

# 基于熵权组合及生育政策下Leslie模型的 山西省人口情况分析

陆星龙, 范振宙, 王 菲

太原理工大学, 山西 太原

收稿日期: 2022年3月26日; 录用日期: 2022年4月21日; 发布日期: 2022年4月28日

## 摘 要

本文从山西人口的实际情况、增长以及流动特点出发, 对于短期人口建立Logistic阻滞增长模型、灰色预测模型、时间序列模型, 并采用熵权法分配比重, 提高预测的精准度; 对于长期人口建立Leslie模型。同时建立BP神经网络模型, 在无三孩生育政策影响的条件下, 分别对中短期以及长期人口趋势进行了预测和分析。并利用上述的Leslie模型分别分析在无三孩和有三孩生育政策条件下的中短期以及长期的人口趋势, 得出在2050年无三孩政策与有三孩政策两种情况的人口预测分别为3424.9万人和3439万人。最后我们采用灰色预测法, 利用关联分析原则, 对山西省人口流失进行分析和预测, 得出未来十年人口一直处于流失状态但流失人口会逐渐减少。

## 关键词

Logistic阻滞增长模型, 时间序列, 熵权组合, Leslie模型, BP神经网络

## Analysis of Population Situation in Shanxi Province Based on the Combination of Entropy Weight and the Leslie Model under the Fertility Policy

Xinglong Lu, Zhenzhou Fan, Fei Wang

Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

Received: Mar. 26<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Based on the actual situation, growth and flow characteristics of Shanxi's population, this paper establishes a Logistic retarded growth model, a gray prediction model, and a time series model for the short-term population, and the entropy weight method is used to allocate the proportion to improve the prediction accuracy; for the long-term population, a Leslie model is established. At the same time, a BP neural network model was established to predict and analyze the short-term and long-term population trends without the influence of the three-child birth policy. And using the above Leslie model to analyze the short- and medium-term and long-term population trends under the conditions of no three-child policy and three-child birth policy, it is concluded that in 2050, the population forecast for the no-three-child policy and the three-child policy is 3424.9 million and 34.39 million respectively. Finally, we use the grey prediction method to analyze and predict the population loss in Shanxi Province by using the principle of association analysis, and conclude that the population will be lost in the next ten years, but the lost population will gradually decrease.

## Keywords

Logistic Retarded Growth Model, Time Series, Entropy Weight Combination, Leslie Model, BP Neural Network

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 研究背景

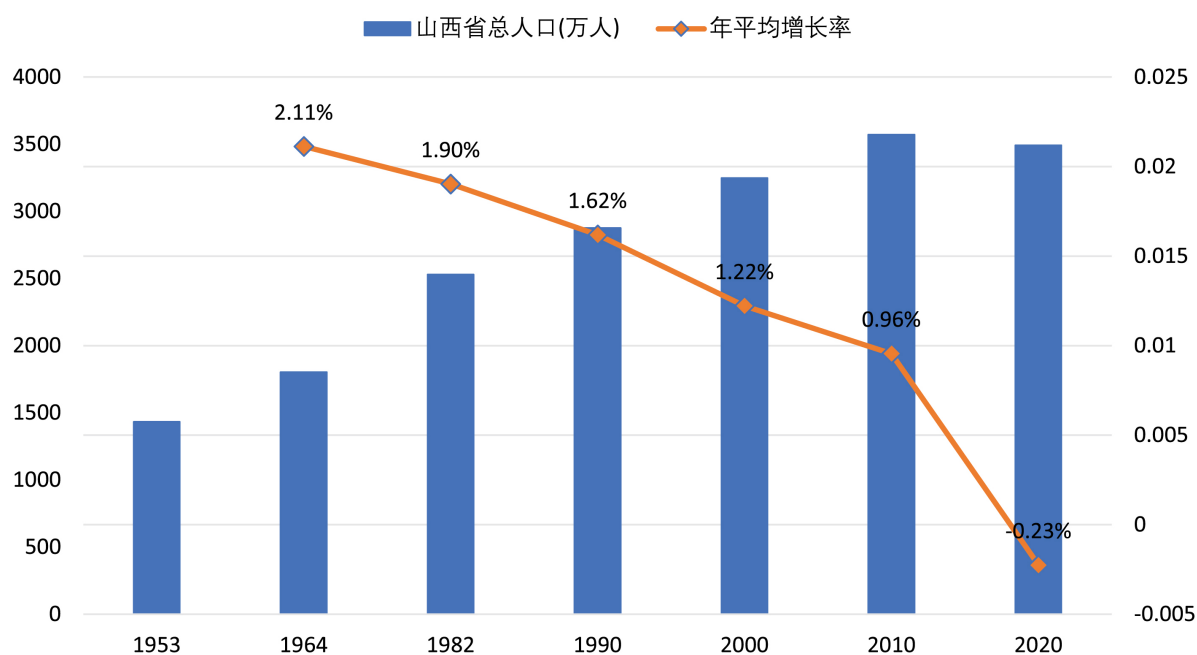
人口是社会经济运行的基础，中国作为一个人口大国，人口始终是制约我国发展的关键影响因素。第七次人口普查数据展现出近年来中国人口发展的新特征，如老龄化进程加速、出生人口性别比持续降低、人口流动加速和乡村人口城镇化等，这些数据有助于预测我国未来人口的发展趋势，调整人口政策，从而更好地建设社会主义现代化强国。

面对第七次人口普查展现出的人口问题，中共中央政治局召开会议审议《关于优化生育政策促进人口长期均衡发展的决定》，依法组织实施三孩政策，促进生育政策与相关的经济社会政策相匹配。

## 2. 数据来源

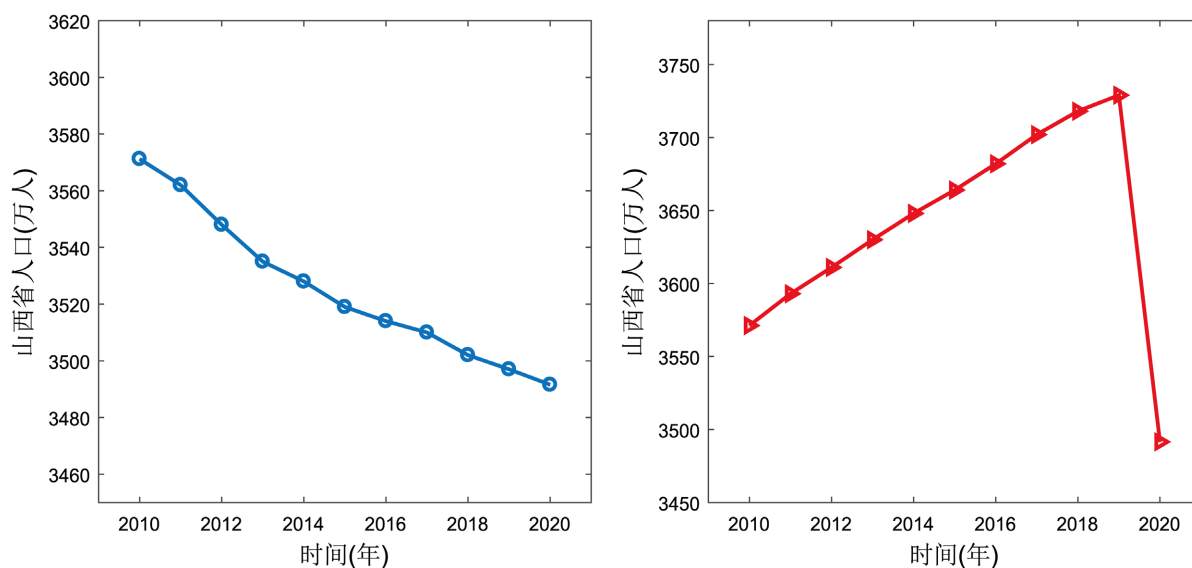
第七次人口普查全国总人口为 1,443,497,378 人，其中大陆 31 个省、自治区、直辖市和现役军人的人口共 1,411,778,724 人；全国人口与 2010 年第六次全国人口普查的 1,339,724,852 人相比增加 72,053,872 人，增长 5.38%，年平均增长率为 0.53%。

山西作为我国中部地区省份，近几年正处在经济转型的重要时期，因此人口数据对于山西在未来的发展具有极强的指导意义。第七次全国人口普查数据显示，有 6 个人口流失的省份，而山西省作为其中之一其总人口为 3491.56 万人比第六次人口普查数据 3571.21 万人减少了 79.65 万人。山西省在 2020 年末常住人口有 34,915,616 人与 2010 年第六次全国人口普查的 35,712,111 人相比，十年间减少 796,495 人，减少 2.23%，年平均增长率为 -0.23%。如图 1 所示。



**Figure 1.** The resident population and average annual growth rate of Shanxi Province in previous national censuses  
**图 1.** 历次全国人口普查山西省常住人口及年均增长率

