

基于模糊相似优先的古城墙砖修复范例推理方法

钱 威, 王子毅, 王 威

(北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 针对古城墙病害问题, 利用三维激光扫描技术获取北方某古城墙段的点云图, 对比实际的古城墙残损状况, 计算出该古城墙修缮的需砖量。而为判断该古城墙砖的产地来源, 首先, 利用 X 射线荧光分析仪对古城墙砖和已知产地的砖块样品进行材料成分检测; 其次, 根据模糊相似优先的概念, 探索性地提出基于模糊相似优先的古城墙砖修复范例推理方法, 对砖的各个化学成分分别建立起目标范例与源范例间的模糊相似优先关系, 并确定各个化学成分的权重, 获得古城墙砖目标范例与源范例间的综合相似性序列, 最终找出与古城墙砖的目标范例最相似的源范例。实例分析表明该方法能够快速准确地判断出古城墙砖的源产地, 可以为古城墙的修复提供一种新的思路。

关键词: 三维激光扫描; 范例推理; 模糊相似优先; 古城墙砖

中图分类号: TU362

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)03-0358-08

Case-based reasoning method for ancient city wall bricks reinforcement based on fuzzy similarity priority

QIAN Wei, WANG Ziyi, WANG Wei

(Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In view of diseases of the ancient city wall, the 3D laser scanning technology was used to obtain the point cloud map of the ancient city wall. The damage area of the ancient city wall brick was obtained and the amount of bricks needed to be repaired was calculated. To judge the origin of ancient wall bricks, X-ray fluorescence analyzer was used to detect the material composition of the ancient city wall bricks and brick samples of the known origin. Based on the concept of fuzzy similarity priority, a case-based reasoning method for restoration of ancient city wall is proposed. Then, the fuzzy similarity priority relationship between the target paradigm and the source paradigm of the ancient city wall brick is established for each component of the ancient city wall brick. After determining the weight distribution of the chemical constituents, a comprehensive sequence of similarities between the target examples of the wall tiles and the source paradigm is acquired, ultimately finding a source example of the ancient wall tiles that are most similar to the target examples of the ancient wall tiles. The example shows that this method can quickly and accurately determine the origin of ancient city wall bricks.

Key words: 3D laser scanning; case-based reasoning; fuzzy similarity priority; ancient city wall brick

中国作为一个历史悠久的国家, 在 5000 多年的城池构建中留下了众多文物古迹。古城墙作为古代人民汗水和智慧的结晶, 有着很高的历史价值、艺术价值和科学价值^[1]。由于大多数的古城墙是裸露在外的, 长时间的风、雨和温差等自然环境的侵蚀致使古城墙墙面易出现泛碱、微生物衍生、砖块缺失、裂缝、表层剥落等病害^[2-3]。这些古城墙因年久失修或人类活动造成的破坏, 亟待修缮^[4]。

近年来, 对古城墙的保护工作也取得了很大的进展。吴超英等学者归纳总结了古城墙 11 种典型的破坏模式, 并提出了具体的防护措施^[5]。Chen 对若干古城墙的破坏模式进行了识别和分类,

并针对不同的破坏模式提出了具体的保护建议^[6]。马勇以大同古城墙为例, 针对其结构破坏情况提出了对应的结构修复方案及补强措施^[7]。朱才辉等学者通过大量调研, 将城墙病害分为微弱、轻度、中度和重度四个等级; 并基于数值方法、模糊数学理论和层次分析法提出了古城墙病害等级评价模型^[8]。白禹等学者参照石质文物病害分类标准, 提出了古砖病害的具体分类体系^[9]。Fan 提出了古砖表面风化时的四种典型形态, 基于热力学数据研究古砖的风化机理^[10]。Mesquita 利用超声波间接测量古老砖石结构建筑墙体的无损特征, 为古墙维护和改造提供有用的信息^[11]。Lopez-Arce 确

收稿日期: 2020-01-03

修改稿日期: 2020-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678005); 北京市自然科学基金项目(8182008); 北京市教委—市自然科学基金联合资助项目(KZ202010005012)

第一作者: 钱 威(1977—), 男, 副教授, 主要从事遗产保护技术方面的研究。E-mail: qianwei@bjut.edu.cn

通信作者: 王 威(1981—), 男, 副研究员, 主要研究城市与工程防灾减灾, 古建筑安全评价等。E-mail: iceww@bjut.edu.cn

定了西班牙托莱多地区一些历史建筑的砖块的风化类型, 帮助选择适当的方法来清洁或修复建筑遗产中古砖建筑^[12]。另有学者采用探底雷达^[13-14]、面波技术^[15]、三维激光扫描技术^[16-17]等无损检测技术对古城墙残损进行检测。

