

谢江丽, 阿布都瓦里斯·阿布都瓦衣提, 李帅, 姚远, 2021. 利用 GM (1,1) 预测模型预测房屋面积——以乌鲁木齐市为例. 震灾防御技术, 16 (2): 263—271. doi: 10.11899/zzyfy20210205

利用 GM (1, 1) 预测模型预测房屋面积 ——以乌鲁木齐市为例¹

谢江丽 阿布都瓦里斯·阿布都瓦衣提 李 帅 姚 远

(新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011)

摘要 房屋面积数据是地震灾害损失评估的重要参数, 也是地震应急数据库基础数据。数据库要求每年及时更新, 但数据更新周期较长, 达不到更新要求。本研究主要从乌鲁木齐统计年鉴中提取 2001—2018 年房屋基础数据, 建立乌鲁木齐住宅建筑总面积及人均住宅面积数据增长模型, 利用 GM (1,1) 预测模型和多元线性回归模型预测未来 2 年乌鲁木齐住宅建筑总面积和人均住宅面积。本研究得到的住宅建筑总面积及人均住宅面积数据可作为应急数据库中相关基础数据更新的补充手段, 也可作为未来几年震害预测的参考基础数据。

关键词: GM (1,1) 模型 乌鲁木齐 住宅建筑总面积 人均住宅面积

Predict House Area By GM (1, 1) Model ——A Case Study of Urumqi

Xie Jiang li, A Bu Du Wa Li Si·A Bu Du Wa Yi Ti, Li Shuai and Yao Yuan

(Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

Abstract Building area is an important parameter of seismic loss assessment and the basic data of earthquake emergency database. The database is required to be updated in time every year, but the statistical data is delayed and the cycle is long, which cannot meet the requirements. We extracted the basic housing data from 2001 to 2018 in Urumqi Statistical Yearbook, then we established the data growth model of total residential building area and per capita residential area in Urumqi. Finally the data of total residential building area and per capita residential area in Urumqi in the next two years were provided by using GM (1, 1) prediction model and multiple linear regression model. The data of total residential building area and per capita residential area obtained in our study can be used as a supplementary means to update the relevant basic data in the emergency database, or as a reference for seismic loss prediction in the next few years.

Key words: GM(1, 1) model; Urumqi; Total area of residential buildings; Per capita residential area

引言

“十五”期间, 我国 31 个省(直辖市、自治区)建立了地震应急指挥技术系统(何少林等, 2007), 其中地震应急基础数据是整个地震应急指挥系统进行抗震救灾指挥决策的基础和核心, 为地震灾害评估和了解地震灾害影响提供基础数据, 为抗震救灾指挥决策提供救灾力量储备数据(姜立新等, 2004)。地震应急基础数据库的数据对地震灾害损失快速评估有决定性影响, 住宅建筑总面积和人均住宅面积是地震灾害损失

¹ 基金项目 中国地震局地震应急青年重点任务 (CEA EDEM. 202022); 新疆地震局科技创新团队计划 (XJDZCXTD2020-2)

[收稿日期] 2020-07-15

[作者简介] 谢江丽, 女, 生于 1987 年。工程师。主要从事地震活动性研究方面的工作。E-mail: 670198463@qq.com

评估工作的重要参数(常想德等, 2017; 马建等, 2020)。地震应急数据库中住宅建筑总面积数据的更新具有复杂性、艰巨性和长期性等特征, 无法实现与社会发展同步更新的需求, 且数据库更新通常延迟 2 年。本研究主要通过统计乌鲁木齐住宅建筑总面积和人均住宅面积数据, 采用定性描述及定量分析模型, 预测未来两年乌鲁木齐住宅建筑总面积及人均住宅面积增长情况。

