

## 中国人口增长预测模型

杨海滨, 赵 翔, 黄魁华

指导教师: 指导教师组

(国防科技大学, 长沙 410073)

**摘 要:** 本文结合控制论, 运用系统工程的原理和方法, 对中国人口增长这个复杂的社会现象加以定量研究。综合我国人口呈现的老龄化、城镇化加速, 出生性别比升高等新特点, 运用状态空间分析法, 将人口发展分为年龄、生育和迁移过程, 建立分区域分性别带迁移项的离散人口发展方程及其指标体系, 并讨论方程参数的拟计算方法。最后求解方程, 给出分析结论并评价模型的优缺点。

**关键词:** 人口预测; 改进人口发展方程; 状态空间分析法; 迁移模式

**分类号:** AMS(2000) 90C30

**中图分类号:** O221

**文献标识码:** A

## 1 引言

在我国现代化进程中, 必须实现人口与经济、社会、资源、环境协调和可持续发展, 进一步控制人口数量, 提高人口质量, 改善人口结构。现阶段, 在感受计划生育政策带来的“人口红利”<sup>[1]</sup>的同时, 中国依然面临人口结构性失调的严峻挑战, 如老龄化进程加速、出生性别比持续走高, 乡村人口城镇化加快等。因此, 需要准确预测未来人口数量, 为社会发展决策提供科学依据。

为论述方便, 并使得人口增长预测模型更具有针对性, 给出如下基本假设:

- 1) 人口生存环境为一般常态的自然和社会环境;
- 2) 从净增长来看, 只存在从乡村向城和镇两级行政区划的人口迁移;
- 3) 无重大毁灭性自然灾害和疾病, 无战争等暴烈活动, 即扰动人口发展的因素只有人口迁移;
- 4) 迁移到城镇的乡村人口在统计时刻到来前的前向死亡率与迁移前在乡村的死亡率相比, 无显著变化。

## 2 分区域分性别带迁移项的人口增长预测离散模型

与现有模型相比, 本文创新点主要体现在: 一是, 现有文献中关于人口增长的预测, 基本上都是在全国层面上进行的, 未进行分城乡预测<sup>[2]</sup>。而从我国国情来看, 社会经济体系客观上存在城、镇、乡三元结构, 且城乡之间的生育、死亡水平存在较大差异; 同时城乡之间存在明显的人口迁移, 分城、镇、乡进行人口预测更符合国情。二是, 宋健等的离散人口模型是通过连续模型离散化得到的, 本文从控制过程的角度, 将人口视作一个系统, 把人口发展过程分为年龄、生育和迁移过程, 来推导离散人口发展模型。

## 2.1 人口系统的状态变量

设  $t$  时刻在  $a$  区域人口系统内满  $i$  岁但不足  $(i+1)$  岁的  $s$  性人数为  $x_a^s(i, t)$ , 其中  $a \in \{c, t, v\}$ ,  $s \in \{m, f\}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为系统中人口能活到的最大年龄。利



用  $x_a^s(1, t), x_a^s(2, t), \dots, x_a^s(m, t)$  这一组量就能完整描述人口系统。由于这是一组最小描述, 因此可选定  $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$  为人口系统的状态变量。

## 2.2 人口动态过程

在假设条件下, 引起人口系统状态变化的三个基本要素是: 生育、死亡和迁移, 因而人口动态过程实际上就是反映在三个过程上, 即年龄、生育和迁移过程。下面分析这三个过程, 建立系统的状态空间模型。

### 1) 年龄过程

$t$  时刻年满  $i$  岁不足  $(i+1)$  的人口, 经过一年时间, 减去期间死亡的人口, 再加上期间由乡村迁入的满  $i$  岁不足  $(i+1)$  的人口, 就是  $(t+1)$  时刻年满  $(i+1)$  岁而不足  $(i+2)$  的人口数。即

$$x_a^s(i+1, t+1) = [1 - \mu_a^s(i, t)]x_a^s(i, t) + f_a^s(i, t), \quad (1)$$

其中  $a \in \{c, ts, v\}$ ,  $c$  = 城 (City),  $t$  = 镇 (Township),  $v$  = 乡 (Village);  $s \in \{m, f\}$ ,  $m$  = 男性 (Male),  $f$  = 女性 (Female);  $i = 0, 1, 2, \dots, m-1$ .  $x_a^s(i, t)$  表示  $t$  时刻  $a$  区域的  $i$  足岁的  $s$  性人口数量;  $\mu_a^s(i, t)$  表示  $t$  时刻  $a$  区域的  $i$  足岁的  $s$  性人口的前向死亡率;  $f_a^s(i, t)$  表示  $t$  时刻  $a$  区域的  $i$  足岁的  $s$  性人口的迁移数量。

