

# 资源受限下的人口迁移模型

宋佳,郝睿,王旭明,霍杰

(宁夏大学物理电气信息学院;宁夏沙漠信息智能感知重点实验室,银川750021)

**摘要:**人类行为的复杂性源于系统内部各组分间的相互作用和外部影响,而对受资源等自然因素制约的人类决策行为是少数被关注的人类动力学研究新方向.本文考虑资源受限下的农业人口迁移,结合“推-拉理论”,在二维网格上建立了受粮食产量影响的人口迁移模型.通过模型模拟了不同区域人口及人均粮食产量的变化趋势,并通过引入信息熵对其人口分布变化进行分析.结果表明人口基数与经济水平相适应,资源才能得到充分合理的开发利用.信息熵呈先增后减的趋势,说明人口迁移行为经历了从无序到有序的发展过程.通过不同时刻人口规模斑图的对比,进一步展现了人口分布变化的趋势和特点.

**关键词:**人口迁移;信息熵;人均粮食产量;动力学模型

**中图分类号:**C92;N94;O415

**文献标志码:**A

近年来,人类行为动力学的研究越来越多地渗透到其他的学科领域并得到了许多令人瞩目的结果.研究人类的各种行为规律,是探索自然,认识人类自身行为的重要方面,也对其他学科研究、社会发展有着重要意义.2005年Barabási发表在Nature上的文章<sup>[1]</sup>掀起了“人类动力学”的研究热潮.文章通过对用户电子邮件和普通邮件的发送与回复等人类行为时间间隔的实证统计,展示了人类行为发生的时间间隔并不是均匀分布,而是表现出长时间的静默与短期内的高频率爆发.这一发现引起了国内外学者的关注,在随后的几年中,人类行为中存在的大量特殊现象和规律被相继揭示.

目前针对人类动力学的研究主要集中在3方面.1)人类行为中时间间隔分布规律的实证统计与理论分析.如人们对市场交易<sup>[2]</sup>、网站浏览<sup>[3]</sup>、微博浏览<sup>[4]</sup>等商业行为、娱乐行为的研究.2)人类行为空间特性的挖掘及其理论建模.如对疾病传播模型<sup>[5]</sup>、人的旅行行程分布<sup>[6]</sup>等研究.研究结果有助于城市交通、人流控制、紧急避险等系统的运作.3)人类行为时空演化的理论建模与动力学描述.如人类对新事物接受过程的描述,可以为新事物或新政策的传播提供合理的建议<sup>[7]</sup>.

作为一门新兴的交叉学科,目前人们多是对不受较苛刻的客观条件限制、也无利益驱动的人类行为进行研究.相比之下,受资源等自然因素制约的人类决策行为是少数被关注的人类动力学研究新方向.人口迁移这一人类群体决策行为,不仅受到自然资源以及环境的约束,同时也受到地区经济发展水平等因素的驱动.目前,对人口迁移的研究已形成了较为系统的理论思想,包括莱文斯坦迁移法则<sup>[8]</sup>、雷文斯坦(E. Ravenstein)和李(Everett Lee)的移民推-拉理论<sup>[9]</sup>、投资-收益理论等;其中由美国发展经济学家托达罗(1969)提出的“人口迁移预期收入理论”被广泛用于解释发展中国家人口迁移问题<sup>[10]</sup>;王桂新(1994)认为,地理因素对人口迁移具有重要影响,农村人口向城市迁移的重要原因是生态环境与自然资源的不断恶化<sup>[11-12]</sup>;而运用广泛的模型多为“引力模型”.本文试图建立自然因素约束下的农业人口迁移动力学方程,并考虑资源受限下,具有利益驱动特点的人口迁移,以期能给出受自然约束的人类群体行为发生的特征及规律,从而获得对人类活动规律的进一步理解和描述.

收稿日期:2014-09-21;修回日期:2014-10-30.

基金项目:国家自然科学基金(11265011;10565002);宁夏自然科学基金(NZ12161).

作者简介:宋佳(1988-),女,河北清苑人,宁夏大学硕士研究生,研究方向为非线性动力学及复杂性研究.

