

既有房屋建筑拆除施工扬尘治理成本预测研究

华东交通大学土木建筑学院 刘伟 唐培涛 李可 刘静

摘要: 当前没有准确计算出建筑施工中的扬尘治理预估成本模型。根据过去的及现在已知的或非确定的信息建立灰色预测模型, 结合拆除施工项目成本的历史发展趋势建立基于 GM(1,1)预测模型, 从而确定未来扬尘治理成本发展变化的趋势, 得到扬尘治理预估成本。为了进一步提高预测精度, 建立了单段函数残差辨识模型, 从 2010 年-2018 年历年扬尘治理实际成本与预测成本的相对误差为 0.00295%~0.07706%之间, 并通过工程实例测算得到 2019 年南昌某处拆除工地平均综合治理扬尘成本与预测模型所得到的结果接近, 验证了扬尘治理成本模型的准确性。

关键词: 拆除施工; 扬尘治理; 预测模型; 成本研究

1 引言

随着我国新型城镇化的加快发展, 一大批老旧建筑和棚改区将被拆除, 老旧建筑和棚改区的拆除会产生大量的建筑垃圾, 造成一系列环境污染问题。据统计, 城镇垃圾总量中有 30%~40%为建筑垃圾, 随着城市化进程的加快, 城市建筑垃圾数量也会急剧增长。近年来, 全国大气环境空气质量整体有明显的改善, 但是局部地区也存在一定程度的大气环境污染, 尤其是颗粒物污染最为突出。据气象部门的统计数据表明, 大气环境颗粒物污染中颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的污染天数占重度污染天数的 74.2%和 20.4%。大气环境颗粒物污染的主要来源之一是施工扬尘颗粒物污染, 通过控制施工工地扬尘颗粒物污染能够降低大气环境污染程度。因此, 为加快改善大气环境空气质量, 打赢蓝天保卫战, 那么施工工地扬尘污染治理便是首要任务之一, 对施工扬尘颗粒物治理成本的预测也显得至关重要。

建筑施工扬尘污染是指由于在建筑施工过程中人为施工活动将施工现场潜在的扬尘源中的扬尘颗粒物排放入大气环境中, 因而造成了大气环境扬尘颗粒物的污染^[1]。近年来研究大气环境污染的切入点比较多, 包括无机气溶胶、金属元素和氮组分影响等都是研究大气环境污染的研究方向^[2]。关于雾霾形成机理和治理技术方面

的综合性和学术性的研究报道很多^[3]，目前有较多研究采用分解技术对大气污染排放量、排放强度、和削减量^[4]的影响因素进行分解来研究大气环境污染。无机粉尘可作为二次无机气溶胶形成的光催化剂^[5]，在雾霾高发季节应限制建筑施工的扬尘，向城市空气中喷雾或路面洒水清除法清除雾霾的效果显著^[6]，在大中城市已得到广泛应用。卢睿等(2016)认为在施工过程中不能合理的处置建筑材料是造成污染的主要原因，城市监管力度低、市民环保意识薄弱等原因使城市的扬尘污染不断加剧^[7,8]。Sung Kin Pun 等(2006)认为建筑物拆卸是建筑业中最常见的活动之一。常用的拆除技术有机械拆除、拆除和混合拆除。虽然解构主义以其环保的方式被提倡，但是不同技术下的拆除项目成本比较却很少被研究^[9]。Mohamed Marzouk 等(2008)提出了一种基于多目标优化的建筑污染治理新框架，计算由于灰尘、有害气体和噪音而对项目涉及的每项活动所产生的污染。该应用程序考虑了建筑活动的动态性，包括不同类型的关系和活动临界性的变化^[10]。基于修正后的理论框架，Tan Hai Dang Nguyen 等(2018)进行了多案例研究，探索这些利益相关者影响建设项目所采取的具体行动的常见组合和顺序。强调有必要与利益攸关方进行充分和诚实的接触，以防止利益攸关方对建设项目产生不利影响^[11]。为了将防治扬尘污染的工作落实需要多个部门配合协调工作，联合执法。但在中国大部分的城市中很多地区的部门没有实现联合执法，出现互相推脱责任的现象，影响了建筑施工中扬尘污染的防治^[12]。随着环保局施工扬尘整治办法的出台，各地区将建筑扬尘治理纳入标准化工地创建工作，扬尘治理采取的各项措施也必然要纳入工程项目成本费用当中。林伟强(2013)根据当前建筑市场工程项目严要求、利润低的现状，通过采取科学合理的项目管理模式和方法，提高管理效率降低管理成本^[13]。施工企业的成本管理与控制策略在施工运行过程中的作用也日益重要，施工企业项目成本管理是一个有机联系并相互制约的系统过程，王巧渭(2010)认为应建立文件化的项目成本管理模式^[14]。Long D 等(2019)认为项目复杂性是影响项目性能的一个因素。了解项目复杂性如何与管理活动和项目性能交互是必要的^[15]。Susanna Hedborg Bengtsson(2019)确定了基于公司的模型、基于项目的模型和基于系统的模型之间的差异，并建议在研究和实践中实施协调建设物流时，应考虑发展、影响和目标等方面的差异^[16]。Madelyn Marrero 等(2010)提出基于建筑成本系统(BCS)的一种处理与建筑和拆除废物管理有关的成本