将式(1)写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} x_a^s(1, t+1) \\ x_a^s(2, t+1) \\ \vdots \\ x_a^s(m, t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 - \mu_a^s(0, t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 - \mu_a^s(1, t) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 - \mu_a^s(m-1, t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a^s(1, t) \\ x_a^s(2, t) \\ \vdots \\ x_a^s(m, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1 - \mu_a^s(0, t))x_a^s(0, t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_a^s(0, t) \\ f_a^s(1, t) \\ \vdots \\ f_a^s(m-1, t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中按龄死亡率  $\mu_a^s(i, t)$  表示  $a$  区域  $i$  年龄组人口中在  $t$  年度内死亡人口所占的比率。它既是年龄和时间的函数, 又是区域和性别的函数, 反映了人口按区域按性别死亡的统计规律。当  $t, a, s$  固定时,  $\mu_a^s(i, t)$  随年龄变化图线呈马鞍状; 当  $i, a, s$  固定时,  $\mu_a^s(i, t)$  随时间一般呈递减趋势, 反映了医疗和生活水平的提高。

### 2) 生育过程

设  $r_1$  是系统内妇女最低生育年龄,  $r_2$  为最高生育年龄, 称  $[r_1, r_2]$  为妇女的育龄区间, 即妇女有生育能力的年龄段。定义育龄女性生育率  $b_a^s(i)$ ,  $i \in [r_1, r_2]$ ,  $b_a^s(i) \triangleq \frac{\Psi_a^s(i, t)}{x_a^s(i, t)}$ , 其中,  $\Psi_a^s(i, t)$  表示  $t$  年代  $a$  区域  $i$  岁妇女生育  $s$  性的婴儿数量,  $i \in [r_1, r_2]$ 。于是

$$x_a^s(0, t) = (1 - \mu_a^s(00, t))\Psi_a^s(t), \quad (3)$$



其中

$$\Psi_a^s(t) = \sum_{i=r_1}^{r_2} \Psi_a^s(i, t) = \sum_{i=r_1}^{r_2} b_a^s(i, t) x_a^f(i, t) = [0 \cdots b_a^s(r_1, t) \cdots b_a^s(r_2, t) \cdots 0] \begin{bmatrix} x_a^f(1, t) \\ x_a^f(2, t) \\ \vdots \\ x_a^f(m, t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

将式(3)(4)代入式(2)右边第二项, 得

$$\begin{bmatrix} (1 - \mu_a^s(0, t)) x_a^s(0, t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = (1 - \mu_a^s(0, t))(1 - \mu_a^s(00, t)) \begin{bmatrix} 0 & \cdots & b_a^s(r_1, t) & \cdots & b_a^s(r_2, t) & \cdots & 0 \\ 0 & & & \cdots & & & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & & \vdots \\ 0 & & & & \cdots & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a^f(1, t) \\ x_a^f(2, t) \\ \vdots \\ x_a^f(m, t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

记

$$\eta_a^s(0A) = (1 - \mu_a^s(0, t))(1 - \mu_a^s(00, t)),$$

$$\beta_a(t) \triangleq \sum_{i=r_1}^{r_2} n_a(i, t), \quad h_a(i, t) \triangleq \frac{n_a(i, t)}{\sum_{i=r_1}^{r_2} n_a(i, t)},$$

其中  $n_a(i, t)$  表示  $t$  年代  $a$  区域  $i$  岁妇女平均生育婴儿个数;  $h_a(i, t)$  称为  $a$  区域妇女的生育模式,  $\beta_a(t)$  为  $t$  年代  $a$  区域妇女的比生育率, 即一个平稳人口系统中,  $a$  区域一对夫妇终生生育婴儿数, 或  $t$  年代  $a$  区域每个妇女平均生育婴儿数 (据统计数据, 当前我国城、镇、乡的  $\beta_a(t)$  在计算时分别取定为 1.9, 2.0, 2.1 即可<sup>[4]</sup>)。于是