而在对古城墙的修缮过程中, 我们应遵循着“修旧如旧”的原则^[18], 才能最大限度地保持和还原古城墙的原真性。同时, 在古城城墙砖材料选择时应遵循“原产地、原材料、原工艺”的原则, 避免以假乱真。然而, 那些明确产地的古城墙砖早已难觅踪迹^[19]。然而, 不同产地的墙砖材料可能采用不同的原料或配方, 其化学组成亦会因其形成机理的不同而改变^[20]。鉴于此, 本文选取北方地区某古城墙约 200m 的城墙段作为研究对象, 对其进行了全面实地的调查。为更准确地完成对城墙墙体的病害勘察, 使用三维激光扫描仪对该古城墙段进行扫描, 以此来获取该城墙段的点云

数据以及较为完整精确的几何信息; 并随机选取该城墙段 2 块古砖和已知产地的 16 块古砖样品进行化学成分检测。最后, 基于检测数据, 提出基于模糊相似优先^[21-23]的古城墙砖修复范例推理方法, 以此来判断与该城墙古砖化学成分最为相近的砖, 这可以为古城墙修缮提供科学的依据。

1 北方某古城墙残损调查

1.1 病害勘察

调研发现由于历史的原因和城镇建设的发展, 该城墙段现存的城墙段部分损坏, 墙体面层砖酥碱、风化、离鼓较为严重, 离鼓区域存在相对鼓胀情况, 最大鼓胀量可达 20 cm; 侧墙上存在多条垂直裂缝, 侧墙上多处砌体因灰浆流失而松散、缺失; 城墙侧面有草木或藤本植物等生物病害; 墙体表面有人工干预痕迹, 疑似抹灰层(图 1)。

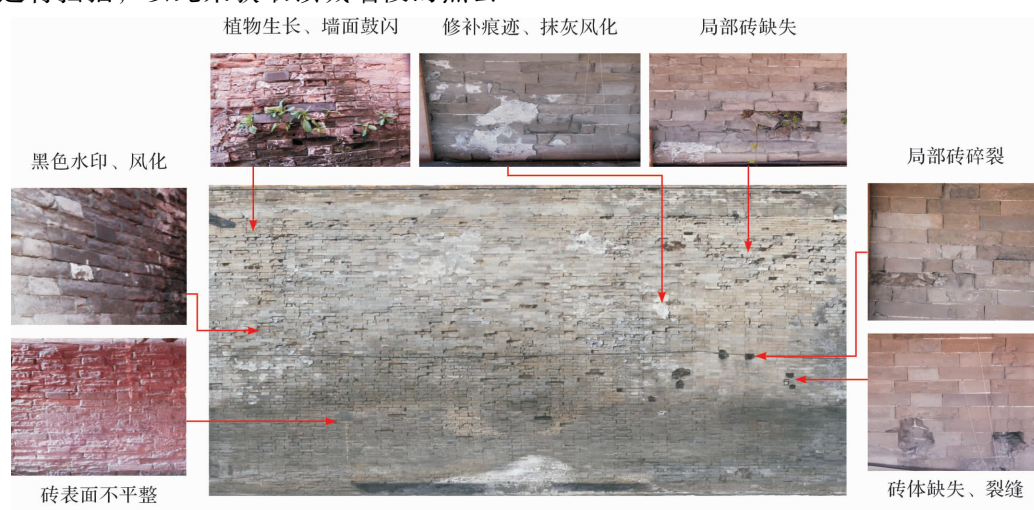


图 1 城墙病害分布图

Fig. 1 Disease distribution map of the city wall

1.2 三维激光扫描

与传统测绘方法相比, 三维激光扫描技术在不破坏古城墙现状的前提下, 不仅可以获得城墙高度密集的点云数据, 也能充分显示古城墙细节特征, 例如对城墙细微的沉降、开裂、酥碱、风化及鼓胀变形等城墙常见病害分析^[24]。因此, 本文尝试运用三维激光扫描技术获得该古城墙 200 m 段范围内的基础点云数据, 并找到城墙的病害部位, 利用 Geomagic Qualif 软件量取城墙的破损面积, 最后计算古城墙修缮所需的用砖量。经检测发现改古城墙有些地方破损严重, 需要对其进行修复。例如, 以该墙段 L1 位置为例, 其点云图如图 2(b)所示, 在 L1 路线上 2.8 m 处, 出现明显空鼓情况, 外鼓距离约为 16.5 cm。通过 Geomagic Qualif 软件计算该区域空鼓面积大约为 4.12 m², 而每一块砖 0.043 m², 故此处需要 96 块砖。

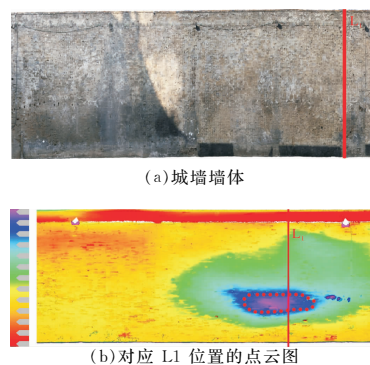


图 2 城墙病害勘察

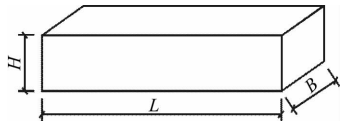
Fig. 2 A survey of the disease on the wall