1 研究现状

选择具有适用性和科学性的数据预测模型是保证预测结果符合发展趋势的前提。不同预测方法有不同的优势和适用范围, 为实现对不同发展变化规律的预测, 在具体方法的选择上必须结合研究数据预测的特点。通常只需 1 个时间序列、4 个以上连续数据即可得到预测模型 GM (1,1), 利用连续的灰色微分模型对系统的发展变化进行全面分析, 克服并弥补了回归分析方法的缺陷和不足。GM (1,1) 预测模型具有所需样本少、计算简单且预测精度较高等优势, 使其广泛应用于各学科领域, 但存在模型单一、初取值单一、背景计算不准确等问题, 众多学者对 GM (1,1) 模型进行了优化和改进, 如通过构造模型新背景和初始值(彭振斌等, 2017; 李凯等, 2018)、优化模型参数(曾亮, 2019)、构造新的边值条件(郑坚等, 2018; 沈艳等, 2019)、修正残差(赵卓峰等, 2017; 朱明等, 2017)等手段提高模型预测精度。

学者们在城镇建筑面积预测方面积累了一些方法和经验, 如刘颂等(1999)利用 GM (1,1) 预测模型对上海市区人均居住面积进行了预测; 刘伟等(1999)利用 GM (1,1) 预测模型对南京市人均居住面积进行预测和关联分析; 叶淳等(2020)在城镇人均住房建筑面积预测研究中提取了多种影响因素, 并建立了多元线性回归模型。本文在已有研究基础上, 对乌鲁木齐住宅建筑总面积和人均住宅面积走向进行探索, 研究发现对乌鲁木齐住宅建筑总面积进行预测时, GM (1,1) 预测模型和一元线性回归模型曲线拟合良好。影响乌鲁木齐人均住宅面积因素颇多, 本文分别利用 GM (1,1) 预测模型、一元线性回归模型和多元线性回归模型对其拟合。

2 研究区数据收集

新疆地广人稀, 地形复杂, 地震灾害频繁发生。处于中国西北部的乌鲁木齐市是新疆政治、经济、历史文化及高新科技等领域的中心, 人口密集, 房屋建筑集中, 如发生地震灾害, 人员伤亡、经济损失严重(卢永坤等, 2011)。根据乌鲁木齐城市发展和人口密度分布情况(谢江丽, 2019), 乌鲁木齐尚处于城市发展阶段, 除老城区人口密度较高外, 其他新区远远达不到国内城市平均水平, 可发展空间较大, 预测近十年乌鲁木齐人口、城市建设均处于稳步上升阶段。本研究将乌鲁木齐市作为研究区, 通过统计年鉴(陈志敏, 2008, 2009, 2010; 王伟, 2011; 黄国森, 2012, 2013, 2014; 潘世锦, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019), 提取乌鲁木齐市历年住宅建筑总面积和人均住宅面积数据(表 1)。通过乌鲁木齐历年住宅建筑总面积和人均住宅面积数据绘制住宅建筑总面积曲线图(图 1)和人均住宅面积曲线图(图 2)。研究发现, 乌鲁木齐房屋建筑总面积逐年增长, 随人口增长平稳增加; 乌鲁木齐人均住宅面积随时间呈波浪式增长趋势。

表 1 乌鲁木齐市住宅建筑总面积和人均住宅面积

Table 1 Total area of residential buildings and per capita residential area in Urumqi

年份	总面积/10 ⁴ m ²	人均面积/m ²	年份	总面积/10 ⁴ m ²	人均面积/m ²
2001	3 081.00	18.48	2010	5 398.93	25.97
2002	3 216.00	17.48	2011	5 779.95	27.31
2003	3 312.00	18.56	2012	5 976.64	27.37
2004	3 379.00	17.70	2013	6 340.26	29.28
2005	3 683.31	18.72	2014	6 620.65	31.74
2006	3 957.60	19.33	2015	7 001.20	31.08
2007	4 300.37	18.58	2016	7 369.64	32.00
2008	4 908.29	20.67	2017	7 865.22	32.36
2009	5 146.32	26.33	2018	8 555.64	33.94

