DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.056
开放科学(资源服务)标识码OSID:

基于多元线性回归模型的面砖外墙劣化评估方法

杨同越[1],许浒[1,2],赵仕兴[3],田永丁[1],龙丹冰[1],余志祥[1]
(1.西南交通大学 土木工程学院,成都 610031;2.成都西南交通大学设计研究院有限公司,成都 610031;3.四川省建筑设计研究院有限公司,成都 610095)

摘　要:针对建筑面砖外墙劣化导致其脱落风险日益凸显的问题,基于现场调研与多元线性回归模型,提出一种劣化程度快速评估方法,旨在降低既有评估方法的模糊性,提升劣化诊断效率。综合相关研究,分类梳理面砖外墙的劣化类型及其影响因素,并制定劣化定性评估标准;通过实地调研构建面砖外墙劣化图像库,开展分组对比评估。在此基础上,采用多元线性回归方法建立劣化评估模型,模型决定系数R^2达82.45%,且各自变量对因变量的影响在统计学上均显著。为进一步规范评估结果,引入价值函数对模型输出结果进行修正,得到归一化劣化程度评估值;结合回归模型、价值函数与劣化程度评级标准,形成一套完整的面砖外墙劣化评估方法。与传统评估方法相比,该方法具有指标全面、简便高效、适用性强等优势。

关键词:面砖外墙;劣化特征识别;多元线性回归模型;评估标准
中图分类号:TU196　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(2026)04-0134-12

Assessment approach to deterioration of exterior wall tiles based on multiple linear regression model

YANG Tongyue[1], XU Hu[1,2], ZHAO Shixing[3], TIAN Yongding[1], LONG Danbing[1], YU Zhixiang[1]
(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Southwest Jiaotong University Chengdu Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610031, P. R. China; 3. Sichuan Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610095, P. R. China)

Abstract: As the risk of falling caused by deterioration of exterior wall tiles has become increasingly prominent, a multiple linear regression model is proposed to rapidly assess the deterioration degree based on field surveys. This method aims to reduce the ambiguity of existing assessment approaches while improving diagnostic efficiency. Firstly, the types of deterioration and their impacts on exterior wall tiles were classified and analyzed according to the available research, and qualitative assessment standards for deterioration were summarized. Then, the image library covering the deterioration of exterior wall tiles was established through surveys, and grouped evaluation of the deterioration based on the proposed standards was conducted. Subsequently, an

收稿日期:2024-02-28
基金项目:国家自然科学基金(52308330);四川省建筑设计研究院有限公司课题(KYYN202231-F1)
作者简介:杨同越(1999-),男,主要从事结构冲击与防护研究,E-mail:3248009935@qq.com。
许浒(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:xuhu@swjtu.edu.cn。
Received: 2024-02-28
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52308330); Research Project of Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd. (No. KYYN202231-F1)
Author brief: YANG Tongyue (1999-), main research interests: structural impact and protection, E-mail: 3248009935@qq.com.
XU Hu (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: xuhu@swjtu.edu.cn.

assessment model for the deterioration was built using a multiple linear regression approach, with a determination coefficient R^2 of 82.45%, and the impact of independent variables on dependent variables was statistically significant. To further standardize the assessment results, a value function was introduced to process the model output, obtaining normalized deterioration degree assessment values. Finally, combining the regression model, value function, and rating standards of deterioration degree, a complete set of assessment approaches was formed. Compared with traditional assessment methods, this approach has the advantages of being comprehensive, simple, efficient, and highly applicable.

Keywords: exterior wall tiles; deterioration characteristic identification; multiple linear regression model; assessment standard

近年来，建筑外墙面砖脱落事故屡见不鲜，给人民群众生命财产安全带来极大威胁。住建部指出[1]，亟须大力加强包含外立面在内的建筑物安全管理。建筑面砖外墙的维护工作包括劣化的识别、评估和修复，目前识别技术相对成熟，如目测法、红外热成像法[2-3]、三维激光扫描技术和超声波检测技术[4]等。但受多种主客观因素影响，目前尚未形成统一且高效的评估方法，因此对其展开研究十分必要。

评估工作可根据评估指标分为定性评估、定量评估及两者相结合3种类型。定性评估方法便捷性高、灵活性强，但评估指标较为模糊，易导致评估结果存在差异。Ruiz等[5]通过研究面砖外墙定性评估指标的分级方法发现，分级方式会显著影响评估结果，采用5级分级法时，结果差异最小。姜常玖等[6]采用以外墙损伤状况与修复紧急程度为分级指标的定性评估方法，该方法可兼顾检测效率、准确度与结果可靠性，但评估结果仍存在偏差。定量评估方法通过量化评估指标消除评估结果的差异性，但量化指标往往存在主观性强、指标僵化等问题。目前此类方法难以应对劣化的多样性、不确定性，也无法兼顾劣化成因多因素耦合的复杂特征。Liao[7]分析了建筑年龄、层数、外墙材料、朝向和城市区域等因素对评估结果的影响，但其指标的合理性与全面性仍有待进一步探讨和验证。Galbusera等[8]采用数值指标表征面砖外墙的退化严重程度，该指标为面砖实际退化程度与最大理论退化程度的比值，但缺乏理论支撑，且计算流程复杂，实际应用受到限制。定性与定量相结合的评估方法则通过定性评估结果归纳出客观的量化评估指标，解决了传统量化评估指标的主观性问题，更具发展前景。但既有方法依然存在指标不灵活、劣化因素考虑不全面的问题。焦杨[9]研究了基于劣化量化分析的遗产建筑砖墙外立面评估方法，提出了客观的量化评估指标，然而该方法未能考量多种劣化成因间的相互关系。Ruiz等[10]提出的外墙量化评估指标考虑了劣化的多因素特征，但涵盖的劣化类型不够全面，指标完整性仍有待完善。综上所述，目前仍缺乏一套指标全面、客观的面砖外墙劣化评估方法。

笔者深入分析面砖外墙劣化特征，通过现场调研与网络检索建立劣化案例图像库，结合现有评估方法归纳制定劣化的定性评估标准，并分组采集图像库的定性评估结果，采用方差分析（ANOVA）、Tukey比较、Friedman检验等多种统计方法开展数据分析。在此基础上，全面考虑各类典型单一劣化类型和多种复合劣化类型，通过多元线性回归方法建立评估模型，以期得到一套全面、可靠、便捷的面砖外墙劣化定性、定量综合评估方法。

1　定性评估方法

1.1　面砖外墙劣化

既有建筑面砖外墙的构造通常包括饰面层、保温层和结构层，如图1所示。饰面层由面砖及其黏结材料构成，面砖分为釉面砖和抛光砖，其黏结材料以水泥砂浆为主；保温层由保温材料及其黏结材料构成，保温材料分为以聚苯乙烯为主的有机保温板和以岩棉为主的无机保温板，其黏结材料为胶黏剂，并根据设计需要采用锚栓作为辅助固定件；结构层由钢筋混凝土或各类砌体构成。观测对象为饰面层，结构层和保温层内部劣化（如保温层内部脱黏）无法通过外部目测识别，需结合其他手段开展检测。面砖外墙劣化可分为表面劣化和结构劣化，表面劣化有脏污、油垢、排水痕迹和风化等；结构劣化有裂缝、墙面不平整、空鼓、缺失、植被生长和修补等。此外，劣化还会以复合形式出现，主要分为3类：表面劣化相互复合、表面劣化与结构劣化复合、结构劣化相互复合。