2 材料成分

2.1 样品来源

随机选择 16 处明确产地的城墙砖和该城墙上 2 块砖(未知产地)作为检测对象, 对其进行化学成分检测, 样本相关参数详见表 1。

表 1 样品参数
Tab. 1 The sample parameters

编号	产地	土质状况	样品描述	样品尺寸
C ₁	河北任丘	黏土	深灰色	 L = 480 mm B = 240 mm H = 120 mm
C ₂	山东临清	原土	深灰色	
C ₃	河北任丘	黏土	深灰色	
C ₄	山东临清	白土	深灰色	
C ₅	山东临清	澄浆土	深灰色	
C ₆	山东曲阜	原土制砖	深灰色	
C ₇	山东临清	莲花土	深灰色	
C ₈	河北定兴	炼泥	深灰色	
C ₉	山东临清	澄浆泥	深灰色	
C ₁₀	河北定兴	黏土	深灰色	
C ₁₁	山东曲阜	过筛土	深灰色	
C ₁₂	山东曲阜	烧砖黏土	深灰色	
C ₁₃	山东临清	胶泥土	深灰色	
C ₁₄	河北定兴	黏土	深灰色	
C ₁₅	山东临清	红土	深灰色	
C ₁₆	河北定兴	黏土	深灰色	
C ₀₁	未知产地城墙砖	—	深灰色	
C ₀₂	未知产地城墙砖	—	深灰色	

2.2 样品成份组成分析

由于改古城墙砖样品无法直接满足相关分析测试的条件要求. 因此, 在分析之前, 对样品进行预处理(图 3). 首先, 清除砖样品表面的浮尘和黏结灰浆; 其次, 将城砖切割中掉下的残渣部分经锤击粗碎后, 使用玛瑙研钵将其研磨成均匀粉末状, 进行硼砂压片制样, 以用于成分结构与红外分析^[25-27]. 采用 Shimadzu XRF-1800 荧光光谱仪对砖样品中的主要元素进行定量分析, 数据采用氧化物的形式, 数据见表 2.

从表 2 中得知, 由于砖的化学组成成分众多,

主要含有 14 种氧化物成分, 即 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、MgO、K₂O、Na₂O、TiO₂、P₂O₅、MnO、SO₃、ZrO₂、SrO 和 Rb₂O. 由于这些成分之间存在高度的非线性, 单纯依靠理论计算或针对某一成分进行砖产地判断的方法值得商榷. 鉴于此, 本文提出基于模糊相似优先比的古城墙砖范例推理方法, 对影响砖产地判别的每个化学成分分别在目标范例与源范例间建立模糊相似优先关系, 得到不同化学成分下目标范例与源范例间的相似性序列, 找出与目标范例最相似的源范例, 最终实现城墙砖产地的预测.

