

文物裂隙趋势预测模型研究

张小红^{1,2},王慧琴³,马涛^{4,5},王展^{4,5},史蕊⁶

(1. 西安建筑科技大学 管理学院,陕西西安 710055; 2. 西安科技大学 通信与信息工程学院,陕西西安 710054;
3. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院,陕西西安 710055; 4. 陕西省文物保护研究院,陕西西安 710075;
5. 砖石质文物保护国家文物局重点科研基地,陕西西安 710075; 6. 福州大学 经济与管理学院,福建福州 350116)

摘要: 露天不可移动文物常年遭受风化侵蚀和人为破坏,保存环境十分恶劣,掌握文物健康状况并进行趋势预测,是“预防性”文物保护工作的重要内容。文物健康监测数据具有不确定性和贫信息性,传统概率统计方法和模糊数学方法不能满足预测要求。针对文物裂隙数据的特点,以陕西唐顺陵天禄石刻为研究对象,提出了采用灰色系统理论来预测文物裂隙发展趋势,建立了裂隙 GM((1,1)模型和 Verhulst 模型,分别确定了灰色模型的灰色作用量和发展系数,并且对唐顺陵石刻文物的裂隙进行了预测。实验用前 12 个月的裂隙月均值,对随后的 7 个月的裂隙进行了定量预测,发现天禄石刻的裂隙有缓慢增大的趋势。与同期真实裂隙监测值相比,GM((1,1)模型和 Verhulst 模型预测值的平均相对误差满足裂隙预测精度要求。研究结果为文物健康趋势研究提供了定量分析的理论依据。

关键词: 文物预防性保护;裂隙;文物健康监测;灰色模型;裂隙预测

中图分类号: K878,G312 **文献标识码:** A

0 引言

中国文物资源丰富。不可移动文物保存环境恶劣,常年面临风吹日晒、地震、洪水、人为毁盗等,文物健康状况甚是堪忧。文化遗产健康监测和预防性保护方法研究已经成为文物保护工作的核心。

传统文物保护监测工作主要是以离线监测、人工巡检、数据存储为主,劳动强度大,维护成本高,数据处理难度大。近年来,无损监测技术尤其是文物物联网技术已经成为文物预防性保护的必要手段。物联网技术广泛应用到了文物本体^[2]、病害^[3]和保存环境^[4-5]等文物健康监测的多个领域,采集了大量的文物监测数据。

文物健康保护与管理可以视为一种风险管理。对文物面临风险进行识别、评估,以及对风险预防与控制,从而实现低成本、高效率的保护与管理文化遗产,是预防性保护的思想和理念的充分体现^[6]。上海博物馆吴来明^[7]认为,文物健康状态的评估和预测对文物保护研究有着重要的意义,如今已经成为文物保护工作的热点和难点。

国内外很多学者也已经开始了对文物健康管

理^[8]与风险预测^[9,10]方面的研究工作,并取得了一些成果。在文物保存环境评价方面,文献[11]建立了携带污染颗粒物的石窟空气流通模型,并在云冈石窟 6 号和 9 号石窟测得了温度和空气交换率,得出了温度与空气交换率对石窟风化影响关系。文献[12]对照统计学与当地的环境,使用英国气候计划 UKCP09 进行气候建模进行评估,得出了环境变化因素与岩石恶化最为相关的结论。文献[13]分析了污染颗粒对云冈石窟石质文物风化的影响。在文物病害预测方面,胡振瀛^[14]等根据土力学理论块体的滑移和倾倒破坏的条件,分析了大足石刻的稳定性。杜建国^[15]通过数值仿真的方法确定文物最大响应位置及其与测点位置响应之间的关系,构建测试点与预测点之间的传递函数,并利用现场布置的有限测点所获得的振动信号来预测壁画结构的最大振动响应。马宏林^[16]采用超声 CT 检测技术,对乾陵石刻内部裂隙发育进行了检测。也有一些学者开始通过分析传感器采集的数据进行病害评估和预测,徐方圆^[17]提出了“温湿度合格率”、“温湿度分布图”温湿度波动指数,对文物保存环境中长期温湿度的评估方法进行了探讨;方云^[18]分析了石雕裂