$$b_a^s(i, t) = S_a^s(t) \beta_a^s(t) h_a(i, t), \quad (6)$$

其中  $S_a^s(t)$  表示  $t$  年代  $a$  区域  $s$  性出生婴儿占总出生婴儿数的比例。

将式(6)代入式(5), 从而有下式

$$\begin{bmatrix} (1 - \mu_a^s(0, t)) x_a^s(0, t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \eta_a^s(0A) \begin{bmatrix} 0 & \cdots & S_a^s(t) \beta_a^s(t) h_a(r_1, t) & \cdots & S_a^s(t) \beta_a^s(t) h_a(r_2, t) & \cdots & 0 \\ 0 & & & \cdots & & & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & & \vdots \\ 0 & & & & \cdots & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a^f(1, t) \\ x_a^f(2, t) \\ \vdots \\ x_a^f(m, t) \end{bmatrix},$$



写成向量形式有

$$X_a^s(t+1) = M_a^s(t)X_a^s(t) + \eta_a^s(0A)Y_a^s(t) + f_a^s(t), \quad (7)$$

其中

$$Y_a^s(t) = \beta_a(t)S_a^s(t)H_a^s(t)X_a^f(t), \quad H_a(t) \triangleq \begin{bmatrix} 0 & \cdots & h_a(r_1, t) & \cdots & h_a(r_2, t) & \cdots & 0 \\ 0 & & & & & & 0 \\ \vdots & & & & & & \vdots \\ 0 & & & & & & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_a^s(t) \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 - \mu_a^s(i, t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 - \mu_a^s(2, t) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 - \mu_a^s(m-1, t) & 0 \end{bmatrix}.$$

### 3) 迁移过程

本文所指的多区域就是城、镇、乡三个区域，乡村人口是指人口普查资料中的县级以下人口，城、镇人口是分别指人口普查资料中的城市人口和镇人口。乡村人口发展和城、镇人口发展既有联系又有区别，区别在于城乡人口规模、结构以及生育水平、死亡水平的显著性差异，而乡-城镇之间的人口迁移是连接城乡人口的纽带。

迁移过程，很大程度上缘于乡村人口的城镇化。参考生育过程式(3)，定义  $\Phi_a^s(i, t)$  为  $t$  年代  $a$  区域迁入或迁出的总人数：当  $a=v$  时， $\Phi_a^s(i, t) < 0$ ；当  $a=c$  或  $t$  时， $\Phi_a^s(i, t) > 0$ 。根据人口统计时刻人口总量守恒的原则，即乡村迁出人口等于城、镇迁入人口，

$$\begin{cases} \Phi_c^s(i, t) = (1 - \lambda_v^s(t))\omega_v^s(i, t)\Phi_v^s(i, t), \\ \Phi_v^s(i, t) = \Phi_c^s(i, t) + \Phi_t^s(i, t). \end{cases}$$

为了揭示迁移人口与当地总人口的关系，引入迁移模式矩阵

$$W_v^s(t) \triangleq \begin{bmatrix} IR_v^s(0, t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & IR_v^s(1, t) & \cdots & 0 \\ 0 & & \ddots & 0 \\ 0 & & & \cdots & IR_v^s(m, t) \end{bmatrix},$$

对于乡村来说，

$$f_a^s(t) = -f_v^s(t) = - \begin{bmatrix} f_v^s(0, t) \\ f_v^s(1, t) \\ \vdots \\ f_v^s(m, t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} IR_v^s(0, t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & IR_v^s(1, t) & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & & & \cdots & IR_v^s(m, t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v^s(1, t) \\ x_v^s(2, t) \\ \vdots \\ x_v^s(m, t) \end{bmatrix} = -W_v^s(t)X_v^s(t). \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)，得到乡村人口发展模型

$$X_v^s(t+1) = M_v^s(t)X_v^s(t) + \eta_v^s(0A)Y_v^s(t) + (-W_v^s(t)X_v^s(t)). \quad (9)$$



引入迁移人口留存矩阵

$$N_v^s(t) \triangleq \begin{bmatrix} 1 - \lambda_v^s(1, t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 - \lambda_v^s(2, t) & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & & \cdots & 1 - \lambda_v^s(m, t) \end{bmatrix},$$

其中  $\lambda_v^s(1, t)$  表示  $t$  年代乡村的  $s$  性迁移人口在下一个统计时刻到来之前死亡的概率。根据前文的假设约定,  $\lambda_v^s(1, t) = \mu_v^s(i, t)$ 。所以

$$N_v^s(t) \approx \begin{bmatrix} 1 - \mu_v^s(0, t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 - \mu_v^s(1, t) & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & & \cdots & 1 - \mu_v^s(m, t) \end{bmatrix}$$