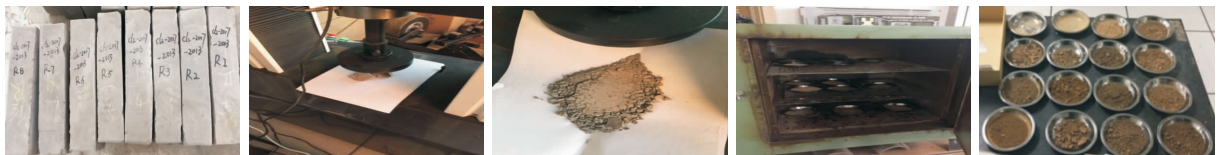


图 3 样品制备

Fig. 3 Sample preparation

表 2 古城墙砖氧化物种类及含量
Tab. 2 Type and content of oxide of ancient city wall brick

源范例 C_K	目标 范例 C_0	主要化学组成成分百分比/%													
		SiO ₂ b_1	Al ₂ O ₃ b_2	CaO b_3	Fe ₂ O ₃ b_4	MgO b_5	K ₂ O b_6	Na ₂ O b_7	TiO ₂ b_8	P ₂ O ₅ b_9	MnO b_{10}	SO ₃ b_{11}	ZrO ₂ b_{12}	SrO b_{13}	Rb ₂ O b_{14}
C_1		60.443	11.803	12.370	5.416	4.057	2.520	1.537	0.705	0.224	0.084	0.181	0.059	0.065	0.017
C_2		64.970	12.421	8.261	5.547	3.119	2.553	1.808	0.788	0.242	0.088	0.067	0.056	0.044	0.021
C_3		66.320	12.213	7.085	5.088	3.366	2.516	2.015	0.683	0.238	0.078	0.204	0.051	0.044	0.019
C_4		67.226	11.538	7.679	4.974	2.816	2.420	2.087	0.696	0.238	0.079	0.085	0.060	0.041	0.019
C_5		67.361	11.127	7.935	4.415	3.029	2.333	2.189	0.739	0.280	0.077	0.203	0.057	0.041	0.015
C_6		68.551	13.350	3.333	6.315	2.761	2.490	1.821	0.776	0.230	0.109	0.127	0.032	0.088	0.017
C_7		64.253	12.610	8.294	5.595	3.461	2.542	1.731	0.736	0.256	0.123	0.276	0.045	0.041	0.019
C_8		59.932	12.827	11.967	5.627	4.349	2.542	1.418	0.688	0.195	0.094	0.121	0.034	0.071	0.016
C_9		67.363	11.121	8.207	4.646	2.762	2.307	2.178	0.680	0.271	0.071	0.242	0.058	0.048	0.017
C_{10}		60.146	11.784	12.372	5.555	4.019	2.591	1.618	0.799	0.181	0.097	0.157	0.060	0.070	0.021
C_{11}		72.205	12.269	2.394	5.190	2.151	2.337	2.145	0.768	0.239	0.083	0.087	0.055	0.064	0.015
C_{12}		72.014	12.853	2.572	4.694	2.269	2.463	1.810	0.752	0.243	0.083	0.122	0.064	0.045	0.017
C_{13}		50.487	15.673	14.116	10.028	4.038	3.296	0.769	0.763	0.196	0.203	0.207	0.025	0.049	0.027
C_{14}		67.289	12.930	5.368	5.050	4.018	2.289	1.999	0.685	0.159	0.068	0.153	0.022	0.078	0.014
C_{15}		57.506	14.685	11.491	7.653	4.048	2.968	1.068	0.732	0.183	0.148	0.116	0.039	0.045	0.027
C_{16}		63.580	12.769	9.175	5.432	3.846	2.607	1.387	0.719	0.222	0.084	0.093	0.033	0.039	0.016
	C_{01}	62.164	13.307	8.864	5.863	4.011	2.605	1.964	0.725	0.209	0.104	0.064	0.041	0.043	0.021
	C_{02}	59.197	13.194	10.628	5.444	4.537	2.627	2.335	0.696	0.213	0.102	0.659	0.037	0.060	0.018

3 基于模糊相似优先的古城墙砖范例推理方法

3.1 古城墙砖的模糊相似优先关系^[28-29]

3.1.1 古城墙砖范例的表示

设 $B=B_1 \times B_2 \times \cdots \times B_j \times \cdots \times B_n$ 为一离散 n 维因素空间, $B_j(j=1, 2, \cdots, n)$ 为一实数有穷集合, 则古城墙砖范例可定义为 $C=(b_1, b_2, \cdots b_j, \cdots, b_n)$, $b_j \in B_j(j=1, 2, \cdots, n)$, b_j 为古城墙砖的第 j 个化学组成成分.

而古城墙砖源范例库表示为 $BC=\{C_1, C_2, \cdots, C_k, \cdots, C_K\}$, $C_k \in BC(k=1, 2, \cdots, K)$, C_k 为古城墙砖的第 k 个源范例. 城墙砖目标范例表示为 $C_0=(b_{01}, b_{02}, \cdots, b_{0j}, \cdots, b_{0n})$, $b_{0j}(j=1, 2, \cdots, n)$ 为古城墙砖目标范例的第 j 个化学成分.

3.1.2 化学组成成分之间的相似性度量

设 C_p 和 C_q 分别为源范例库 BC 中的第 p 个和第 q 个源范例, 且 $C_p \neq C_q(p, q=1, 2, \cdots, K)$, b_{pj} 和 b_{qj} 分别为源范例 C_p 和 C_q 的第 j 个化学成分, C_0 为城墙砖的目标范例, 则

$$\begin{aligned} C_p &= (b_{p1}, b_{p2}, \cdots, b_{pj}, \cdots, b_{pn}) \\ C_q &= (b_{q1}, b_{q2}, \cdots, b_{qj}, \cdots, b_{qn}) \\ C_0 &= (b_{01}, b_{02}, \cdots, b_{0j}, \cdots, b_{0n}) \end{aligned} \quad (1)$$

化学成分之间的相似性度量采用化学成分之间的语义距离来表示^[28]. 则源范例 C_p 第 j 个化学成分与目标范例 C_0 第 j 个化学成分间语义距离为

$$D(C_{pj}, C_{0j}) = |b_{pj} - b_{0j}| \quad (2)$$

源范例 C_q 第 j 个化学成分与目标范例 C_0 第 j 个化学成分间语义距离为

$$D(C_{qj}, C_{0j}) = |b_{qj} - b_{0j}| \quad (3)$$

当采用两范例间的语义距离表示其相似程度时, 当语义距离愈小, 两个化学成分就愈相似^[28].

3.1.3 模糊相似优先关系 $D(j)$ 的构造

设城墙砖源范例 C_p 和 C_q 的第 j 个化学成分分别是 C_{pj} 和 C_{qj} , 它们与 C_0 的第 j 个化学成分 C_{0j} 间语义距离分别是 $D(C_{pj}, C_{0j})$ 和 $D(C_{qj}, C_{0j})$, 则 C_p 的第 j 个化学成分 C_{pj} 比 C_q 的第 j 个化学成分 C_{qj} 与 C_{0j} 的模糊相似优先比定义为

$$D_{pq}^j = \frac{D(C_{qj}, C_{0j})}{D(C_{pj}, C_{0j}) + D(C_{qj}, C_{0j})} \quad (4)$$

式中, $D_{pq}^j \in [0, 1]$, 且 $D_{qp}^j = 1 - D_{pq}^j \in [0, 1]$.

