 预测模型在中长期内的预测都是有效的,烽火台裂缝 1 号平均相对误差为 5.08%,2 号平均相对误差为 8.09%;2 条裂缝平均相对误差都在 10% 以下,能够满足预测精度要求。

图 5 是 2017 年 1—6 月烽火台裂缝 1 号、2 号变形发育趋势的预测结果。从图中可以看出,SVM 预测模型可以较好地预测裂缝的发展趋势,同时也可以看出烽火台裂缝 1 号拟合效果比裂缝 2 号好。

表 3 烽火台裂缝及三个气象站气温监测数据归一化处理

Table 3 Normalization of crack width of beacon tower and temperature monitoring data of three weather stations					
时间	裂缝 1 号宽度 变化月均值	裂缝 2 号宽度 变化月均值	关城气象站 月均气温	第一墩气象站 月均气温	东北长城气象站 月均气温
2016-01	1	1	0	0	0
2016-02	0.855 27	0.892 84	0.154 30	0.124 02	0.170 92
2016-03	0.557 30	0.609 63	0.417 28	0.420 47	0.425 05
2016-04	0.398 07	0.345 14	0.636 11	0.617 95	0.655 86
2016-05	0.349 38	0.284 30	0.700 41	0.723 04	0.722 75
2016-06	0.135 52	0.071 85	0.915 11	0.933 43	0.924 82
2016-07	0.034 86	0.008 10	1	1	1
2016-08	0.042 87	0.040 70	0.936 58	0.914 25	0.918 39
2016-09	0	0	0.831 02	0.833 93	0.842 15
2016-10	0.220 41	0.171 44	0.523 19	0.528 25	0.537 20
2016-11	0.451 36	0.481 29	0.297 41	0.305 93	0.299 76
2016-12	0.590 07	0.619 52	0.203 49	0.213 44	0.191 63

表 4 预测模型输出结果
Table 4 Output results of forecast model

阶段	时间	1 号 实际值	1 号 输出数据	残差	相对 误差	2 号 实际值	2 号 输出数据	残差	相对 误差
训练阶段	2016-01	-0.405 82	-0.402 07	0.003 75	0.92%	-0.038 04	-0.037 91	0.000 132	0.35%
	2016-02	-0.481 32	-0.463 7	0.017 624	3.66%	-0.132 79	-0.133 01	-0.000 22	0.16%
	2016-03	-0.636 77	-0.709 46	-0.072 68	11.41%	-0.383 23	-0.429 188	-0.045 959	11.99%
	2016-04	-0.719 84	-0.759 54	-0.039 7	5.51%	-0.617 1	-0.698 01	-0.080 91	13.11%
	2016-05	-0.745 24	-0.746 72	-0.001 48	0.20%	-0.670 9	-0.709 46	-0.038 56	5.75%
	2016-06	-0.856 81	-0.866 01	-0.009 2	1.07%	-0.858 76	-0.858 56	0.000 2	0.02%
	2016-07	-0.909 33	-0.985 11	-0.075 78	8.33%	-0.915 14	-0.915 04	9.5E-05	0.01%
	2016-08	-0.905 15	-0.904 53	0.000 614	0.07%	-0.886 31	-0.886 17	0.000 138	0.02%
	2016-09	-0.927 51	-0.805 17	0.122 34	13.19%	-0.922 29	-0.818 04	0.104 256	11.30%
检验阶段	2016-010	-0.812 53	-0.714 94	0.097 584	12.01%	-0.770 7	-0.684 81	0.085 888	11.14%
	2016-011	-0.692 04	-0.692 19	-0.000 15	0.02%	-0.496 71	-0.496 74	-3.2E-05	0.01%
	2016-012	-0.619 68	-0.613 67	0.006 011	0.97%	-0.374 48	-0.374 74	-0.000 25	0.07%
预测阶段	2 017-01	-0.540 11	-0.525 23	0.014 884	2.76%	-0.266 3	-0.186 24	0.080 059	30.06%
	2 017-02	-0.522 47	-0.634 24	-0.111 77	21.39%	-0.273 87	-0.359 36	-0.085 49	31.21%
	2 017-03	-0.71	-0.693 11	0.016 888	2.38%	-0.713 33	-0.562 61	0.150 719	21.13%
	2 017-04	-0.726 23	-0.739 03	-0.012 8	1.76%	-0.690 16	-0.690 24	-7.7E-05	0.01%
	2 017-05	-0.823 8	-0.795 81	0.027 986	3.40%	-0.871 44	-0.789 68	0.081 763	9.38%
	2 017-06	-0.891 42	-0.913 43	-0.022 01	2.47%	-0.942 39	-0.942 19	0.000 203	0.02%