通信作者:王旭明(1967-),男,宁夏西吉人,宁夏大学教授,博士生导师,研究方向为复杂系统科学及应用, E-mail: wang\_xm@126.com.

## 1 人口迁移模型的建立

人口迁移通常受到自然、经济、文化等诸多因素的影响和制约,其中经济因素占主导地位.本模型选取 $40 \times 40$ 的网格,每个格点代表一个区域,并假设这些区域的经济来源主要以农业为主,即以各区域的人均粮食产量来衡量人均经济收入水平;同时各区域所拥有的资源不发生波动,即各区域耕地面积总量和亩产量保持不变,进而建立人口迁移模型.

### 1.1 人均粮食产量方程

无论对个体还是群体,其所在区域粮食产量的多少势必会影响该区域的经济水平.本文考虑仅受资源限制且各区域资源不变,将时间离散化后某区域粮食亩产量方程为

$$P_{(i,j,t)} = P_{(i,j,t+1)}, \quad (1)$$

其中, $P_{(i,j,t)}$ , $P_{(i,j,t+1)}$ 分别表示某区域( $(i,j)$ 表示二维网格中的格点坐标)第 $t$ 期(本期)及第 $t+1$ 期(下一期)的粮食亩产量.对于任意区域来讲,其人口数量的变化主要依赖于自然增减(出生或死亡)和迁移增减(迁入或迁出).模型中,忽略各区域人口出生率和死亡率,重点研究各区域由于迁移引起的人口变化与区域经济发展之间的关系.用区域( $i,j$ )处于第 $t$ 期的人均粮食产量 $P_{(i,j,t)}^{Aver}$ 来描述各区域的经济水平以及人均收入水平,其主要由本区域的亩产量 $P_{(i,j,t)}$ 、人均耕地面积 $C_{(i,j)}$ 和人口基数 $R_{(i,j,t)}$ 共同决定,其方程为

$$P_{(i,j,t)}^{Aver} = \frac{C_{(i,j)} \cdot P_{(i,j,t)}}{R_{(i,j,t)}}. \quad (2)$$

不同区域的经济收入存在差异,引入系统人均粮食产量

$$P_t^{Aver} = \frac{\sum_{i=1,j=1}^N C_{(i,j)} \times P_{(i,j,t)}}{\sum_{i=1,j=1}^N R_{(i,j,t)}} \quad (3)$$

作为衡量各个区域经济发展水平高低的标准.

### 1.2 人口迁移模型

经济水平制约着某区域的人口承载能力和人口集中程度.结合“推-拉理论”,迁移者会受到来自其他迁入区域的拉力和所在区域的推力作用.拉力表现为迁入区高的人均收入,推力则表现为迁出地的人均低收入水平,因此要在区域划分的基础上分别考虑不同区域间的迁移.

1) 当 $t$ 时期区域( $i,j$ )的人均粮食产量 $P_{(i,j,t)}^{Aver} < 0.85P_t^{Aver}$ 时,表示该区域的人均收入较低,人口超过资源、环境的承载能力.部分人口期望更优越的生活而选择迁往其他高收入区域,则该区域称为迁出区.则在 $N$ 个区域中,区域( $i,j$ )的迁出人口方程为

$$R_{(i,j,t)}^{out} = \frac{M_t}{N} \times \left(1 - \frac{P_{(i,j,t)}^{Aver} - P_{(i,j,t-1)}^{Aver}}{P_{(i,j,t-1)}^{Aver}}\right) \times \frac{P_t^{Aver} - P_{(i,j,t)}^{Aver}}{\sum_{i=1,j=1}^{N-M_t} (P_t^{Aver} - P_{(i,j,t)}^{Aver})} \times R_{(i,j,t)}. \quad (4)$$