的高精度新方法，并产生了独立于一般预算的估计^[17]。邵松玲等(2019)为了预测业务成本，他们在灰色理论的基础上进一步优化预测模型，采用拟合一致性方法构建GM-Verhulst-SCGM 组合灰色预测模型对业务成本进行预测^[18]。鉴于影响工程施工成本因素之间复杂的非线性关系，进行准确的工程施工成本预测有一定难度，樊树海等(2017)对单位产品制造成本的波动过程进行建模，采用模型对规律性偏移过程进行预测^[19]。王惠珍(2015)建立改进优化后的GM(1,1)模型，通过对成本历史数据统计分析筛选，结果表明拟合曲线能够理想的进行相应成本预测及控制^[20]。孙晓彤等(2015)针对建筑工程质量成本的预测问题，建立建筑工程质量成本的径向基神经网络预测模型并采用均方根误差进行检验，预测精度较高，预测结果与实际情况较吻合^[21]。在不确定性环境下为有效提高企业运营成本管理，梁丽莉等(2011)将预测技术和模糊理论相结合，构造了一种快速准确确定工程合理成本的模糊估测模型，并开发出相应操作程序^[22]。建筑施工质量与环境污染防治成本是一对相互博弈的自相关关系模型，采用 关联均衡博弈进行环境污染防治的成本分析和工程造价控制，对促进环境保护具有重要意义^[23]，通过统计分析和量化分析方法可以有效节约了治理成本开销。

目前，我国不仅对既有建筑拆除工程施工扬尘颗粒物的控制与治理缺乏深入研究而且鲜有对扬尘治理成本的研究。基于以上原因，本文基于相关的施工扬尘控制规范为依据，对拆除工程施工扬尘综合治理成本进行研究。采用单段函数残差GM(1,1)预测模型根据扬尘治理成本发展变化的趋势，预测得到拆除工程平均单位面积扬尘治理成本。

2.模型的构建及数据

2.1 扬尘治理成本预测模型

通过调查取得拆除工程施工扬尘颗粒物治理成本的历史数据资料，采用经验总结、统计分析及数学模型的方法对拆除施工扬尘治理成本进行判断和推测。为了科学合理的进行扬尘颗粒物污染治理成本预估分析，构造扬尘治理成本的预估模型。设有原始序列：

$$a^{(0)}(t) = \{a^{(0)}(1), a^{(0)}(2), \dots, a^{(0)}(m)\} \quad (1)$$

一般来说，原始数据的时间序列会包含许多不确定的随机不利影响因素，要想获得模拟结果真实可靠，因此必须采取一定的措施对原始数据进行加工预处理，将随机不利因素弱化降低对模拟的偏移影响，应用微分拟合方法建立预测模型。首先对 $a^{(0)}(t)$ 进行一次累加得到生成的序列 $a^{(1)}(t)$ ，再根据 $a^{(1)}(t)$ 建立 GM(1,1) 模型。其微分方程为：

$$\frac{da^{(1)}(t)}{dt} + b a^{(1)}(t) = c \quad (2)$$

在(2)式中： b 和 c 为待定参数，可根据最小二乘法来确定 b 和 c 的值。其参数向量为：

$$\hat{b} = [b, c]^T = (D^T D)^{-1} D^T Y_m \quad (3)$$

式(3)中， $D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(a^{(1)}(1) + a^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(a^{(1)}(2) + a^{(1)}(3)) & 1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ -\frac{1}{2}(a^{(1)}(m-1) + a^{(1)}(m)) & 1 \end{bmatrix}$ ， $Y_m = [a^{(0)}(2), a^{(0)}(3), \dots, a^{(0)}(m)]^T$ 。

通过对微分方程求解，再依次累加微分方程的解后得预测模型为：

$$\hat{a}^{(1)}(t+1) = \left(a^{(0)}(1) - \frac{c}{b} \right) e^{-bt} + \frac{c}{b} \quad (4)$$

对上式(4)求导，还原得到原始序列的预测模型为：

$$\hat{a}^{(0)}(t+1) = (-b) \left(a^{(0)}(1) - \frac{c}{b} \right) e^{-bt} \quad (5)$$

原始数据列预测值 $\hat{a}^{(0)}(t)$ 与原始数据列 $a^{(0)}$ 相比较，原始数据列预测值具有的不利后果为精度不够高而且预测期短。为了杜绝预测模型的不利后果提高预测精度，采用单段函数残差辨识可以有效的避免上述不利后果的出现。由原始数据列 $a^{(0)}(t)$

和预测列 $\hat{a}^{(0)}(t)$ 构成残差序列为:

$$E^{(0)}(t) = a^{(0)}(t) - \hat{a}^{(0)}(t) \quad (6)$$

按上述采用单段函数残差优化预测模型的建模方法, 构建得到残差 GM(1,1)模型:

$$\hat{E}^{(0)}(t+1) = (-a') \left(E^{(0)}(1') - \frac{c'}{b'} \right) e^{-bt'} \quad (7)$$