定义迁移年龄模式

$$RC_c^s(t) \triangleq \begin{bmatrix} RC_c^s(0, t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & RC_c^s(1, t) & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & RC_c^s(m, t) \end{bmatrix},$$

它表示  $t$  年代  $s$  性乡村人口按年龄别从乡村迁移到城市的比率; 其中

$$RC_c^s(i, t) \triangleq \frac{f_c^s(i, t)}{\sum_{i=0}^m f_v^s(i, t)},$$

它表示  $i$  岁  $s$  性迁移到城市的乡村人口占  $s$  性迁移总人口的比率。参考专业统计资料, 我们发现它与时间的依赖性较小, 变化不显著, 因此基于简化计算的考虑, 可用已知的统计数据来估算它, 即

$$RC_c^s(i, t) \approx \frac{f_c^s(i, t_0)}{\sum_{i=0}^m f_v^s(i, t_0)}.$$

那么简单地,  $RC_c^s(t) \approx RC_c^s(t_0)$ 。

所以, 得到对于城市的人口发展模型

$$X_c^s(t+1) = M_c^s(t)X_c^s(t) + \eta_c^s(0A)Y_c^s(t) + N_v^s(t)RC_a^s(t_0)W_v^s(t)X_v^s(t). \quad (10)$$

同理, 我们可以顺利得到对于镇的人口发展方程

$$X_{ts}^s(t+1) = M_{ts}^s(t)X_{ts}^s(t) + \eta_{ts}^s(0A)Y_{ts}^s(t) + N_{ts}^s(t)[I - RC_c^s(t_0)]W_{ts}^s(t)X_{ts}^s(t), \quad (11)$$

其中  $I$  为单位矩阵。至此, 就推得了最终的考虑了城乡人口迁移和男女性别的分区域离散人口发展模型

$$\begin{cases} X_v^s(t+1) = M_v^s(t)X_v^s(t) + \eta_v^s(0A)Y_v^s(t) + (-W_v^s(t)X_v^s(t)), \\ X_c^s(t+1) = M_c^s(t)X_c^s(t) + \eta_c^s(0A)Y_c^s(t) + N_v^s(t)RC_a^s(t_0)W_v^s(t)X_v^s(t), \\ X_{ts}^s(t+1) = M_{ts}^s(t)X_{ts}^s(t) + \eta_{ts}^s(0A)Y_{ts}^s(t) + N_{ts}^s(t)[I - RC_c^s(t_0)]W_{ts}^s(t)X_{ts}^s(t). \end{cases} \quad (12)$$



### 2.3 人口模型指标体系

模型中的  $x_a^s(i, t)$  表明了人口发展过程随时间的演化规律。为刻画人口发展的某些特点和人口统计之用, 还要引进一些数字特征量, 这些特征量和状态量  $x_a^s(i, t)$  有着直接联系。它们从不同方面反映了人口发展的内在属性, 通常称作人口指数。下面给出主要人口指数的定义及其计算公式, 以建立模型完整的指标体系。

#### 1) $t$ 年代的人口总数

$$N(t) = \sum_{i=0}^m \sum_{a \in \{c, ts, v\}} \sum_{s \in \{m, f\}} x_a^s(i, t).$$

#### 2) $t$ 年代死亡人口总数

$$D(t) = \sum_{i=0}^m \sum_{a \in \{c, ts, v\}} \sum_{s \in \{m, f\}} \mu_a^s(i, t) x_a^s(i, t) + \sum_{a \in \{c, ts, v\}} \sum_{s \in \{m, f\}} \mu_a^s(00, t) \psi_a^s(t).$$

#### 3) $t$ 时刻总人口的平均年龄

$$A(t) = \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^m \sum_{a \in \{c, ts, v\}} \sum_{s \in \{m, f\}} i x_a^s(i, t).$$

$A(t)$  实质上是各个年龄构成的加权平均, 它越小, 说明年龄小的人口比重大, 因而青年人相对的多, 年龄构成轻。

4)  $t$  时刻人口自然增长率  $G(t) = \frac{\psi(t) - D(t)}{N(t)}$ 。随基数  $N(t)$ ,  $N(t-1)$ ,  $\frac{1}{2}(N(t) + N(t-1))$  的不同, 有后向、前向、中向自然增长率的区分。