收稿日期:2016-01-13;修回日期:2016-03-08
基金项目:国家科技支撑计划课题资助(2012BAK14B01),高等学校博士学科点专项科研项目资助(20126120110008),国家教育部归国留学人员科技支撑项目资助(K05055),西安市碑林区科技计划项目资助(GX1614)
作者简介:张小红(1978—),女,讲师,西安建筑科技大学,博士生,研究方向为物联网应用与数据分析,E-mail: 447973560@qq.com

隙及裂隙两侧岩体的变形特点、变形趋势;李超^[19]对唐顺陵石刻文物本体及保存环境监测数据的梳理、分析和评估,定性研究了石刻裂隙、不均匀沉降与保存环境之间的关系关联。总之,传统文物健康分析方法设备昂贵,操作不方便,对文物有一定损伤。在文物无损监测处理方面,缺乏文物病害数据的有效分析方法,虽然进行了初步的整理,但还不能发现文物病害数据的规律性,从监测数据中还不能读出文物病害发展趋势和下一步的数值范围,需要进一步的进行量化分析。

因此,本工作在分析文物裂隙病害数据的不确定性基础之上,借助灰色系统理论,建立文物裂隙的GM((1,1)预测模型和 Verhulst 预测模型,对文物裂隙的发展趋势进行了预测,并以陕西唐陵石刻的监测数据加以验证,为文物健康风险预测提供一定的理论依据。

1 裂隙采集

1.1 唐顺陵石刻

唐顺陵位于陕西省咸阳市渭城区底张乡陈马村南,此陵乃武则天之母杨氏之墓,建于 670 年。691 年,武则天称帝改唐为周,追封其母为孝明皇后,自此改称为陵^[15]。唐顺陵外城南门的天禄东石雕为研究对象,如图 1 所示。



图 1 陕西唐顺陵东天禄石刻

Fig. 1 Shaanxi Tang Shunling Dong Tian Lu stone

1.2 裂隙监测仪器及数据采集方法

裂隙监测工作与文物本体、环境监测一起进行,具体传感器布置如图 2 所示。其中,传感器节点 28-159 至 28-162 以及 28-169 至 28-172 共 8 个应变片用来采集天禄头部和尾部的裂隙;采集应变片采集精度为 0.00001mm,设定仪器的测量间隔为 10min。采集时间从 2012 年开始持续至今,数据通过无线传输到数据库服务器进行存储数据如图 3 所示。