残差模型具有的特点是在一般情况下只注重修正原点附近的数, 而不是对所有的数都进行修正。正是考虑到残差模型这一特征, 因此本文不采用全部残差建模, 而用原点附近残差较大值来建立预测模型。所以得到修正后的预测模型为:

$$\hat{a}^{(0)}(t+1) = (-a) \left(a^{(0)}(1) - \frac{c}{b} \right) e^{-bt} + F(t-i)(-b') \left(E^{(0)}(1') - \frac{c'}{b'} \right) e^{-bt'} \quad (8)$$

式(8)中 $F(t-1) = \begin{cases} 1 & t \geq i \\ 0 & t < i \end{cases}$ 。经过修正后的预测模型代表差分方程, 修正后结果

与 $F(t-1)$ 选取有关。

本文将预测结果精度等级分为不合格、勉强、合格及好共四个等级, 后验差比值越小、小误差概率值越大, 则预测精度等级越高。当后验差比值 $H \geq 0.65$, 小误差概率 $P \leq 0.75$ 时, 此时可认为预测精度等级为不合格; 当后验差比值 $H < 0.65$, 小误差概率 $P > 0.75$ 时, 此时可认为预测精度等级为勉强; 当后验差比值 $H < 0.50$, 小误差概率 $P > 0.85$ 时, 此时可认为预测精度等级为合格; 当后验差比值 $H < 0.35$, 小误差概率 $P > 0.95$ 时, 此时可认为预测精度等级为好。扬尘治理成本预测精度等级如表 1 所示。

表 1 预测精度等级

预测等级	后验差比值 H	小误差概率 P
好	<0.35	>0.95
合格	<0.50	>0.85
勉强	<0.65	>0.75
不合格	≥0.65	≤0.75

注：后验差比值 $H = \frac{s_1}{s_2}$ ，小误差概率 $P = \left\{ \left| E^{(0)}(t) - \bar{E} \right| < 0.6745s_1 \right\}$ 。其中 $a^{(0)}(t)$ 的平均值 $\bar{a} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m a^{(0)}(t)$ ，方差 $s_1 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (a^{(0)}(t) - \bar{a})^2}$ 。残差 $E^0(t)$ 的平均值 $\bar{E} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m E^0(t)$ ，方差 $s_2 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t=1}^m (E^0(t) - \bar{E})^2}$ 。

2.2 拆除工地调研及成本数据

近年来，随着南昌市的旧房改造及新型城镇化的推进，南昌市的拆除工程项目增多。依据《中华人民共和国大气污染防治法》和《南昌市环境污染防治条例》中施工扬尘的管理要求，为了降低施工扬尘颗粒物大气污染，南昌市已经采取强制性污染控制措施，要求拆除工程加大施工现场扬尘颗粒物排放的管控工作，细化扬尘治理工作。本次拆除工程施工扬尘污染治理情况调研所选取拆除工程工地能够较好地满足拆除工程扬尘治理要求，没有被环保部分约谈或处罚的。选取南昌市内 20 个拆除工地为研究对象，展开调查分析拆除工地施工扬尘治理成本情况。

表 2 建筑拆除工程扬尘治理措施的实施情况

扬尘治理措施	使用数量
防尘网覆盖	16
铁皮覆盖	5
围墙、围挡	19
人工洒水	18
喷淋降尘装置	9
车辆冲洗	17

调查 20 个拆除施工工地，调查内容包括各拆除施工工地的基本信息：(1)拆除工程的规模、拆除施工工期、拆除施工现场机械设备使用情况等；(2)拆除施工工地在边界围挡、裸露地面覆盖、易扬尘物质覆盖、持续洒水降尘以及运输车辆冲洗等控尘措施的落实情况；(3)拆除施工工地扬尘治理措施的费用问题。在这 20 个调查拆除工程项目中，有 16 个拆除工地使用防尘网覆盖建筑垃圾进行防治扬尘；有 5 个拆工地使用铁皮覆盖建筑垃圾防治扬尘；有 19 个拆除工地利用围墙、围挡防治扬尘；有 18 个工地通过人工洒水的方式防治扬尘；有 9 个工地使用喷淋降尘装置防治扬尘；有 17 个工地使用车辆冲洗设备防治扬尘。表 2 为二十个拆除工程项目扬尘治理措施的实施情况。

表 3 选取 20 个调查拆除施工工地基本情况汇总表

区名	工地数 (个)	施工工地面积 (m ²)	总施工时间 (天)	施工机械数量(辆)			运输车		洒水车	
				挖掘机	液 压 破 碎 锤	铲 车	数量 (辆)	(次 /日)	数量 (辆)	(次/ 日)
东湖区	3	19789.81	90	3	6	3	9	6	3	3
西湖区	2	17190.43	60	3	5	2	6	6	2	3
青云谱区	4	33077.71	120	6	8	4	10	11	4	4
湾里区	4	29866.46	137	6	8	4	10	12	4	4
青山湖区	2	15622.72	65	2	4	2	5	7	2	4
新建区	2	17507.63	75	3	4	2	6	6	2	3
进贤县	1	6943.64	30	2	2	1	4	3	1	3
南昌县	1	9476.48	45	2	2	1	5	3	1	4
安义县	1	5632.77	25	2	2	1	3	3	1	3