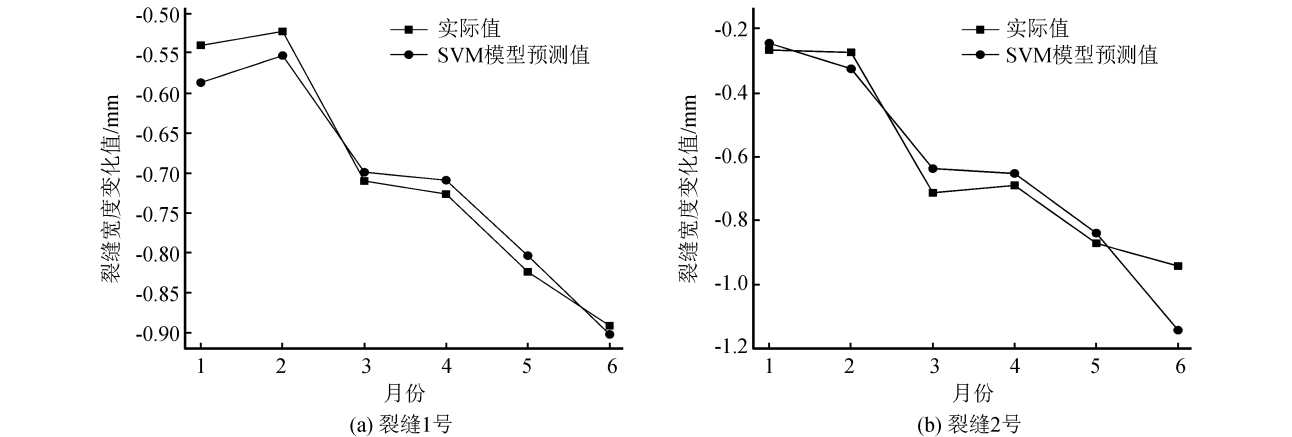


图 5 2017 年 1—6 月烽火台裂缝 1 号、2 号趋势预测图

Fig.5 Trend forecast chart of cracks on the beacon tower from January to June 2017

4.2 整体预测

图6为SVM预测模型对2016年1月—2017年6月烽火台裂缝1号、2号变形发育总体趋势的预测结果。从SVM预测曲线可以看出,与实际值一样,2016年1月和2017年1月气温最低时烽火

台裂缝1号、2号的SVM预测值最大,2016年7月气温最高时裂缝SVM预测值最小;2017年1—6月,随气温的逐渐回升裂缝SVM预测值逐渐降低。由此可见,SVM预测模型的预测结果符合裂缝与气温响应关系,满足裂缝变形发育预测趋势的规律。

