

· 创新与探索 ·

合肥市生活垃圾产量多模型预测与分析

汪平生^{1,2}, 陈俊^{1,2*}, 陈召明^{1,2}, 王磊^{1,2}, 卫新来^{1,2}, 金杰^{1,2}

(1. 合肥学院生物食品与环境学院, 安徽 合肥 230601;

2. 污水净化与生态修复材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要:针对合肥市生活垃圾产量现状,通过建立时间序列 (ARIMA)、多元线性回归 (MLR)、灰色系统 GM(1,1) 和反向传播神经网络 (BPNN) 模型对历史数据进行验证比较分析。结果表明,ARIMA(0,1,2) 模型的 MAPE、MAE、RMSE、NRMSE 分别为 1.879%、2.240、2.781、0.021,其精度最高、效果最好,为合肥市生活垃圾产量的最佳预测模型。用该模型预测合肥市 2021—2025 年的城市生活垃圾产量,结果显示生活垃圾产生量为 218.89 万 t~290.71 万 t。

关键词: 生活垃圾;产量;预测模型;对比分析;合肥市

中图分类号:X799.3

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2022)04-0064-04

Multi-model Prediction and Analysis of Domestic Waste Output in Hefei

WANG Ping-sheng^{1,2}, CHEN Jun^{1,2*}, CHEN Zhao-ming^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, WEI Xin-lai^{1,2}, JIN Jie^{1,2}

(1. School of Biology, Food and Environment, Hefei University, Hefei, Anhui 230601, China;

2. Anhui Key Laboratory of Sewage Purification and Eco-restoration Materials, Hefei, Anhui 230088, China)

Abstract: Aiming at the current status of domestic waste output in Hefei, the historical data was verified and compared by establishing time series (ARIMA), multiple linear regression (MLR), grey system GM(1,1) and back propagation neural network (BPNN) models. The results showed that the MAPE, MAE, RMSE, and NRMSE of ARIMA(0,1,2) model were 1.879%, 2.240, 2.781, and 0.021, respectively. The model had the highest accuracy and the best effect, and was the best for domestic waste output prediction in Hefei. The model was used to predict the domestic waste output in Hefei from 2021 to 2025, and the results were from 2.188 9 to 2.907 1 million tons.

Key words: Domestic waste; Output; Prediction model; Comparative analysis; Hefei

合肥市作为经济高速发展的长三角城市群副中心城市,2019年生活垃圾产量高达186.23万t,且每年以12.22%左右的速度增加,带来了许多不可避免的生态环境问题^[1],须进一步加强城市生活垃圾处理处置与监测管理。城市生活垃圾产量预测是城市环境监测管理系统中的重要组成部分,在城市生活垃圾清运和处理规划时,对其垃圾产生量预测过高会导致投入较大人力和物力,造成资源浪费;若预测偏低则会导致投入不足,不能满足实际情况的需要,造成垃圾堆积,污染环境^[2]。因此,只有准确了解城市生活垃圾的产量,才能科学合理地制定生活垃圾环境监测管理方法。

近年来,国内外很多学者通过分析城市生活垃

圾产量的影响因素建立了预测模型,计算生活垃圾的产量^[3]。今选取常用的生活垃圾产量预测方法,包括ARIMA(p, d, q)、MLR、灰色系统GM(1,1)和BPNN模型^[4-7],对合肥市城市生活垃圾的产量进行科学合理的预测。通过精度对比,确定合肥市城市生活垃圾预测的最佳模型,并对未来5年合肥市生活垃圾产量作预测,为合肥市未来的城市生

收稿日期:2021-09-05;修订日期:2022-06-24

基金项目:国家重点研发计划“长三角典型流域多源有机固废集约化处置集成示范”基金项目资助(2020YFC1908601; 2020YFC1908602)

作者简介:汪平生(1996—),男,安徽舒城人,在读研究生,研究方向为固体废弃物处理处置。

*通信作者:陈俊 E-mail: chenjun@hfu.edu.cn

活垃圾处理处置提供一定数据支撑。

1 数据与模型

1.1 数据来源

研究所用的生活垃圾基础数据来源于合肥

市统计局和安徽省统计局公开数据(合肥市主城区基础数据),见表1。安徽省和合肥市统计局负责全省或全市基本统计资料的调查、汇总、整理工作,其数据可靠、真实,并向公众公开,具有权威性。

表1 合肥市2011—2019年生活垃圾产量及主要影响因素

Table 1 Domestic waste output and main influencing factors in Hefei from 2011 to 2019