5)  $t$  年代社会抚养指数  $\rho(t) = \frac{N(t) - L(t)}{L(t)}$ 。其中,  $L(t)$  具有劳动能力的人口数量, 男性具有劳动能力的年龄区间定义在  $[r_{11}, r_{12}]$ , 女性为  $[r'_{11}, r'_{12}]$ 。  $\rho(t)$  表示该年代每一个有劳动能力的人平均要抚养的没有劳动能力的人数, 它越大社会的人口负担就越大。

6)  $t$  年代老龄化指数  $\omega(t) = \frac{A(t)}{S(t)}$ , 其中  $A(t)$  为人口平均年龄,  $S(t)$  为平均寿命。

7)  $t$  年代  $i$  岁人口性别比  $\lambda(i) = 100 \frac{x_a^m(i, t)}{x_a^f(i, t)}$ 。

## 3 模型求解

人口发展过程的预测是根据初始状态, 推算出未来人口发展状态, 即人口数量、年龄分布和区域分布的变化规律。人口发展过程是一个对输入反应很慢的动态系统, 这是它不同于一般动态系统的重要特点。人口发展过程的预测, 实质上就是在给定初始边界和各种参数的条件下, 求解方程(1)。解出  $x_a^s(i, t)$  后, 依上节各公式就可以计算出今后任何时刻的人口指数。这些指数是制定合理的人口政策的有力科学依据。

为了做人口发展过程的预测, 需要给出方程的初始状态。对于该模型, 即  $X_a^s(t_0)$ ,  $M_a^s(t_0)$ ,  $H_a(t)$ ,  $S_a^s(t)$  以及  $f_a^s(t)$ 。确定后, 选择不同的控制参数  $\beta_a(t)$ , 便对应不同的人口发展过程。下面给出确定参数的方法。

### 3.1 迁移人口的估算

以往的人口预测, 通常是对  $W_a^s(t)$  给出一个简单假设, 或固定为某一时期的值。然而, 随着人口城镇化水平接近高峰, 各年龄人口迁移率将随之降低; 甚至当逆城镇化时,  $W_a^s(t)$  还会出现负值。仅假设  $W_a^s(t)$  为一个常量是不符合人口城镇化发展规律的, 不能准确反映人口城镇



化对总人口再生产的影响, 无法对未来城乡人口年龄结构做出准确预测。因为, 一是人口城镇化速度决定了乡-城镇人口年龄别迁移率的水平; 二是城乡生育率水平的客观差异, 使得乡-城迁移人口会影响总人口生育率; 三是乡-城镇人口迁移将直接影响人口年龄结构。为准确刻画这三个方面的影响, 在人口预测中必须依据城镇化进程对  $W_a^s(t)$  进行估算。

首先, 据统计数据估计得到乡-城镇迁移人口的年龄模式  $IR_a^s(i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, m$ ; 其次, 设定乡-城镇迁移人口年龄模式的变化态势; 然后, 根据城镇化水平速度计算总和乡-城镇人口迁移率  $TIR$ 。

引入  $a$  区域  $i$  岁  $s$  性人口的迁移率

$$IR_a^s(i) = \frac{IR_a^s(i, t)}{\sum_{i=0}^m IR_a^s(i, t)},$$

它是一个关于年龄的迁移率函数, 与时间的依赖性较小, 变化不显著<sup>[4]</sup>。基于简化计算的考虑, 本文用统计数据来估算它。在计算过程中, 它是一个相对固定的常数, 即

$$IR_a^s(i) \approx \frac{IR_a^s(i, t_0)}{\sum_{i=0}^m IR_a^s(i, t_0)}.$$

记  $TAR_a^s = \sum_{i=0}^m IR_a^s(i, t)$ , 依据城镇化水平的预测值, 则可推算出所需要的  $IR_a(i, t)$ , 而城镇化水平的预测值可由人口城镇化与社会经济发展水平之关系对未来进行预测<sup>[2]</sup>, 记作  $U_v(t)$ , 即  $TAR = \varphi(U_v(t))$ 。

未来人口城镇化速度的确定是预测未来乡-城镇迁移人口的基础, 根据国内外关于城镇化水平与经济发展水平关系的研究<sup>[3]</sup>, 我国已进入城镇化快速发展阶段, 其发展速度可容易确定。从而本文中的  $W_a^s(t)$  会随社会经济的发展而不断变化, 更具实际意义。至此, 可得到迁移模式  $W_a^s(t)$  的计算方法, 即

$$W_a^s(t) = TAR \begin{bmatrix} IR_a^s(0) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & IR_a^s(0) & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & & \dots & IR_a^s(0) \end{bmatrix}.$$