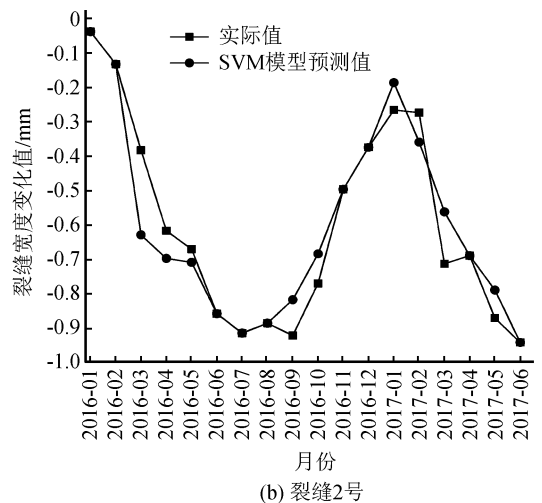
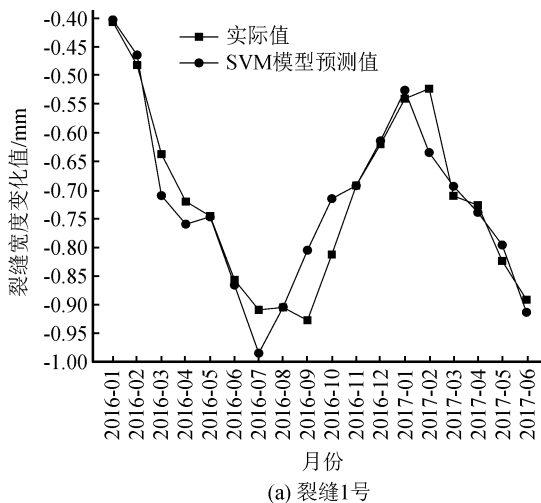


图6 2016年1月—2017年6月烽火台裂缝1号、2号趋势预测图

Fig.6 Trend forecast chart of cracks on the beacon tower from January 2016 to June 2017

5 结论

以嘉峪关土遗址烽火台监测数据为研究对象,分析其裂缝宽度变化值与气温的响应关系。三个气象站气温和烽火台裂缝监测数据显示,二者之间确实存在存在响应关系,总体表现为气温逐渐升高而裂缝值减小、气温逐渐降低而裂缝值增大,符合土遗址本体热胀冷缩的规律。在此基础上通过数据相关性分析、归一化处理构建SVM预测模型,对裂缝未来发育趋势进行预测,并对预测结果进行检验分析。

利用2016年12个月的裂缝数据建立预测模型,之后对2017年1—6月的数据进行中长期预测,收到了良好的预测效果,发现2条裂缝平均相对误差达到预测精度要求,且烽火台裂缝1号预测效果比裂缝2号好。

本次研究仅用了一种支持向量机SVM进行预测分析,下一步将采用多个预测模型进行对比分析,从而找出最优预测效果,提高预测精准度。

参考文献(References)

[1] 孙满利.土遗址保护研究现状与进展[J].文物保护与考古科学,2007,19(4):64-70.
SUN Manli. Research Status and Development of the Conserva-

tion of Earthen Sites[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2007, 19(4): 64-70.

- [2] 李最雄.丝绸之路古遗址保护[M].北京:科学出版社,2003.
LI Zuixiong. Protection of the Ancient Ruins of the Silk Road [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] 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): 1-21.
- [4] CUI K, WU G P, DU Y M, 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.
- [5] 崔凯,关喜鹏,湛文武,等.干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应(Ⅱ)[J].岩土工程学报,2017,39(10):1777-1784.
CUI Kai, GUAN Xipeng, CHEN Wenwu, et al. Effects of Salinized Deterioration and Aeolian Ullage on Soils in Undercutting Areas of Earthen Ruins in Arid Regions (Ⅱ) [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1777-1784.
- [6] 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):772-778,765.
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, 765.
- [7] 湛文武,张起勇,张帅,等. SH灰土和糯米浆灰土材料物理力学