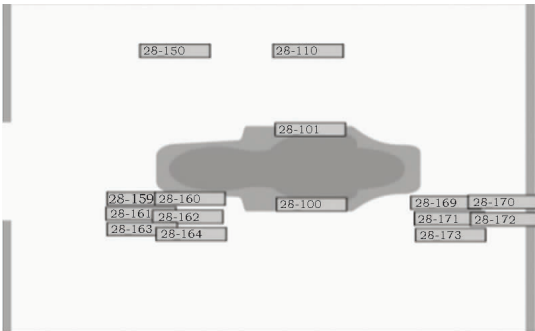


图 2 东天禄传感器布置图

Fig. 2 Sensors layout Dong Tian Lu

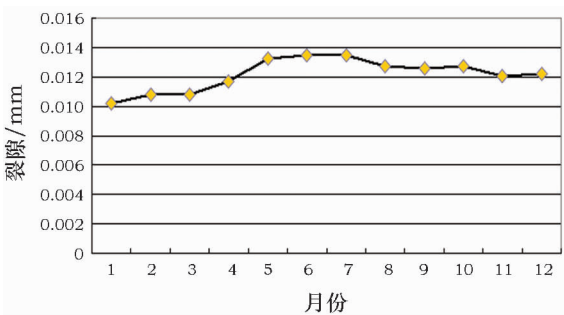


图 3 文物裂隙监测值

Fig. 3 Monitoring value of the cultural relics

数据研究对象为 2013 年 1 ~ 12 月份 28 ~ 170 节点 X 方向裂隙的月平均值(表 1)。

2 文物裂隙预测方法选择

文物裂隙数据具有不确定性、贫信息性和趋势性。首先,从图 3 可以看出,文物裂隙是时间的非线性函数,裂隙量随着时间的推移,发生不确定的变化。因此,不能用简单的模型进行拟合预测。其次,文物裂隙数据存在“大数据、贫信息”的特点,表面看来,文物裂隙采样周期为 10min,如今采集的样本量确实很大,但是数据采集时间相对于上千的文物年龄,数据样本量又相对较少,属于贫信息数据。最后,裂隙数据发展虽然具有不确定性,但是也有一定的规律可循。总起来说,数据绝对值在缓慢变大,并且增长速度趋于缓和。

学者们用来进行预测的方法主要包括概率统计方法、模糊数学方法和灰色系统理论。概率统计方法的前提是大数据量,并且数据遵循一定的概率分布,而文物监测数据量相对较小,不能代表整个文物的整体发展,也不能确定其遵循的分布模型。因此,概率统计方法在文物健康预测方面不太适用。模糊数学主要研究定性问题,而裂隙预测主要是在定性分析基础上进行定量预测,更多的是定量研究。因

此,模糊数学在定量预测方面也存在限制。文物裂隙预测属于“外延明确,内涵不明确的”的研究问题,灰色系统理论着重研究概率统计、模糊数学难以解决的“小样本”、“贫信息”的不确定问题,尽管客观系统表象复杂,数据离乱,但它总是有整体功能,必然蕴含某种内在规律。

灰色系统理论以“部分信息已知、部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定型系统为研究对象。灰色系统可以依据信息通过序列算子的作用探索实物运动的现实规律,实现“小数据建模”,寻找不同系统变量之间或某些系统自身的数学关系与变化规律^[20]。

表 1 2013 年裂隙月均值
Table 1 Crack mean in 2013

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
X 方向裂隙/mm	0.01017	0.01077	0.01077	0.01170	0.01326	0.01346
月份	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
X 方向裂隙/mm	0.01349	0.01269	0.01260	0.01275	0.01209	0.01220

3 灰色裂隙预测模型

灰色系统理论把只知道取值范围而不知其确切值的数成为灰数。

灰色系统将看似没有规律的裂隙原始序列转化成为递增的 $X^{(1)}$ 序列,数据的规律性变强,随机性变弱,更便于计算数据的规律。然后通过构建灰色微分方程和白化方程,对方程的参数进行最小二乘估计,即可求解 $X^{(1)}$,经过累减计算,即可得出所要估计的值。

定义 1 设序列
 $X^{(1)} = (x(1), x(2), \dots, x(k), x(k+1), \dots, x(n)), x(k)$ 与 $x(k+1)$ 为 X 的一对紧邻值^[21]。

定义 2 设 $X^{(0)}$ 为原始序列,对 $X^{(0)}$ 中的每个元素进行运算,若为

$$x^{(0)}(k)d = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k=1,2,\dots,n, \quad (1)$$

则为 $X^{(0)}$ 的一次累加生成算子,记为 1-AGO。若为

$$x^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - x^{(0)}(k-1), k=1,2,\dots,n \quad (2)$$

则为累减操作,记为 1-IAGO。

定义 3 设序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, 则
 $x^*(k) = 0.5x(k) + 0.5x(k-1) \quad (3)$

则 $x^*(k)$ 为紧邻均值生成数。由紧邻均值生成数构成的序列称为紧邻均值生成序列。

3.1 灰色 GM(1,1) 裂隙模型

设裂隙数据序列:
 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), X^{(0)}$ 序列数据按式(1)进行 1-AGO 运算后记为
 $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ 。