D_{pq}^j 愈大, C_p 的第 j 个化学成分 C_{pj} 比 C_q 的第 j 个化学成分 C_{qj} 同 C_0 的第 j 个化学成分愈相似。

令 $p=1, q=2, 3, \dots, K$, 求得 $D_{12}^j, D_{13}^j, \dots, D_{1K}^j$; 令 $p=2, q=1, 3, \dots, K$, 求得 $D_{21}^j, D_{23}^j, \dots, D_{2K}^j$, 依次取 $p, q=1, 2, \dots, K$, 同时令 $p=q$ 时, 有 $D_{pq}^j=0$, 则

$$D(j) = \begin{bmatrix} 0 & D_{12}^j & \cdots & D_{1K}^j \\ D_{21}^j & 0 & \cdots & D_{2K}^j \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ D_{K1}^j & D_{K2}^j & \cdots & 0 \end{bmatrix} (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

该矩阵称为第 j 个化学成分的古城墙砖的模糊相似优先关系。依次取 $j=1, 2, \dots, n$, 求出对应于 n 个化学成分的模糊相似优先关系有 n 个。

3.2 基于模糊相似优先的古城墙砖范例检索模型

对于 $D(j)$ 取各 λ 截集, 可得 K 个城墙砖源范例第 j 个成分与目标范例 C_0 的相似程度序列。让 λ 由大到小, 分别检查 $D(j)$, 若第 p 行首先出现除对角线元素为 0 外, 其它元素皆为 1, 则认为 C_p 与 C_0 最相似, 划去 C_p 所在的行和列; 同样可得与 C_0 相似程度排第二的城墙砖源范例, 依次递推, 得到城墙砖源范例库中 K 个源范例与 C_0 相似程度序列^[29]。

假定: 与 C_0 最为相似的排在序列最前, 顺序号为 1; 与 C_0 最不相似的排在最后, 顺序号为 K 。则 K 个古城墙砖源范例的顺序号可组成如下序号集:

$$T_j = (t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{kj}, \dots, t_{Kj}) \quad (6)$$

对应于 n 个化学成分就形成 n 个序列号集:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= (t_{11}, t_{21}, \dots, t_{K1}) \\ T_2 &= (t_{12}, t_{22}, \dots, t_{K2}) \\ &\cdots \\ T_n &= (t_{1n}, t_{2n}, \dots, t_{Kn}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

第 k 个城墙砖源范例与 C_0 相似程度序列中的顺序号为:

$$t_k = \sum_{j=1}^n \omega_j \times t_{kj} \quad (8)$$

式中, ω_j 为 n 个化学成分的权重 ($j=1, 2, \dots, n$); 取 $k=1, 2, \dots, K$, 利用式(8)得 K 个范例顺序号大小; t_k 愈小, C_k 与 C_0 愈相似, 在相似程度序列中愈排前。

3.3 影响因素权重的确定

权重用来衡量各影响因素的相对重要性。考虑到权重对环境的敏感, 在不同的决策环境下相同的因素对决策输出会有不同的影响^[30]。本文根据熵值的概念, 提出城墙砖化学成分权重的计算方法。

假定被评价对象有 m 个, 即评价比较 m 个城墙砖; 每个被评价古城墙砖的化学成分指标有 n 个, 则每个古城墙砖的各化学成分值构成判断矩阵 R 。

$$R = (r_{ij})_{m \times n} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

对判断矩阵 R 进行归一化, 得到矩阵 B 。

$$B = (b_{ij})_{m \times n} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

B 的元素为

$$b_{ij} = \frac{r_{ij} - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (11)$$

式中, r_{\max} 和 r_{\min} 分别为同一化学成分下不同产地的指标值中最大者和最小者。

按照熵的概念, 定义指标的熵为

$$H_j = - \left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) / \ln m \quad (12)$$

$$(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$$

$$\text{其中: } f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1 + b_{ij})}$$

则第 j 个化学成分指标的熵权 ω_j , 定义为

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (13)$$

通过上述计算方法, 可得古城墙砖目标范例的化学成分的权重分配, 由于古城墙砖不同化学组成成分的取值不同, 对应权重分配是不一样的, 从而使结果与当前的评价体现了变权的思想。

表3 古城墙砖目标范例的权重

Tab.3 Weight of ancient city wall brick target example

权重	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}
ω_j	0.049 5	0.070 8	0.081 1	0.067 4	0.073 0	0.070 6	0.052 9	0.103 6	0.064 1	0.074 2	0.015 0	0.088 1	0.103 7	0.085 9

4 实例分析

本文选择已有明确结论的 16 个产地的古城墙砖实例作为源范例库, 选取该城墙段 2 块墙砖作为目标范例, 采用上述方法, 计算古城墙砖源范例

与目标范例的相似程度序列, 从而在古城墙砖源范例库中找出与目标范例最相似的古城墙砖源范例。通过编制 Matlab 程序, 对表 2 中的两个目标范例 C_{17} 和 C_{18} 分别进行了计算, 计算结果分别见表 4 和表 5。