年份	常住人口 /万人	国内生产总值(GDP) /万元	社会零售总额 /万元	人均住宅面积 A/m ²	人均年消费支出 /元	生活垃圾清运量 /万 t
2011年	359.5	23 989 434	12 383 129	28.47	15 697	75.82
2012年	362.7	27 373 470	14 629 012	29.00	18 758	92.03
2013年	365.3	30 777 069	17 076 941	30.85	20 475	99.50
2014年	369.9	34 344 500	19 503 323	35.20	18 214	110.22
2015年	375.3	37 666 841	22 046 257	35.30	20 049	129.16
2016年	379.9	41 916 962	24 866 314	35.75	21 805	144.30
2017年	385.4	46 928 625	27 917 866	35.90	23 312	153.74
2018年	393.9	56 787 448	30 390 067	35.20	25 339	166.31
2019年	400.3	62 383 533	32 510 473	34.70	27 319	186.23

1.2 预测模型

ARIMA(p, d, q)模型:研究所选用的ARIMA(p, d, q)模型表达式见式(1):

$$\varphi_p(B) \nabla^d Z_t = \theta_q(B) \alpha_t \quad (1)$$

式中: Z_t 为原序列; d 为差分阶数; α_t 白噪声序列; B 为后移算子, $BZ_t = Z_{t-1}$; ∇ 为向后差分算子, $\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1} = (1 - B)Z_t$; φ_p 为自回归阶数, $\varphi_p(B) = 1 - \varphi_1 B - \dots - \varphi_p B^p$; θ_q 为移动平均算子, $\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$; q 为滑动平均阶数。具体建模在IBM SPSS Statistics 26中完成^[4]。

MLR模型:基于城市生活垃圾产量影响因素较多,研究选取MLR模型,见式(2):

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_k x_k \quad (2)$$

式中: $\hat{y}$ 为被预测量,万t; x 为影响生活垃圾产量的影响因子; a 为影响因子系数; k 为年数,取值为5。具体建模在IBM SPSS Statistics 26中完成^[5,8]。

灰色系统GM(1,1)模型:灰色系统模型(GM)包含模型的变量维数 m 和阶数 n ,记作GM(n, m)。灰色系统模型中,高阶模型的计算复杂,精度也难以保障,而且多维模型在城市垃圾产量分析中的应用也不多见,故选取灰色系统GM(1,1)模型,见式(3)(4):

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + a x^{(1)} = u \quad (3)$$

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (4)$$

式中: a, u 为模型参数; t 是年数; $x^{(0)}(1)$ 为模型建模基准年的被预测量,万t; $\hat{x}^{(1)}(t+1)$ 为模型计算的生成量值,万t。具体建模在matlab中完成^[6,9]。

BPNN模型:人工神经网络一般有两种,广义神经网络和多层感知机网络。目前,广泛使用的神经网络是BP算法,故选取BPNN模型,见式(5):

$$v_t = f_{\text{ANN}}(u_{i_1 t}, u_{i_2 t}, \dots, u_{i_q t}) \quad (5)$$

式中: v_t 为目标的预测值,万t; $u_{ijt}(j=1, 2, \dots, q)$ 为检验样本的主要因素序列; t 为年数。

研究模型归一化公式见式(6):

$$\hat{x}_k = \frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

式中: $\hat{x}_k$ 为归一化后的数值; x_k 为该影响因素的正常值; k 为1, 2, $\dots$; $x_{\max}, x_{\min}$ 为该影响因素的最大、最小值。建模在SPSS中完成^[7,10]。

研究选取的编辑器为多层感知器,隐藏层和输出层的激活函数分别为双曲正切函数和恒等式函数。

1.3 模型精度检验

为了评价不同模型的精度,选择4个指标,即平均绝对百分比误差(MAPE)、平均绝对偏差(MAE)、均方根误差(RMSE)、标准均方根误差(NRMSE)作为评价因子^[11]。各评价因子值越接近于0,模型预测精度越高。

2 结果与讨论

2.1 单一模型预测结果分析

2.1.1 ARIMA(0,1,2)模型

首先进行该模型平稳性检验,发现通过一阶差分后的序列具有平稳性,即 d 值取1。接着对序列进行自相关分析(ACF)、偏自相关性分析(PACF)得到 p 值为0、 q 值为2,确定模型为ARIMA(0,1,2)。进一步对该模型的残差序列ACF、PACF检验,残差序列为白噪声序列。因此,模型ARIMA(0,1,2)可以用于合肥市生活垃圾的拟合预测。预测结果表明ARIMA(0,1,2)模型的预测结果非常接近实际值,其最小相对误差为0,最大相对误差为5.04%。王桂琴等^[12]选择ARIMA模型预测了北京市2004—2014年的生活垃圾产量,平均相对误差为3.15%。Yan等^[13]选用ARIMA成功预测了武汉市2014年城市生活垃圾产量,平均相对误差为4.80%。上述研究ARIMA模型的平均相对误差仅为1.88%,低于以上几位学者研究结果。因此,ARIMA(0,1,2)模型可以较好地预测合肥市城市生活垃圾产量。