令 $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 按式(3)的紧邻均值(MEAN)生成序列 $Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$, 其中,

将原始裂隙数据与其紧邻均值之间建立裂隙 GM(1,1)灰色微分方程:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$$

式中,参数 $-a$ 为发展系数, b 为灰色作用量。GM(1,1)灰色微分方程的时间响应序列为:

$x^{(0)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}$ 。然后根据定义 3, 将 AGO 序列进行还原, 如(4)式所示, 即可得到原始裂隙序列的估计值:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (4)$$

其中,式(3)和(4)中 $k=1,2,\dots,n$

3.2 灰色 Verhulst 裂隙模型

在实际问题中,常遇到原始数据本身呈现 S 的过程^[17],变化率逐渐减小趋近于 0。Verhulst 模型是单变量二阶微分方程,用来拟合饱和型的数列。Verhulst 直接应用原始序列,即把原始序列作为了 $X^{(0)}$,按照式(2)计算其 1-IAGO 序列为 $X^{(1)}$,直接对 $X^{(1)}$ 进行模拟预测。

利用原始序列和紧邻生成序列建立裂隙灰色 Verhulst 模型方程:

$$x^{(1)}(k) + az^{(1)}(k) = b(z^{(1)}(k))^2$$

式中,发展系数 a 和灰色作用量 b 的值采用最小二乘法计算,即

$$\hat{a} = (a, b)^T = (B^TB)^{-1}B^TY$$

式中,

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^2 \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & (z^{(1)}(n))^2 \end{bmatrix}$$

灰色 Verhulst 裂隙预测模型的时间响应式为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{ax^{(1)}(0)}{bx^{(1)}(0) - (a - bx^{(1)}(0))e^{-ak}},$$

$k=1,2,\cdots,n$

3.3 灰色裂隙模型预测

3.3.1 GM((1,1) 裂隙预测 如表 1 所示,设 $X^{(0)}$ 为原始裂隙数值序列: $X^{(0)}=(0.01077,0.01077,0.0117,0.01326,0.1346,0.01349,0.01269,0.0126,0.01275,0.01209,0.01220)$ 。

用最小二乘法确定发展系数 $a=-0.0095$,灰色作用量 $b=0.0117$ 。建立的灰色裂隙微分方程:

$$x^{(0)}(k)-0.0095z^{(1)}(k)=0.0117$$

该微分方程的解即位微分方程的时间相应式为:

$$x^{(0)}(k+1)=0.0117e^{0.0095k}$$

根据建立的 GM(1,1) 模型预测式,对 28-170 X 方向 2013 年 1~12 月裂隙月均值的模拟拟合值为 (0.01177,0.01188,0.01199,0.01211,0.01222,0.01234,0.01245,0.01257,0.01269,0.01281,0.01293)。GM(1,1)模型预测第 13~19 个月的裂隙序列值为: $\hat{X}^{(1)}=(0.01306,0.01318,0.01331,0.01343,0.01356,0.01369,0.01382)$,具体如表 2 所示。

3.3.2 灰色 Verhulst 裂隙预测 Verhulst 模型发展系数和灰色作用量的计算由最小二乘法计算得: $a=-0.2624,b=-19.3446$ 。由此裂隙时间序列建立的灰色 Verhulst 微分方程为:

$$x^{(1)}(k)+(-0.2624)z^{(1)}(k)=-19.3446(z^{(1)}(k))^2$$

该灰色 Verhulst 微分方程对应的响应时间函数为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=\frac{-0.002624}{-0.200489-0.057483e^{-0.257972k}}$$

根据建立的 Verhulst 模型预测式,对表 1 中的裂隙值计算模拟拟合值为 (0.01017,0.01072,0.01118,0.01156,0.01188,0.01213,0.01234,0.0125,0.01263,0.01273,0.01281)。根据表 1 中的第 1~12 月的原始裂隙数据和 Verhulst 微分方程响应时间函数,预测出第 13~19 月的裂隙为 $\hat{X}^{(2)}=(0.01287,0.01292,0.01296,0.01299,0.01301,$