从上式可看出,若 $t$ 时期高收入区域个数 $M_t$ 越大,说明有越多的区域来接纳移民,即有更多的优秀资源吸引低收入区域的人口迁出,则迁出人数也随之增多.式中 $\left(1 - \frac{P_{(i,j,t)}^{Aver} - P_{(i,j,t-1)}^{Aver}}{P_{(i,j,t-1)}^{Aver}}\right)$ 表明低收入区的迁出规模与该区域的人均收入水平的变化趋势有关.即若基于上期,本期粮食产量增加幅度越大,本期和上一期的人均收入差值越明显,本期多数人仍愿留在原区域以期下一时期人均收入会提高,迁移欲望减弱;反之,人们迁移欲望增强,表现为本区域人口向高收入区域迁移的推力增大,即人口迁出规模随之增加.右边第三项体现了迁出区域的经济收入与系统平均经济收入水平的比较,随着两者间差距增大,迁出区对本区域人口的推力作用增大,促使更多的人口迁出来获取更多的利益.

2) 当区域( $i,j$ )的人均粮食产量 $P_{(i,j,t)}^{Aver} > 1.13P_t^{Aver}$ 时,该区域经济收入水平较高,且还具有容纳人口的承载能力,该区域将会成为人口迁入区.迁入区对迁出区的吸引力强弱主要取决于其人均收入的高低和它们之间距离 $S_{(i,j) \rightarrow (i',j')}$ 的远近.则 $t$ 时刻迁出区域( $i,j$ )迁向迁入区域( $i',j'$ )的人口规模可表示为

$$R_{((i,j) \rightarrow (i',j'), t)}^m = \frac{(P_{(i',j')}^{Aver} - P_t^{Aver})}{\sum_{i=1, j=1}^N (P_{(i',j')}^{Aver} - P_t^{Aver})} \times \frac{1 - \frac{S_{(i,j) \rightarrow (i',j')}}{\sum_{i,i'=1, j, j'=1, i \neq i', j=j'}^N S_{(i,j) \rightarrow (i',j')}}}{\sum_{i,i'=1, j, j'=1, i \neq i', j=j'}^N \left(1 - \frac{S_{(i,j) \rightarrow (i',j')}}{\sum_{i,i'=1, j, j'=1, i \neq i', j=j'}^N S_{(i,j) \rightarrow (i',j')}}\right)}}{\sum_{i,i'=1, j, j'=1, i \neq i', j=j'}^N \left(1 - \frac{S_{(i,j) \rightarrow (i',j')}}{\sum_{i,i'=1, j, j'=1, i \neq i', j=j'}^N S_{(i,j) \rightarrow (i',j')}}\right)}} \times R_{i,j,t}^{out}, \quad (5)$$

此时距离简化为 2 格点间距离, 即  $S_{(i,j) \rightarrow (i',j')} = \sqrt{(i-i')^2 + (j-j')^2}$ .

上式右边第 1 项表示迁出区人均收入与系统人均收入的差异. 二者间的差异越大, 说明高收入区域对低收入区域的拉力越强, 迁出者更倾向于迁入该区域. 将其归一化有  $\sum_{i=1, j=1}^N \frac{(P_{(i',j')}^{Aver} - P_t^{Aver})}{\sum_{i=1, j=1}^N (P_{(i',j')}^{Aver} - P_t^{Aver})} = 1$ . 为降低

迁移成本人们会更倾向于选择距离相对更近的迁入区进行迁移; 右边第 2 项表现为距离对迁入人口规模的影响, 并对其归一化处理. 考虑某迁出区到迁入区的距离占其到各迁入区的距离之和的比例, 将所有迁出人口完全分配到各迁入区. 当迁入、迁出区两者的距离越大, 即迁移成本越高, 迁往此地的人数越少; 相反, 二者的距离越小, 意味着迁移成本越低, 移民对该地的迁移倾向越强.

3) 当区域  $(i, j)$  的人均粮食产量  $0.85P_t^{Aver} < P_{(i,j,t)}^{Aver} < 1.13P_t^{Aver}$  时, 该区域的人均收入与系统人均收入相接近, 区域人口承载能力已处于饱和状态, 即

$$R_{(i,j,t+1)} = R_{(i,j,t)}. \quad (6)$$

综上, 式(1)~(6)为区域人口迁移预测模型. 在迁移过程中假设: 当迁出地或迁入地为零时, 各区域人口数不变; 当迁入地唯一时, 所有的迁出地人口迁入此迁入地; 当有多个迁入、迁出地时, 遵循上述的人口迁移模型.