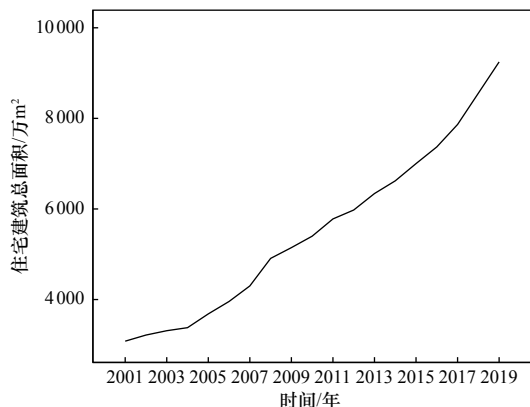


图1 乌鲁木齐住宅建筑总面积曲线图

Fig. 1 Curve of total area of residential buildings in Urumqi

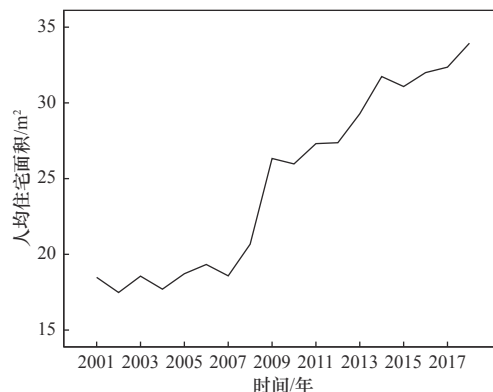


图2 乌鲁木齐人均住宅面积曲线图

Fig. 2 Curve of per capita residential area in Urumqi

3 住宅建筑总面积预测模型构建

3.1 灰色系统 GM (1,1) 模型

1982年邓聚龙教授创立灰色系统理论,研究部分信息已知、部分信息未知的系统,并提出灰色系统预测的概念其基本思路是,通过对原始数据进行有规则处理,寻求数据间的内在联系,并对变换后的数列建立连续的微分方程动态模型,通过对该模型的求解变换得到预测结果,其中应用较广泛的是GM(1,1)模型(邓聚龙,1990),该模型是单序列的一阶线性动态模型,通过5步建模灰色生成或序列算子的作用弱化原始数据的随机性,使其呈现较明显的特征规律,对于原始数据序列较短且随机性较强的预测具有较好的效果。

GM(1,1)模型是常用的灰色数列预测模型,具体构造方法如下:

对于给定的原始时间序列 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$, 经过累加生成新的数据序列 $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$, 其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n$ 。作均值序列 $Z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k-1) + 0.5x^{(1)}(k)$ 。

构造数据矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2), 1 \\ -Z^{(1)}(3), 1 \\ \vdots \\ -Z^{(1)}(n), 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5[x^{(1)}(1)+x^{(1)}(2)], 1 \\ -0.5[x^{(1)}(2)+x^{(1)}(3)], 1 \\ \vdots \\ -0.5[x^{(1)}(n-1)+x^{(1)}(n)], 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

构造数据向量 Y_N :

$$Y_N = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T; \quad (2)$$

针对原始构造数据利用以下步骤得到预测模型:

- (1) 白化形式的微分方程为: $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$, 式中 a, b 为待定系数。
- (2) 用最小二乘法求得: $a = (B^T B)^{-1} B^T Y_N = [a, b]$;
- (3) 时间序列预测模型: $x^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a}$

利用灰色系统理论对2001—2018年乌鲁木齐住宅建筑总面积和人均住宅面积数据进行拟合,拟合结果如表2所示,通过计算得出 a 和 b 值(表3)。

采用灰色系统GM(1,1)模型对2001—2018年乌鲁木齐住宅建筑总面积进行预测,对比精度检验等级参照表如表4所示模型,乌鲁木齐住宅建筑总面积相对误差基本达到一级或接近一级水平,说明预测值接近实际值。

3.2 一元线性回归模型

一元线性回归也叫时间序列法,基本模型为 $y = a + bx$, a 为回归常数,是回归直线的截距; b 为回归系数,是回归直线的斜率。根据历史数据(样本)和最小二乘(OLS)可计算出模型参数 a, b (王宇等, 2016)。

住宅建筑面积的发展可能会在较短时间内发生变化。假设人口发展过程线上任一点基本保持不变,住宅建筑面积发展速度的切线斜率是一致的,即每个周期的近似线性形式可采用一元线性回归方法表示。根据

表 2 灰色系统 GM (1,1) 模型乌鲁木齐市住宅建筑总面积拟合

Table 2 Predictive fitting of total area of residential buildings in Urumqi using grey system GM(1,1) model