$0.01303,0.01304)$,具体如表 2 所示。

3.4 文物裂隙预测精确度检验

对于一个具体的研究对象,究竟选择哪一种模型进行预测并不是一成不变的,需要对预测模型进行检验才能判断其是否满足要求。

根据灰色模型求得原始序列对应的模拟(预测)序列为: $\hat{X}^{(1)}=(\hat{x}^{(1)}(1),\hat{x}^{(1)}(2),\cdots,\hat{x}^{(1)}(n))$ 。按式残差 $\varepsilon(k)=\hat{x}^{(0)}(k)-x^{(0)}(k),k\in[1,n]$ 构成残差序列: $\varepsilon^{(0)}=(\varepsilon(1),\varepsilon(2),\cdots,\varepsilon(n))$ 。

检验预测准确度的方法还可以计算相对误差:

$$\nabla_k=\frac{|\varepsilon(k)|}{x^{(0)}(k)},k=1,2,\cdots,n,$$
 预测的相对误差如

表 2 所示。

整个预测序列的平均相对误差为:

$$\bar{\Delta}=\frac{1}{n-1}\sum_{k=2}^n\nabla_k。$$
 经过计算,GM(1,1)模型裂隙预测模型和灰色 Verhulst 裂隙预测的相对平均误差为 6.23% 和 4.40%

由裂隙预测误差分析(表 2)可以看出:两种方法在中长期内预测都是有效的,平均相对误差都在 10% 以下,能够满足预测精度要求。从图 4 也可以看出,在总体趋势预测方面,Verhulst 模型整体拟合效果较 GM((1,1)模型好。

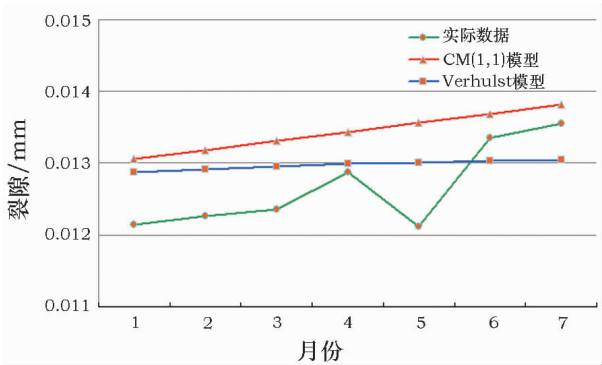


图 4 裂隙预测与实测量值比较

Fig.4 Comparison of crack value predicted and measured

表 2 裂隙预测误差检验表

Table 2 Crack prediction error test table

序号	实际数据 /mm	GM((1,1)模型			Verhulst 模型		
		预测数据/mm	残差/mm	相对误差	预测数据/mm	残差/mm	相对误差/%
13	0.012145	0.01306	0.000915	7.53%	0.01287	0.000725	5.97
14	0.012259	0.01318	0.000921	7.51%	0.01292	0.000661	5.39
15	0.012354	0.01331	0.000956	7.74%	0.01296	0.000606	4.91
16	0.012869	0.01343	0.000561	4.36%	0.01299	0.000121	0.94
17	0.012111	0.01356	0.001449	11.96%	0.01301	0.000899	7.42

(续表 2)

序号	实际数据 /mm	GM((1,1)模型			Verhulst 模型		
		预测数据/mm	残差/mm	相对误差	预测数据/mm	残差/mm	相对误差/%
18	0.013346	0.01369	0.000344	2.58%	0.01303	-0.00032	2.40
19	0.013554	0.01382	0.000266	1.96%	0.01304	-0.000514	3.79
平均相对误差		6.23%			4.40 %		