表 4 目标范例 C_{01} 与各个源范例的相似程度序列
Tab. 4 Sequence of similarity between target example C_{17} and each source example

C_K	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	t_k
C_1	2	11	11	6	5	6	12	5	4	6	11	11	11	7	7.694
C_2	6	7	3	4	10	3	6	15	11	4	1	8	1	1	6.030
C_3	7	9	7	9	9	7	2	11	8	11	13	6	1	4	7.056
C_4	9	13	6	11	12	10	3	7	9	10	2	14	4	5	8.487
C_5	11	14	5	14	11	12	9	4	16	12	12	9	3	12	9.658
C_6	13	1	14	7	14	8	4	14	5	1	8	5	15	6	8.598
C_7	4	6	2	2	8	5	10	3	13	5	16	2	6	3	5.198
C_8	5	4	9	1	7	4	13	8	3	3	6	3	13	9	6.528
C_9	12	15	4	13	13	13	8	13	15	13	15	10	7	7	10.854
C_{10}	3	12	12	3	2	2	11	16	7	2	10	13	12	2	8.009
C_{11}	15	8	16	8	16	11	7	12	10	8	3	7	10	13	10.756
C_{12}	14	3	15	12	15	9	5	6	12	9	7	15	2	8	9.307
C_{13}	16	16	13	16	3	16	16	9	1	16	14	9	9	11	11.318
C_{14}	10	2	10	10	1	14	1	10	14	14	9	12	14	14	10.056
C_{15}	8	10	8	15	4	15	15	2	6	15	5	1	5	10	8.155
C_{16}	1	5	1	5	6	1	14	1	2	7	4	4	8	10	4.923

表 5 目标范例 C_{02} 与各个源范例的相似程度序列
Tab. 5 Sequence of similarity between target example C_{18} and each source example

C_K	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	t_k
C_1	3	10	4	2	2	6	12	3	2	5	6	13	2	5	5.202
C_2	7	7	7	3	10	3	9	15	9	4	16	10	9	9	8.286
C_3	8	9	12	8	9	7	5	5	6	11	4	7	9	2	7.462
C_4	9	13	10	10	12	10	4	1	7	10	15	15	12	1	8.816
C_5	11	14	9	14	11	12	1	10	16	12	5	11	10	11	10.892
C_6	14	1	14	13	14	8	7	14	3	2	9	4	15	4	8.911
C_7	6	6	6	5	8	5	10	9	13	9	1	5	13	3	7.506
C_8	1	4	2	6	1	4	13	2	5	3	11	2	5	7	4.154
C_9	12	15	8	12	13	13	2	6	15	13	2	12	6	5	9.774
C_{10}	2	11	5	4	5	2	11	16	12	1	7	14	3	8	7.479
C_{11}	16	8	16	7	16	11	3	13	8	7	14	9	1	12	9.750
C_{12}	15	3	15	11	15	9	8	11	10	8	10	16	8	6	10.347
C_{13}	13	16	11	16	4	16	16	12	4	16	3	6	4	15	10.980
C_{14}	10	2	13	9	6	14	6	4	14	14	8	8	11	13	9.476
C_{15}	4	12	1	15	3	15	15	8	11	15	12	1	7	14	9.056
C_{16}	5	5	3	1	7	1	14	7	1	6	13	3	14	10	6.238

对于未知产地的古城墙砖目标范例 C_{01} 而言，表 4 给出了目标范例 C_{01} 中的每个化学成分与各个源范例中对应的化学成分之间的相似程度排序。例如，目标范例 C_{01} 的第 1 个化学成分 b_1 与每个源范例的第 1 个化学成分 b_1 相似程度排序分别为 2、6、7、9、11、13、4、5、12、3、15、14、16、

10、8、1。依次类推，就可以构建目标范例 C_{01} 与每个源范例之间的相似程度序列。例如目标范例 C_{01} 与源范例 C_1 之间的相似程度序列 T_1 为 (2, 11, 11, 6, 5, 6, 12, 5, 4, 6, 11, 11, 11, 7)。根据公式 (8)，可以求出目标范例 C_{01} 与每个源范例之间的相似程度的序列号 t_k 。 t_1 的求解过程如下

所示:

$$t_1 = 2 \times 0.049\ 5 + 11 \times 0.070\ 8 + 11 \times 0.081\ 1 + 6 \times 0.067\ 4 + 5 \times 0.073\ 0 + 6 \times 0.070\ 6 + 12 \times 0.052\ 9 + 5 \times 0.103\ 6 + 4 \times 0.064\ 1 + 6 \times 0.074\ 2 + 11 \times 0.015\ 0 + 11 \times 0.088\ 1 + 11 \times 0.103\ 7 + 7 \times 0.085\ 9 = 7.694$$

由此上述知, t_k 愈小, C_k 与 C_0 愈相似, 在相似程度序列中愈排前. 则由表 4 可以看出 t_{16} 为 4.923, 其值最小, 可判断目标范例 C_{01} 与源范例 C_{16} 最相似. 同理, 由表 5 可以看出 t_8 为 4.154, 其值最小, 因此可以判断目标范例 C_{02} 与源范例 C_8 最相似. 而根据表 1 可知, 古城墙砖源范例 C_8 和 C_{16} 的产地都来源于河北定兴, 进而可以判断该城墙段所使用的墙砖最有可能来源于河北定兴.