面砖外墙表面劣化由污染物附着形成，不仅影响建筑美观，还会产生潜在安全隐患。面砖外墙表面黏附灰尘后形成脏污（图2(a)）。材料表面越粗糙越容易黏附灰尘，与釉面砖相比，抛光砖表面较为粗糙，脏污情况通常更为严重。脏污对面砖外墙

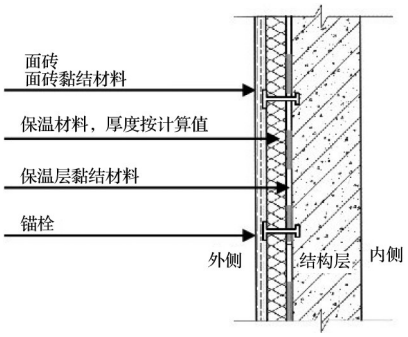


图1 典型面砖外墙构造

Fig. 1 Typical structure of exterior tiled wall

结构安全影响不大,主要影响建筑外观。烹饪产生的油烟、油渍经高温氧化后,油分子会产生黏性并附着于面砖外墙表面,进而形成油污(图2(b))。油污会阻碍水分蒸发,加剧面砖与黏结材料之间的水分蓄积,造成黏结材料性能劣化;且油垢可为微生物提供营养物质,促使霉菌、藻类等生物在外墙表面滋生,威胁外墙整体安全[11]。排水痕迹(图2(c))多形成于窗台、挑檐、女儿墙等外墙凸出部位下方。Ferreira等[12]研究表明,高受潮环境下面砖外墙使用寿命显著低于低受潮环境。面砖风化(图2(d))是指面砖与大气、水及生物接触过程中产生物理、化学变化,进而出现结构疏松、力学指标持续下降的过程。Yiu等[13]指出,在前100次湿热循环中,面砖外墙的抗剪强度降低了50%,大幅提升了面砖脱落风险。

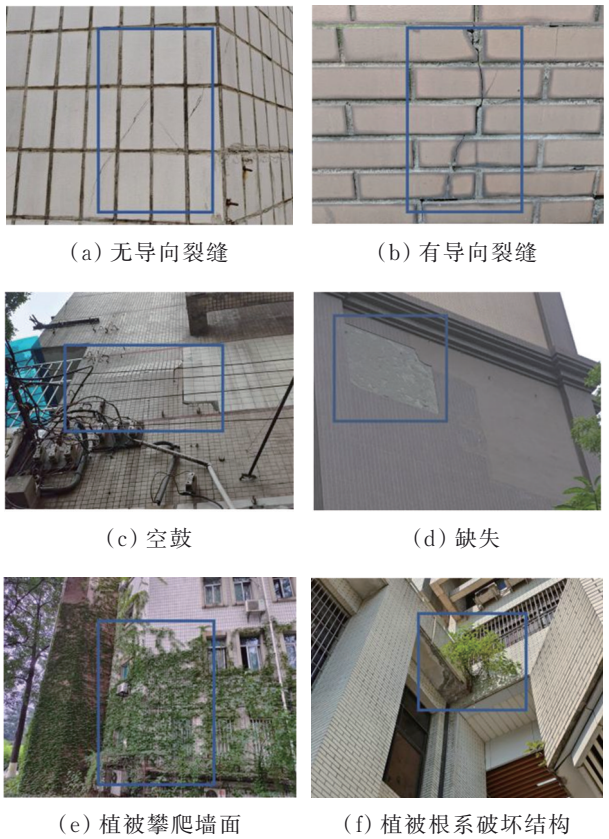
(a) 脏污 (b) 油污

(c) 排水痕迹 (d) 风化

图2 面砖外墙表面劣化

Fig. 2 Surface deterioration of exterior tiled walls

面砖外墙结构劣化由表面劣化衍化形成或施工缺陷导致,主要包括裂缝、空鼓、缺失、植被生长等形式,严重影响面砖外墙安全。裂缝分为无导向裂缝和有导向裂缝[14]。无导向裂缝(图3(a))是指裂缝的发展无明显导向,此类裂缝窄且浅,表现为面砖开裂、墙体完好,形成的原因有机械应力、施工错误和材料质量问题等;有导向裂缝(图3(b))是指裂缝的发展有明显导向,此类裂缝宽且深,表现为裂缝区域内部的保温层、找平层甚至是结构层开裂,其形成原因包括荷载、变形和沉降等。空鼓(图3(c))形成的原因有冷热循环、冻融循环、水流渗透和施工缺陷等。空鼓形成后会进一步演化为面砖缺失(图3(d)),失去面砖保护后,墙面会进一步遭受侵蚀,导致面砖缺失情况加剧。植被生长分为植被攀爬墙面(图3(e))和植被根系破坏结构(图3(f)),前者可以丰富建筑立面造型,但也会导致墙体局部潮气和生物聚集,成为形成劣化的温床;后者根茎深入墙体,造成严重安全隐患。修补为特殊劣化,笔者调研发现,实际工程中常出现修补不平整、修补面积不足等问题,从而导致修补区域相邻面砖存在较高安全风险。显然,相较于表面劣化,面砖外墙的结构劣化对面砖脱落安全风险的影响更为显著。



(a) 无导向裂缝 (b) 有导向裂缝

(c) 空鼓 (d) 缺失

(e) 植被攀爬墙面 (f) 植被根系破坏结构

图3 面砖外墙结构劣化

Fig. 3 Structural deterioration of exterior tiled walls

1.2 定性评估指标

在劣化程度分级标准研究的基础上,为更准确地衡量不同劣化类型对面砖外墙整体性能退化程度的影响,结合相关研究领域的评估指标[5, 15-17]、劣

化机理及专家意见,调整后汇总,形成面砖外墙劣化定性评估指标表(表1)。基于该表建立的评估方法称为面砖外墙劣化定性评估方法(qualitative deterioration assessment method for exterior wall tiles,QDAT)。但该方法仍存在一定模糊性,其指标体系中同一劣化类型不同等级的划分依据仅为“轻度”“中度”“重度”和“极度”等定性描述,易导致不同人员的评估结果出现较大偏差。

表1　劣化定性评估标准

Table 1　Qualitative assessment standards for deterioration

等级	表面劣化	结构劣化				
		裂缝	植被生长	空鼓	修补	缺失
0级:健康状态或轻微退化状态	无或有附着于表面的轻微脏污	无	无	无	无	无
1级:轻度退化状态	排水痕迹、油污	无	植被攀爬墙面(评级1~2级)	无	较为工整的修补	无
2级:中度退化状态	明显侵蚀、污渍痕迹,风化作用(评级2~3级)	裂缝分为有导向裂缝和无导向裂缝,出现渗透侵蚀(评级2~4级)	植被攀爬墙面(评级1~2级)	墙面不平整,可能为早期空鼓	修补不平整、修补面积不足等(评级2~4级)	无
3级:重度退化状态	明显侵蚀、污渍痕迹,风化作用(评级2~3级)	裂缝分为有导向裂缝和无导向裂缝,出现渗透侵蚀(评级2~4级)	植被根系生长影响墙体结构(评级3~4级)	空鼓意味着墙面黏结力缺失,情况比较严重(评级3~4级)	修补不平整、修补面积不足等(评级2~4级)	墙面出现缺失,伴随渗透侵蚀(评级3~4级)
4级:极度退化状态	表面劣化很少有4级的情况	裂缝分为有导向裂缝和无导向裂缝,出现渗透侵蚀(评级2~4级)	植被根系生长影响墙体结构(评级3~4级)	空鼓意味着墙面黏结力缺失,情况比较严重(评级3~4级)	修补不平整、修补面积不足等(评级2~4级)	墙面出现缺失,伴随渗透侵蚀(评级3~4级)