调查的 20 个拆除施工工地的基本情况见表 3，最明显的特征有：(1)拆迁工地的拆除施工周期较短；(2)机械设备的使用与拆除施工规模和工地面积量有密切的联系，拆除施工规模和拆除工地面积越大，涉及的机械设备种类和数量也就越多；(3)每个拆除工地平均拥有 4 辆施工机械，每个拆除工地平均拥有运输车为 3 辆左右；(4)拆除施工工地都采取了洒水降尘的扬尘颗粒物治理措施，平均每个拆除工地拥有 1 辆洒水车，工地(道路)洒水的次数平均每天 3 次左右。

表 4 20 个拆除工地施工的拆除公司自 2010-2018 年平均拆除工程单位面积扬尘治理成本 单位 (元/m²)

拆除公司	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
1	7.45	8.89	9.28	9.99	10.91	14.83	17.54	19.99	25.3
2	7.6	8.22	9.45	10.48	11.55	14.58	18.01	19.87	24.84
3	6.9	7.87	9.34	11.78	12.93	14.92	17.76	21	23.94
4	7.29	8.23	9.88	10.91	12.01	14.87	17.98	21.96	24.68
5	7.89	8.48	9.79	10.34	11.79	13.94	18.23	20.46	23.95
6	7.31	8.16	9.58	10.61	11.48	14.96	18.21	19.83	25.47
7	7.93	8.45	9.42	10.37	10.87	14.56	17.45	19.12	23.16
8	7.44	8.42	9.45	10.79	10.71	14.69	17.36	20.36	24.96
9	7.16	8.17	9.35	10.46	11.93	14.3	17.73	20.59	24.58
10	7.95	8.49	9.63	11.12	11.84	14.37	17.94	21.03	24.35
11	7.71	8.55	8.98	10.56	11.91	14.38	17.95	19.95	24.63
12	7.95	7.68	8.67	10.68	12.01	14.75	17.99	20.71	23.75

13	7.57	7.46	9.72	10.35	11.39	14.63	17.73	20.41	23.35
14	7.45	9.1	9.88	10.12	11.83	14.26	17.83	19.43	24.67
15	7.84	8.35	9.78	10.4	11.56	14.35	18.02	19.47	24.45
16	6.69	8.24	10.1	10.38	11.89	14.47	17.99	20.5	24.69
17	7.51	8.88	9.91	10.79	11.59	14.44	18.02	20.56	25.07
18	7.93	8.74	9.65	10.89	11.82	14.21	17.79	20.58	25.65
19	7.85	8.67	9.78	10.9	11.96	13.96	17.85	20.59	24.7
20	7.79	8.34	9.82	10.89	11.68	13.56	17.74	21.03	24.4
平均值	7.56	8.37	9.57	10.64	11.68	14.45	17.86	20.37	24.53

通过对在这 20 个拆除工地拆除公司自 2010 年到 2018 年在拆除工程项目中单位面积扬尘治理成本进行调查, 其单位面积扬尘治理成本如下表 4 所示。调查中发现各拆除施工工地扬尘防治费用只占总拆除工程施工费用的不足 3%的比例, 扬尘防护费用预算严重不足(如表 5 所示), 因而导致扬尘治理方案实施所需资金不足。调查发现几乎所有被调查的拆除施工工地都明确制定扬尘控制实施方案, 但是该扬尘控制实施方案的内容宏观空洞, 缺乏实地落实难度较大。从实地除尘控制情况来看, 各项扬尘防护措施中, 边界围挡及车辆冲洗落实执行相对较好, 但道路积尘多, 需要及时冲洗, 避免二次扬尘。拆除施工工地四周边界围挡所用材质差异较大(铁皮、彩钢和砖砌围墙等), 且拆除工地围挡密闭性普遍较差。要加强对车辆冲洗, 避免存在运输沿路撒漏情况。在洒水降尘方面, 采用了喷淋设备, 同时配合使用水管人工进行喷洒。

表 5 20 个拆除工地拆除工程费用及扬尘防治费用情况

拆除工地序号	拆除工地面 积(m ²)	拆除建 筑面积(m ²)	拆除工 程费用 (元)	扬尘防 治费用 (元)	扬尘防治费 用占拆除费 用比例(%)
1	7455.65	39457.34	6618182	182000	2.75
2	6532.56	29543.48	7800000	167700	2.15
3	5799.6	43626.43	5975000	136230	2.28
4	6987.54	30504.6	8252261	164220	1.99
5	10202.89	50503.8	11688412	272340	2.33
6	9767.74	44032.54	11253680	259960	2.31
7	7846.4	35067.43	10084848	199680	1.98
8	7057.67	34437.45	6932943	183723	2.65
9	8405.9	38532.9	8792903	218064	2.48
10	6432.4	33259.54	5953803	169088	2.84
11	9456.98	46540.07	10411154	243621	2.34
12	7300.65	32020.84	8773333	192136	2.19
13	6676.43	28070.43	8316635	172986	2.08

14	9367.97	41300.7	9443360	238917	2.53
15	6254.75	35043.65	5379094	154380	2.87
16	8864.09	35854.64	8012955	197920	2.47
17	8643.54	36709.43	11619348	213796	1.84
18	6943.64	38443.65	6912970	183885	2.66
19	9476.48	40532.65	9781181	248442	2.54
20	5632.77	25003.76	5424873	149184	2.75