2.1.2 MLR模型

通过运行IBM SPSS Statistics 26,得到多元回归模型见式(7):

$$\hat{y} = 6.6x_1 - 4.1 \times 10^{-7}x_2 - 4.2 \times 10^{-7}x_3 + 3.6x_4 + 5.0 \times 10^{-3}x_5 - 2.3 \times 10^3 \quad (7)$$

式中: x_1 为常住人口,万人; x_2 为社会零售总额,万元; x_3 为GDP,万元; x_4 为人均住宅面积, m^2 ; x_5 为人均消费支出,元。

将表1中各参数代入上式,得到MLR模型的预测结果,显示该模型最小、最大相对误差分别为2.39%、5.01%。杨小妮等^[14]基于MLR模型对西安市2015—2016年的城市生活垃圾产量进行预测,平均相对误差为9.34%。Al-Salem等^[15]选择MLR模型对科威特的固体废物发电率进行预测,平均相对误差为6.48%。上述研究的MLR模型平均相对误差仅为4.00%,说明MLR模型可以用于合肥市城市生活垃圾产量的预测。

2.1.3 灰色系统GM(1,1)模型

给定观测数据列: $X^{(0)} = \{75.82, 92.03, 99.50, 110.22, 129.16, 144.30, 153.74, 166.31, 186.23\}$,经过1次累加得到: $X^{(1)} = \{75.82, 167.85, 267.35, 377.57, 506.73, 651.03, 804.77, 971.08, 1157.31\}$ 。通过matlab运行得到灰色GM

(1,1)模型表达式,见式(8):

$$\hat{X}(k+1) = 879.86 \times [e^{0.10022k} - e^{0.10022(k-1)}] \quad (8)$$

式中: k 取1,2,3,...,9。

通过计算得到灰色系统GM(1,1)的预测结果,显示该模型最小、最大相对误差分别为0、4.03%。何宗健等^[16]采用灰色GM(1,1)模型对南京市2001—2007年城市生活垃圾产量进行预测,平均相对误差为2.75%。Wang等^[17]选用灰色GM(1,1)模型预测了东北核心城市沈阳、大连和广东省广州、深圳2020—2023年的建筑垃圾产量,平均相对误差为1.00%。上述研究灰色GM(1,1)模型平均相对误差为1.81%,与文献研究结果相比处于中等水平。由此说明,灰色GM(1,1)模型可以对合肥市城市生活垃圾产量进行预测。

2.1.4 BPNN模型

首先将数据进行归一化处理,然后导入SPSS软件中,运行过后得到预测结果,BPNN模型预测结果显示其最小、最大相对误差分别为0.67%、6.81%。于涛等^[18]基于BP神经网络对兰州市2001—2009年城市生活垃圾清运量进行了预测,其平均相对误差为0.34%。上述研究所用BP神经网络模型预测结果平均相对误差为3.53%,与文献相比,该误差偏大,主要原因是BP神经网络需要大量的基础数据,而上述研究基础数据较少。由于偏差不是很大,故可以用于合肥市城市生活垃圾产量预测。

2.2 多模型预测结果对比分析和精度检验

用ARIMA(0,1,2)、MLR、GM(1,1)、BPNN这4种预测模型对合肥市2011—2019年生活垃圾产量拟合预测,结果显示4种模型的平均相对误差分别为1.88%、4.00%、1.81%、3.53%。其中,MLR与BPNN模型的平均相对误差要高于ARIMA(0,1,2)和GM(1,1)模型,而ARIMA(0,1,2)、GM(1,1)模型的平均相对误差仅相差0.07%,差距较小,可对各模型进一步进行精度检验。

将各模型的拟合预测值代入模型精度评价因子的公式中得到各模型精度,结果显示模型精度从大到小的排序依次为ARIMA(0,1,2) > GM(1,1) > BPNN > MLR。ARIMA(0,1,2)模型精度最高,其MAPE、MAE、RMSE、NRMSE依次为1.879%、2.240、2.781、0.021,表明ARIMA(0,1,2)模型达到了高精度的预测水平。