注:对于复合劣化,打分应不低于相应单一劣化的评级,如空鼓与缺失复合,则应分别不低于空鼓和缺失的评级,建议按4级评定。

2　改进的评估方法

采用多元线性模型构建量化评估指标,以消除QDAT的模糊性。首先通过调研获取足够多的劣化案例,每个案例由学生团队与专家团队分别评估;其次,对比分析两组评估结果后得到模型的因变量Y;随后,对案例进行劣化特征识别,得到模型的自变量X;在此基础上,采用多元线性模型回归得到劣化影响的回归系数β,构建更客观的量化评估指标;最后通过价值函数$f(y)$规范计算结果,形成基于多元线性回归模型的面砖外墙劣化量化评估方法。

2.1　收集数据

通过开展线下实地调研和网络检索,收集既有建筑面砖外墙劣化的案例数据,进而建立劣化评估图像库,相关标准如下:

1)图像库包含所有单一劣化和常见的复合劣化现象,同时也包含质量良好、无任何劣化的图像,以对应评级为0级的情况。

2)样本数量需满足统计分析要求。为保证统计分析样本分布均衡,各类劣化样本数量均不少于10组。

图像库的样本数量为402个。邀请10名土木工程在读学生组成学生组,5名从业年限15 a以上的行业专家组成专家组,根据表1中的定性评估方法对每个劣化案例进行评级。表2为前10组图像的评估结果,选取学生组评估结果中出现频率最高的数值作为P_0,并将其定义为参考值。P_1~P_5分别为5位专家的评估值,均值P_1~P_5代表5位专家的评估结果,简称专家值;均值P_0~P_5为专家值与参考值的平均值。对比可知,均值P_1~P_5和均值P_0~P_5相近。

表2　评估结果示例

Table 2　Samples of assessment results

序号	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	均值(P_1~P_5)	均值(P_0~P_5)
1	2	2	2	3	3	2	2.33	2.40
2	3	2	3	2	2	2	2.33	2.20
3	4	2	4	2	4	2	3.00	2.80
4	2	2	3	2	2	2	2.17	2.20
5	4	3	4	4	3	4	3.67	3.60
6	3	2	2	2	4	2	2.50	2.40
7	4	2	4	4	2	4	3.33	3.20
8	1	1	2	2	3	2	2.00	1.83
9	4	3	4	4	3	4	3.60	3.67
10	2	2	2	2	4	3	2.60	2.50

表3为参考值和专家值的统计分布情况,其中Q_1、Q_3分别为上四分位数、下四分位数。由表3可知,专家值与参考值的统计分布相近。只有专家值P_2、P_3、P_4的Q_3值高于参考值,说明3位专家对严重

劣化程度的判断略高于参考值,整体分布中未出现异常数据。从参考值Q_1为1、Q_3为3也可知,图像库在各级劣化情况的分配较为均匀,没有数据缺失的情况。

表3 分组评估结果

Table 3 Assessment results by groups

序号	均值	标准差	Min	Q_1	中位数	Q_3	Max
P_0	2.21	1.32	0	1	2	3	4
P_1	2.12	1.30	0	1	2	3	4
P_2	2.19	1.41	0	1	2	3.75	4
P_3	2.31	1.44	0	1	2	4	4
P_4	2.34	1.28	0	1	2	4	4
P_5	2.16	1.36	0	1	2	3	4

图4为不同参考值评级下专家评分结果的箱线图。虽然图中存在少量异常值,但考虑共计402张图像参与评估,专家评估过程难免存在疏漏。从图像分布可知,各位专家的评估结果相近,各专家评估结果与参考值也基本一致,从侧面证明QDAT具备较好的准确性。但专家值与参考值之间仍存在一定差异,这是由QDAT自身的模糊性所致。

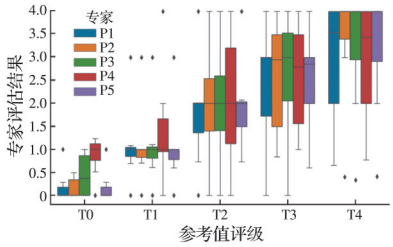


图4 参考值各评级箱线图

Fig. 4 Box plots of reference values for each rating

2.2 数据分析

以专家值与参考值为因子,对评估结果间的差异开展单因子与双因子方差分析(ANOVA)。ANOVA是检验不同组别均值是否存在显著差异的常用方法,显著性水平设定为0.05。

2.2.1 单因子分析

单因子分析中原假设为所有组的均值相等,相应的备择假设为至少有一组的均值与其他组不同。表4列出了专家值与参考值差异的单因子方差分析结果。

表4 单因子方差分析结果

Table 4 Results of one-way ANOVA

因子	观测值	自由度d_f		平方和S_S		均方差M_S		F统计量	P值
		d_{fB}	d_{fW}	S_{SB}	S_{SW}	M_{SB}	M_{SW}		
专家值	差异值	4	20	0.350	2.359	0.087	0.118	0.737	0.575
参考值	差异值	4	20	1.366	1.343	0.341	0.067	5.090	0.005

表4中的自由度d_f、平方和S_S、均方差M_S的表达式如式(1)~式(6)所示。

$$d_{fB}=k-1 \tag{1}$$

$$d_{fW}=N-k \tag{2}$$

$$S_{SB}=\sum_{j=1}^{k}n_j(\bar{Y}_j-\bar{Y})^2 \tag{3}$$

$$S_{SW}=\sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{n_j}(Y_{ji}-\overline{Y_j})^2 \tag{4}$$

$$M_{SB}=\frac{S_{SB}}{d_{fB}} \tag{5}$$

$$M_{SW}=\frac{S_{SW}}{d_{fW}} \tag{6}$$

式中:d_{fB}、d_{fW}、S_{SB}、S_{SW}、M_{SB}和M_{SW}分别为组间自由度、组内自由度、组间平方和、组内平方和、组间均方差和组内均方差;k为组数;N为总样本数;n_j为第j组的样本大小;$\bar{Y}_j$为第j组的均值;$\bar{Y}$为总体均值;Y_{ji}为第j组中第i个观测值。