## 2 模拟结果

模拟时, 取  $N = 40 \times 40$  的网格, 区域耕地面积  $C_{(i,j)}$  在 60 ~ 100 万亩波动; 各区域人口数  $R_{(i,j,t)}$  在 20 ~ 80 万人范围内; 各区域亩产量  $P_{(i,j,t)}$  在 150 ~ 500 kg 范围内波动, 可将各区域划分为迁出、迁入、不动区. 区域人口发生迁移时, 人口基数的变化会引起区域人均收入发生变化, 该变化会引发新的人口迁移. 在上述演化规则下, 迁移行为持续发生直到各区域人口基数不再发生变化, 此时, 迁移行为结束.

### 2.1 区域人口、人均粮食产量演化

模拟得到某迁出区人口及人均粮食产量随时步的变化趋势如图 1(a) 和 1(b) 所示. 图 1(a) 表明迁出区人口随时间呈递减趋势. 随着人口的减少, 该区域人均粮食产量上升, 如图 1(b) 所示. 由于每个区域总亩产量不发生波动, 人口减少, 自然会使得此区域表现出推力作用减小, 即区域人口迁移强度逐渐降低, 最终使得该区域人口不再发生迁移. 随时间演化, 人均粮食产量较之前有所提高, 此区域人口不再迁移, 转变为不动区, 表明此时人口数目不再发生变化, 人均亩产量也趋于平稳, 与图中曲线与  $x$  轴平行对应.

图 2(a) 和 2(b) 反映了某迁入区人口及人均粮食产量随时步的变化趋势. 起初该区域人均粮食产量较高, 对其他区域人口的拉力增强, 迁入区人口随时间呈递增趋势. 随着人口的增加, 该区域人均粮食产量下降, 致使区域逐渐由迁入区转变为不动区, 不再接纳其他迁出区的人口迁入, 最终区域人口不再发生变化, 区域人均粮食产量也趋于稳定, 二者曲线与  $x$  轴平行.

### 2.2 信息熵

熵的宏观意义是系统能量分布均匀性的一种量度, 可以表示物体所处状态是否稳定及系统的变化方向<sup>[13]</sup>. 迁移现象的发生会使区域人口规模发生变化, 而人口规模的变化对系统的信息熵有怎样的影响? 若  $t$

时期某区域人口数为  $R_{i,j,t}$ , 系统中  $N$  个区域的总人口数为  $\sum_{i,j=1}^N R_{(i,j,t)}$ , 则  $t$  时期各区域人口数占系统总人口数的比例为