从图 1 中可以看出虽然山西省历次普查人口年均增长率不断降低, 但前六次人口仍保持正增长, 然而 2010 年至 2020 年山西人口年均增长率为 $-0.23\%$ , 已步入负增长阶段。从历次普查数据来看, 我们无法判断山西省人口增长峰值的具体所在时间段, 但结合文献检索和数据查找, 通过对山西省 2000 年到 2020 年常住人口数据的收集和核对, 我们发现在 2010 年到 2020 年即第六次人口普查和第七次人口普查期间的九年数据中, 有两组数据存在较大区别。如图 2 所示。



**Figure 2.** Two groups of population data in Shanxi Province from 2010 to 2020 (Left: Source “National Data”; Right: Source “China Statistical Yearbook”)

**图 2.** 山西省 2010~2020 两组人口数据(左: 来源“国家数据”; 右: 来源“中国统计年鉴”)

如图 2 所示，两组数据除了在 2010 和 2020 两个普查年份的数据一致外，其余各抽查年份均不同。来源于“国家数据”的山西人口数整体随时间呈负增长趋势；而来源于“中国统计年鉴”的数据整体呈正增长趋势，但在 2020 年人口迅速减少近二百万。我们猜测来源于“中国统计年鉴”的数据存在问题。

根据国际惯例人口普查之后，会对两次普查数据进行修订，消除抽样统计和人口普查的数据差异。目前国家统计局正在对两次普查之间的总人口、出生人口、户籍人口、城市化率等相关数据进行修订，上述“中国统计年鉴”的数据是还未进行修正的。而“国家数据”中的人口数据是经过修正的数据，其数据图也更合理。

综合分析，我们此次采用“国家数据”。

### 3. 人口模型的建立与分析

#### 3.1. 模型概述

在山西人口模型的建立中，本论文选用 Logistic 阻滞增长模型、时间序列模型、灰色预测模型，通过熵权法将三个模型组合起来形成中短期人口模型；同时用 Leslie 模型对长期人口进行建模分析；最后利用 BP 神经网络将中短期和长期人口模型统一起来，形成最终模型。如图 3 所示。

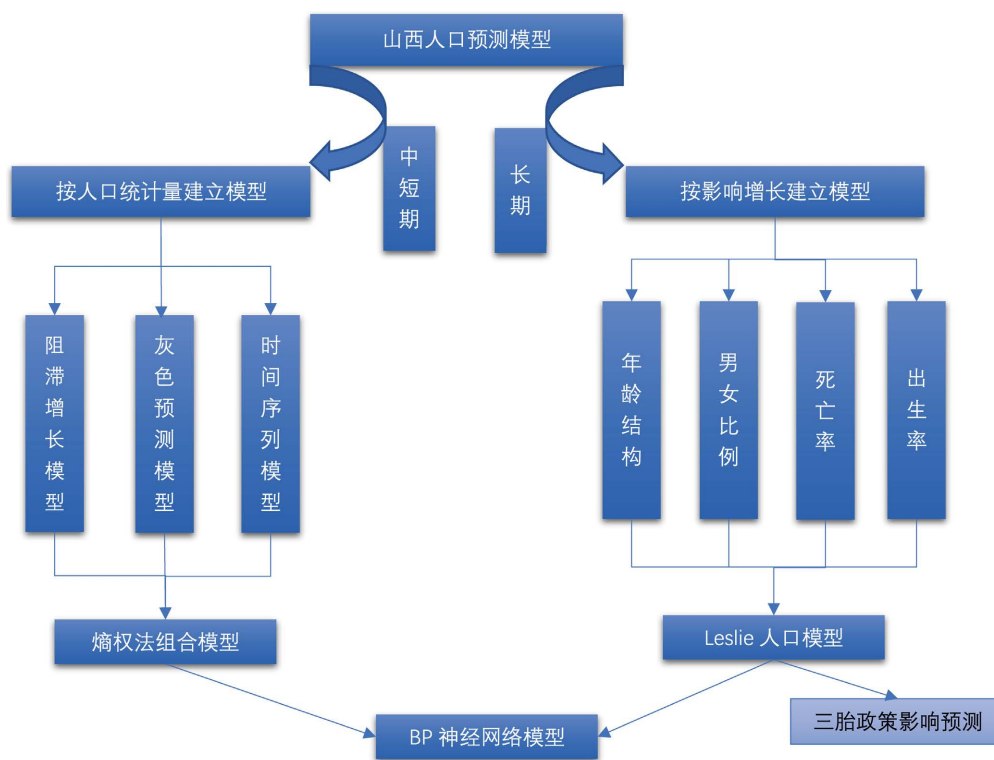


Figure 3. Model map  
图 3. 模型导图

#### 3.2. Logistic 阻滞增长模型

指数增长模型是增长率保持不变，以指数形式增长的模型；但人口受自然资源、环境条件等因素的阻滞作用增长到一定数量增长率会下降，并且随着人口的增加阻滞作用越来越大，Logistic 阻滞增长模型就是考虑到这个因素对指数增长模型进行修改后得到的[1]。

### 3.2.1. 模型建立

记  $t=0$  年的人口为  $x_0$ ,  $t$  年后人口为  $x(t)$ , 人口增长率为  $r$ , 则

$$x(t) = x_0(1+r)^t$$

上式成立的基本条件是人口增长率  $r$  保持不变。将  $x(t)$  视为连续、可微函数, 则单位时间内  $x(t)$  的增量  $\frac{dx}{dt}$  等于  $r$  乘以  $x(t)$  于是得到  $x(t)$  满足微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = rx \\ x(0) = x_0 \end{cases}$$

解上式可得:

$$x(t) = x_0 e^{rt}$$

同时考虑资源、环境等因素的影响, 人口增长率  $r$  随人口数量增长而下降。将  $r$  表示为  $x$  的函数  $r(x)$ ,  $r(x)$  为减函数, 得

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = r(x)x \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (1)$$

设  $r(x)$  为  $x$  的线性函数

$$r(x) = r - sx \quad (r, s > 0) \quad (2)$$

这里  $r$  为固有增长率, 表示人口很少时(理论上  $x=0$ )的增长率。用  $x_m$  表示自然资源和环境条件所能容纳的最大人口数量, 即  $r(x_m) = 0$ , 代入式(2)得  $s = \frac{r}{x_m}$ , 将其代入式(1)、(2)得

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{x_m}\right) \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (3)$$

解上式得 *Logistic* 阻滞增长模型:

$$x(t) = \frac{x_m}{1 + \left(\frac{x_m}{x_0} - 1\right) e^{-rt}} \quad (4)$$

### 3.2.2. 模型求解

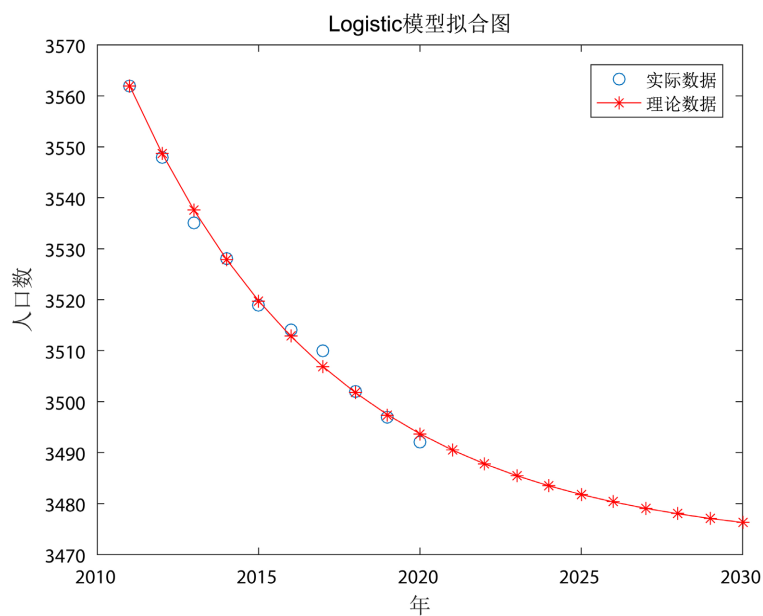
由式(4)可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{x} \frac{dx}{dt} = r - sx \\ s = \frac{r}{x_m} \end{cases}$$

通过 *Matlab* 拟合求出  $r, x_m$ 。由程序解得:  $r = 0.0002$ ,  $x_m = 3471.6$  根据 *Logistic* 阻滞增长模型预测未来人口数量, 拟合效果及预测结果如表 1、图 4 所示:

**Table 1.** Logistic retarded growth model for short- and medium-term forecasts  
**表 1.** Logistic 阻滞增长模型中短期预测

年份	预测人口数(万人)
2021	3490.5
2022	3487.8
2023	3485.5
2024	3483.5
2025	3481.8
2026	3480.3
2027	3479.1
2028	3478.0
2029	3477.1
2030	3476.3