F_{obs}值、P值是ANOVA中反映观测值是否存在显著差异的核心指标。F_{obs}为组间均方差与组内均方差的比值,用于判断不同组的均值是否存在显著差异;F_{obs}越大,说明组间差异相对于组内差异越显著。其计算公式为

$$F_{obs}=\frac{M_{SB}}{M_{SW}} \tag{7}$$

P值表示观测数据与原假设一致的概率,P值小于0.05表明数据不符合原假设,P值的计算基于F统计量和F分布的累积分布函数(CDF),其计算式为

$$P(F\geqslant F_{obs})=1-F_{CDF}(F_{obs},d_{fB},d_{fW}) \tag{8}$$

由专家值P=0.575>0.05可知,各专家之间的均值不存在显著差异,即专家值之间的差异值不显著。由参考值P=0.005<0.05可知,参考值各评级的差异值存在显著性,采用Tukey比较法进一步确定哪些评级存在显著差异。Tukey比较中T值的计算考虑了多组均值差异以及样本大小;T值绝对值越大,表示两组间的均值差异越显著,其计算式为

$$T=\frac{\bar{Y}_i-\bar{Y}_j}{\sqrt{M_{SE}\left(\frac{1}{n_i}+\frac{1}{n_j}\right)}} \tag{9}$$

式中:$\bar{Y}_i$为第i组的均值;均方误差M_{SE}的计算式为

$$M_{SE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2 \tag{10}$$

表5为参考值各评级的Tukey比较结果。组别“4-0”的T值绝对值最大，且P=0.003<0.05，说明差异的显著性来源于参考值0级与4级两组之间。表6为参考值各评级的差异值分析结果，其中R为评级，N为专家人数，专家值相对于参考值0级、4级的平均差异值分别为0.396、−0.299。究其原因，对于参考值为0级的案例，各专家评估结果均大于等于0；对于参考值为4级的案例，各专家评估结果均小于等于4，所以0级与4级之间存在显著差异，这反映出极端评级的特殊性。

表5　Tukey比较结果

Table 5　Comparison results via Tukey's Method

组别	均值差	差值标准误差	95%置信区间	T值	P值
1-0	−0.31	0.16	(−0.80, 0.18)	−1.88	0.361
2-0	−0.24	0.16	(−0.73, 0.25)	−1.46	0.596
3-0	−0.49	0.16	(−0.98, 0.01)	−2.96	0.054
4-0	−0.69	0.16	(−1.19, −0.20)	−4.24	0.003
2-1	0.07	0.16	(−0.42, 0.56)	0.41	0.993
3-1	−0.18	0.16	(−0.67, 0.31)	−1.08	0.814
4-1	−0.39	0.16	(−0.88, 0.10)	−2.36	0.167
3-2	−0.25	0.16	(−0.74, 0.25)	−1.49	0.577
4-2	−0.46	0.16	(−0.95, 0.04)	−2.77	0.077
4-3	−0.21	0.16	(−0.70, 0.28)	−1.28	0.706

表6　参考值的差异性分析结果

Table 6　Analysis results of differences in reference values

R	N	均值	标准差	95%置信区间
0	5	0.396	0.485	(0.207, 0.998)
1	5	0.088	0.154	(−0.103, 0.279)
2	5	0.156	0.159	(−0.042, 0.354)
3	5	−0.089	0.101	(−0.214, 0.036)
4	5	−0.299	0.202	(−0.549, −0.048)

2.2.2　双因子分析

双因子方差分析时，若在模型中纳入因子交互作用，即C(Factor1)*C(Factor2)时，误差自由度为0。因此选用C(Factor1)+C(Factor2)模型，仅考虑两个因子的独立效应，分析结果如表7所示。由表7可知，专家值对应的P=0.275>0.05，参考值对应的P=0.006<0.05；即在仅考虑参考值与专家值的独立效应下，各专家的评估差异不显著，参考值不同评级间的差异则存在显著性。由表8可知，该显著差异同样来源于参考值0级与4级之间。

为补充双因子分析模型中因子交互作用的考量，采用Friedman检验判定两因子共同作用下专家组评估结果是否存在差异。Friedman检验将各专家评估结果按参考值不同评级分组，所得统计量为7.134，P值为0.129。由于P=0.129>0.05，表明在纳入双因子相互作用后，各专家观测值的中位数仍不存在统计学显著差异。

表7　双因子方差分析结果

Table 7　Results of two-way AVOVA

指标	平方和	自由度	F_{obs}	P值
参考值	0.350	4.0	1.410	0.275
专家值	1.367	4.0	5.508	0.006
残差	0.993	16.0		

表8　双因子方差分析系数统计

Table 8　Coefficient statistics for two-way AVOVA

项	系数	系数标准误差	T值	P值
常量	0.050	0.049 8	1.01	0.327
P1	−0.054	0.099 6	−0.54	0.594
P2	−0.089	0.099 6	−0.89	0.385
P3	0.077	0.099 6	0.77	0.450
P4	−0.127	0.099 6	−1.27	0.222
P5	0.193	0.099 6	1.93	0.071
R0	0.345	0.099 6	3.47	0.003
R1	0.038	0.099 6	0.38	0.709
R2	0.106	0.099 6	1.06	0.305
R3	−0.140	0.099 6	−1.40	0.181
R4	−0.349	0.099 6	−3.50	0.003

综合ANOVA结果可知，不同专家的评估结果无显著差异，因此将专家组评估结果作为评级的依据是合理的；同时，专家评估结果与参考值的差异在各评级间存在显著差异，该差异主要体现在0级与4级之间。

2.3　多元线性回归模型

经典的多元回归算法有多元线性回归、多项式回归、主成分回归和决策树回归等。多元线性回归形式简单、建模便捷，同时该模型具备良好的解释性，可通过模型系数直观反映各劣化特征对评估结果的具体影响；多项式回归可拟合非线性数据，但易发生过拟合；主成分回归易损失部分关键信息；决策树回归对训练数据的微小扰动高度敏感。评估结果由定性分级指标确定，与劣化特征识别结果在一定程度上符合线性关系，因此采用多元线性回归模型开展回归分析。构建模型时采用最小二乘法，以误差平方和最小为准则求取最优拟合结果能够保证真实数据与预测数据之间的误差最小。线性回归通过将单个或多个变量纳入线性组合，拟合得到目标预期值；当模型自变量数量大于1时，即为多元线性回归。采用专家值作为回归因变量Y；以劣化特征识别结果作为自变量X，主要自变量包括油污X_1、排水痕迹X_2、脏污X_3、修补X_4、无导向裂缝

X_5、有导向裂缝X_6、墙面不平整X_7、空鼓X_8、缺失X_9、风化X_{10}、植被攀爬墙面X_{11}和植被根系破坏结构X_{12}。劣化特征识别标准规定:0表示无劣化特征,1表示存在劣化特征。作为示例,表9为前10组图像的劣化特征识别结果。此外,为避免回归模型发生过拟合,采用十折交叉验证方法对回归效果进行检验,即将数据集划分为10个子集,轮流选取其中9个作为训练集、1个作为测试集完成回归运算。

表9 劣化特征识别结果统计

Table 9 Statistics of deterioration characteristic identification results

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	Y
1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3.2
2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2.8
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2.4
4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3.0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2.2
6	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3.8
7	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2.6
8	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3.6
9	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2.2
10	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3.8