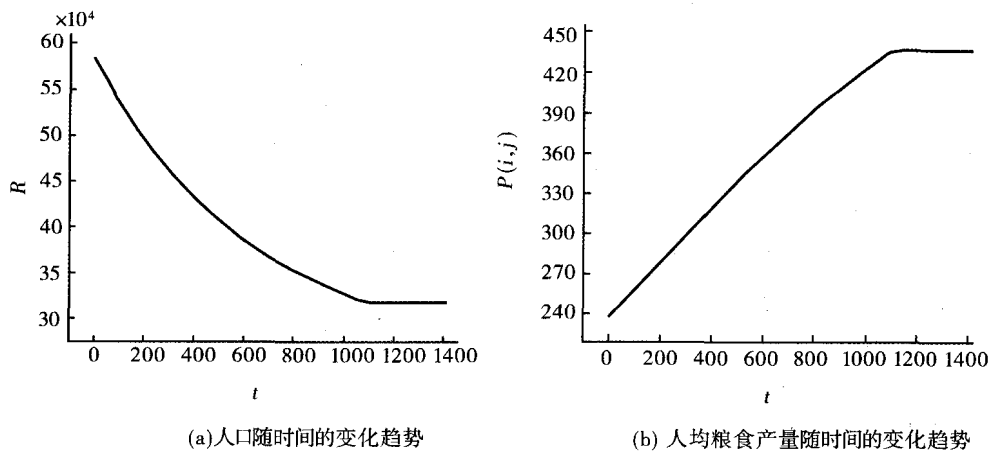


图1 迁出区人口及产量变化趋势

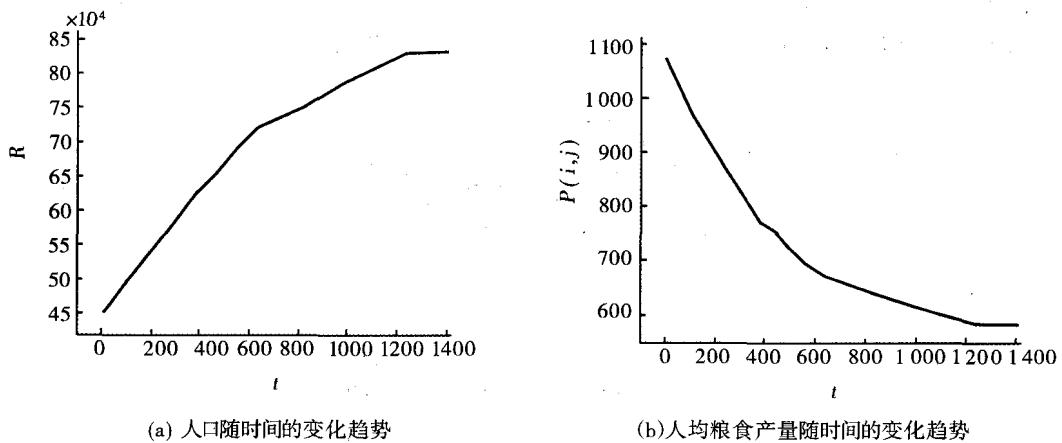


图2 迁入区人口及产量变化趋势

$$A_{(i,j;t)} = \frac{R_{(i,j;t)}}{\sum_{i,j=1}^N R_{(i,j;t)}}, \tag{7}$$

定义信息熵

$$H_t = - \sum_{i,j=1}^N A_{(i,j;t)} \ln A_{(i,j;t)}. \tag{8}$$

根据信息熵的定义,可以得到人口迁移过程中信息熵的变化趋势,如图 3 所示. 图 3 表明整个迁移过程中信息熵呈先增大后减小的趋势,峰值出现的时间为  $t=398$ . 起初各区域人口分布比较均匀,由于对外界区域的信息不完全清楚,各区域人口的迁移盲目性较强,熵值逐渐增加,系统从有序向无序发展,增到某一值时,熵值开始减小,系统从无序转向有序.

为了清楚解释人口迁移过程中各区域的人口空间分布对信息熵的影响,将人口规模划分成 3 个范围,用红色、绿色、蓝色点子分别表示人口规模大于 60 万、40 万~60 万及 40 万以下的区域(图 4). 人口迁移初期,如图 4(a),红、绿、蓝 3 个分布区域所占个数分别为 548,528,524,比例接近 1 : 1 : 1,人口分布较为均匀. 在迁出区所表现的推力作用下,迁出者为了更快缩小与其他区域的差距,选择盲目、频繁的迁往高收入区. 随着接纳迁入人口数的增多,原本高收入区的人均粮食产量降低;相反,低收入区由于部分人口迁出,人均粮食产量增多. 这就会导致一些低收入区和高收入区的人均粮食产量与系统人均粮食产量相接近,继而人们又会选择迁往收入相比更高的区域,造成人口的高密度和低密度区域减小,由图 4(b)和(c)可以看出,绿色中等人口规模区域增多,其中图 4(c)对应图 3 中信息熵的峰值,迁移行为表现出的混乱度最大,其红、绿、蓝人口分布区域个数分别为 353,900,347. 随后熵值开始减少,是由于多数人都集中在绿色区域,而每个区域的亩产量不变,势必会造成此区域人均粮食产量减少,因此后续的迁移过程中,人们由盲目转为理智,而原迁出区由