- 性质对比[J].兰州大学学报(自然科学版),2017,53(6):764-769.
- CHEN Wenwu, ZHANG Qiyong, ZHANG Shuai, et al. Comparison between the Physical and Mechanical Properties of SH and Sticky Rice Lime-soil Materials[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(6): 764-769.
- [8] 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(增刊2):2875-2880.
- ZHAO Haiying, LI Zuixiong, HAN Wenfeng, et al. Main Diseases and Their Causes of Earthen Ruins in Arid Region of Northwestern China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp2): 2875-2880.
- [9] 孙满利,李最雄,王旭东,等.交河故城的主要病害分析[J].敦煌研究,2005(5):92-94.
- SUN Manli, LI Zuixiong, WANG Xudong, et al. The Characteristic of Primary Damages about the Ruins of the Ancient City Jiaohe[J]. Dunhuang Research, 2005(5): 92-94.
- [10] 卫国.文物保存环境数据监测分析研究:以西藏博物馆临时库房为例[J].高原科学研究,2019(3):90-105.
- WEI Guo. A Report on Analyzing the Environmental Data of Preserving the Relics: Take the Temporary Cultural Relics Storage of Tibet Museum as Example[J]. Plateau Science Research, 2019(3): 90-105.
- [11] 张小红,王慧琴,马涛,等.文物裂隙趋势预测模型研究[J].文物保护与考古科学,2017,29(1):44-50.
- ZHANG Xiaohong, WANG Huiqin, MA Tao, et al. Study on Crack Prediction Models for Cultural Relics[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(1): 44-50.
- [12] 黄继忠,王金华,高峰,等.砂岩类石窟寺保护新进展:以云冈石窟保护研究新成果为例[J].东南文化,2018(1):15-19.
- HUANG Jizhong, WANG Jinhua, GAO Feng, et al. Recent Progresses in Sandstone Cave Temples Conservation: A Case Study of Yungang Grottoes[J]. Southeast Culture, 2018(1): 15-19.
- [13] 罗兴贤,肖建琼,周晓庆.基于无线传感器网络的地质遗迹监测平台[J].电脑知识与技术,2019,15(22):87-88,93.
- LUO Xingxian, XIAO Jianqiong, ZHOU Xiaoqing. A Geological Relics Monitoring Platform Based on Wireless Sensor Network[J]. Computer Knowledge and Technology, 2019, 15(22): 87-88, 93.
- [14] 王继伟,巨天珍,林郁,等.“丝绸之路”(中国段)遗址环境监测规划[J].安徽农业科学,2007,35(25):7924-7925.
- WANG Jiwei, JU Tianzhen, LIN Yu, et al. Environmental Monitoring and Planning of Silk Road (China Section) Remains[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(25): 7924-7925.
- [15] 张健,李应军.高精度变形监测预警系统在明显陵遗址保护中的应用研究[J].文物保护与考古科学,2015,27(1):21-28.
- ZHANG Jian, LI Yingjun. Application Research of High Accuracy Deformation Monitoring and Warning System to Protection of the Ming Dynasty Xian Tomb Site[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2015, 27(1): 21-28.
- [16] 付菲,孙满利,朱明哲,等.基于极限学习机的汉阳陵外藏坑遗址温度预测研究[J].文物保护与考古科学,2019,31(1):72-78.
- FU Fei, SUN Manli, ZHU Mingzhe, et al. Temperature Forecasting for an Enclosed Earthen Site Museum Based on Extreme Learning Machine Analysis[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2019, 31(1): 72-78.
- [17] 张钰,马金香,冯露菲,等.天津博物馆文物保存环境调查与监测分析:以2015年1月监测数据为例[J].文物保护与考古科学,2017,29(2):94-99.
- ZHANG Yu, MA Jinxiang, FENG Lufei, et al. Investigation and Monitoring of the Environment for Preservation of Historical Relics in Tianjin Museum: a Case Study in January, 2015[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(2): 94-99.
- [18] 杨晓荣,陈楠.基于多源数据的福建省人口数据空间化研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2019,36(2):79-84,95.
- YANG Xiaorong, CHEN Nan. Spatialization of Population Data for Fujian Province Based on Multi-source Data[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2019, 36(2): 79-84, 95.
- [19] 孙彬,毛诗洋,王景贤,等.长观试件混凝土自然碳化与加速碳化的相关性试验研究[J].建筑结构,2019,49(9):111-114,70.
- SUN Bin, MAO Shiyang, WANG Jingxian, et al. Experimental Study on Correlation between Natural Carbonation and Accelerated Carbonation of Long-term Observation Concrete Specimens[J]. Building Structure, 2019, 49(9): 111-114, 70.
- [20] 潘小旺,邹良浩,梁枢果,等.基于极值相关性的超高层建筑风荷载组合研究[J].建筑结构学报,2020,41(2):83-91.
- PAN Xiaowang, ZOU Lianghao, LIANG Shuguo, et al. Wind Load Combination Method for High-rise Buildings Based on Extreme-value Correlation[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(2): 83-91.
- [21] 吴玉程,金智新,包研科,等.基于关联度分析的炼焦煤稀有性研究[J].太原理工大学学报,2020,51(2):157-161.
- WU Yucheng, JIN Zhixin, BAO Yanke, et al. Study on the Rarity of Coking Coal Based on Correlation Analysis[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(2): 157-161.
- [22] 王亮,胡从亮,张嘉玮,等.贵州深部四级断裂构造特征及与重要矿产的关系[J].地质力学学报,2019,25(1):36-51.
- WANG Liang, HU Congliang, ZHANG Jiawei, et al. Correlation between the Structural Characteristics of the Deep Four-level Fault and the Important Mineral Deposits in Guizhou Province[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(1): 36-51.
- [23] 曾治平,刘震,马骥,等.深层致密砂岩储层可压裂性评价新方法[J].地质力学学报,2019,25(2):223-232.
- ZENG Zhiping, LIU Zhen, MA Ji, et al. A New Method for