### 3.2 方程参数的拟合

下面给出生育模式、死亡率及初始条件三个重要参数的拟合方法。

#### 3.2.1 生育模式的计算

首先确定生育模式  $h_a(i, t)$ 。  $h_a(i, t)$ ,  $i = r_1, (r_1 + 1), \dots, r_2$  是  $a$  区域年龄为  $i$  岁妇女可以生育的加权因子, 满足归一化条件  $\sum_{i=r_1}^{r_2} h_a(i, t) = 1$ 。  $h_a(i, t)$  越大, 说明  $a$  区域年龄为  $i$  岁妇女生育婴儿越多。在归一化条件下, 按年龄分布适当调整  $h_a(i, t)$  的大小, 便可控制生育的早晚以及密疏; 控制比生育率  $\beta_a(t)$  的大小, 又可控制生育的多少。因此,  $h_a(i, t)$  和  $\beta_a(t)$  是人口政策的一种定量描述, 比如我们一贯的乡村人口政策是“晚、少、稀”, “晚”和“稀”就可以通过生育模式  $h_v(i, t)$  来调节, 而“少”则通过  $\beta_v(t)$  来加以控制。根据宋健等对统计数据的研究, 生育模式函数可以相当准确的用统计学中的  $\chi^2$  分布密度函数曲线来表达<sup>[4]</sup>, 即

$$h_a(r) = \begin{cases} 0, & r < r_1, \\ \frac{1}{2^{1/2} \Gamma(\frac{1}{2})} (r - r_1)^{(\frac{1}{2}-1)} e^{-\frac{r-r_1}{2}}, & r \geq r_1, \end{cases} \quad (13)$$



这个函数在  $r_0 = r_1 + n - 2$  处达到极大值,  $r_0$  成为峰值生育年龄, 其中  $r_1$  是最低生育年龄。结合题给数据和相关文献定义<sup>[5]</sup>, 我国现在平均水平可以取  $r_1 = 15$ , 而分别对城、镇、乡来说, 这个值会略有不同, 三者在数值上呈递减形式:  $r_2 = 49$ 。将式(14)离散化, 就得到离散生育模式  $h_a(i, t)$ ,  $i = r_1, (r_1 + 1), \dots, r_2$ 。

### 3.2.2 死亡率的计算

$\mu_a^s(i, t)$  是对人口发展过程预测有较大影响的重要参数。统计数据表明, 婴儿、1-2岁儿童以及老年人的死亡率较高, 其他年龄死亡率较低, 且相差不大。随着我国现代化建设的发展, 人民生活及医疗卫生水平不断提高, 尤其乡村更为明显,  $\mu_a^s(i, t)$  将随着  $t$  增大而减小。在预测人口发展时, 可假定  $\mu_a^s(i, t)$  在若干年内下降到某一最小值, 即接近世界最小死亡率地域的现有死亡率值<sup>[4]</sup>。参照宋健人口模型, 取

$$\mu_a^s(t) = \begin{cases} \mu_a^s(t_0), & 5 \leq i \leq 50, \\ \mu_a^s(t_0)[1 - \varepsilon(t - t_0)], & i < 5 \text{ or } i > 50. \end{cases}$$

可以看出, 死亡率的统计数据在年份上越多,  $\mu_a^s(i, t)$  的逼近就越精确, 整个预测值也越准确。本文进一步认为婴儿的前向死亡率  $\mu_a^s(00, t)$  也服从上述规律, 所以一致地沿用这个公式来计算  $\mu_a^s(00, t)$ 。

### 3.2.3 人口初值的选择

初始条件  $x_a^s(i, t)$ , 就是预测起始那一年的人口数据。根据题给数据, 选定2000年的数据作为初始条件, 这样既能充分利用题给数据信息, 又能对本文所建模型做出检验预测, 是一个不错的选择。

### 3.3 人口发展方程的解

据题给数据求解式(11), 得到关于中国人口的中短期预测和长期预测结果, 结果见表1。

表1: 中国人口中短期和长期预测结果汇总表(单位: 万人)