于人口迁出导致人均收入增多,即迁出区的推力作用减弱或转变为拉力作用,部分迁出者会选择迁回原迁出区,人口迁移过程逐渐变得有序,如图 4(d),绿色区域减少,红、蓝色区域增多,此时红、绿、蓝 3 个区域个数分别为 432,716,452,人口规模分布由无序转变为有序。

图 5 给出了不同时期人口迁出区到迁入区的指向结构图。图 5(a)为起初信息熵值较小时的连线图,由于人们盲目的迁移行为造成区域间的迁入、迁出比较频繁,中心节点个数较多,且分布也较为广泛,结构对称性较低。而随着迁移行为的进行,人们的行为开始由盲目向理智转变,就会出现一些中心节点较为突出,形成中间区域;如图 5(b)所示,此时对应图 3 中信息熵值较大的点,从图中可以看出图形对称性较高,此时熵值较大,系统混乱程度高。直到系统达到稳定时,迁移也趋于小范围,如图 5(c)可看到标号 16、1112 的区域为高收入区,图中区域选择向其迁移。此时绝大多数的区域平均亩产量与系统平均亩产量接近,系统混乱度降低,对称性降低。

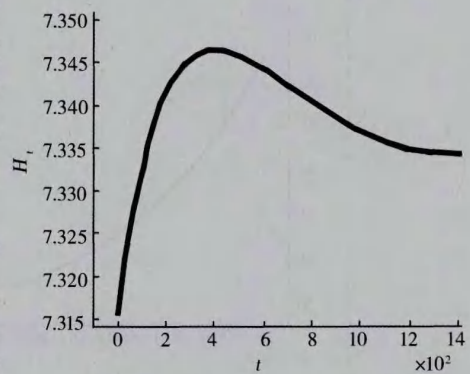


图3 信息熵随时间的演化趋势

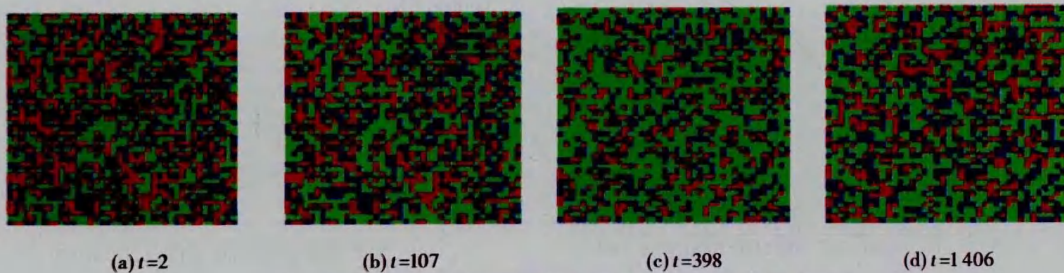


图4 不同时间下的人口规模斑图(■ >60万 ■ 40万~60万 ■ <40万)