**Figure 4.** Logistic retarded growth model population curve  
**图 4.** Logistic 阻滞增长模型人口曲线

### 3.3. 时间序列模型

#### 3.3.1. 模型建立

经过模型预检验得出山西省当前人口变化呈负增长，无周期性波动，时间序列图符合“人口数据呈长期趋势”这一常识性判断。

$$\begin{cases} l_t = \alpha x_t + (1-\alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t = \beta(l_t - l_{t-1}) + (1-\beta)b_{t-1} \\ \hat{x}_{t+h} = l_t + hb_t \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $t$ : 当前期;  $h$ : 预测超前期数, 也称之为预测步长;  $x_t$ : 第  $t$  期的实际观测值;  $l_t$ : 时刻  $t$  的预估水平;  $b_t$ : 时刻  $t$  的预测趋势;  $\alpha$ : 水平的平滑参数;  $\beta$ : 趋势的平滑参数。

借助 *Spss* 时间序列的专家建模器进行数据建模, 从运行结果来看, 输入的数据适合 *Brown* 线性趋势模型[2]。得到 *Brown* 模型的参数:  $\alpha = \beta = 0.963$ , 将参数值代入式(3)计算得到 *Brown* 线性趋势模型十年内的中短期预测值如图 5 所示。

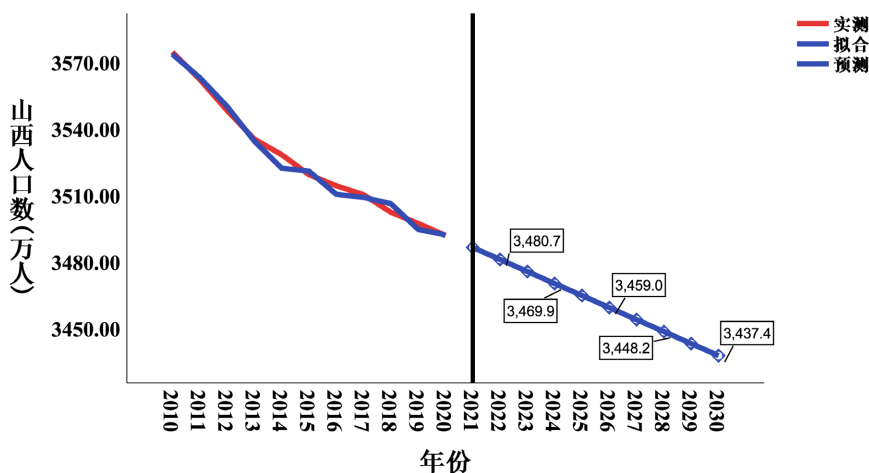


Figure 5. Brown linear trend model Shanxi population medium- and short-term forecast  
图 5. Brown 线性趋势模型山西人口中短期预测

考虑到人口增长规律并不是简单的线性趋势, 且 *Brown* 模型与 *ARIMA* 模型类似, 二者对本论文数据分析处理上均有较好的效果, 我们用 *ARIMA* 模型再次建模[3]。根据差分自回归移动平均模型中的方程容易得到 *ARIMA* (0, 2, 0)模型参数, 平稳的 R 方为 0, R 方为 0.970, 这说明估计的效果特别好。如图 6 所示。

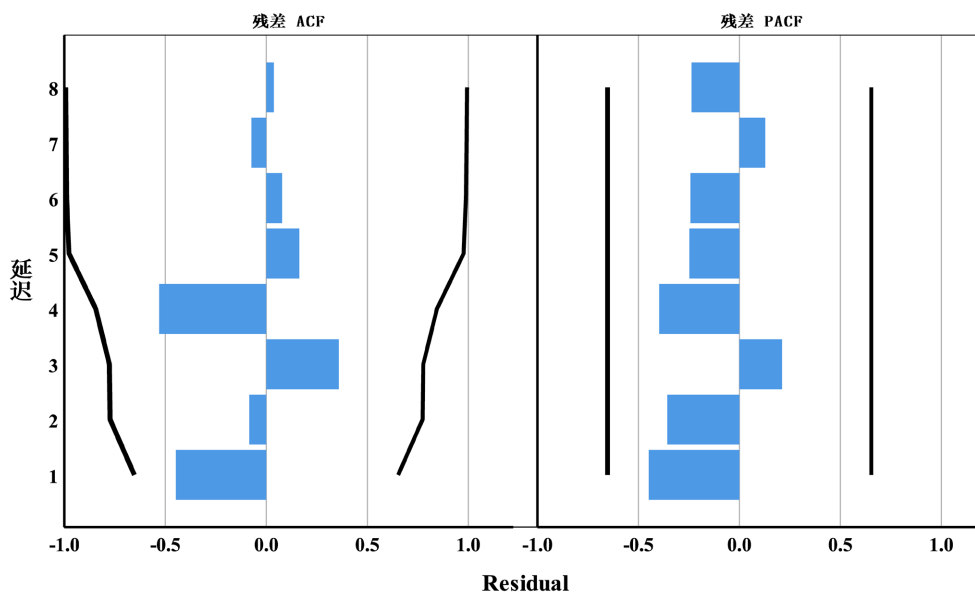


Figure 6. ARIMA (0, 2, 0) model residual plot  
图 6. ARIMA (0, 2, 0)模型残差图

得到  $ARIMA(0, 2, 0)$ 模型参数, 如图 7 所示。

			估算	标准误差	t	显著性
ARIMA (0, 2, 0) 模型	山西省人口 (万人)	常量	0.752	1.063	0.708	0.499
		差异	2			

Figure 7. ARIMA model parameters  
图 7. ARIMA 模型参数

代入参数, 计算得:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{2021} &= 0.752 + 2y_{2020} - y_{2019} + E(\varepsilon_{2021}) = 3486.87 \\ \hat{y}_{2022} &= 0.752 + 2\hat{y}_{2021} - y_{2020} + E(\varepsilon_{2022}) = 3482.94 \\ \hat{y}_{2023} &= 0.752 + 2\hat{y}_{2022} - \hat{y}_{2021} + E(\varepsilon_{2023}) = 3479.75 \\ &\vdots \end{aligned}$$

ACF 和 PACF 图形显示残差为白噪声, 所以  $E(\varepsilon_t) = 0$ 。

由此, 可以得到  $ARIMA(0, 2, 0)$ 模型十年内的中短期预测如图 8 所示:

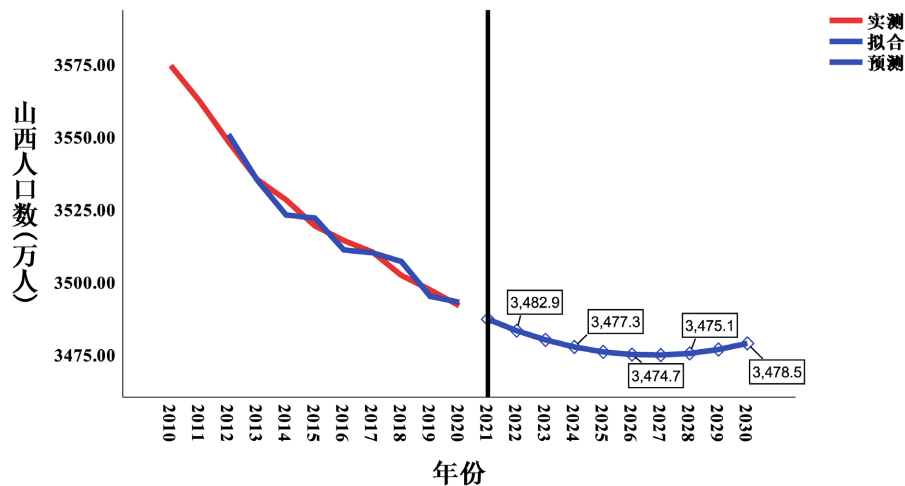


Figure 8. ARIMA (0, 2, 0) model short and medium term prediction of Shanxi population  
图 8. ARIMA (0, 2, 0) 模型山西人口中短期预测

对比图 5、图 8,  $ARIMA(0, 2, 0)$ 模型的人口预测在中期较 *Brown* 线性趋势模型更为合理。

### 3.4. 灰色预测模型求解与评价

原数据的期数大于 4, 所以我们可以将数据组分为训练组和试验组, 训练数据是:

$$[3574.21 \quad 3562 \quad 3548 \quad 3535 \quad 3528 \quad 3519 \quad 3514 \quad 3510]$$

试验数据是:

$$[3502 \quad 3497 \quad 3491.56]$$

通过借助 *Matlab* 计算机程序, 我们得到: 传统  $GM(1, 1)$ 对于试验组预测的误差平方和为 246.5806,



新信息  $GM(1, 1)$  对于试验组预测的误差平方和为 246.6359, 新陈代谢  $GM(1, 1)$  对于试验组预测的误差平方和为 126.9858。