4 东天禄石刻裂隙发展趋势分析

图 5 是灰色裂隙预测模型在前 12 个月的模拟结果和后 7 个月的预测结果。可以看出,裂隙 GM(1,1)预测模型和 Verhulst 预测模型可以预测裂隙的发展趋势。从图 5 裂隙原始值可以看出,唐顺陵东天禄裂隙总体来说较为稳定,但有上下起伏的不确定性。从 Verhulst 裂隙预测模型预测结果来看,东天禄确实在情况较为稳定,但总体呈增大趋势,并且裂隙序列变化曲线斜率有减小的趋势,也就是说,每月裂隙相对增幅量在减少。经计算,预测每月平均增长幅度不超过 1%。这正好可以证明,采用灰色模型进行裂隙预测是可行的,也满足了裂隙趋势的要求。

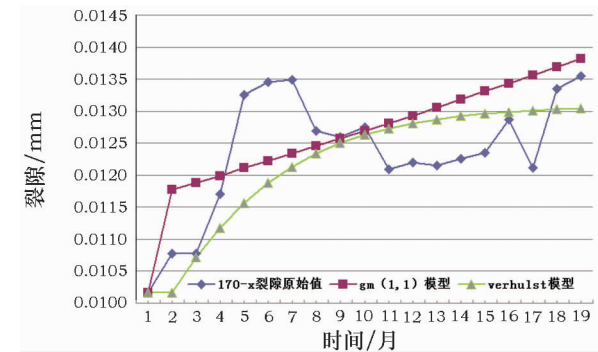


图 5 东天禄裂隙趋势预测分析

Fig.5 Trend analysis of crack predication

为了更清楚地说明问题,作者就其他监测节点的裂隙监测值进行了统计,结果如图 6 所示。图中是多个裂隙监测节点从 2013 年 1 月至 2014 年 5 月监测结果的月均值统计结果。

通过实验验证,每个节点采用 Verhulst 模型进行预测时的误差均在 10% 以下,具体见表 3,完全满足裂隙预测的要求,也能表明可以预测各个节点裂隙的发展趋势。

表 3 各节点裂隙预测精度

Table 3 Prediction accuracy of nodes

节点编号	159-x	159-z	169-x	169-y	171-z
Verhulst 模型预测精度	6.44%	4.56%	6.3%	3.75%	4.39%

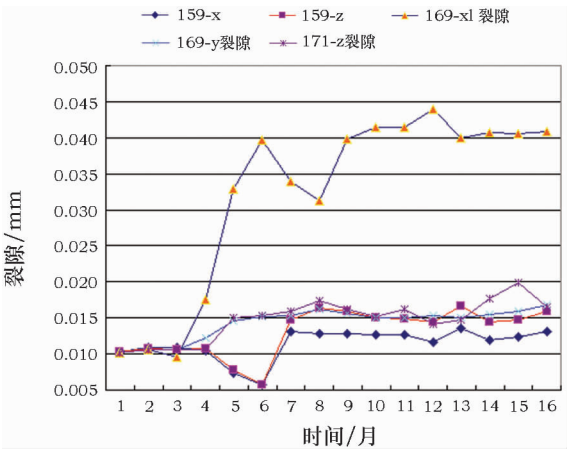


图 6 唐顺陵东天禄石刻裂隙统计

Fig.6 Tang Shunling Dong Tianlu stone crack statistics

5 结 论

本工作基于物联网技术的文物健康分析出发,以中国陕西唐顺陵东天禄裂隙数据为对象,构建了文物裂隙的灰色 GM(1,1)模型和 Verhulst 模型,并进行了预测并加以检验分析。本工作通过前 1~12 个月的裂隙数据建立了裂隙灰色预测模型,对后第 13~19 个月的数据进行中长期预测,收到了良好的预测效果,尤其是裂隙 Verhulst 预测模型误差要小,效果更好。

需要注意的是,该节点 X 方向裂隙实测值在第 14~15 个月上升较快,两种预测方法都没有反映出数据的反复性与复杂性。因此,课题组下一步工作就是采用智能算法进行先验知识学习,将多个预测值进行学习后的结果进行灰色预测,从而提高预测的准确度。

参考文献:

[1] 马 涛,和 玲,Simon. 超声波技术在大佛寺石窟石质保护中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 1997,9(2):33-39.
MA Tao, HE Lin, Simon. The application of ultrasonie measurements in the conservation of sanelstone at Dafosi grotto[J]. Sci Consev Archaeol, 1997,9(2):33-39.