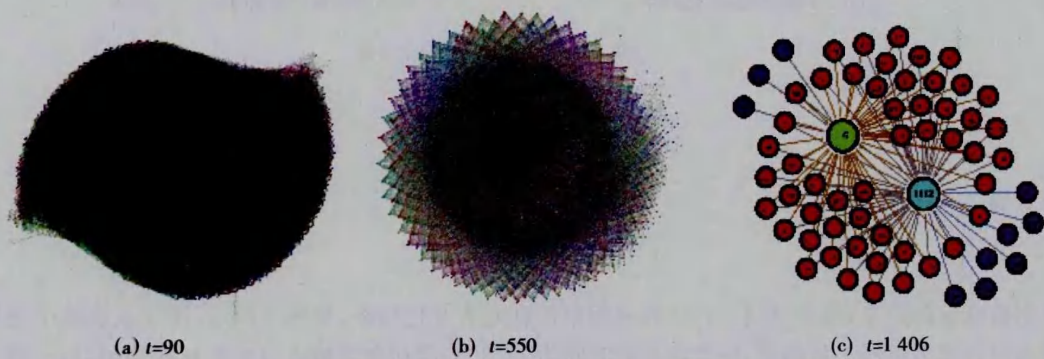


图5 不同时间下的人口迁出、迁入连线图

### 3 总 结

本文建立了自然因素制约下的农业人口迁移时空动力学方程. 不论人口的迁出还是迁入,模型主要考虑系统农业发展对人口迁移的影响. 用区域的粮食产量来表征其经济发展水平,根据各区域人均粮食产量与系统人均粮食产量的比较表征其区域经济差异,同时考虑迁出、迁入区之间的距离,以此将迁出人口合理分配到各迁入区. 通过对迁出、迁入区人口及人均粮食产量的模拟,可以看出人口过于密集或稀少,都会给经济发展造成巨大的压力和阻碍,因此通过人口迁移可以促进区域人口密度同经济水平相适应,资源和环境才能保持良性循环. 信息熵先增后减的变化过程表明,起初人们的迁移具有较高的盲目性,随后人们的决策更加理智,对应的迁移过程为从无序到有序,结构对称性增强后又减弱。

对自然因素影响下的人类行为决策进行研究,有助于认识人类群体迁移行为发生的特征和机制,本模型的演化结果及建立思想将为更好地理解人口迁移提供了一种新的参考.

### 参 考 文 献

- [1] Barabási A L. The origin of bursts and heavy tails in human dynamics [J]. *Nature*, 2005, 435(7039): 208-211.
- [2] Jiang Z Q, Chen W, Zhou W X. Scaling in the distribution of intertrade durations of Chinese stocks[J]. *Physica A*, 2008, 387(23): 5818-5825.
- [3] Gonçalves B, Ramasco J J. Human dynamics revealed through Web analytics[J]. *Physical Review E*, 2008, 78(2): 026123.
- [4] Jiang Z H, Zhang Y B, Wang H, et al. Understanding human dynamics in microblog posting activities[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2013, 2013: 02006.
- [5] Yang Z M, Zhou T. Epidemic spreading in weighted networks: an edge-based mean-field Solution[J]. *Physical Review E*, 2012, 85(5): 056106.
- [6] Yan X Y, Han X P, Zhou T, et al. Exact Solution of the Gyration Radius of an Individual's Trajectory for a Simplified Human Regular Mobility Model [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(12): 120506.
- [7] Lin Y T, Han X P, Wang B H. Dynamics of human innovative behaviors[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 394: 74-81.
- [8] Ravenstein E G. The Laws of Migration[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1889, 52(2): 241-301.
- [9] Everett S L. A theory of Migration[J]. *Demography*, 1966, 3(1): 47-57.
- [10] Todaro M P. A Model of Labour Migration and Urban Unemployment in Less Developed Countries[J]. *The American Economic Review*, 1969, 59(1): 138-148.
- [11] 王桂新. 我国省际人口迁出选择过程的年龄模式及其特征[J]. *人口研究*, 1994, 18(2): 9-17.
- [12] 王桂新. 中国区域经济发展水平及差异与人口迁移关系之研究[J]. *人口与经济*, 1997(1): 50-56.
- [13] 谭永忠, 吴次芳. 区域土地利用结构的信息熵分异规律研究[J]. *资源学报*, 2003, 18(1): 112-117.

## A Model of Resource-constrained Population Migration

SONG Jia, HAO Rui, WANG Xuming, HUO Jie

(School of Physics and Electrical Information Engineering; Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** The complexity of human behavior springs from the interaction within the system between the various components and the external influences. Human decision behavior constraints on resources and other natural factors is a new direction, which is few concerned with the study of human dynamics. In this paper, considering agricultural population migration can be ruled by resources, with pull and push theory, building a model which can be influenced by agricultural development level on a two-dimension grid. The trends of changes in population and food production per capita of different areas are discussed, and the changes of population distribution is analysed by using information entropy. The results showed that the development of the population should be suitable for the level of economic, resources can get to the development and utilization. Information entropy has the rule of first rose then descended, which means population migration has experienced a transition from disorder to order. By comparing the different time scale of population pattern, further shows the trend and characteristics of changes of population distribution.

**Keywords:** human migration; information entropy; food production per capita; dynamic model