结合图 9, 我们选择误差平方和最小的新陈代谢  $GM(1, 1)$  模型进行预测[4]。

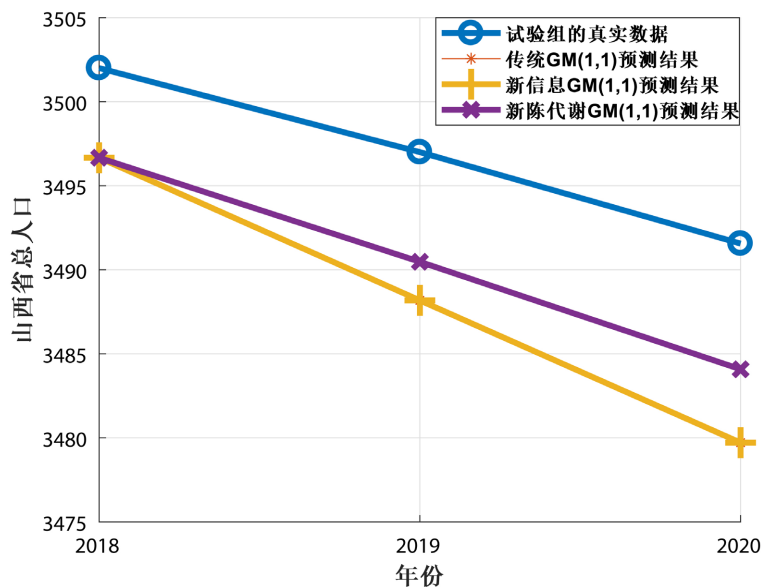


Figure 9. Comparison of Three GM (1, 1) Models

图 9. 三种 GM (1, 1) 模型比较

我们将训练组和试验组数据合并, 代入新陈代谢  $GM(1, 1)$  模型进行求解得到相应得预测值, 如图 10 所示。平均相对残差为 0.0009145 以及平均级比偏差为 0.00083413 的结果表明该模型对原数据的拟合程度非常不错。

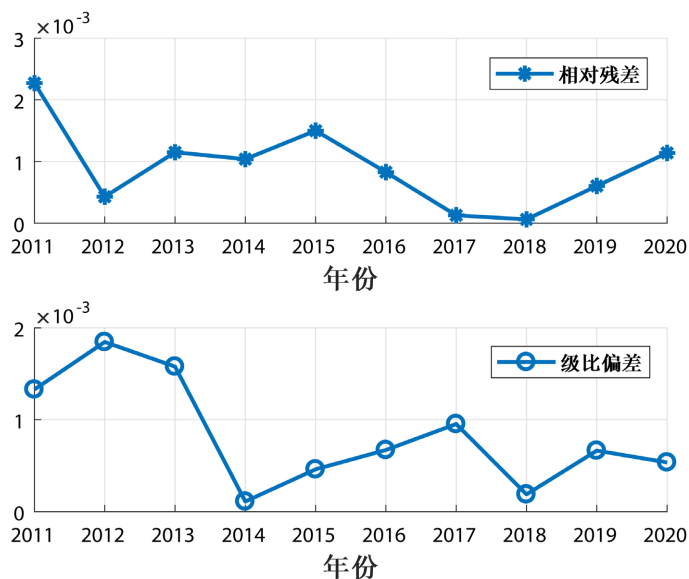


Figure 10. Relative residuals and ratio bias tests

图 10. 相对残差和级比偏差检验

从图 11 中，我们可以大致看出其预测情况类似与 *Brown* 模型。拟合情况也比较好。

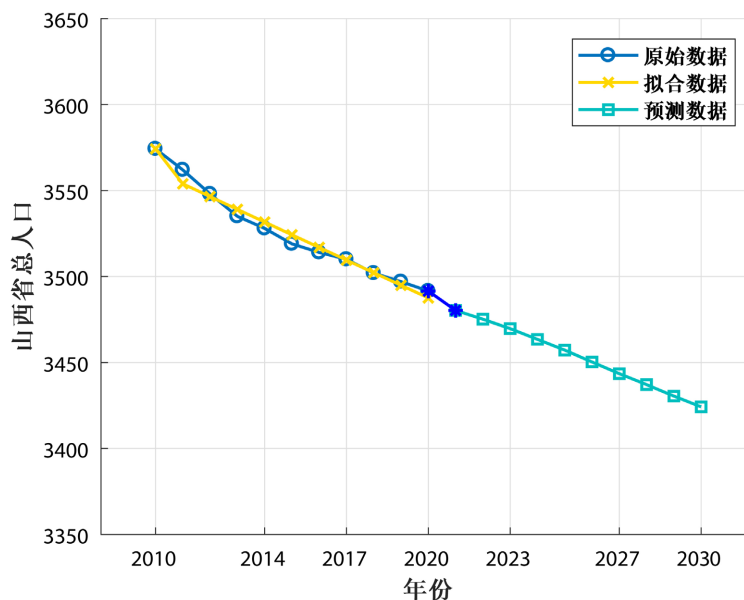


Figure 11. Metabolic GM (1, 1) model curve

图 11. 新陈代谢 GM (1, 1)模型曲线

### 3.5. 熵权组合

我们选取平方和误差、平均绝对值误差、均方误差、平均绝对值百分比误差、平均绝对值百分比误差对上述提到的三个模型进行评价。

借助 *Matlab* 对模型进行求解，得到三个模型的权重，如表 2 所示。

Table 2. Three predictive model weights

表 2. 三种预测模型权重

预测模型	<i>Logistic</i> 模型	时间序列模型	GM (1, 1)模型
$\omega$	0.1471	0.3315	0.5214

通过权重我们得到三个模型最终的组合模型，从而得到中短期的预测值，如表 3 所示。

Table 3. 2021~2030 Shanxi province population forecast (10,000 people)

表 3. 2021~2030 山西省人口预测(万人)

2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
3483.98	3479.60	3475.36	3471.00	3466.93	3462.83	3459.03	3455.74	3452.59	3449.88

### 3.6. Leslie 预测模型

#### 3.6.1. 模型说明

*Leslie* 模型的求解步骤如下：

假设预测期限内所生孩子的男女比为而每个年龄组的男女比与 1:1 初始的年份相同。因此该模型可以仅考虑女性人口的发展变化。

假设女性的最大年龄为  $S$  岁，将其年龄划分为  $m$  个年龄段。

1) 在同一时间间隔内不考虑人口数量的变化。

2)  $n(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_m(t)]$  为第  $t$  次观察到的女性各年龄段矩阵。

3) Leslie 模型的人口迭代等式为  $n_i(t+1) = \sum_{i=1}^m b_i n_i(t)$  和  $n_{i+1}(t+1) = s_i n_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m-1$  如图 12 所示。

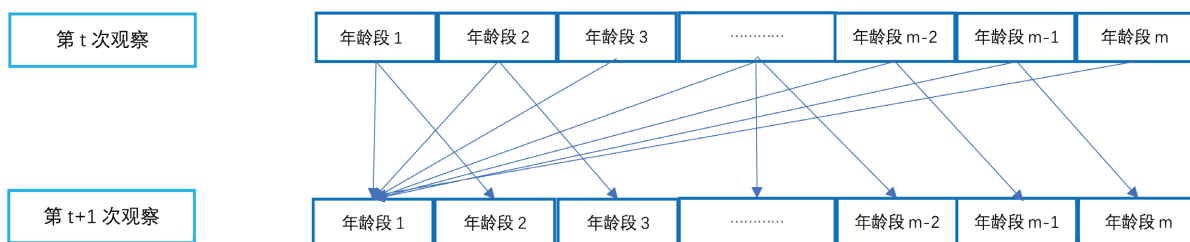


Figure 12. Leslie prediction model

图 12. Leslie 预测模型

### 3.6.2. 模型建立与求解

我们通过将女性的年龄分为 0 岁、1 岁、2 岁、……、90 岁以上这 91 个年龄段，对于女性的生育率与死亡率分别选用不同的模型来进行预测，最后将预测数据代入 Leslie 模型的人口迭代等式中预测每个年龄段的女性人口，并利用 2019 年山西省每个年龄段的男女比例计算每个年龄段的男性人口，最后得到预测总人口[5]。

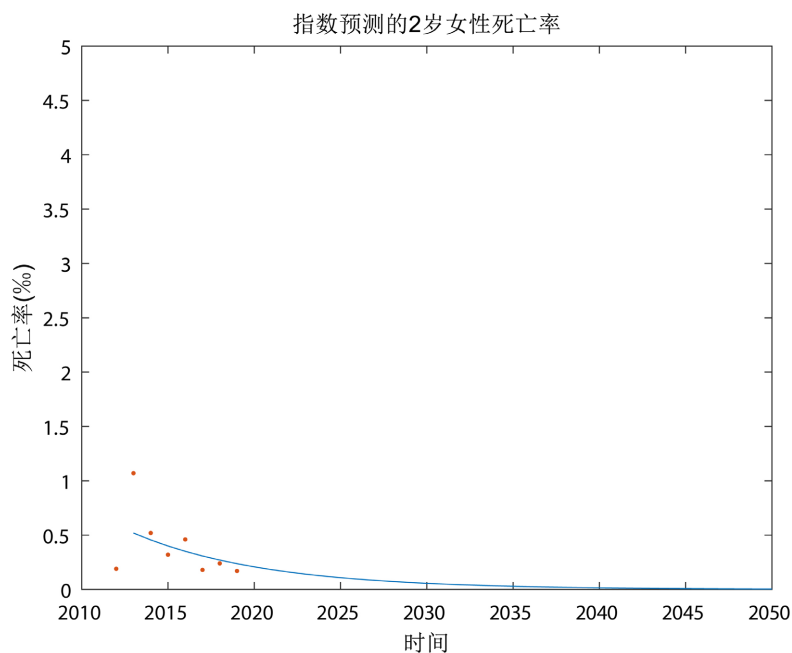


Figure 13. Mortality prediction curve for 2-year-old girls from 2021 to 2050

图 13. 2021 至 2050 年的 2 岁女孩的死亡率预测曲线

### 1) 死亡率预测

通过对于数据以及随机选取某个年龄的死亡率的散点图的观察可得,死亡率随着时间递减,并由此假设死亡率与时间变化的函数为:

$$y = \alpha e^{\beta t}, \alpha > 0, \beta < 0$$

通过 *Matlab* 数据拟合工具箱得出每个年龄段死亡率的函数,并预测出 2021 至 2050 年的死亡率,如:预测 2 岁的死亡率预测公式为,利用方程我们可以预测出 2021 至 2050 年的 2 岁女孩的死亡率,预测曲线如图 13 所示。