年份	人口总数	市		镇		乡		迁移人口		老年人口
		男	女	男	女	男	女	男	女	
2005	13.0756	1.8149	1.8097	1.1271	1.1114	3.6664	3.5461	812	752	0.9695
2010	13.4702	2.1148	2.1067	1.8939	1.8831	2.7681	2.7035	815	779	1.0954
2015	13.8907	2.2920	2.2836	2.1197	2.1086	2.5712	2.5156	848	734	1.2851
2020	14.2913	2.4581	2.4495	2.3238	2.3123	2.4024	2.3452	832	761	1.6372
2025	14.7333	2.6225	2.6137	2.5282	2.5164	2.2557	2.1967	769	683	1.9530
2030	14.8256	2.6983	2.6894	2.6479	2.6360	2.1067	2.0474	725	679	2.3012
2035	14.6022	2.7014	2.6926	2.6810	2.6693	1.9582	1.8997	371	343	2.8963
2040	14.2047	2.6563	2.6478	2.6506	2.6392	1.8196	1.7912	218	176	3.1244
2045	14.1197	2.6545	2.6460	2.6489	2.6376	1.7805	1.7523	76	128	3.2078
2050	13.9158	2.6301	2.6217	2.6245	2.6134	1.7270	1.6991	33	52	3.2617

#### 1) 全国总人口数

更加直观地, 把预测值绘制如图1和2。可见我国人口在未来20年仍会持续增长, 且增长率几乎呈线性。中短期预测一般受人口惯性的影响较大, 有必要在此基础上做长期预测。人口总数在2030年左右迎来一个高峰后开始减少, 2050年回落到当前水平, 这说明了计划生育国



策的得力。总人口数先升后降主要是人口增长的惯性所致。目前我国的总和生育率已经低于生育更替水平, 但人口仍会持续增长并在2030年左右达到峰值; 2030年以后由于综合生育率低于生育更替水平, 人口系统趋向于稳定。

## 2) 出生人口性别比

为进一步清晰对比, 把各区域的出生性别比画成图3至5。可以看到各区域的出生性别比在短期内上升后最终在长线上出现了回落, 这也是符合自然界发展规律的。

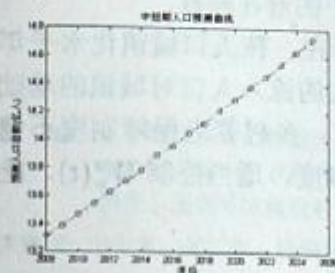


图 1: 中短期人口预测值曲线图

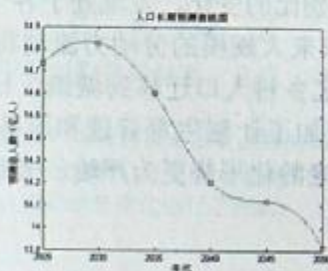


图 2: 长期人口预测值曲线图

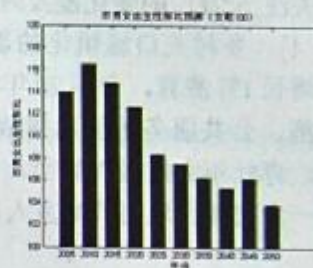


图 3: 城出生男女性别比预测图

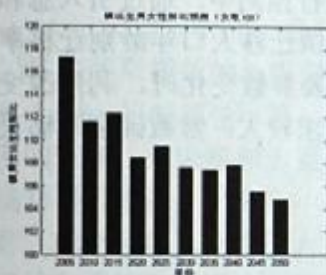


图 4: 镇出生男女性别比预测图

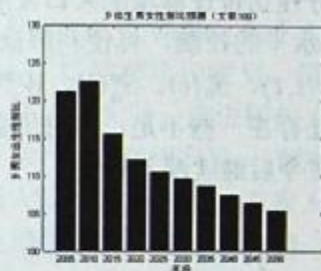


图 5: 乡出生男女性别比预测图

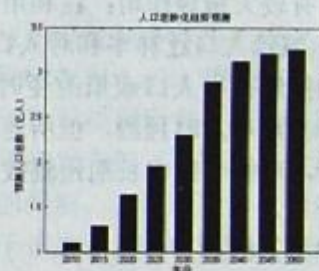


图 6: 老龄人口数预测图

## 3) 老龄化进程

直观起见, 将老龄人口数的预测数据绘制成柱状图6。人口发展的巨大惯性使得人口高速繁殖的后果在若干年后才得以显现, 并且未来增加的趋势呈递增走向。老龄化加重了社会负担, 对可持续发展是一个严重的挑战。