2.3 未来5年生活垃圾产量多模型预测结果

用ARIMA(0,1,2)、MLR、GM(1,1)、BPNN模型进一步对合肥市2021—2025年生活垃圾产量进行预测,结果见表2。由表2可知,灰色模型GM(1,1)的预测结果相对于ARIMA(0,1,2)模型预测结果偏大,这是由于该模型数学表达式为指数型,故随着时间的增加结果越来越大,进而导致其预测结果偏大。MLR和BPNN模型预测结果相对于ARIMA(0,1,2)模型预测结果偏小,这是由于MLR模型涉及的影响因素众多,不确定性较大,导致预测结果偏小。BP神经网络模型是由于其提供的基础数据越多,预测结果越准确,而研究的基础数据较少,致使其预测结果偏小。研究最终选取误差小、精度高的ARIMA(0,1,2)模型作为最佳的预测模型。由ARIMA(0,1,2)模型预测结果可知,合肥市2021—2025年生活垃圾产量为218.89万t~290.71万t。

表2 4种模型预测合肥市2021—2025年

城市生活垃圾产量

万t

Table 2 Prediction of domestic waste output in Hefei from 2021 to 2025 by 4 models

万t

年份	模型			
	ARIMA(0,1,2)	MLR	GM(1,1)	BPNN
2021年	218.89	202.46	228.58	208.36
2022年	236.06	215.47	252.67	221.67
2023年	253.76	228.50	279.31	234.97
2024年	271.97	241.58	308.75	248.27
2025年	290.71	254.61	341.30	261.58

3 结语

用预测模型对合肥市2011—2019年的生活垃圾产量进行了拟合验证分析,并进行了模型精度检验,结果表明ARIMA(0,1,2)模型相对误差小、精度高,其MAPE、MAE、RMSE、NRMSE依次为1.879%、2.240、2.781、0.021,可用于合肥市城市生活垃圾产量预测。基于ARIMA(0,1,2)模型对合肥市2021—2025年城市生活垃圾产量进行预测,达到了218.89万t~290.71万t,该结果可为合肥市未来生活垃圾的处理处置提供数据参考。

[参考文献]

- [1] 郭华,李佳美,邱明杰,等.我国生活垃圾产量的多元线性回归预测分析[J].环境与发展,2018,30(1):61-63.
- [2] AO Y, CHUN W, ZHENG W H. The prediction of the output of

municipal solid waste (MSW) in Nanchong City[J]. Advanced Materials Research, 2012, 518: 3552-3556.

- [3] LIN K S, ZHAO Y C, TIAN L, et al. Estimation of municipal solid waste amount based on one-dimension convolutional neural network and long short-term memory with attention mechanism model: A case study of Shanghai[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 1-12.
- [4] 聂淑媛. 时间序列分析的早期发展[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [5] 胡涛, 钱萌, 孙国芬, 等. 城市生活垃圾产生量预测研究——以南方某市为例[J]. 环境卫生工程, 2018, 26(2): 36-38.
- [6] 李艳平, 麻敏洁, 鲁来凤. 基于多模型拟合的西安市生活垃圾量预测[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(6): 222-226.
- [7] COSKUNER G, JASSIM M S, ZONTUL M, et al. Application of artificial intelligence neural network modeling to predict the generation of domestic, commercial and construction wastes[J]. Waste Management & Research, 2021, 39(3): 499-507.
- [8] 陈昭明, 王伟, 赵迎, 等. 改进主成分分析与多元回归融合的汉丰湖水水质评估及预测[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(4): 15-19.
- [9] ZHANG Z Y, ZHANG Y X, WU D Z, et al. Hybrid model for the prediction of municipal solid waste generation in Hangzhou, China[J]. Waste Management & Research, 2019, 37(8): 781-792.
- [10] 许艺馨, 任杰, 冯磊, 等. 基于小波分析优化PM_{2.5}浓度预测模型[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(2): 24-28.
- [11] 蒋晓燕, 温小乐, 罗维. 北京城市塑料垃圾年产量的模拟预测及其影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3435-3444.
- [12] 王桂琴, 张红玉, 戴志锋. 基于ARIMA模型的北京市生活垃圾产量分析与预测[J]. 环境工程, 2017, 5(S2): 206-210.
- [13] YAN Y, QIU P H, XIAO Y M, et al. Prediction of urban waste disposal based on ARIMA model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 768: 707-713.
- [14] 杨小妮, 张凯轩, 杨宏刚, 等. 西安市城市生活垃圾产生量的多元回归及ARIMA模型预测[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(2): 37-41.
- [15] AL-SALEM S M, AL-NASSER A, AL-DHAFFERI A T. Multi-variable regression analysis for the solid waste generation in the State of Kuwait[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119: 172-180.
- [16] 何宗健, 胡彬, 李志涛. 南京市生活垃圾清运量预测[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(31): 17686-17687.
- [17] WANG P F, LIU Y, GAO S Y, et al. Prediction of construction waste in representative cities of North and South based on Grey Model[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 615(1): 12-19.
- [18] 于涛, 黄涛, 潘膺希, 等. 基于BP神经网络和灰色关联度组合模型的城市生活垃圾清运量预测[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 94-97.