3.模型预测结果分析

根据南昌市城区 20 个拆除工程公司 2010 年-2018 年平均拆除工程单位面积扬尘治理成本费用，用这 9 年的平均拆除工程单位面积扬尘治理成本费用表征南昌市 2010 年-2018 年每年的单位拆除工程面积扬尘治理成本。从而得到江西省南昌市 2010 年-2018 年房屋建筑拆除工程平均单位工地面积的扬尘治理成本，具体数据如表 6 所示。

表 6 江西省南昌市 2010 年-2018 年单位面积扬尘治理成本 元/m²

年度	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
单位成本	7.56	8.37	9.57	10.64	11.68	14.45	17.86	20.37	24.53

把 $a^{(0)}(t) = \{7.56, 8.37, 9.57, 10.64, 11.68, 14.45, 17.86, 20.37, 24.53\}$ ，经过一次累加生成数列得到：

$$a^{(1)}(t) = \{a^{(1)}(1), a^{(1)}(2), \dots, a^{(1)}(9)\} = \{7.56, 15.93, 25.5, 36.14, 47.82, 62.27, 80.13, 100.5, 125.03\}$$

由本文前面理论得 GM(1,1)模型：

$$\hat{a}^{(0)}(t+1) = 6.0345e^{0.1512t}$$

经过还原检验，模型预测计算结果如表 7 所示。根据计算结果可以看出：这 9 年当中模型计算残差的范围在 -1 到 3.27 之间，相对误差的范围在 -0.00295% 到 0.07706% 之间，该模型的误差较大，因此还需进一步优化该成本预测模型。模型中的计算值与观察值的对比如图 1 所示。

表 7 模型计算值及残差情况

年份	编号	实际成本 t	预测成本	残差 (e)	相对误差/%
2010	1	7.56	7.02	-0.54	0.07143
2011	2	8.37	8.17	-0.2	0.02389
2012	3	9.57	9.50	-0.07	0.00731

2013	4	10.64	12.85	2.21	0.20771
2014	5	11.68	14.95	3.27	0.07706
2015	6	14.45	14.76	0.31	0.02145
2016	7	17.86	19.45	1.59	0.08903
2017	8	20.37	20.23	-0.14	0.00687
2018	9	24.53	23.53	-1	0.04077

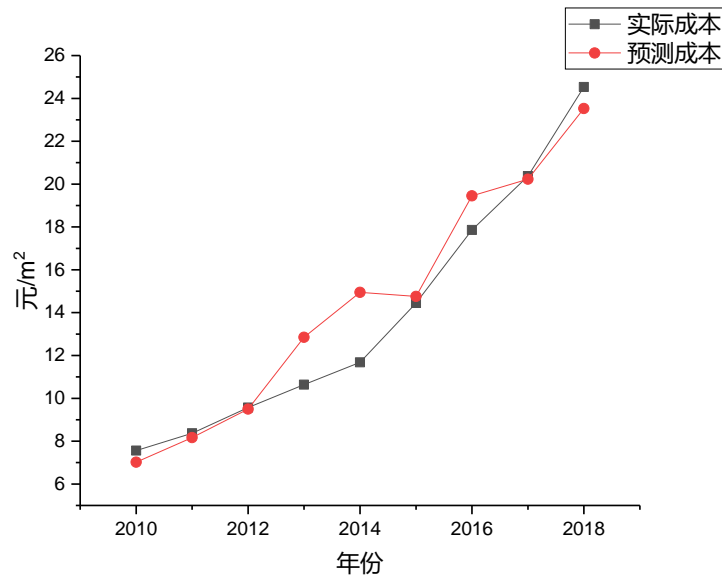


图 1 模型计算值与观察值的对比

经后验差检验得到小误差概率 $P = \left\{ \left| E^{(0)}(t) - \bar{E} \right| < 0.6745s_t = 1.2047 \right\} = 1$ ，查精度等级表 1 可知精度等级为合格。为了进一步提高预测精度，以残差 $E^0(t)$ 为原始数据建立残差模型($t=3$ 以后修正)，该模型后验差比值 $H \leq 0.35$ ，小误差概率 $P > 0.95$ ，因此修正后的模型预测等级为好。

$$\hat{E}^{(0)}(t+1) = 6.0345e^{0.1597t}$$

建立残差修正后模型：

$$\hat{a}^{(0)}(t+1) = 6.0345e^{0.1597t} - F(t-3)0.6035e^{0.1597(t-3)}$$

$$F(t-3) = \begin{cases} 1 & t \geq 3 \\ 0 & t < 3 \end{cases}$$

经过还原检验，结果如表 8 所示。

表 8 模型修正后 扬尘治理成本预测值

年度	年次	实际成本	预测成本	残差(e)	相对误差/%
2010	1	7.56	7.08	-0.48	0.06349
2011	2	8.37	8.31	-0.06	0.00717
2012	3	9.57	9.74	0.17	0.01776
2013	4	10.64	10.72	0.08	0.00752
2014	5	11.68	12.58	0.9	0.07706
2015	6	14.45	14.76	0.31	0.02145
2016	7	17.86	17.31	-0.55	0.0308
2017	8	20.37	20.31	-0.06	0.00295
2018	9	24.53	23.83	-0.7	0.02854
2019	10	-	27.95	-	-