多元线性回归模型为

$$Y_i=\beta_0+\sum_{j=1}^{p}\beta_j X_{ij}+\varepsilon \tag{11}$$

式中:$i=\{1,2,3\cdots 402\}$;Y_i为因变量,由专家组评分均值计算得到;β_0为模型截距项;β_j为回归系数,表示相应劣化特征的量化指标;$j=\{1,2,3\cdots p\}$,p为自变量个数;X_{ij}为自变量,指第i张图像中第j个劣化特征的识别结果;ε为随机误差,表示实际观测值与模型预测值的偏差,各分量相互独立,满足期望$E(\varepsilon)=0$,协方差为$\sigma^2 I_n$。

采用不同回归模型时,可依据决定系数R^2判断模型拟合优劣,R^2值越大,代表模型拟合度越高;C_p统计量可综合权衡模型拟合优度与复杂度,当C_p与p值相近时,认为该模型结构"最简洁";模型的S值与C_p作用相似,S取值越小,说明模型拟合良好且结构简洁。其中,R^2计算公式为

$$R^2=1-\frac{R_{SS}}{T_{SS}} \tag{12}$$

式中:R_{SS}为计算残差平方和;T_{SS}为计算总平方和。二者的计算式分别为

$$R_{SS}=\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\hat{Y}_i)^2 \tag{13}$$

$$T_{SS}=\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2 \tag{14}$$

式中:$\hat{Y}_i$为模型预测值;$\bar{Y}$是因变量均值。C_p统计量计算式为

$$C_p=\frac{S_{SE}^p}{M_{SE}^{full}}-n+2p \tag{15}$$

式中:S_{SE}^p为子集模型残差平方和,由式(13)计算;M_{SE}^{full}为全模型均方误差,由式(10)计算。S值计算式为

$$S=\sqrt{M_{SE}}=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{16}$$

最佳回归模型结果如表10所示。自变量数为8、9、10、11、12时,模型R^2均在79%左右,C_p统计量与S值拟合表现最优。考虑到自变量数量越多涵盖的劣化类型越完整,因此最终选取自变量数为12的回归模型。在复合劣化样本中,空鼓与有导向裂缝复合、空鼓与缺失复合这两类复合劣化出现最为频繁,二者有明显的内部相互影响:空鼓膨胀会加速有导向裂缝发展,有导向裂缝的发展又使空鼓加剧;同时,空鼓膨胀会扩大饰面缺失范围,而缺失面积增加则使空鼓遭受更严重侵蚀。因此,在回归模

表10 考虑不同变量数量的回归模型对比统计

Table 10 Comparison of statistical regression models considering the number of variables

p	R^2	C_p	S	自变量
1	34.8	815.1	0.994	X_9
1	26.1	976.9	1.058	X_8
2	55.6	431.2	0.822	X_8、X_9
2	47.8	575.9	0.891	X_6、X_9
3	63.8	279.4	0.742	X_4、X_8、X_9
3	62.2	310.4	0.759	X_6、X_8、X
4	72.8	115.2	0.645	X_4、X_6、X_8、X_9
4	67.3	216.2	0.706	X_3、X_4、X_8、X_9
5	75.0	75.8	0.619	X_3、X_4、X_6、X_8、X_9
5	74.4	86.3	0.626	X_4、X_5、X_6、X_8、X_9
6	76.3	53.6	0.603	X_3、X_4、X_5、X_6、X_8、X_9
6	75.9	61.3	0.609	X_3、X_4、X_6、X_8、X_9、X_{12}
7	77.3	36.9	0.591	X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9
7	77.2	37.6	0.592	X_3、X_4、X_5、X_6、X_8、X_9、X_{12}
8	78.3	19.5	0.578	X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{12}
8	77.6	32.7	0.588	X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{11}
9	78.7	14.3	0.574	X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{11}、X_{12}
9	78.6	16.7	0.576	X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{10}、X_{12}
10	79.1	9.6	0.570	X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{10}、X_{11}、X_{12}
10	78.7	16.2	0.574	X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{11}、X_{12}
11	79.1	11.3	0.570	X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{10}、X_{11}、X_{12}
11	79.1	11.3	0.570	X_1、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{10}、X_{11}、X_{12}
12	79.1	13.0	0.571	X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9、X_{10}、X_{11}、X_{12}

型中加入X_6*X_8和X_8*X_9来模拟这两类复合劣化，这两项仅在$X_6=X_8=1$或$X_8=X_9=1$时取值为1。据此，将此包含14个自变量的回归模型定义为M1。

选择回归模型系数的参考指标包括T_1值、P值与方差膨胀因子V值。T_1值越大，表明自变量对因变量的影响越显著，其计算式为

$$T_1=\frac{C_{\text{coef}}}{S_{\text{E}}^{\text{coef}}} \tag{17}$$

P值为介于0～1之间的统计量。若P值大于0.05(显著性水平)，则自变量对因变量的影响无统计学意义。V值为衡量多重共线性程度的指标，当V值大于10时，认为自变量之间存在多重共线性；模型多重共线性会造成参数不稳定，降低模型解释能力，其计算式为

$$V=\frac{1}{1-R^2} \tag{18}$$

回归模型M1的系数如表11所示。M1的S值与决定系数R^2分别为0.504、82.44%，十折交叉验证得到的S值与R^2平均值分别为0.514、82.50%，说明M1与数据拟合效果良好，且无明显过拟合。但系数β_1、β_3对应的P值分别为0.101、0.952，均大于0.05，说明自变量X_1、X_3不具备统计学显著性。虽然油污X_1与脏污X_3会影响面砖外墙的劣化情况，但二者对应的回归系数β_1、β_3不显著，无法保证系数β_1、β_3的准确性。如$\beta_3=-0.004$时即存在脏污X_3时劣化程度反而更低，显然不符合实际。删除此类统计不显著的自变量能提高模型整体系数的准确率。因此，综合考虑，在M1基础上删除变量X_1、X_3，得到拟合程度与合理性更高的回归模型M2，其具体参数如表12所示。M2的S值与决定系数R^2分别为0.505、82.45%，十折交叉验证所得S值与R^2平均值分别为0.513、82.53%，说明模型与数据充分拟合，无明显过拟合现象。同时，模型各系数P值均小于0.05，说明各自变量对因变量的影响在统计意义上显著；所有V值均小于10，说明模型自变量之间不存在多重共线性问题。

图5为模型M2的残差分析结果。残差正态概率近似呈直线分布，且残差与观测值顺序无明显关联，表明残差服从正态分布且相互独立。因此选择多元线性回归模型M2(式(19))，并规定当计算所得Y值大于4时，取$Y=4$。

$$Y=0.820+0.181X_2+1.213X_4+1.092X_5+1.558X_6+0.693X_7+2.432X_8+2.308X_9+0.549X_{10}+0.865X_{11}+1.429X_{12}-1.109X_6X_8-1.743X_8X_9 \tag{19}$$

2.4　结果处理

为规范计算结果，采用图6所示价值函数$f(Y)$对计算结果进行归一化处理。该函数横坐标为回归模型计算所得Y值，纵坐标y值为Y值归一化结果。构建$f(Y)$的标准[10,18]如下：