[2] Luo L. Integrated RS, GIS and GPS approaches to archaeological prospecting in the Hexi Corridor, NW China: a case study of the royal road to ancient Dunhuang[J]. J Archaeol Sci, 2014,50:178-

- 190.
- [3] 付莹,陈晓江,邢天璋,等. 基于云模型的土遗址形变判定[J]. 计算机研究与发展,2010,S2:251-255.
FU Ying, CHEN Xiao-jiang, XING Tian-zhang, *et al.* The Judgment of heritage deformation based on cloud model[J]. J Computer Research Development, 2010, S2:251-255.
- [4] Kay Smarsly, Kincho H. Law. A migration-based approach towards resource-efficient wireless structural health monitoring[J]. Advanced Engineering Informatics, 2013, (27):625-635.
- [5] 陈晓江,房鼎益,张谦,等. PDHP:一个适于土遗址微环境监测的WSN路由协议[J]. 计算机研究与发展,2011,S2:223-230.
CHEN Xiao-jiang, Fang Ding-yi, Zhang Qian, *et al.* DHP: An efficient WSN routing protocol used in the micro-environment monitoring for the protection of solid relics[J]. J Computer Research Development, 2011, S2:223-230.
- [6] 戴俭,刘科. 基于传统木构建筑健康安全监测与全信息采集——利用的物联网技术需求的思考[J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(3):39-47.
DAI Jian, LIU Ke. IOT technology based on the safety monitoring and information collection and utilization of traditional wooden construction[J]. Sci Consev Archaeol, 2011, 23(3):39-47.
- [7] 吴来明,徐方圆,黄河,等. 博物馆环境监控及相关物联网技术应用需求分析[J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(3):96-102.
WU Lai-ming, XU Fang-yuan, HUANG He, *et al.* The demand analysis of museum environment monitoring and the application of Internet of Things[J]. Sci Consev Archaeol, 2011, 23(3):96-102.
- [8] 孙满利. 土遗址病害的评估体系研究[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(8):27-32.
SUN Man-li. A system for evaluating the deterioration of earthen sites[J]. Sci Consev Archaeol, 2012, 24(8):27-32.
- [9] 张其林. 大型建筑结构健康监测和基于监测的性态研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(12):68-77.
ZHANG Qi-lin. Health monitoring system and monitoring-based performance study on large scale building structures[J]. Building Structure, 2011, 41(12):68-77.
- [10] 王明明,文琴琴,张月超. 基于风险管理理论的文化遗址监测研究[J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(3):1-5.
WANG Ming-ming, WEN Qin-qin, ZHANG Yue-chao. Monitoring for cultural heritage based on risk management[J]. Sci Consev Archaeol, 2011, 23(3):1-5.
- [11] C. S. Christoforou, L. G. Salmon, G. R. Cass. Air exchange within the Buddhist cave temples at YunGang[J]. China Atmospheric Enuronmen, 2006, 30(23):3995-406.
- [12] MyraJ. Giesenatl. Condition assessment and preservation of open-air rock art panels during environmental change[J]. J Cult Heritage, 2014(15):49-56.
- [13] Salmon G, Chrstoforou C S, Cass G R. Airborne pollutants in the buddhist cave temples at the Yungang grottoes, China[J]. Environmental Science Technology, 2004, (28):805-811.
- [14] 胡振瀛,范幸义,朱作荣,等. 大足石刻保护岩体稳定性预测研究[J]. 地下空间, 1995, 04:267-276+316.
HU Zhen-ying, FAN Xing-yi, ZHU Zuo-rong, *et al.* A Study on predietion of rock stability for protection of Dazu Grott[J]. Underground space, 1995, 04:267-276+316.
- [15] 杜建国,李利莎,贺永胜,等. 敦煌莫高窟壁画结构振动响应预测方法[J]. 建筑结构, 2015, 19:62-66.
DU Jian-guo, LI li-sha, HE Yong-sheng, *et al.* Predication method for vibration responses of wall-paintings of Mogao grottoes at Dunhuang[J]. Buliding Structure, 2015, 19:62-66.
- [16] 马宏林. 超声CT技术在乾陵石刻风化状况调查中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2015, 27(S1):64-70.
MA Hong-lin. The use of CT scanning to survey the condition of stone sculptures at Qianling Mausoleum[J]. Sci Consev Archaeol, 2015, 27(S1):64-70.
- [17] 徐方圆,吴来明,解玉林,等. 文物保存环境中温湿度评估方法研究[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(S1):6-12.
XU Fang-yuan, WU Lai-ming, XIE Yu-lin, *et al.* Study of methods for temperature and humidity evaluation in museum environments[J]. Sci Consev Archaeol, 2012, 24(S1):6-12.
- [18] 方云,董庆贺. 唐顺陵天禄石雕变形监测及分析[J]. 安全与环境工程, 2014, 05:174-180.
FANG Yun, DONG Qing-he. Monitoring and analysis of the deformation of Tianlu stone carving in Tangshun tomb[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 05:174-180.
- [19] 李超. 唐顺陵石刻本体状况与保存环境的监测评估[D]. 西北大学, 2014.
LI Chao. Monitoring and evaluation the sculptures relic damage situation and reservation environment in Shun Imperial Tomb[D]. Northwest University, 2014.
- [20] 刘思峰,党耀国,方志耕,等. 灰色系统理论及其应用(第五版)[M]. 北京:科学出版社, 2010:5.
LIU Si-feng, DANG Yao-guo, FANG Zhi-geng, *et al.* Grey system theory and application[M]. Beijing: China Science Publishing & Medin Ltd, 2010:5.
- [21] 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 02:267-272.
LIU Si-feng. Emergence and development of grey system theory and its forward trends[J]. J Nanjing University Aeronautics Astronautics, 2004, 02:267-272.