年份	实际值/10 ⁴ m ²	预测值/10 ⁴ m ²	相对误差	年份	实际值/10 ⁴ m ²	预测值/10 ⁴ m ²	相对误差
2001	3 081.00	3 081	0.00	2010	5 398.93	5 234	0.03
2002	3 216.00	3 221	0.00	2011	5 779.95	5 561	0.04
2003	3 312.00	3 422	0.03	2012	5 976.64	5 909	0.01
2004	3 379.00	3 636	0.08	2013	6 340.26	6 279	0.01
2005	3 683.31	3 864	0.05	2014	6 620.65	6 672	0.01
2006	3 957.60	4 106	0.04	2015	7 001.20	7 089	0.01
2007	4 300.37	4 362	0.01	2016	7 369.64	7 533	0.02
2008	4 908.29	4 635	0.06	2017	7 865.22	8 004	0.02
2009	5 146.32	4 925	0.04	2018	8 555.64	8 505	0.01

表 3 乌鲁木齐住宅建筑总面积 GM (1,1) 模型参数

Table 3 Parameters a and b of GM(1,1) model of total area of residential buildings in Urumqi

系数	数值
<i>a</i>	-0.0607
<i>b</i>	2936.9

表 4 精度检验等级参照表

Table 4 Precision inspection level reference table

精度等级指标	相对误差
一级	0.01
二级	0.05
三级	0.10

2001—2018 年的原始数据, 使用线性回归法建立预测模型 (表 5)。由表 5 可知, 显著性概率 Sig 为 0.000, 相关指数 R^2 为 0.983, 说明乌鲁木齐住宅建筑总面积与年份之间存在显著的线性关系, 表 6 为乌鲁木齐住宅建筑总面积的原始数据经拟合后的结果。

通过灰色系统 GM(1,1) 模型和一元线性回归模型分别对乌鲁木齐住宅建筑总面积进行拟合, 并绘制拟合值与实际值线性图 (图 3), 由图 3 可知, 乌鲁木齐市住宅建筑总面积与时间有较好的线性关系, 实际值曲

表 5 乌鲁木齐住宅建筑总面积一元线性回归参数

Table 5 Univariate linear regression parameter values of total area of residential buildings and per capita residential area in Urumqi

	<i>a</i>	系数 <i>b</i>	有关指数 R^2	显著性概率Sig	常数项	斜率	统计量 <i>F</i>
系数	319.674	-637058.012	0.983	0.000	-30.144	30.396	923.909

表 6 一元线性回归模型拟合得到的乌鲁木齐住宅建筑总面积

Table 6 Predictive fitting of total area of residential buildings in Urumqi by univariate linear regression

年份	实际值/10 ⁴ m ²	预测值/10 ⁴ m ²	相对误差	年份	实际值/10 ⁴ m ²	预测值/10 ⁴ m ²	相对误差
2001	3 081.00	2 609.66	0.15	2010	5 398.93	5 486.73	0.00
2002	3 216.00	2 929.34	0.09	2011	5 779.95	5 806.40	0.02
2003	3 312.00	3 249.01	0.02	2012	5 976.64	6 126.08	0.00
2004	3 379.00	3 568.68	0.06	2013	6 340.26	6 445.75	0.03
2005	3 683.31	3 888.36	0.06	2014	6 620.65	6 765.42	0.02
2006	3 957.60	4 208.03	0.06	2015	7 001.20	7 085.10	0.01
2007	4 300.37	4 527.71	0.06	2016	7 369.64	7 404.77	0.00
2008	4 908.29	4 847.38	0.05	2017	7 865.22	7 724.45	0.02
2009	5 146.32	5 167.05	0.01	2018	8 555.64	8 044.12	0.06

线两端存在弧度，特别是近几年，乌鲁木齐住宅建筑总面积增加速率变大，相比一元线性回归模型拟合曲线，灰色系统 GM(1,1) 模型较好地体现了这一点，拟合曲线更加优化，故该预测模型实用性更强。