### 2) 考虑三孩政策的预测

按照我国的人口统计规定,把育龄妇女的年龄区间设定为 15~49 岁。同时三孩政策的实施必然会对 2021 年的人口生育率造成影响,且对 15 至 49 岁的各年龄段的人口的影响不同,以 32 岁为界限,对于 15 岁至 32 岁的女性的影响逐渐增加,对于 32 至 49 岁的影响逐渐减小,而且随着时间的推移,政策的影响会逐渐减小,因此我们可以构造如下的函数度量三孩政策对于生育率的影响[6]。

$$\omega_1(x,t) = \begin{cases} \left(1 + \varpi_1 \left(\frac{x-14}{32}\right)\right)^{\frac{1}{t}}, & 15 < x < 32 \\ \left(1 + \varpi_1 \left(\frac{50-x}{32}\right)\right)^{\frac{1}{t}}, & 32 < x < 49 \end{cases}$$

其中  $\omega_1$  表示三孩政策对生育率的平均影响因子,变量  $x$  表示的女性年龄的大小,变量  $t$  表示距离三孩政策实行的年份的长短。

$\omega_1$  是一个不太大的正数,选取 *Matlab* 计算出的 [0, 3] 上的  $\omega_1$  值,最终得到  $\omega = 0.1365$ 。将  $\omega$  代入 *Leslie* 模型的人口迭代等式中计算出三孩政策对于生育率的影响,并预测出 2021 至 2050 年的生育率,得出 2050 年山西省人口数将达到 34,390,000。

### 3) 不考虑三孩政策的预测

以 2020 年为起始年份,对于 2021 至 2050 年的人口进行预测,通过 *Leslie* 模型的人口迭代等式  $n_i(t+1) = \sum_{i=1}^m b_i n_i(t)$  和  $n_{i+1}(t+1) = s_i n_i(t)$ ,  $i=1,2,\dots,m-1$ , 可以得出 2050 年人口数为 34,249,000 人。

## 3.7. 无三孩生育政策分析

在无三孩生育政策或者不考虑三孩生育政策影响的条件下,意味着默认生育政策与过去几年的政策条件是相同且连续的,凭借过去人口数据建模来预测未来人口的模型(即熵权组合模型)在此条件下是合理且有意义的。但是,由于这种模型主要依赖于原有的数据,必然导致时间越长预测误差越大[7]。其只能用于中短期预测,要进行长期预测还需要依赖 *Leslie* 预测模型,我们采用 *BP* 神经网络将中短期与长期预测两个模型相统一。

在 *BP* 神经网络的训练中,我们选取过去的原始数据、熵权模型的中短期数据、*Leslie* 预测模型的长期数据作为其训练集,从而达到统一模型的目的。

### 3.7.1. BP 神经网络

我们用所构造的训练集借助 *Matlab* 神经网络拟合工具箱对神经网络展开训练[8]。如图 14 所示,训练集和验证集的  $R$  分别为 0.97479 和 0.99874,说明所得到的神经网络效果比较好。

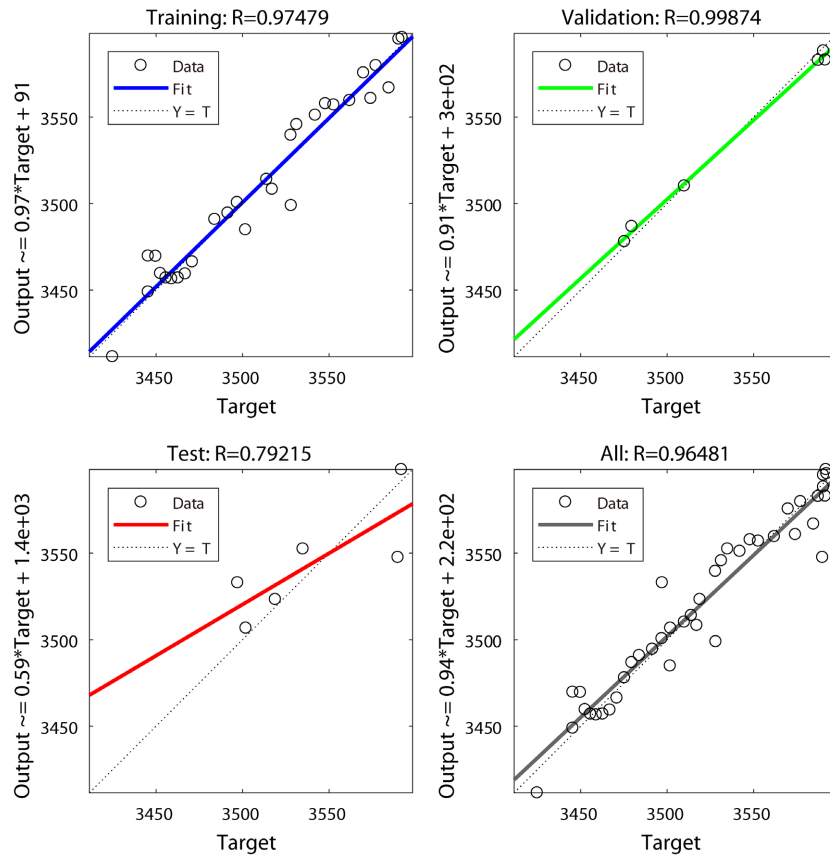


Figure 14. BP neural network training R value  
 图 14. BP 神经网络训练 R 值

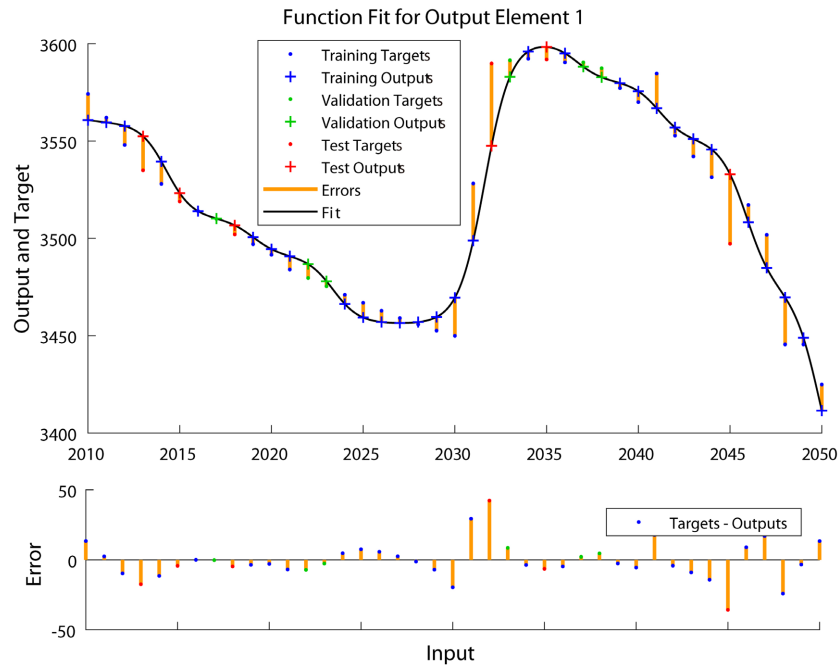


Figure 15. BP neural network trend forecast  
 图 15. BP 神经网络趋势预测

从图 15 中, 我们可以看到在没有三孩生育政策影响的条件下, 山西在中短期内仍无法摆脱人口负增长的情况。但是, 从长期来看, 随着城镇化率越来越高, 死亡率会不断降低, 同时, 随着经济的发展, 在 2035 年前后, 山西会迎来人口的正增长。但如果山西省没有积极有利的人口刺激措施和政策, 山西在本世纪中叶将还会遇到人口负增长的现象。

### 3.7.2. 三孩生育政策影响分析

在有三孩生育政策影响的条件下, 以 2020 年为起始年份直接利用 *Leslie* 模型对三孩生育政策影响进行分析。对于 2021 至 2050 年的人口进行预测, 预测的曲线图如图 16 所示, 可知在 2050 年山西省人口将达到 34,390,000。