Study on crack prediction models for cultural relics

ZHANG Xiao – hong^{1,2}, WANG Hui – qin³, MA Tao^{4,5}, WANG Zhan^{4,5}, SHI Rui⁶

- (1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
- 2. School of Communication & Information Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;
- 3. School of Information & Control Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;
- 4. Shaanxi Institute of Heritage Conversation and Restoration, Xi'an 710075, China;
- 5. Masonry Quality State Administration of Cultural Heritage, Xi'an 710075, China;
- 6. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Perennially suffering from weathering erosion and man – made damage, open – air immovable cultural relics face severe problems. Present condition based trend prediction is part of the "preventive" protection concept. However, sometimes, because of uncertainty in the prediction method, little useful information is obtained. Traditional statistical probability methods and fuzzy comprehensive evaluations are not suitable for making prediction models. We used the Tang Dynasty Shunling Tianlu stone carvings in Shaanxi as examples for predicting fracture damage based on grey system theory. Two models, the GM(1,1) and the Verhulst models of settlement are presented. The grey coefficient and the development coefficient are calculated by ordinary least squares. Experimental results show that the average predicted relative errors for the two models are 6.23% and 4.40%, respectively, and meet the expectations of crack prediction accuracy. This research provides a quantitative basis for assessing the health of relics and for guiding future research.

Key words: Cultural relic preventive conservation; Crack; Relic health management; Grey model; Crack predication

(责任编辑 潘小伦)