4 乌鲁木齐人均住宅面积预测模型构建

叶淳等 (2020) 将影响城镇人均住宅面积的因素分为社会经济发展、家庭情况、房地产市场发展 3 大类，细化为经济发展水平、城镇发展水平、居民住房支付能力、人口结构、家庭规模、住房市场，对其衡量指标为人均 GDP、城镇化率、人均可支配收入、恩格尔系数、人均居住消费支出、常住人口、家庭户数、住宅竣工面积、房地产开发投资。对以上影响因素进行定量化描述，采用人均住宅面积为因变量，其他因素为自变量，进行人均住宅面积相关性与共性分析，按照相关程度从高到低排序，排除相关程度低的因素，确定相关程度较高的自变量，分别为人均 GDP、常住人口、人均可支配收入、住宅竣工面积，提取乌鲁木齐统计年鉴中以上变量数据，如表 7 所示。

将乌鲁木齐人均住宅面积定义为因变量 Y ，人均 GDP、常住人口、人均可支配收入、住宅竣工面积分别定义为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ，建立多元线性回归模型：

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 \quad (3)$$

将表 7 中各影响因素原始数据代入公式 3，得各变量系数 (表 8)，确定模型的表达式为：

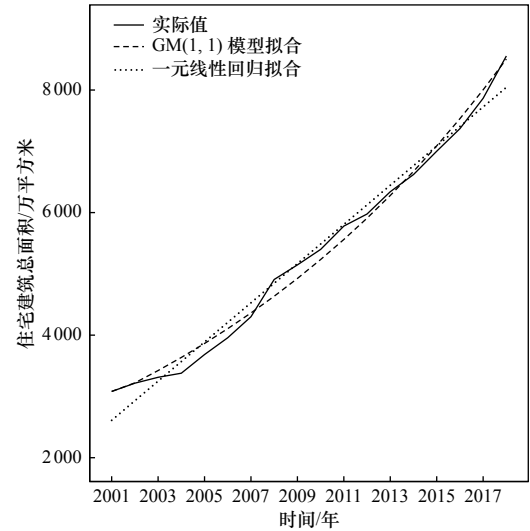


图 3 乌鲁木齐市住宅建筑总面积预测曲线图

Fig. 3 Predictive Fitting curve of total area of residential buildings in Urumqi

表 7 2001—2018 年乌鲁木齐人均住宅面积影响因素原始数据

Table 7 Raw data of influencing factors of per capita residential area in Urumqi from 2001 to 2018

年份	人均住宅面积/m ²	人均GDP/万元	居民人均可支配收入/元	常住人口/万人	住宅竣工面积/10 ⁴ m ²
2001	18.48	1.8331	7897.0	166.71	388.35
2002	17.48	1.7780	8652.0	172.37	389.71
2003	18.56	1.9899	9087.0	178.63	376.44
2004	17.70	2.2820	8948.2	183.74	231.68
2005	18.72	2.5507	9605.0	190.50	267.93
2006	19.33	2.8261	10432.0	198.00	270.08
2007	18.58	3.1140	11373.0	263.42	404.33
2008	20.67	3.7133	12328.0	273.24	427.76
2009	26.33	3.8249	13075.0	284.32	387.32
2010	25.97	4.4917	14402.0	311.03	309.85
2011	27.31	5.2649	16141.0	321.21	287.39
2012	27.37	5.9576	18385.0	335.00	613.24
2013	29.28	6.4695	21304.0	346.00	442.24
2014	31.74	7.0428	26890.0	353.00	812.59
2015	31.08	7.4340	31604.0	355.00	591.62
2016	32.00	6.9865	34190.0	351.96	295.07
2017	32.36	7.7756	37028.0	350.40	378.87
2018	33.94	8.7196	40101.0	350.58	365.24