1)y值随着Y值的增大而增大。

2)$Y=0$时$y=0$，$Y\geqslant 4$时$y=1$；函数拐点横坐标$Y_i=2$，且对应y值约为0.5。

3)价值函数的形状为S形。单因子分析结果表明，专家值相较于参考值在靠近0时偏大、靠近4时偏小，因此，曲线在靠近0处为凹形，靠近4处为凸形。

价值函数$f(Y)$表达式为

$$f(Y)=\gamma(1-\mathrm{e}^{-k(Y-Y_{\min})^{\alpha}}) \tag{20}$$

式中：Y为回归模型计算得到的评估结果；γ为使函数保持在0到1范围内的因子，由式(21)确定；k为价值函数在拐点处对应纵坐标的近似值，由式(22)

表11　回归模型M1的参数

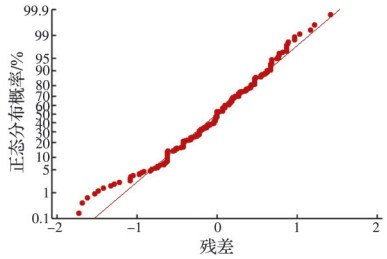
Table 11　Parameters of regression model M1

自变量	C_{coef}	$S_{\text{E}}^{\text{coef}}$	T_1	P	V
截距项	0.796	0.059	13.42	0.000	
X_1	0.262	0.159	1.64	0.101	1.07
X_2	0.193	0.085	2.28	0.023	1.29
X_3	−0.004	0.072	−0.06	0.952	1.17
X_4	1.231	0.084	14.68	0.000	1.45
X_5	1.112	0.139	8.02	0.000	1.09
X_6	1.575	0.112	14.03	0.000	1.86
X_7	0.704	0.101	7.01	0.000	1.30
X_8	2.454	0.112	21.98	0.000	2.80
X_9	2.330	0.076	30.70	0.000	1.72
X_{10}	0.569	0.105	5.40	0.000	1.17
X_{11}	0.887	0.169	5.24	0.000	1.10
X_{12}	1.450	0.231	6.27	0.000	1.04
X_6*X_8	−1.125	0.190	−5.93	0.000	2.43
X_8*X_9	−1.763	0.159	−11.05	0.000	2.26

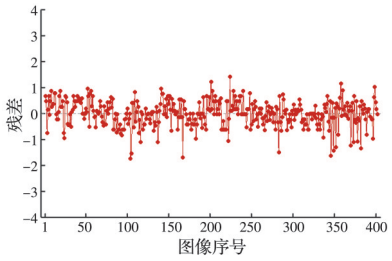
表12　回归模型M2的参数

Table 12　Parameters of regression model M2

自变量	C_{coef}	$S_{\text{E}}^{\text{coef}}$	T_1	P	V
截距项	0.820	0.052	15.83	0.000	
X_2	0.181	0.085	2.14	0.033	1.27
X_4	1.213	0.082	14.74	0.000	1.39
X_5	1.092	0.138	7.93	0.000	1.07
X_6	1.558	0.111	14.04	0.000	1.82
X_7	0.693	0.100	6.92	0.000	1.29
X_8	2.432	0.108	22.47	0.000	2.63
X_9	2.308	0.074	31.43	0.000	1.61
X_{10}	0.549	0.102	5.36	0.000	1.11
X_{11}	0.865	0.167	5.18	0.000	1.07
X_{12}	1.429	0.231	6.18	0.000	1.03
X_6*X_8	−1.109	0.189	−5.88	0.000	2.40
X_8*X_9	−1.743	0.159	−10.99	0.000	2.23



(a) 残差的正态概率



(b) 残差的分布

图 5 残差分析

Fig. 5 Residual analysis

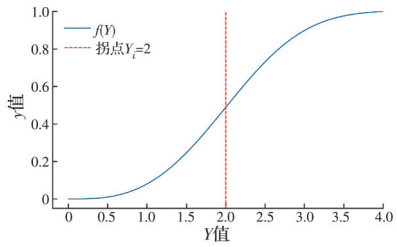


图 6 价值函数

Fig. 6 Value function

确定;y_{min}为评估值Y的最小值,$Y_{min}=0$。

$$\gamma=\left(1-\mathrm{e}^{-k(Y_{max}-Y_{min})^{\alpha}}\right)^{-1} \tag{21}$$

$$k=\frac{\alpha-1}{\alpha(Y_i-Y_{min})^{\alpha}} \tag{22}$$

式中:Y_{max}为评估值Y的最大值,$Y_{max}=4$;α为曲线形状因子,当$\alpha>1$时,曲线呈S型,取$\alpha=3$。价值函数$f(Y)$的数学表达式可简化为

$$f(Y)=\left(1-\mathrm{e}^{\frac{-16}{3}}\right)^{-1}\left(1-\mathrm{e}^{\frac{-Y}{12}}\right)^{3}=1.004\,8\left(1-\mathrm{e}^{\frac{-Y}{12}}\right)^{3} \tag{23}$$

表13为利用回归模型M2与价值函数$f(Y)$计算的常见劣化类型评估结果验证。由表13可知,在单一劣化中,空鼓、缺失的Y值分别为3.252、3.128,对应的归一化y值分别为0.948、0.926,均处于最高水平,属于劣化程度最严重的两类单一病害;修补、无导向裂缝、有导向裂缝、植被根系破坏结构的Y值分别为2.033、1.912、2.378、2.249,对应的归一化y值分别为0.506、0.444、0.677、0.615,劣化程度仅次于空鼓、缺失,为较为严重的一组病害;其余的排水痕迹、风化、植被攀爬墙面均属于表面劣化,评估结果低于结构劣化,与劣化定性标准建议表规律一致。墙面不平整的评估结果偏低,其Y值、y值分别为1.513、0.252,但该病害有可能为早期空鼓隐患,需采用专业检测设备进一步复查核验。表中的复合劣化类型中,风化与墙面不平整复合的Y值与y值最低,分别为2.062、0.521,评估结果与单一劣化中的修补、无导向裂缝相近,属于较为严重的病害;其余有导向裂缝与空鼓复合、空鼓与缺失复合、风化与有导向裂缝复合、风化与空鼓复合的Y值分别为3.701、3.817、2.927、3.801、3.433,对应的y值分别为0.990、0.995、0.881、0.994,整体水平与单一劣化中的空鼓相近,均属于最严重的病害。说明这些复合劣化类型对外墙整

表 13 常见劣化类型的评估结果验证

Table 13 Verification of assessment results for common deterioration types

劣化	X_2	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_6*X_8	X_8*X_9	Y值	y值
排水痕迹	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.001	0.081
修补	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.033	0.506
无导向裂缝	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.912	0.444
有导向裂缝	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2.378	0.677
墙面不平整	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1.513	0.252
空鼓	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3.252	0.948
缺失	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3.128	0.926
风化	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1.369	0.193
植被攀爬墙面	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1.685	0.330
植被根系破坏结构	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2.249	0.615
有导向裂缝与空鼓复合	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	3.701	0.990
空鼓与缺失复合	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	3.817	0.995
风化与有导向裂缝复合	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2.927	0.881
风化与空鼓复合	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3.801	0.994
风化与墙面不平整复合	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2.062	0.521

体健康状况退化的影响程度极高，与劣化定性标准建议表的规律一致。综上，根据表13的计算结果，回归模型M2和价值函数$f(Y)$的计算结果与劣化定性标准建议表相符，且价值函数$f(Y)$的计算结果更为规范。