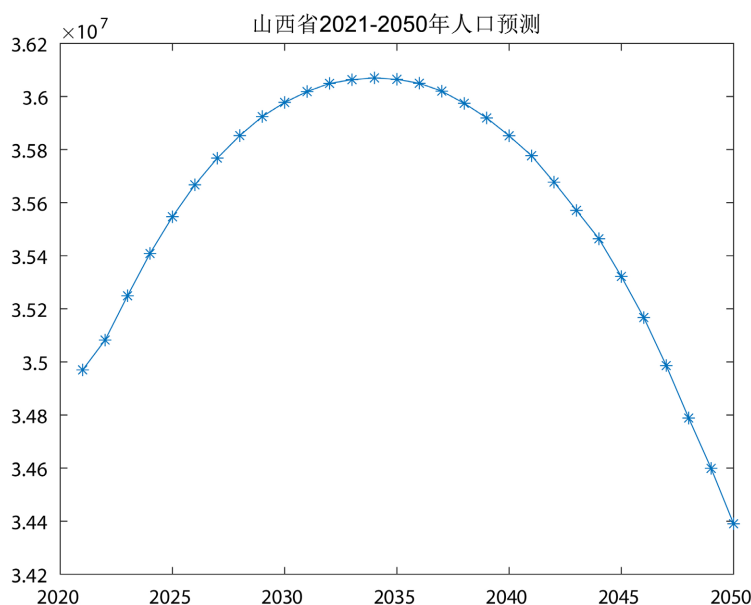


Figure 16. Demographic trends in different age groups

图 16. 不同年龄段人口变化趋势

对比分析考虑与不考虑三孩政策的人口流失预测结果如表 4 所示, 从表格中可知三孩政策对于山西生育人口的有积极影响, 有助于人口的增长与均衡。

Table 4. Population loss forecast

表 4. 人口流失预测

年份	不考虑三孩政策	三孩政策	差额
2030	35,841,000	35,978,000	137,000
2033	35,915,000	36,063,000	148,000
2036	35,904,000	36,050,000	146,000
2039	35,772,000	35,919,000	147,000
2042	35,528,000	35,677,000	149,000
2045	34,972,000	34,972,000	188,000
2048	34,455,000	34,789,000	334,000
2050	34,249,000	34,249,000	141,000

从图 17 可看出三孩生育政策一放开,就会对山西人口产生影响,使得山西人口在极短时间内转为正增长。在 2025 年左右会达到一个人口的小高峰,这是由于三胎政策直接导致的结果。同时由于过去二孩生育政策的回声潮,当初作为二孩出生的人在 2035~2040 年达到生育年龄,这将山西人口又推向另一个高峰。不可避免的是在没有积极有利的人口刺激措施的情况下,山西在本世纪中叶将还会遇到人口负增长的现象。

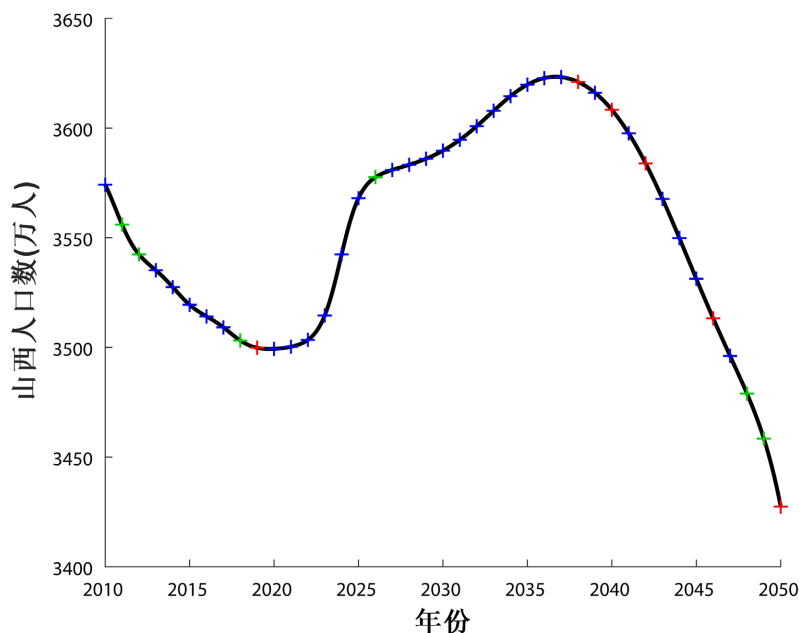


Figure 17. The changing trend of population in Shanxi under the influence of birth policy

图 17. 生育政策影响下山西人口变化趋势

## 4. 人口流动分析及预测

### 4.1. 省内人口流动分析

山西省近几年来除太原市外其余城市常住人口均有所减少,其中忻州市的人口流失最为严重;但是太原市常住人口却有所增加,我们从如下几方面说明太原常住人口增加的原因:

1) 从教育资源来看:太原有 44 所高等院校,运城 7 所高等院校,临汾 5 所高等院校,吕梁有 2 所高等院校,晋中 8 所高等院校,长治有 5 所高等院校,大同有 2 所高等院校,忻州有 2 所高等院校,晋城有 1 所高等院校,朔州有 2 所高等院校,阳泉 3 所高等院校,太原市的教育资源最为丰富,其余地方的教育资源较为缺乏。太原市丰富的教育资源吸引了其余地区人口的迁移,使太原市人口增加。为享受更加优质的教育资源,人们选择迁入、居住在太原。

2) 从医疗资源来看:27 医疗因素对于人口的迁移有十分重要的影响,由图 18 可知太原市的卫生医疗机构远高于山西省其他市的医疗机构,达到了 2747 个(卫生医疗机构数包括医院、疾病预防控制中心、妇幼保健院等);由图 19 可知太原市的卫生机构床位数与卫生技术人员(包括执业医师、护士等)的数量远高于其他地区的卫生机构床位数和卫生技术人员。