经过扬尘治理成本预估模型计算得到 2019 年拆除工程施工的单位面积扬尘治理成本为 27.95 元/m²，经过对扬尘治理成本预估模型后验差检验：得到本模型满足要求，精度等级为好的结果。

4.扬尘治理成本实例分析

4.1 工程概述

南昌市在 2017 年颁布了《南昌市建筑工地扬尘专项治理的实施方案》，进一步强化施工扬尘颗粒物污染的管控，开展建筑工地扬尘专项治理工作。通过拆除工程施工扬尘颗粒物治理，实现建筑工地扬尘防治制度化、规范化，推进建筑工地“八个 100%”的现场管理落实，建立健全拆除工程施工扬尘长效管理机制。(南昌市行政区划图如图 2 所示)



图 2 江西省南昌市行政区位图

该拆除工程项目位于江西省南昌市某处，拆除工程拆除范围包括 107、107A、107C、107D 建筑物及构筑物地面以上部分拆除工程，其中 107 是五层框架结构的教学楼，107A 为二层砖混结构的学校医院，107C 为四层框架结构的学生宿舍楼，及 107D 为二层砖混结构的学校礼堂。本拆除工程要求在 2019 年 9 月 11 日至 2019 年 10 月 5 日工期 25 天完成。拆除施工现场没有砖砌围墙处的围护结构采用彩钢完全封闭，围挡高度不低于 1.8 米，围护结构东侧与围墙相接，该拆除工程扬尘治理各项措施落实布置如图 3 所示。

4.2 扬尘控制措施成本分析

(1) 边界围挡

本拆除工程施工现场都采用了边界围挡，围挡的材质主要是原有砖砌围墙和彩钢(含钢架)。根据拆除施工围挡材质的市场价格计算，砖墙的成本价格在 100~260 元/平方米之间，平均为 170 元/平方米左右；彩钢的成本价格在 35~175 元/平方米之间，平均为 75 元/平方米左右。

(2) 裸地覆盖

本拆除施工工程对拆除施工现场建筑废料采取覆盖措施，覆盖的材质为防尘网。拆除施工工地为 5000 平方米(覆盖面积)/万平方米(工地面积)。根据围挡材质的市场

价格计算，防尘网的成本价格在 2~50 元/平方米之间，平均为 12 元/平方米。

(3)持续洒水作业

本拆除施工工程采用租赁洒水设备进行拆除施工现场洒水作业，单次洒水作业的费用在 700~1000 元/次左右(含水费)。拆迁工地不需要硬化道路路面，但是要在通道上不定期做人工喷淋及清洁防尘工作，洒水的次数根据现场实际扬尘情况确定。平均计算拆除阶段单位洒水强度为 0.6 次/万平方米·天。本拆除工程施工工地也采用了喷淋设备进行喷淋洒水降尘，喷淋设备市场采购单价一般为 0.3 万元/套。

(4)运输车辆冲洗

运输车辆的冲洗成本包括运输车辆冲洗设备价格和冲洗用水费用两部分组成。车辆自动冲洗设备的市场价格一般在 1 万元/套左右，高压泵 0.25 万元/个，沉沙井+过水槽在 0.5 万元/座左右。车辆的冲洗成本按照 1.2 立方米/车来计算。

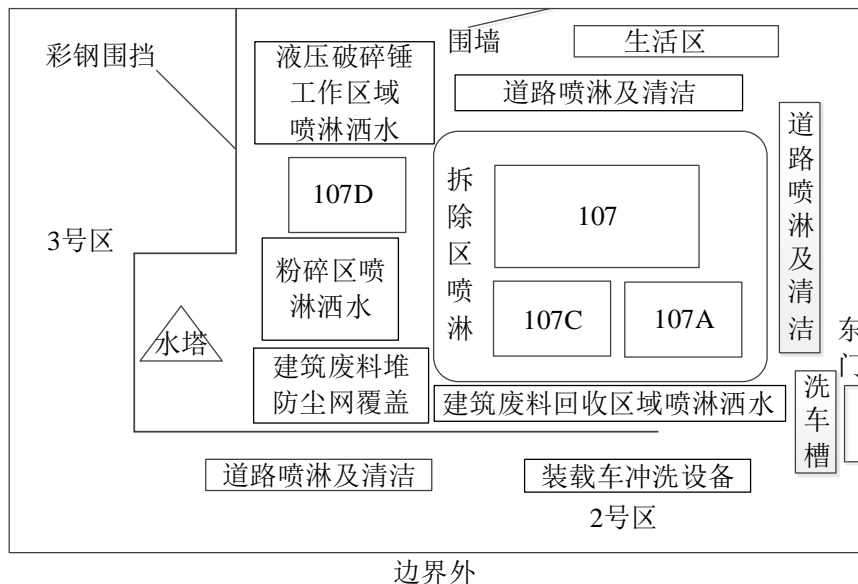


图 3 该拆除工程扬尘治理措施布置图

4.3 扬尘治理成本核算

按照张丹等(2016)关于工地施工扬尘治理成本分析的方法^[24]，对施工扬尘治理措施的单项成本分析。该拆除工程总占地面积约为 5000 平方米，总建筑面积约 13798.95 平方米，工地的建筑废料为 32000 立方米，对拆除施工扬尘的防治成本进行测算：