表14为根据价值函数$f(Y)$计算结果建立的面砖外墙退化程度评级表，采用常用的5等分分级方式，将y值值域等分为5个区间，并为每个区间赋予相应等级。其中0级区间为$0 \leqslant y < 0.2$，对应的劣化程度为轻微，该评级的代表劣化有排水痕迹、风化；4级区间为$0.8 \leqslant y < 1$，对应的劣化程度为极度，该评级的代表劣化有空鼓、缺失。结合相关规范[19]及专家意见，表14给出了各评级对应的建议措施。

表14　劣化程度评级标准

Table 14　Rating standards for deterioration

劣化程度评级	区间	劣化特征及相应措施
0级	$0 < y \leqslant 0.2$	属于轻微劣化，多为表面劣化，主要影响外墙美观性，可根据需求对劣化进行修复
1级	$0.2 < y \leqslant 0.4$	属于轻度劣化，可按照0级劣化的措施进行处理；此外，宜采用专业设备复查，防止劣化程度进一步发展
2级	$0.4 < y \leqslant 0.6$	属于中度劣化，应对劣化部位进行修复，并结合专业设备复查，检验修复效果
3级	$0.6 < y \leqslant 0.8$	属于重度劣化，甚至可能影响结构安全，应对劣化部位进行修复，并结合专业设备复查，检验修复效果
4级	$0.8 < y \leqslant 1$	属于极度劣化，应采取防护措施直至劣化修复，并结合专业设备复查，检验修复效果

基于多元线性回归模型的面砖外墙劣化评估方法（assessment approach to deterioration of exterior wall tiles based on multiple linear regression model，简称ADTLR）步骤如图7所示：首先，排查和检测建筑外墙面砖的劣化类型与数量；其次，识别各劣化对应的劣化特征X_i，若无劣化则对墙面整体进行正常维护，若有劣化则根据回归模型M2计算劣化程度的Y值；然后，采用价值函数$f(Y)$归一化得到y值；最后，根据面砖外墙劣化程度评级标准评估劣化程度等级，并开展相应的维护修复措施。

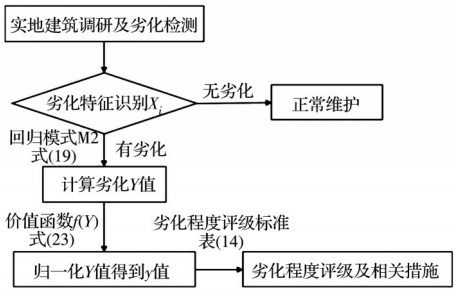


图7　ADTLR方法流程图

Fig. 7　Flowchart of ADTLR method

3　实例验证

采用经典定性评估方法QDAT、Ruiz等[10]提出的SEF方法以及本文提出的ADTLR方法，分别对实际建筑进行评估，以验证ADTLR的适用性与可靠性。结合典型外墙劣化特征，调研了成都市多处民居建筑，最终选用南铜路临街建筑群作为试验验证对象。该片区建筑多建于2000年前后，经历多年风雨，外墙劣化问题严重。选取10处典型外墙劣化案例（图8）开展验证，案例涵盖表面劣化、结构劣化及复合劣化3大类型，图中1^{*}～10^{*}为验证案例序号。

表15为采用ADTLR对各验证案例的评估结果。表中特征识别表示案例被识别出的劣化特征，即在采用模型M2进行评估时，对应劣化特征为1。劣化验证结果表明，表面劣化案例1^{*}、2^{*}、10^{*}的评估等级较低，其余结构劣化和复合劣化案例的评估等级较高，与实际经验相符。

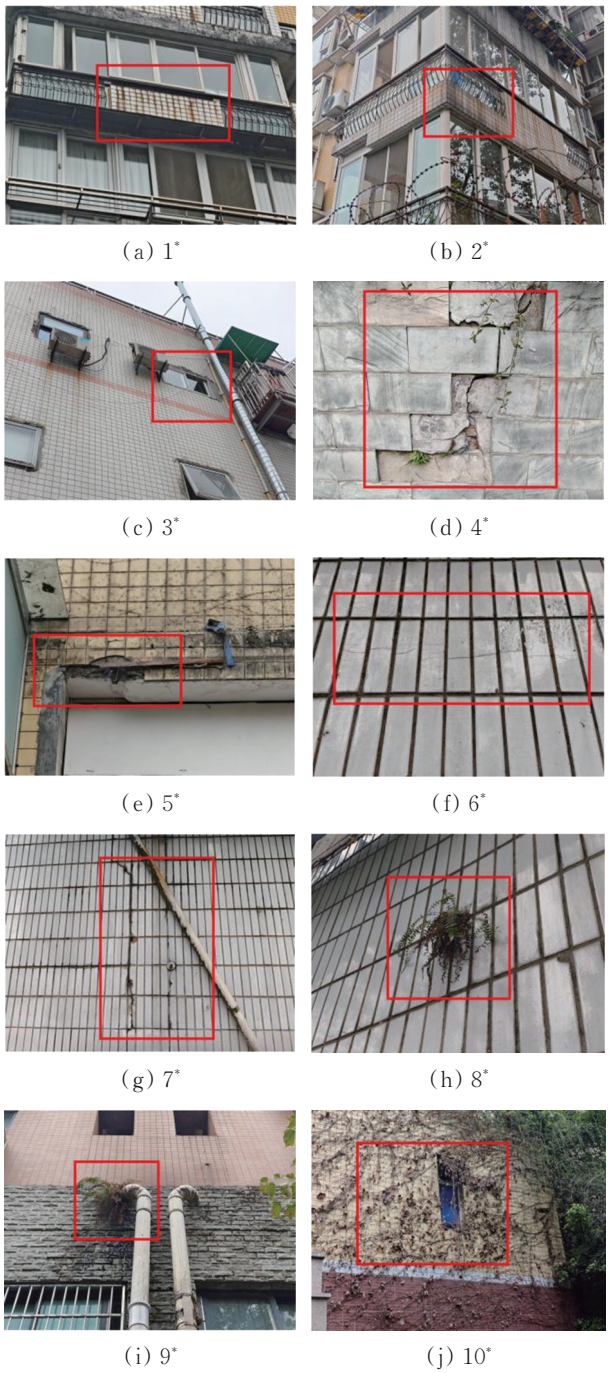
表15　ADTLR评估验证案例

Table 15　Evaluation of verification cases with the ADTLR method

序号	特征识别	Y值	y值	等级
1^{*}	X_2	1.001	0.081	0级
2^{*}	X_2	1.001	0.081	0级
3^{*}	X_9	3.128	0.926	4级
4^{*}	X_6、X_9	4.000	1.000	4级
5^{*}	X_2、X_5、X_9	4.000	1.000	4级
6^{*}	X_5	1.912	0.444	2级
7^{*}	X_6	2.378	0.667	3级
8^{*}	X_{12}	2.249	0.615	3级
9^{*}	X_{12}	2.249	0.615	3级
10^{*}	X_{11}	1.685	0.330	1级