因此山西省太原市的医疗水平高于其他市,各市的人们为了享受更加优质的医疗资源,选择迁入、居住在太原市。

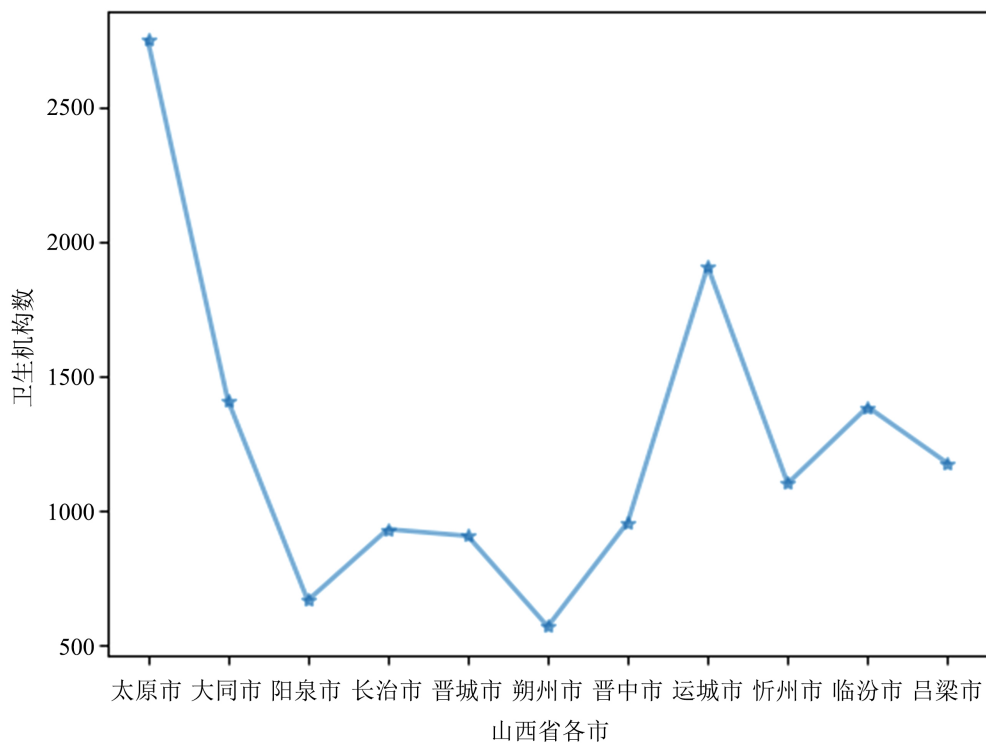


Figure 18. The number of health institutions in each city  
图 18. 各市卫生机构数

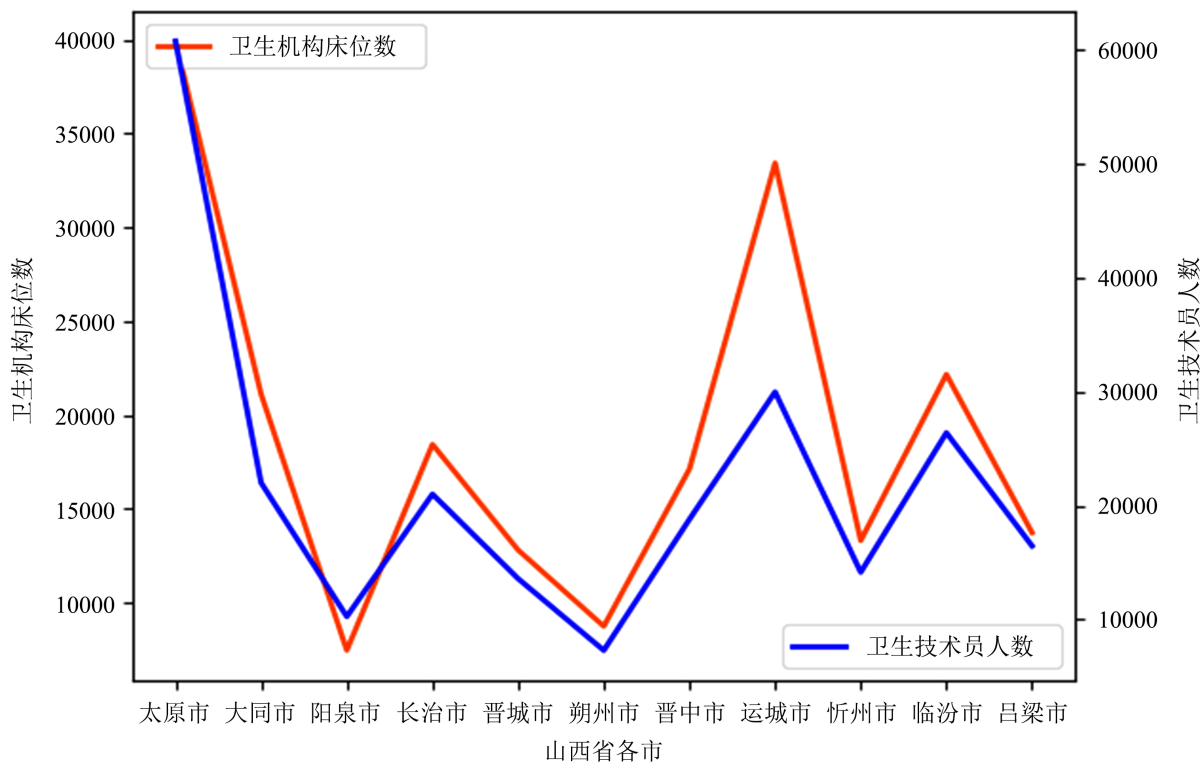


Figure 19. Number of beds and personnel in health institutions by city  
图 19. 各市卫生机构床位数与人员情况



3) 从人均可支配收入来看: 可支配收入是指一个人最终用于消费和储蓄的收入, 是人们生活与迁移的一个重要因素, 由山西省 2016 至 2018 年的各市的人均可支配收入(如图 20 所示)可知, 山西各市的人均可支配收入逐年增加, 太原市的人均可支配收入远高于山西省其他市, 由此, 我们可以推断出太原市的经济发展比其余市更加迅速, 人均收入也高于山西省其余市, 吸引更多人前往太原市根据山西统计年鉴城乡人口情况数据, 我们绘制出了山西省 2008 年至 2018 年城乡人口趋势图, 由图 21 可知, 2008 年至 2018 年城镇人口逐年增加, 乡村人口逐年减少。

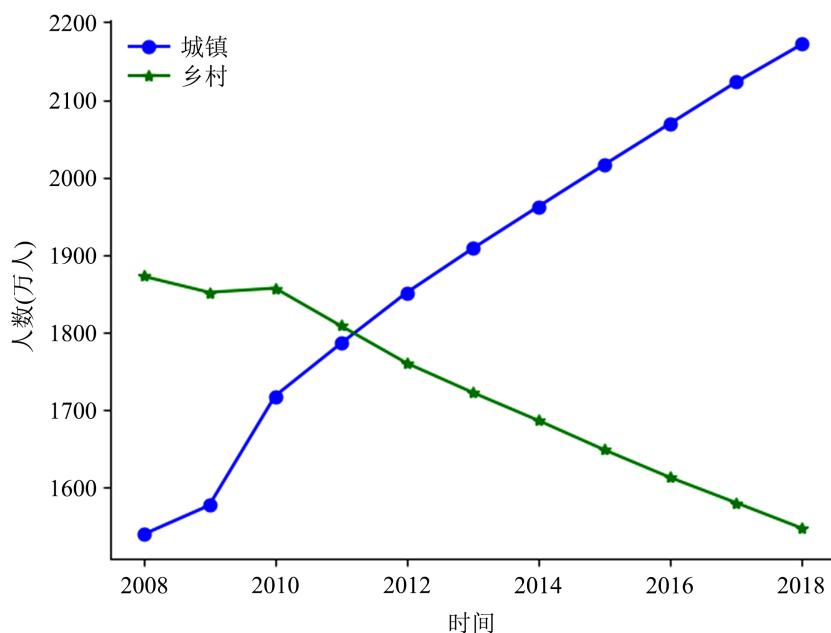


Figure 20. Per capita disposable income of cities in Shanxi Province

图 20. 山西省各市人均可支配收入

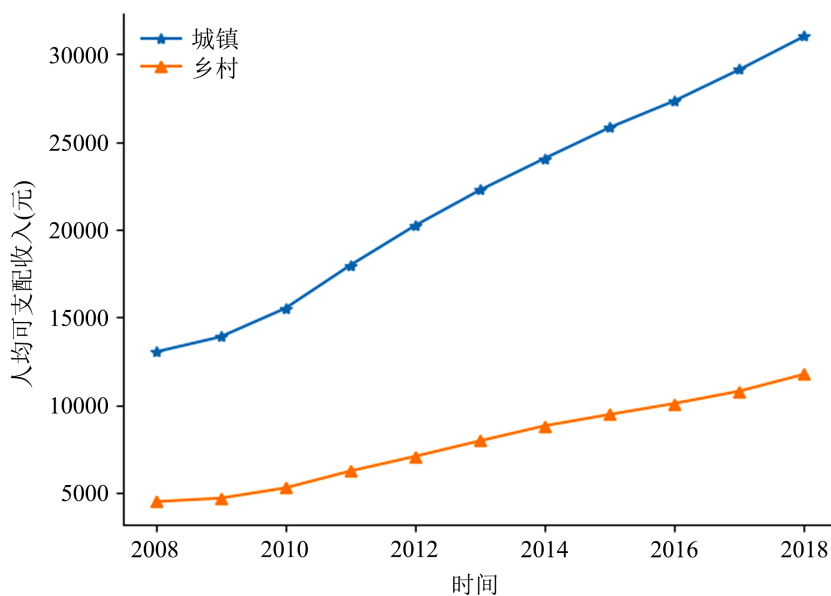


Figure 21. Urban and rural population trends in Shanxi Province from 2008 to 2018

图 21. 山西省 2008 至 2018 城乡人口趋势

a) 可支配收入是影响人们迁移的一个重要因素, 由图 22 可知, 山西省 2008 年至 2018 年的城镇的人均可支配收入及其增长速度均高于乡村的人均可支配收入, 城镇的较高收入吸引人们从乡村迁移至城镇。

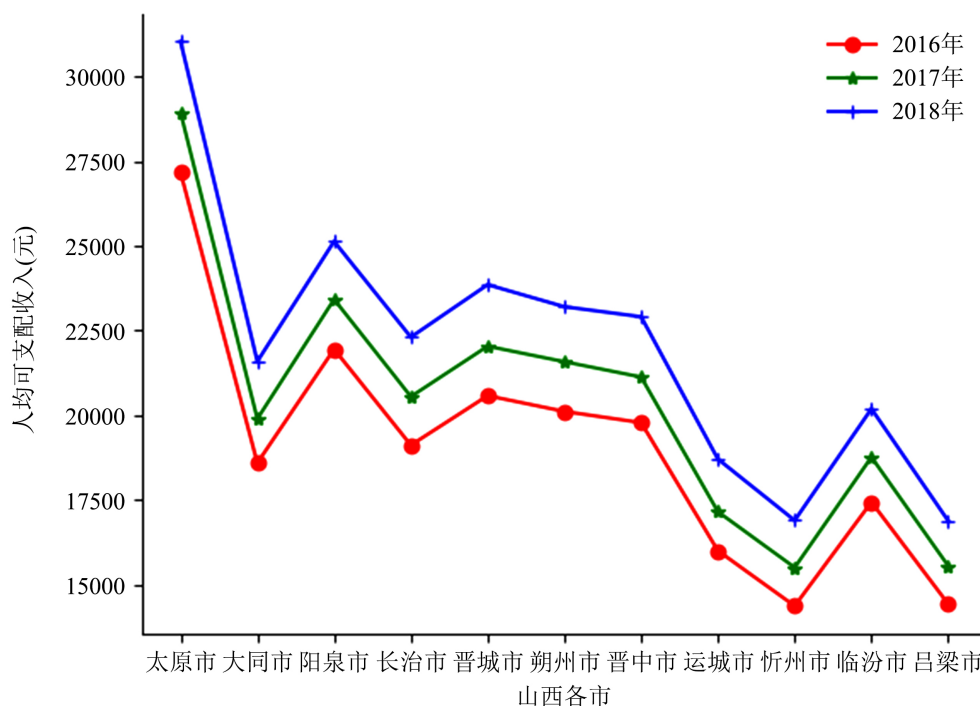


Figure 22. The trend of urban and rural per capita disposable income in Shanxi Province from 2008 to 2018  
图 22. 山西省 2008 至 2018 城乡人均可支配收入趋势

b) 卫生技术人员(每万人)的人数可以反映该地区医疗建设情况。山西省历年卫生技术人员数(每万人)由 2013 年的 58 人增长到 2018 年的 66 人, 增长了 8 人, 城镇的卫生技术人员数量多于乡村的卫生技术人员数量。乡村人民为了享受更加优质的医疗条件选择迁入城镇。