5000	32000	25	2.25	0.6	9.0	1.2	13.05	26.1
------	-------	----	------	-----	-----	-----	-------	------

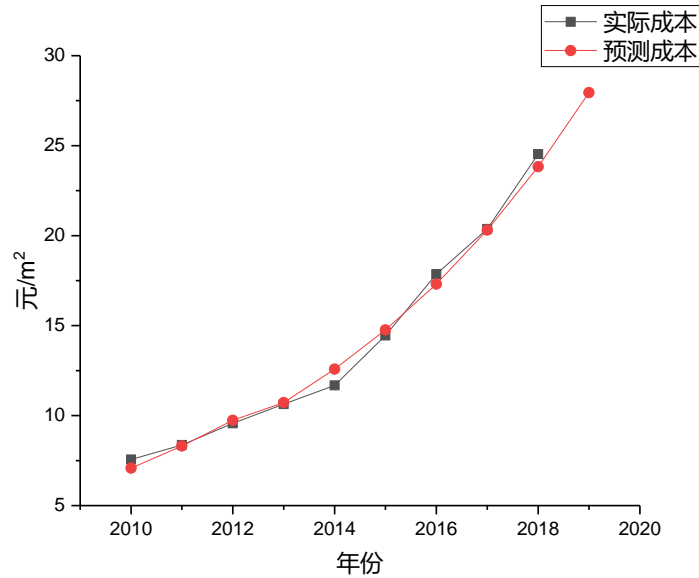


图 5 扬尘治理实际成本与预测值的拟合程度

4.4 讨论与分析

为了验证拆除工程施工中扬尘治理成本预估模型的整体有效性，基于南昌市房屋建筑拆除施工单位调查挖掘得到江西省南昌市 2010 年-2018 年扬尘治理单位成本数据。采用 拆除工程施工中 扬尘污染防治成本估算模 型测试时，该模型得到的拆除工程施工场地扬尘治理成本 与实际扬尘治理成本基本相符，扬尘治理实际成本与预测值的拟合程度如图 5 所示。

根据上述分析可以得到：(1)从 2010 年-2018 年历年扬尘治理实际成本与预测成本的相对误差来看，2017 年实际成本与预测成本的相对误差最小为 0.00295%，2014 年实际成本与预测成本相对误差最大为 0.07706%。通过相对误差也可以反映出该预测模型能够较好地预测出拆除工程施工中扬尘治理成本。(2)为了进一步验证建筑施工中扬尘污染防治成本预估模型的有效性，采用扬尘治理成本预估模型预测得到 2019 年南昌市扬尘治理成本为 27.95 元/平方米，这与 2019 年南昌某处实际拆除施工项目的所采取的扬尘治理方案的措施成本 26.1 元/平方米的相对误差为 0.07088%，说明拆除工程施工中扬尘治理成本预估模型的精准度较高，预估结果的准确率较高。虽然预测模型得到的扬尘治理成本与实际扬尘治理成本基本相符，但是在拆除工程的扬尘治理成本的实际应用中，还必须考虑诸如材料消耗定额的变化，物价变化等因素的影响，并确定其影响程度，最后对预测成本加以修正才能得到科学的结果。

国内对扬尘治理研究的专家和学者众多，然而以扬尘治理为背景对拆除工程施工扬尘治理成本预测的研究非常少。现有关于扬尘治理的研究，绝大多数都是与扬尘的排放因子、扬尘的扩散规律、扬尘的治理措施等方面的探讨，对于扬尘治理措施的成本研究非常少，对拆除工程施工扬尘治理成本预测的研究那就更少了。有个别学者对扬尘治理成本进行相关的研究，但其研究也仅限于对现有拆除工程扬尘治理措施成本的计算，并没有涉及到扬尘治理成本的预测。而且本文结合拆除施工项目的历史成本建立基于 GM(1,1)预测模型，得到扬尘治理预估成本。为了进一步提高预测精度，建立单段函数残差辨识模型，所得到的预测成本与相应的治理成本误差很小，精度较高。

5 结论

本文建立了拆除工程扬尘治理成本的灰色预测模型，为拆除工程扬尘治理费用提供了一种快速、简便、准确的成本预测方法，该扬尘治理成本预测模型的预测结果与实际成本误差不大，相对误差介于 0.00295%~0.07706%之间。通过对拆除施工扬尘成本预测，可以为建设单位、拆除工程施工企业决策编制拆除施工扬尘成本计划提供数据。

通过对拆除工程施工扬尘治理成本预测，可以加强对拆除施工过程中的招投标环节、合同签订和管理环节、施工组织设计环节、扬尘专项管理环节、材料管理环节的管理，严格控制施工扬尘治理成本，为施工单位在扬尘治理背景下的施工阶段扬尘治理成本控制提供一些可行性措施。根据拆除施工扬尘成本的预测，拆除工程施工企业可以在项目工作分解结构((BWS)的基础上制定拆除工程项目成本计划，预计拆除施工消耗数量和价格，并综合考虑现场可能发生的技术措施费用和管理费用等。编制拆除工程扬尘成本计划时，应注意保证其成本计划具有可操作性、便于信息化和便于成本核算。在施工过程中要求成本管理责任人按实填写成本计划的执行情况，成本核算人员及时进行成本核算，并就核算结果与成本计划的偏差进行比较分析，有利于及时发现问题，找出施工项目成本管理中的薄弱环节，采取相应措施，在保证扬尘治理的同时还可以减少成本费用支出。