表16为采用SEF方法对各验证案例的评估结果。SEF方法计算流程较为复杂，具体步骤可参考文献[10]。表中等级栏标注为F的，表示该方法无法对当前案例进行有效评估。此外，为使SEF方法的10级评估指标与本文5级评估指标相匹配，对其10级评估指标做了等比例合并，即SEF方法中的0级、1级合并为0级，2级、3级合并为1级，其余等级依次类推。由表16可知，超过半数的劣化案例无法通过SEF方法得到有效评估结果。

表17为3种方法对验证案例评估结果的对比，



(a) 1* (b) 2* (c) 3* (d) 4* (e) 5* (f) 6* (g) 7* (h) 8* (i) 9* (j) 10*

图8 验证案例

Fig. 8 Verification cases

其中QDAT对多处案例的评估结果存在模糊性;SEF方法对半数案例无法有效评估,且可评估案例的等级多为0级、1级,相比另外两种方法存在明显低估现象。ADTLR方法全面评估了10个劣化案例,与QDAT评估结果相比,使用ADTLR评估案例1*、2*的等级偏小,评估案例5*的等级偏大。这是因为QDAT易受主观判断影响,在劣化程度极值区间易出现低估或高估的评价偏差,而ADTLR通过引入价值函数进行修正,从而在一定程度上消除了评价的离散性。此外,其余案例QDAT与ADTLR评估结果完全一致。实际劣化案例对比验证表明,

表16 SEF方法评估验证案例

Table 16 Evaluation of verification cases with the SEF method

序号	特征识别	面积/m²	高度/h	等级
1*	X_2	1.08	10.70	1级
2*	X_2	0.90	4.50	1级
3*	X_9	0.17	7.70	F
4*	X_6、X_9	0.58	1.00	F
5*	X_2、X_5、X_9	0.08	1.00	F
6*	X_5	0.13	0.30	0级
7*	X_6	0.20	0.50	1级
8*	X_{12}	0.06	4.70	F
9*	X_{12}	0.36	2.20	F
10*	X_{11}	15.00	1.50	F

表17 验证案例评估结果对比

Table 17 Comparison of evaluation results of verification cases

序号	QDAT	SEF	ADTLR
1*	0~2级	1级	0级
2*	0~2级	1级	0级
3*	4级	F	4级
4*	4级	F	4级
5*	3~4级	F	4级
6*	2级	0级	2级
7*	3级	1级	3级
8*	3级	F	3级
9*	3级	F	3级
10*	1级	F	1级

ADTLR具备较为出色的适用性与可靠性。

4 结论

1)面砖外墙劣化主要分为表面劣化、结构劣化及复合劣化3类。其中结构劣化与复合劣化对面砖外墙的退化程度影响更为显著。

2)在图像库评估中,学生组与专家组的评估结果仅有微小差异,差异主要源于定性指标的模糊性。专家组评估结果具有较好的一致性;作为参考值,学生组评估结果仅在0级、4级评级区间存在显著差异,反映了评级极端值的特殊性。

3)所构建回归模型的决定系数R^2为82.45%,表明模型与实测数据拟合效果良好;各模型系数的P值均小于0.05,说明自变量对因变量的影响在统计学上显著;模型不存在严重的多重共线性与过拟合现象,残差分布基本符合正态分布且独立性良好。

4)与传统定性评估方法相比,ADTLR有效弱化了定性指标的模糊性,缩小了不同评估结果间的偏差。该方法简便高效、适用性强,可直接依据各类劣化特征的有无获得定量指标,实现劣化等级的

快速判定,可供非专业人士开展建筑面砖外墙劣化评估。

参考文献

[1] 住房和城乡建设部. 对十三届全国人大五次会议第8111号建议的答复[Z]. 2022-12-28.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Response to proposal No. 8111 of the fifth session of the thirteenth national people's congress[Z]. 2022-12-28. (in Chinese)

[2] 冯力强, 王欢祥, 晏大伟, 等. 建筑外墙饰面层内部缺陷红外热像法检测试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 57-61.
Feng L Q, Wang H X, Yan D W, et al. Experimental analysis of infrared thermography for detecting internal defects of decoration layer on exterior wall[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2014, 36(2): 57-61. (in Chinese)

[3] Pan N H, Tsai C H, Chen K Y, et al. Enhancement of external wall decoration material for the building in safety inspection method[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 26(3): 216-226.

[4] 张东波, 王卓琳, 蒋利学. 既有建筑外墙外保温系统无损和微损检测技术[J]. 施工技术, 2020, 49(9): 24-30.
Zhang D B, Wang Z L, Jiang L X. Nondestructive and micro-destructive detection technology for external wall thermal insulation system of existing buildings[J]. Construction Technology, 2020, 49(9): 24-30. (in Chinese)

[5] Ruiz F, Aguado A, Serrat C, et al. Optimal metric for condition rating of existing buildings: Is five the right number? [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(6): 740-753.

[6] 姜常玖, 商登峰, 朱玉华, 等. 既有建筑外墙完损检测快速评估方法[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(4): 128-132.
Jiang C J, Shang D F, Zhu Y H, et al. Rapid assessment method for integrity of damage detection of existing building facades[J]. Construction Technology, 2023, 52(4): 128-132. (in Chinese)

[7] Liao C T. Study on exterior wall tile degradation conditions of high-rise buildings in Taoyuan city[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2018, 17(3): 549-556.

[8] Galbusera M M, de Brito J, Silva A. The importance of the quality of sampling in service life prediction[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 19-29.

[9] 焦杨. 基于劣化定量分析的遗产建筑砖墙外立面评估体系研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
Jiao Y. Study on evaluation system of brick wall facade of heritage building based on quantitative analysis of deterioration[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)

[10] Ruiz F, Aguado A, Serrat C, et al. Condition assessment of building façades based on hazard to people[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(10): 1346-1365.

[11] 李梅婷. 长效防油涂层的制备及其性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
Li M T. Preparation and properties of long-acting oil-proof coating[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)

[12] Ferreira C, Barrelas J, Silva A, et al. Impact of environmental exposure conditions on the maintenance of facades' claddings[J]. Buildings, 2021, 11(4): 138.

[13] Yiu C Y, Ho D C W, Lo S M. Weathering effects on external wall tiling systems[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(3): 594-600.

[14] Wetzel A, Zurbriggen R, Herwegh M, et al. Long-term study on failure mechanisms of exterior applied tilings[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 335-348.

[15] Ferreira C, Neves L C, Silva A, et al. Stochastic maintenance models for ceramic claddings[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(2): 247-265.

[16] Guo S J. Advanced deterioration diagnosis model for building external wall tiles[J]. World Journal of Engineering and Technology, 2018, 6(2): 1-12.

[17] 杨庆山, 赵剑波, 刘纲, 等. 基于模糊层次综合分析的残损状态纯木结构安全评估方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(1): 110-117.
Yang Q S, Zhao J B, Liu G, et al. Safety assessment of wood structure in damaged state based on fuzzy analytical hierarchy approach[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(1): 110-117. (in Chinese)

[18] Alarcon B, Aguado A, Manga R, et al. A value function for assessing sustainability: Application to industrial buildings[J]. Sustainability, 2010, 3(1): 35-50.

[19] T/CECS 1434-2023 既有建筑外墙外保温工程安全风险评估标准[S].
T/CECS 1434-2023 Safety risk assessment standards for external wall external insulation engineering of existing buildings[S].

(编辑　朱备)