Fracrability Evaluation in Deep and Tight Sandstone Reservoirs[J].Journal of Geomechanics,2019,25(2):223-232.

[24] 白丽丽,韩振南,任家骏,等.基于拉普拉斯分值和鲸鱼寻优 SVM 的滚动轴承故障诊断[J].太原理工大学学报,2019,50(6):829-834.

BAI Lili,HAN Zhennan,REN Jiajun,et al.Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Laplacian Score and Whale Optimization Algorithms Optimized SVM[J].Journal of Taiyuan University of Technology,2019,50(6):829-834.

[25] 李良荣,荣耀祖,顾平,等.基于 SVM 的车牌识别技术研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2018,35(5):48-54.

LI Liangrong,RONG Yaozu,GU Ping,et al.Research on the Technology of License Recognition Based on Support Vector Machine[J].Journal of Guizhou University (Natural Sciences),2018,35(5):48-54.

[26] 刘悦婷,孙伟刚,张发菊.一种新的近邻密度 SVM 不平衡数据集分类算法[J].贵州大学学报(自然科学版),2019,36(3):75-80.

LIU Yueting,SUN Weigang,ZHANG Faju.Imbalanced Dataset Classification Algorithm Based on NNDSVM[J].Journal of Guizhou University(Natural Sciences),2019,36(3):75-80.

[27] LIU Y,CHEN X,HAO J S,et al.Snow Cover Estimation from MODIS and Sentinel-1 SAR Data Using Machine Learning Algorithms in the Western Part of the Tianshan Mountains[J].Journal of Mountain Science,2020,17(4):884-897.

[28] ZHANG T Y,HAN L,ZHANG H,et al.GIS-based Landslide Susceptibility Mapping Using Hybrid Integration Approaches of Fractal Dimension with Index of Entropy and Support Vector Machine[J].Journal of Mountain Science,2019,16(6):1275-1288.

[29] PENG J,HAO D M,YANG L,et al.Evaluation of Electro-hysteresogram Measured from Different Gestational Weeks for Recognizing Preterm Delivery: a Preliminary Study Using Random Forest[J].Biocybernetics and Biomedical Engineering,2020,40(1):352-362.

(上接第 720 页)

[21] 邓起东,朱艾斓,高翔.再议走滑断裂与地震孕育和发生条件[J].地震地质,2014,36(3):562-573.

DENG Qidong,ZHU Ailan,GAO Xiang. Re-evaluation of Seismogenic and Occurrence Conditions of Large Earthquakes on Strike-slip Faults[J].Seismology and Geology,2014,36(3):562-573.

[22] 徐化超.青藏高原东北缘地区主要活动断裂带的运动学研究[D].北京:中国地震局地震预测研究所,2018.

XU Huachao.Kinematics Study of Main Active Fault Zones in the Northeastern Qinghai-tibet Plateau[D].Beijing:Institute of Earthquake Forecasting,CEA,2018.

[23] 张培震,邓起东,张国民,等.中国大陆的强震活动与活动地块[J].中国科学(D辑:地球科学),2003,33(增刊 1):12-20.