## 4) 乡村人口城镇化

随着人口的流动, 我国人口城镇化水平将逐年提高, 并于2050年达到70%以上, 人民生活条件和质量进一步提升, 跻身中等发达国家行列。

## 4 结论

本模型对我国城、镇、乡人口的预测结果, 呼应了《报告》中关于人口总数、性别比、城镇化水平及老龄化等关键因素的描述<sup>[1]</sup>。关注  $h_a(i, t)$ 、 $\beta_a(t)$ 、 $S_a^s(t)$ 、 $W_a^s(t)$  等敏感参数, 能够帮助决策者及时发现问题, 制定科学合理的政策。

1) 人口发展与社会经济的发展: 2020年我国人口预计将增至13.29亿, 2030年迎来峰值14.83亿, 2050年落至13.91亿。人口的适度发展, 能极大促进经济发展; 反之, 则会起极大的阻碍作用。决策者应关注  $h_a(i, t)$  和  $\beta_a(t)$  的变化, 通过政策导向和宣传教育, 使中国进入“人口低速发展, 经济快速增长”的理想状态。



2) 老龄化进程加速的影响: 老年人口数量多、老龄化速度快、高龄化趋势将是未来我国人口的显著特点。2020年, 65岁以上老年人口比重预计将增至11.2%; 40年后形成老龄人口高峰, 占总人口比重达22%。老龄化加速使“人口红利期”很快消失, 养老问题进一步突显, 提高出生率、健全社保是解决问题的关键。

3) 高男女出生性别比的影响: 到2020年, 20-45岁男性将比女性多3000万人左右。出生性别比失衡不仅使人才培养面临结构性难题, 更给人口和社会的可持续发展带来严峻挑战, 适当关注  $S_a^s(t)$  的变化能及时提示性别比的变化, 发现处于各个环节中的潜在问题。

4) 乡村人口城镇化的影响: 未来大规模的劳动力流动将持续存在, 按人口城镇化水平年均增长1%测算, 今后20年将有3亿乡村人口迁移到城镇。日益庞大的流入人口对城镇的基础设施、公共服务等提出挑战, 也增加了计划生育管理和服务的难度。乡村养老保障制度不健全, 青壮年大量涌入城市, 使乡村老龄化形势更为严峻。改革户籍制度, 适当控制  $W_v^s(t)$ , 能进一步宏观合理调节城乡人口结构。

## 5 模型的优缺点分析

上述模型的优点主要体现在: 建模过程中关注动态细节, 把握人口发展的关键因数, 对实际有较大指导作用; 在利用分区域分性别带迁移项的人口发展方程进行预测中, 通过引入总和乡-城镇人口迁移率和对人口城镇化水平的控制, 可便利解决对乡-城镇迁移人口年龄别迁移率的控制; 当人口政策改变时, 即  $h_a(i, t)$ 、 $\beta_a(t)$ 、 $S_a^s(t)$ 、 $W_v^s(t)$  等主要参数变化时, 利用改变的参数可及时预测。但所建模型也还存在一些不足, 如对历史数据需求较大; 参数确定不够灵活, 可能会影响长期预测效果, 需在今后继续深入研究。

### 参考文献:

- [1] 国家人口发展战略研究课题组. 国家人口发展战略研究报告[Z], 2007
- [2] 王金营, 原新. 分城乡人口预测中乡-城人口迁移技术处理及人口迁移预测[J]. 河北大学学报, 2007, 32(135)
- [3] 霍利斯, 钱那里等. 发展的型式[M]. 经济科学出版社, 1975
- [4] 宋健, 于景元, 李广元. 人口发展过程的预测[J]. 中国科学, 1980, (9)
- [5] 李永胜. 人口预测中的模型选择与参数认定[J]. 财经科学, 2004, 2(203)

## Forecast Model of China's Population Growth

YANG Hai-bin, ZHAO Xiang, HUANG Kui-hua

Advisor: Instructor Group

(National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract:** By integrating with cybernetic technology, principle and method of the system engineering, this paper addresses the complicated social phenomenon of China's population growth quantitatively. With the increase of sex ratio on birth, the growth of the population is divided into age, birth and migration process by using state space analysis. Also regionalized and sexualized discrete equations of population growth with migration item and its index system are established afterwards. The computation of the parameters is discussed in order to solve the equations. Conclusion and evaluation of the model are presented at last.

**Keywords:** population forecast; improved population growth equation; state-space analysis; migration pattern