表 8 系数
Table 8 Coefficient

项目	非标准化系数		标准系数	斜率	显著性概率Sig
	系数b	标准误差			
常量 b_0	10.123	2.702	—	3.746	0.002
人均GDP	1.525	0.020	0.283	1.774	0.2610
常住人口	0.023	1.544	0.133	0.483	0.8637
人均可支配收入	0.746	1.191	0.584	1.281	0.2230
住宅竣工面积	0.000	0.003	-0.008	-0.116	0.9090

$$Y = 10.123 + 1.525X_1 + 0.023X_2 + 0.746X_3 \quad (4)$$

根据 2001—2018 年乌鲁木齐人均住宅面积原始数据, 利用灰色系统 GM(1,1) 和线性回归方法分别建立预测模型, 将 2001—2018 年数据代入 3 种预测模型进行检验, 得出乌鲁木齐人均住宅面积理论数值, 如表 9 所示, 3 种模型误差分布如表 10 所示。

表 9 各模型对乌鲁木齐人均住宅面积拟合值 (m^2)
Table 9 Predictive fitting of per capita residential area in Urumqi of each model (Unit: m^2)

年份	实际值	多元线性回归模型		GM(1,1)模型		一元线性回归模型	
		理论值	绝对误差	理论值	绝对误差	理论值	绝对误差
2001	18.48	17.34	0.06	18.48	0.00	15.31	0.17
2002	17.48	17.44	0.00	17.11	0.02	16.41	0.06
2003	18.56	17.94	0.03	17.90	0.04	17.50	0.06
2004	17.70	18.50	0.05	18.74	0.06	18.59	0.05
2005	18.72	19.11	0.02	19.61	0.05	19.68	0.05
2006	19.33	19.77	0.02	20.52	0.06	20.77	0.07
2007	18.58	21.78	0.17	21.48	0.16	21.87	0.18
2008	20.67	22.99	0.11	22.47	0.09	22.96	0.11
2009	26.33	23.47	0.11	23.52	0.11	24.05	0.09
2010	25.97	25.20	0.03	24.61	0.05	25.14	0.03
2011	27.31	26.74	0.02	25.76	0.06	26.23	0.04
2012	27.37	28.28	0.03	26.96	0.02	27.33	0.00
2013	29.28	29.54	0.01	28.21	0.04	28.42	0.03
2014	31.74	30.99	0.02	29.53	0.07	29.51	0.07
2015	31.08	31.98	0.03	30.90	0.01	30.60	0.02
2016	32.00	31.42	0.02	32.34	0.01	31.69	0.01
2017	32.36	32.80	0.01	33.84	0.05	32.79	0.01
2018	33.94	34.48	0.02	35.42	0.04	33.88	0.00

通过以上 3 种模型检验可知, 总体上多元线性回归模型拟合情况更好, 但 3 种方法拟合得到的乌鲁木齐人均住宅面积均不理想, 可能存在其他未知影响因素或有更理想的拟合模型, 具体情况有待进一步研究。运用多元线性回归模型时需得到各影响因素预测结果, 灰色系统 GM(1,1) 模型对单因素有良好的预测效果, 故运用灰色系统 GM(1,1) 模型对各影响因素进行预测模型构建, 得到 2019—2020 年乌鲁木齐人均住宅面积影响因素预测值, 如表 11 所示, 将预测值代入公式 (4), 得到 2019—2020 年乌鲁木齐人均住宅面积预测结果。

利用灰色系统 GM(1,1) 模型对 2019—2020 年乌鲁木齐住宅建筑总面积进行预测, 利用多元线性回归模

表 10 不同模型误差分布比例

Table 10 Error distribution ratio of each model

模型	误差分级		
	一级	二级	三级
GM (1,1) 模型	17%	61%	89%
一元线性回归模型	22%	56%	83%
多元线性回归模型	17%	78%	83%

型对 2019—2020 年乌鲁木齐人均住宅面积进行预测, 预测结果如表 12 所示。

5 结语

(1) 本文根据收集的乌鲁木齐住宅建筑总面积数据, 采用灰色系统 GM (1,1) 模型和一元线性回归模型分别对住宅建筑总面积进行拟合, 根据乌鲁木齐市住宅建筑总面积预测曲线图可知, 乌鲁木齐住宅建筑总面积与时间具有较好的线性关系, 2 种模型拟合情况均较好, 灰色系统 GM (1,1) 模型相比一元线性回归模型拟合曲线更加优化, 更贴合实际曲线。