建筑物在全生命周期需要排放大量扬尘，其中，施工扬尘在空气悬浮颗粒物 PM_{2.5}，PM₁₀浓度中占比 10%以上，拆迁项目施工现场空气悬浮颗粒物的浓度是相同区域的 7 倍。因此，减少拆除工程工地扬尘是治理雾霾天气的重中之重。政府部门在扬尘治理过程中，可以借鉴本文关于拆除工程扬尘治理成本的预测值，对拆除工程进行分级，限定该拆除工程扬尘治理费用的最低标准，让拆除施工单位有专项资金去落实拆除施工工地的扬尘治理措施。拆除施工单位有足够的资金支持，拆除工地扬尘的治理才能达到环境保护和大气污染防治的标准，环境治理才会更有成效。

【参考文献】

- [1]杨璐,唐勇军.基于多联式遗传算法的运输网络成本研究[J].电子设计工程,2017,25(9):153-156.
- [2]Liu Zirui,Wang Yuesi,Hu Bo,et al.Source appointment of fine particle number and volume concentration during severe haze pollution in Beijing in January 2013 [J].Environmental Science and Pollution Research,2016,23(7):6845-6860.
- [3]Wang Junmei , Song Yujun , Zuo Jiangnan,et al.Compositions and pollutant sources of haze in Beijing urban sites,[J].Environmental Science and Pollution Research ,2016,23(9):8827-8836.
- [4]FUJII H, MANAUI S, KANEKO S. Decomposition analysis of air pollution abatement in China:empirical study for ten industrial sectors from 1998 to 2009[J].Journal of Cleaner Production,2013,59(18) :22-31.
- [5]Chu Biwu,Liu Tengyu,Zhang Xiao,et al.Secondary aerosol formation and oxidation capacity in photooxidation in the presence ofAl₂O₃ seed particles and SO₂.Science China Chemistry,2015, 58(9):1426-1434.
- [6]Yu Shaocai.Water spray geoengineering to clean air pollution for mitigating haze in China's cities[J].Environmental Chemistry Letters , 2014 ,12 (1)109-116.
- [7]卢睿,李学伟.工程建筑企业投标中的项目成本预测研究[J].铁道工程学报,2016,33(6):104-109.
- [8]喻海涛,秦卫星,兰天,等.山区中小河流治理成本的 BP 神经网络估算模型[J].人民黄河,2016,38(4):34-37.
- [9]Sung Kin Pun,Chunlu Liu,Craig Langston. Case study of demolition costs of residential buildings[J]. Construction Management and Economics,2006,24(9): 967-976.
- [10]Mohamed Marzouk,Magdy Madany,Azza Abou-Zied,Moheeb El-said. Handling construction pollutions using multi-objective optimization[J]. Construction Management and Economics,2008,26(10):1113-1125
- [11]Tan Hai Dang Nguyen,Nicholas Chileshe,Raufdeen Rameezdeen. External stakeholder strategic actions in construction projects: a Vietnamese study[J]. Construction Management and Economics,2018,36(8):443-458.
- [12]高建伟,张昊渤,纵翔宇.生物质电厂秸秆收购优化方案及其成本估算模型[J].可再生能源,2017,35(1):141-147.
- [13]林伟强.工程项目成本管控方法浅析[J].施工技术,2013,42(S2):173-176.
- [14]王巧渭.小型施工企业项目成本管理流程浅析[J].财会研究,2010(07):37-39.
- [15]Long D. Nguyen,Long Le-Hoai,Dai Q. Tran,Chau N. Dang,Chau V. Nguyen. Effect of project complexity on cost and schedule performance in transportation projects[J]. Construction Management and Economics,2019,37(7): 384-399.
- [16]Susanna Hedborg Bengtsson. Coordinated construction logistics: an innovation perspective[J]. Construction Management and Economics,2019,37(5):294-307
- [17]Madelyn Marrero,Antonio Ramirez-De-Arellano. The building cost system in Andalusia: application to construction and demolition waste management[J]. Construction Management and Economics,2010,28(5): 495-507.

- [18]邵松玲,齐鲁光,张峰.制造型企业业务成本预测模型构建与应用——基于灰色理论[J].财会通讯,2019(17):76-79.
- [19]樊树海,姚斌,张雷,季春.基于灰色预测的 EWMA 成本控制设计[J].会计之友,2017(09):23-26.
- [20]王惠珍.基于改进灰色系统 GM(1,1)模型的成本预测[J].统计与决策,2015(15):83-86.
- [21]孙晓彤,冯亚娟.建筑工程质量成本 RBFNN 预测模型[J].资源开发与市场,2015,31(01):17-20.
- [22]梁丽莉,李立军.工程合理成本的模糊预测技术研究[J].太原理工大学学报,2011,42(01):88-91.
- [23]常丽.概述土建工程成本控制要点[J].城市建设,2013,11(2): 123-127.
- [24]张丹.工地施工扬尘治理成本分析[A].中国环境科学学会.2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷)[C].中国环境科学学会:中国环境科学学会,2016,7.416-422