#### 4.2. 省际人口流动分析

根据第七次全国人口普查及山西省计生委对流动人口动态监测调研数据可知, 山西省常住人口为 34,915,616 人, 比 2010 年(第六次全国人口普查数据, 下同)减少 2.23%, 年平均减少 0.23%。山西省人户分离人口为 49,276 万人, 其中, 市辖区内人户分离人口为 11,694 万人, 流动人口为 37,582 万人, 其中, 跨省流动人口为 12,484 万人。与 2010 年相比, 人户分离人口增长 88.52%, 市辖区内人户分离人口增长 192.66%, 流动人口增长 69.73%。我国经济社会持续发展, 为人口的迁移流动创造了条件, 人口流动趋势更加明显, 流动人口规模进一步扩大。

山西省际人口流动数据表明, 2010 年到 2020 年期间山西省人口净流出 796,495 人, 其中男性人口净流出 533,620 人, 女性人口净流出 262,875 人。根据数据, 我们发现男性人口流出量远大于女性人口流出量, 男性迁移意向大于女性。男性迁移的主要原因是工作调动以及外出打工、经商。而女性调动的原因为随迁家属和婚姻嫁娶。

在省际迁移的人数中, 超过 100,000 人的省份有河南、河北; 超过 50,000 人的省份有陕西、四川和内蒙古自治区; 小于 10,000 人的地区主要为直辖市和西北、西南省份。其中接壤 4 省人数达到 470,677, 占总人数的 50.52%。

### 4.3. 人口流失模型的建立求解

关于人口流失的  $GM(1, 1)$ 模型是基于累加生成的数列预测模型[9], 其建立步骤与前文中人口预测的模型相同[10]。人口流失原始序列

$$x^{(0)}(t) = [-14.33 \quad 13.73 \quad 15.73 \quad 14.85 \quad 8.76 \quad 10.55 \quad 6.67 \quad 5.97 \quad 9.51 \quad 6.14]$$

利用 *Matlab* 程序求解, 程序见附录, 结果如下

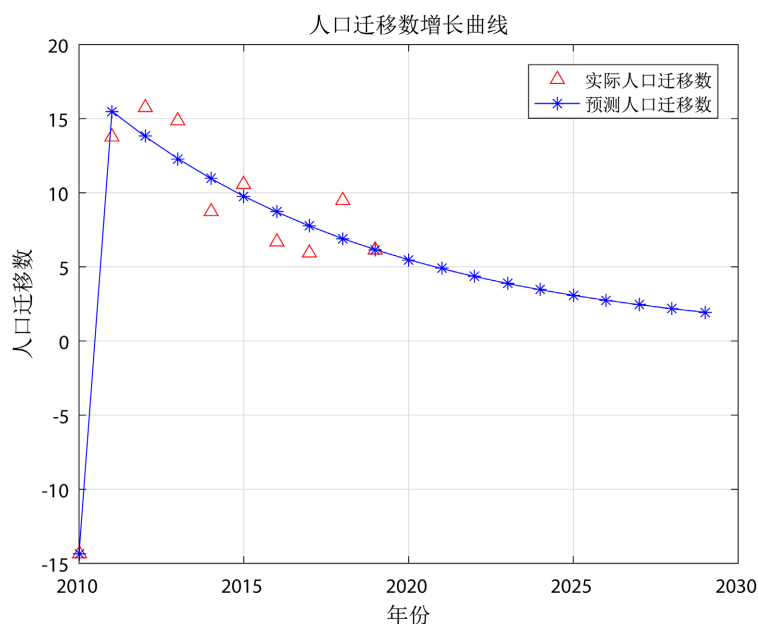
$$a = 0.1154, u = 14.7533$$

利用灰色模型预测, 预测结果如表 5、图 23 所示:

**Table 5.** Population loss forecast

**表 5.** 人口流失预测

年份	预测人口流失数(万人)
2020	5.4852
2021	4.8875
2022	4.3548
2023	3.8802
2024	3.4574
2025	3.0806
2026	2.7748
2027	2.4457
2028	2.1792
2029	3.4771
2030	1.9417



**Figure 23.** Population attrition prediction curve

**图 23.** 人口流失预测曲线

由上述模型可知，未来十年人口一直处于流失状态但流失人口会逐渐减少。

## 5. 政策建议

第七次人口普查数据显示，2014~2017年，出生人口中“二孩”占比明显上升，由2013年的30%左右上升到2017年的50%左右，此后虽有所下降，但仍然高于40%。由此可以看到，二孩政策在过去我国人口增长上起到了一定作用，但不可否认的是我国“二孩”效应正在减弱，国家在这个后疫情时代的关键节点，放开三孩政策，有利于应对我国人口增长及人口老龄化问题。但从我们的分析来看，两个政策所面向的群体数量有较大差异，三孩政策的效应大概率要弱于二孩政策的效应，鉴于此我们向山西省政府部门提出如下建议：

1) 加快经济转型步伐，调整产业结构，提升经济实力。山西人口之所以出现负增长，大量人口迁出，原因便是山西经济条件落后，有能力的人往往选择去更好的城市发展。山西要加快调整和优化产业结构，拓宽就业渠道。我省可以从以下几个方面进行产业结构调整：a) 推进农业规模化发展，以村为规模，创造出更多像“大同黄花”的品牌化、市场化、高端化产业；b) 提高支柱产业的技术发展；c) 促进第三产业尤其是旅游业的发展，大力支持高新技术企业发展。

2) 强调人才在发展中的重要性，落实相关政策吸引人才。如今各行各业飞速发展，人才竞争日益激烈。高素质人才对本地的经济、文化和政治发展均有不可替代的作用。山西人口流失在人才方面是一笔巨大损失，山西本地仅一所211高校，所拥有的人才资源本就少，再加上毕业后还有许多人去往大城市，留住人才对山西来说至关重要，政府必须以优越的政策吸引人才落户。

3) 重视示范城市作用，提升城市形象。良好的城市风貌是一个地区发展的缩影，也是一个地区对外的形象展示。目前山西有特色形象的城市少之又少，注重城市文化建设，于城市的经济发展大有裨益，良好的城市环境有利于吸引更多人居，打造宜居城市。

4) 加快建设交通网络，建设道路和相关基础设施。

5) 提升医疗设施水平。优秀的医疗水平是影响人口分布的一个重要因素。

6) 提高年轻群体的结婚率，当下我国年轻群体普遍存在恐婚、离婚率高等问题。政府有关部门可以努力搭建年轻人交流平台，积极引导宣传正确的婚恋观。

7) 努力配备好三孩政策的配套措施。生育、养育、教育孩子的成本很高，生三孩对家庭经济压力更大。相关的生育成本需要降低，特别是养育和教育成本的降低需要政府有关部门的处理。

8) 三孩对住房要求也变高，特别是在大城市，需要解决居住问题。因此，房子问题政府应要有相应的配套措施。例如可以给多子女家庭提供一定的住房补贴。

9) 山西省政府的人口控制政策，只有与其他刺激人们生活水平提高的政策相配套，才能取得更好的结果，因此人口问题本质上是一个经济问题。

## 参考文献

- [1] 司守奎, 孙兆亮, 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- [2] 孟鹏洋. 人口预测数学模型分析[J]. 行政事业资产与财务, 2018(11): 28-29.
- [3] 卓金武, 王鸿钧, 编著. Matlab 数学建模方法与实践[M]. 第3版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.
- [4] 姜启源, 谢金星, 叶俊, 数学建模[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [5] 严政人, 魏玉蕊, 陈庆炜, 等. 基于 Leslie 模型分析“全面二孩”政策对人口数量影响[J]. 湖北科技学院学报, 2016, 36(7): 44-47.
- [6] 齐美东, 戴梦宇, 郑焱焱. “全面放开二孩”政策对中国人口出生率的冲击与趋势探讨[J]. 中国人口·资源与环境, 2016(9): 1-10.

- 
- [7] 李琳洁, 朱家明, 陈富媛. 基于 Leslie 模型对全面二孩政策下的人口预测[J]. 现代商贸工业, 2018, 39(13): 134-135.
- [8] 闫佩玉. 基于 BP 神经网络研究二孩政策对我国人口结构的影响[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [9] 关海鹏, 任燕, 卢槟峰. 山西省城镇化过程中的人口迁移模型研究[J]. 大众标准化, 2021(4): 113-116, 122.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-1350.2021.04.038.33>
- [10] 周瑞平. GM(1,1)模型灰色预测法预测城市人口规模[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2003, 34(1): 81-83.