(2) 本文根据收集的乌鲁木齐人均住宅面积数据, 采用灰色系统 GM (1,1) 模型、一元线性回归模型和多元线性回归模型分别对人均住宅面积进行拟合, 将 2001—2018 年数据代入 3 种预测模型进行检验, 检验结果显示多元线性回归模型拟合情况更好。运用灰色系统 GM (1,1) 模型预测 2019—2020 年乌鲁木齐人均住宅面积影响因素预测值, 进而得到 2019—2020 年乌鲁木齐人均住宅面积预测值。以上 3 种方法拟合得到的人均住宅面积均不理想, 这是因为可能存在其他未知影响因素或有更理想的拟合模型, 具体情况有待进一步研究。

(3) 在实际数据未得到前, 本研究得到的住宅建筑总面积及人均住宅面积数据可作为应急数据库中相关基础数据更新的补充手段, 也可作为未来几年震害预测时的基础参考数据。

参考文献

- 常想德, 孙静, 谭明等, 2017. 2016 年新疆呼图壁 6.2 级地震房屋震害及成因浅析. *震灾防御技术*, 12 (1): 1—13.
- Chang X. D., Sun J., Tan M., et al., 2017. Study on earthquake damages by the 2016 Hutubi MS 6.2 earthquake. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 12(1): 1—13. (in Chinese)
- 陈志敏, 2008. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Chen Z. M., 2008. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 陈志敏, 2009. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Chen Z. M., 2009. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 陈志敏, 2010. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Chen Z. M., 2010. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 邓聚龙, 1990. 灰色系统理论教程. 武汉: 华中理工大学出版社.
- 何少林, 李佐唐, 张苏平等, 2007. 甘肃省地震应急指挥技术系统设计与实现. *地震地磁观测与研究*, 28 (5): 71—79.
- He S. L., Li Z. T., Zhang S. P., et al., 2007. Design and implement of technical system for earthquake emergency direction in Gansu Province. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 28(5): 71—79. (in Chinese)
- 黄国森, 2012. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Huang G. S., 2012. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 黄国森, 2013. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.

表 11 2019—2020 年乌鲁木齐人均住宅面积影响因素预测值

Table 11 The result of total area of per capita residential area in Urumqi from 2019 to 2020

年份	人均GDP/万元	居民人均可支配收入/元	常住人口/万人
2019	10.1917	44550	341.12
2020	11.1629	50070	351.34

表 12 2019—2020 年乌鲁木齐住宅建筑总面积和人均住宅面积预测结果

Table 12 The result of total area of residential buildings and per capita residential area in Urumqi from 2019 to 2020