5 结论

(1) 针对古城墙病害问题, 三维激光扫描技术能够快速获取古城墙的点云图, 通过对比获取古城墙砖的破损面积, 可以准确地计算出城墙修缮的需砖量, 这对古城墙病害调查具有很强的实用性.

(2) 本文根据模糊相似优先的概念构造了一个基于模糊相似优先的古城墙砖范例检索模型. 通过古城墙砖化学组成成分之间的两两比较, 获得相应成分下古城墙砖的目标范例与源范例之间的相似性序列, 最终找出与目标范例最相似的边古城墙砖的源范例. 本方法推理原理直观、使用方便. 在以往的古城墙砖范例和当前需修复替换的古城墙砖之间建立了合理的推理关系, 可以为今后的古城墙的修缮与城砖替换提供科学的依据.

参考文献 References

- [1] 张丹丹, 王兵. 浅谈北京居庸关城墙的保护和修复[J]. 遗产与保护研究, 2018, 3(11): 155-158.
ZHANG Dandan, WANG Bing. Protection and restoration of juyongguan city wall in Beijing [J]. Research on Heritages and Preservation, 2018, 3(11): 155-158.
- [2] 宋青. 中国古城墙典型病害信息提取方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
SONG Qing. Study on disease information acquisition and expression of point cloud data of ancient city walls in China [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [3] 周远强. 西部某古城墙病害影响因素研究初探[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
ZHOU Yuanqiang. Research on the disease factors affecting an ancient city wall in the west of China [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [4] 周伟. 探地雷达法在古城墙内部病害检测上的应用[J]. 智能城市, 2018, 4(11): 25-26.
ZHOU Wei. Application of ground penetrating radar method in the detection of internal diseases of ancient city walls [J]. Intelligent City, 2018, 4(11): 25-26.
- [5] 吴超英, 李乐, 王峥嵘, 等. 古城墙变形破坏模式分类及识别[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1132-1140.
WU Chaoying, LI Le, WANG Zhengrong, et al. Classification and identification of failure modes of ancient city walls [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1132-1140.
- [6] CHEN Guoqing, LI Le, LI Guangming, et al. Failure modes classification and failure mechanism research of ancient city wall [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(23): 1-15.
- [7] 马勇. 大同古城墙修复结构设计探讨[J]. 山西建筑, 2017, 43(32): 39-40.
MA Yong. Exploration on ancient Datong city wall restoration structure design [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(32): 39-40.
- [8] 朱才辉, 周远强. 某在役明城墙病害调研及评估方法[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(2): 60-73.
ZHU Caihui, ZHOU Yongqiong. Pathologies investigation and assessment method of an ancient city wall in Ming Dynasty [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(2): 60-73.
- [9] 白禹, 张中俭, 刘鹏辉, 等. 古城墙古砖的病害分类[J]. 山西建筑, 2020, 46(1): 30-32.
BAI Yu, ZHANG Zhongjian, LIU Penghui, et al. Disease classification of the ancient brick in ancient city wall [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(1): 30-32.
- [10] FAN Yongli, SONG Shaolei, HUANG Jizhong, et al. Study on weathering mechanism of masonry bricks of ancient temples in Shanxi province using Dingxiang Hongfu temple masonry brick [J]. Construction and Building Materials, 2019, 222: 500-510.
- [11] MESQUITA Esequiel, MARTINI Rachel, ALVES André, et al. Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 19: 172-180.
- [12] LOPEZ-ARCE P, GARCIA-GUINEA J. Weathering traces in ancient bricks from historic buildings [J]. Building and Environment, 2004, 40(7): 929-941.
- [13] 崔洪庆, 冯文丽, 刘国兴. 探地雷达技术在古城墙修缮中的应用[J]. 工程地质学报, 2007(5): 708-711.
CUI Hongqing, FENG Wenli, LIU Guoxing. Application of ground penetrating radar to restoration of ancient city wall in pingyao [J]. Journal of Engineering Geology, 2007(5): 708-711.
- [14] 李悦, 孙士辉, 朱能发, 等. 地质雷达在古墙体无损检测中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 72-74.
LI Yue, SUN Shihui, ZHU Nengfa, et al. Application of the GPR in non-destructive testing of ancient walls [J]. Journal of Water Resources and Architectural En-