项目	年份	
	2019	2020
乌鲁木齐住宅建筑总面积/10 ⁴ m ²	9037	9602
乌鲁木齐人均住宅面积/10 ⁴ m ²	36.83	38.96

- Huang G. S., 2013. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 黄国森, 2014. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Huang G. S., 2014. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 姜立新, 吴天安, 刘在涛等, 2004. 地震现场应急指挥技术系统的结构与功能设计. *地震*, **24** (3): 35—41.
- Jiang L. X., Wu T. A., Liu Z. T., et al., 2004. Structure and design of emergency command system in earthquake site. *Earthquake*, **24**(3): 35—41. (in Chinese)
- 李凯, 张涛, 2018. 基于组合插值的 GM(1,1) 模型背景值的改进. *计算机应用研究*, **35** (10): 2994—2999.
- Li K., Zhang T., 2018. Optimization of background value in GM (1,1) model based on combination interpolation. *Application Research of Computers*, **35**(10): 2994—2999. (in Chinese)
- 刘颂, 江立敏, 1999. GM(1,1) 模型在上海市区人均居住面积预测中的应用. *住宅科技*, (8): 3—5.
- 刘伟, 陈浮, 1999. GM(1,1) 模型在南京市人均居住面积预测和关联分析中的应用. *城市问题*, (1): 15—18.
- Liu W., Chen F., 1999. Application of GM (1,1) model in the prediction and correlation analysis of per capita living area in Nanjing. *Urban Problems*, (1): 15—18. (in Chinese)
- 卢永坤, 代博洋, 庞卫东等, 2011. 云南地区房屋建筑面积的统计和调查结果. *地震研究*, **34** (4): 533—537.
- Lu Y. K., Dai B. Y., Pang W. D., et al., 2011. Statistical and investigative result of buildings in Yunnan. *Journal of Seismological Research*, **34**(4): 533—537. (in Chinese)
- 马建, 常想德, 黄帅堂等, 2020. 无人机摄影技术在精河地震房屋震害定量评估中的应用. *震灾防御技术*, **15** (1): 208—215.
- Ma J., Chang X. D., Huang S. T., et al., 2020. Application of UAV photography technology in quantitative assessment of building damage of the Jinghe Earthquake. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **15**(1): 208—215. (in Chinese)
- 潘世锦, 2015. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Pan S. J., 2015. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 潘世锦, 2016. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Pan S. J., 2016. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 潘世锦, 2017. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Pan S. J., 2017. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 潘世锦, 2018. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Pan S. J., 2018. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 潘世锦, 2019. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Pan S. J., 2019. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 彭振斌, 张闯, 彭文祥等, 2017. GM(1,1) 模型背景值构造的不同方法与应用. *东北大学学报 (自然科学版)*, **38** (6): 869—873.
- Peng Z. B., Zhang C., Peng W. X., et al., 2017. Different structure methods and application of background value in GM (1,1) model. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, **38**(6): 869—873. (in Chinese)
- 沈艳, 尹金姗, 韩帅等, 2019. 基于数值积分公式的 GM(1,1) 模型优化研究. *计算机工程与应用*, **55** (24): 41—45.
- Shen Y., Yin J. S., Han S., et al., 2019. Research and its optimization of GM (1,1) model based on numerical integration formula. *Computer Engineering and Applications*, **55**(24): 41—45. (in Chinese)
- 王伟, 2011. 乌鲁木齐统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Wang W., 2011. Urumqi statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 王宇, 敬莉, 2016. 基于灰色 GM(1, 1) 模型和一元线性回归的人口发展趋势预测——以新疆南疆三地州为例. *西部学刊*, (7): 54—59.
- 谢江丽, 李帅, 姚远, 2019. 地震应急数据库中人口数据预测——以乌鲁木齐市为例. *中国地震*, **35** (2): 389—398.
- Xie J. L., Li S., Yao Y., 2019. Prediction of population data in earthquake emergency database - a case study of Urumqi. *Earthquake Research in China*, **35**(2): 389—398. (in Chinese)
- 叶淳, 吴翔华, 黄雨婴, 2020. 城镇人均住房建筑面积预测研究——以江苏省为例. *中国房地产*, (18): 73—79.
- 曾亮, 2019. 基于振荡序列的灰色 GM(1,1|sin) 模型及其应用. *浙江大学学报 (理学版)*, **46** (6): 697—704.

- Zeng L., 2019. Grey GM (1,1|sin) power model based on oscillation sequences and its application. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, **46**(6): 697—704. (in Chinese)
- 赵卓峰, 杨宗润, 2017. 基于残差修正 GM(1,1) 模型的车流量预测. *计算机科学*, **44** (4) : 96—99, 130.
- Zhao Z. F., Yang Z. R., 2017. Traffic flow forecast based on residual modification GM (1,1) model. *Computer Science*, **44**(4): 96—99, 130. (in Chinese)
- 郑坚, 陈斌, 2018. 基于时间权重序列的 GM(1,1) 初始条件优化模型. *控制与决策*, **33** (3) : 529—534.
- Zheng J., Chen B., 2018. Initial condition optimization of GM (1,1) model based on time weighted sequence. *Control and Decision*, **33**(3): 529—534. (in Chinese)
- 朱明, 王志荣, 梁华等, 2017. 基于 GM(1,1) 的残差修正模型的电梯故障率预测. *安全与环境学报*, **17** (5) : 1701—1704.
- Zhu M., Wang Z. R., Liang H., et al., 2017. Prediction of the elevator failure rate based on the residual error correcting model of GM (1,1). *Journal of Safety and environment*, **17**(5): 1701—1704. (in Chinese)