- gineering, 2016, 14(3): 72-74.
- [15] 孙士辉, 李连成, 韩建, 等. 面波勘探在某古城墙无损检测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2020(2): 57-59, 64.
SUN Shihui, LI Liancheng, HAN Jian, et al. Application of surface wave exploration in an ancient wall non-destructive testing [J]. Site Investigation Science and Technology, 2020(2): 57-59, 64.
- [16] 贺一波, 蔡建文, 王金云, 等. 三维激光扫描技术应用于古城墙建模及修复[J]. 激光杂志, 2018, 39(2): 85-89.
HE Yibo, CAI Jianwen, WANG Jinyun, et al. Modeling and repairing of ancient city wall by three dimensional laser scanning technology [J]. Laser Journal, 2018, 39(2): 85-89.
- [17] 王瑶瑶, 王京卫, 赵莉莉. 基于激光雷达的建筑三维数字化技术应用研究[J]. 山东建筑大学学报, 2018, 33(6): 79-84.
WANG Yaoyao, WANG Jingwei, ZHAO Lili. Research on 3D digital technology of building based on LiDAR data [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2018, 33(6): 79-84.
- [18] 王新生. 古城墙修缮技术及运用初探[J]. 古建园林技术, 2004(1): 20-22.
WANG Xinsheng. Preliminary Study on the Repair Technology and Application of Ancient City Wall [J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 2004(1): 20-22.
- [19] 高衡, 孙升, 金普军. 西安城墙明代“前衛”字砖材料成分、结构与性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 122-127, 155.
GAO Heng, SUN Sheng, JIN Pujun. Composition, structure and properties of the Ming Dynasty bricks engraved with “Qianwei” used in Xi'an circumvallation [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 122-127, 155.
- [20] 朱铁权, 王昌燧, 毛振伟, 等. 不同窑口古瓷断面能量色散X射线荧光光谱线扫描分析[J]. 岩矿测试, 2007(5): 381-384.
ZHU Tiequan, WANG Changsui, MAO Zhenwei, et al. Linear scanning analysis on the cross-section of Chinese ancient porcelains from different kiln by energy-dispersive x-ray fluorescence spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2007(5): 381-384.
- [21] 张齐齐, 王家鼎, 李彬. 基于模糊相似优先比的黄土湿陷性预测方法[J]. 人民长江, 2015, 46(1): 90-93, 104.
ZHANG Qiqi, WANG Jiading, LI Bin. Prediction method of loess collapsibility based on fuzzy analogy preferred ratio [J]. Yangtze River, 2015, 46(1): 90-93, 104.
- [22] 何红前, 温克兵, 陈志新, 等. 基于模糊相似优先比的湿陷性黄土强夯有效加固深度预测范例推理研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 88-93.
HE Hongqian, WEN Kebin, CHEN Zhixin, et al. Case-based reasoning and fuzzy analogy preferred ratio for effective depth of collapsible loess treated with dynamic consolidation [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 88-93.
- [23] 赵文, 贺玉龙. 基于范例推理结构型岩体边坡稳定性评价[J]. 铁道工程学报, 2008(7): 5-9.
ZHAO Wen, HE Yulong. Case-based reasoning approach to stability evaluation of structured rock slope [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(7): 5-9.
- [24] 程虎伟. 基于三维激光扫描技术的古城墙精密测绘[N]. 中国文物报, 2012-10-12(007).
CHENG Huwei. Precision surveying and mapping of ancient city walls based on 3D laser scanning technology [N]. Wen Wu Bao, 2012-10-12(007).
- [25] 官嘉辰, 余鹤雷, 王靖涵. 粉末压片-X射线荧光光谱法测定红土矿中七种组分[J]. 有色矿冶, 2019, 35(2): 56-59.
GONG Jiachen, YU Helei, WANG Jinghan. Determination of seven components in laterite ore by powder tabletting-x-ray fluorescence spectrometry [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2019, 35(2): 56-59.
- [26] 汪瑞俊, 宋正启, 郝媛媛, 等. X射线荧光光谱法测定高铝质耐火砖中氧化铝、氧化铁和二氧化硅的含量[J]. 理化检验(化学分册), 2014, 50(10): 1309-1311.
WANG Ruijun, SONG Zhengqi, HAO Yuanyuan, et al. Determination of the content of alumina, iron oxide and silica in high alumina refractory bricks by X-ray fluorescence spectrometry [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2014, 50(10): 1309-1311.
- [27] 王一凌. X射线荧光光谱法测定硅石、硅砖的主次成分[J]. 鞍钢技术, 2012(5): 24-27.
WANG Yiling. Determination of leading and secondary compositions in silica and silica brick by x-ray fluorescence spectrometry [J]. Angang Technology, 2012(5): 24-27.
- [28] 刘沐宇, 朱瑞赓. 基于模糊相似优先的边坡稳定性评价范例推理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(8): 1188-1193.
LIU Muyu, ZHU Ruigeng. Case-based reasoning approach to slope stability evaluation based on fuzzy analogy preferred ratio [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(8): 1188-1193.
- [29] 肖位枢. 模糊数学基础及应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
XIAO Weishu. Fundamentals and application of fuzzy mathematics [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992.
- [30] 周丽萍, 王文科, 马蓉攀. 熵权决策法在地震灾害风险评估中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(1): 93-97.
ZHOU Liping, WANG Wenke, MA Rongbi. Application of method of entropy proportion to urban earthquake disaster risk index [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2010, 30(1): 93-97.