

群体迁移行为的理论与实证研究

封晨洁 王鹏 王旭明

Theoretical and empirical studies on group behaviors

Feng Chen-Jie Wang Peng Wang Xu-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 030502 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.030502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.030502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 群体迁移行为的理论与实证研究\*

封晨洁<sup>1)</sup> 王鹏<sup>1)2)</sup> 王旭明<sup>1)3)†</sup>

1)(宁夏大学物理电气信息学院, 银川 750021)

2)(北方民族大学物理系, 银川 750021)

3)(宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 银川 750021)

(2014年1月2日收到; 2014年9月11日收到修改稿)

人类行为往往取决于经济社会的某种趋势性影响, 对其动力学的定量描述和准确理解是当前复杂系统研究的热点. 本文提出由迁移距离, 迁移人口年龄和迁出地经济人口密度所描述的群体迁移欲望函数, 及广义势. 借助于朗之万方程, 将其转变为Hamilton-Jacobi方程, 从而对群体决策行为进行统计理论分析. 采用高维最陡降线的方式求解Hamilton-Jacobi方程. 其解的形式揭示了群体迁移过程中信息熵随着迁移群体年龄的变化呈现一个单峰; 信息熵对迁移距离的二阶导随迁移距离而穿零变化(对应一种相变); 信息熵随着经济人口密度也呈现单峰. 进一步分析信息熵的这些变化规律所蕴含的意义及其机理, 从而获得对人类群体迁移行为的新理解, 为政府管理提供参考和启示.

**关键词:** Hamilton-Jacobi方程, 有效势, 群体迁移结构

**PACS:** 05.10.Gg, 89.70.Cf, 02.50.-r

**DOI:** 10.7498/aps.64.030502

## 1 引言

群体行为具有高度的复杂性. 研究群体行为规律, 对于经济学, 社会学, 管理学的研究和应用有着极为重要的参考价值. 近十年来, 人们在复杂系统研究领域取得了令人瞩目的成就. 复杂系统研究具有天然的综合性和交叉性, 它所涉及的问题遍及人们所关注的绝大多数领域, 包括物理学, 生物学等自然科学.

不论是个体还是群体, 人类行为的复杂性源于人类通过对自然现象的认识和分析从而做出最后判断和决策的复杂性和多样性. 但是, 复杂的人类行为又具有普适的规律性, 因此, 认识和理解人类自身行为的规律及其机理是科学界最有趣和最具挑战的命题之一, 尤其是在定量描述方面. 迄今, 已有一些成功的实证和模拟研究揭示了人类行为的统计规律及其动力学<sup>[1-4]</sup>.

对群体行为分析、模拟的关键是对群体行为演化过程的恰当描述. 目前, 描述群体行为的模型有Reynolds建立的局部boid模型, 描述自然界中群鸟的集体运动行为<sup>[5]</sup>; Vicsek等提出的多粒子群模型, 模拟发现导致产生群体行为的原因是粒子间的局部作用引起粒子群运动方向的对称性破缺<sup>[6]</sup>; Helbing建立的社会力模型, 用广义的社会力对个体运动进行描述, 清晰表现了欲速则不达, 双向流动人群小溪的自组织等特征<sup>[7]</sup>; Chenney建立的流模型用来描述群体疏散逃逸的社会现象<sup>[8]</sup>等. 虽然这些模型能够模拟群体行为的一些现象, 但更接近实际系统的结构非对称性, 时间延迟抑制互利共生生态系统中的种群数目<sup>[9]</sup>, 群体迁移导致的结构相变等方面的研究还比较少. 尝试从不同角度, 用不同方法揭示群体动力学以深刻理解人类行为是值得探究的重要命题.

本文拟采用Hamilton-Jacobi(H-J)动量方程来描述群体迁移导致其斑图或空间结构的形成

\* 国家自然科学基金(批准号: 11265011)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wang\_xm@126.com

过程. H-J 方程来源于最小作用原理与欧拉-拉格朗日方程, 是用路径积分描述系统粒子轨迹的一种方法, 用以研究临界动力学, 分子集聚, 蛋白质折叠等过程<sup>[10,11]</sup>. 本文从动力学的角度出发, 采用 H-J 优化方程对群体出行欲望进行研究, 从群体的迁移距离, 群体的迁移年龄 (迁移群体的平均年龄) 以及迁出地的人口经济密度几个方面, 揭示群体迁移过程的动力学机理及斑图结构的形成等.

## 2 群体迁移的随机动力学模型

人类迁移行为实质是受某种利益驱动, 根据得与失的判断而做出的决策和选择. 刻画和理解这种决策行为的理论方法主要是唯象的动力学模拟, 这种工作有可能抓住若干动力学因素的演化规则, 揭示统计规律背后的动力学机理<sup>[1-8]</sup>. 然而, 人类群体是一个复杂的开放系统. 这种系统的演化具有多变量驱动, 变量间复杂耦合, 互为因果以及开放性等特点, 因此, 准确刻画迁移机理往往很困难. 为此, 我们引入广义势, 用来描述群体的迁移欲望, 建立群体迁移的过程方程即 H-J 方程, 实质上是绕过了动力学建模时不可回避地要抓住决定迁移的主要因素以及建立演化规则, 从而将迁移的主要驱动因素及其耦合包含在势函数中. 广义耦合函数如广义流<sup>[12]</sup>, 广义势<sup>[13]</sup>的确能够在很大程度上克服无法周全考虑多个决定系统演化因素的困难.

这里考虑的主要因素包括群体迁移距离, 迁移群体的平均年龄和经济人口密度. 假设群体迁移距离以负指数幂方式依赖于群体迁移欲望<sup>[14-16]</sup> (群体最可能迁移的是距离自己最近且条件最好的地方. 相比较而言, 如果两个地方的基本生存条件一样, 那么就优先选择距离比较近的迁移地点). 群体中最活跃的是年轻力壮的青年, 最有可能迁移的正是这些创业欲望强烈的人群, 因此这样的人群具有最高的能量. 经济人口密度是指各种自然资源、经济资源与人口的比. 经济人口密度大的地区比较稳定, 具有相对比较低的势能; 而那些经济密度比较小的地区, 迁出的欲望比较强烈, 对应于不稳定的状态, 因此这些地区具有较高的势能. 通过对上述因素的分析, 我们建议群体出行欲望的广义势函数取如下形式:

$$U(r, a, \rho) = c_1 r^{-\alpha} + c_2 (a - a_0)^2 + c_3 \rho + c_{12} r^{-\alpha} (a - a_0)^2 + c_{13} r^{-\alpha} \rho$$

$$+ c_{23} \rho (a - a_0)^2, \quad (1)$$

这里  $U(r, a, \rho)$  代表迁移欲望的广义势;  $r$  代表群体迁移距离, 首项表示广义势以负幂形式依赖于迁移距离;  $a$  代表年龄,  $a_0$  代表最活跃群体的年龄, 即动力最大群体的年龄, 而偏离  $a_0$  较远的 (较小的指代小孩, 较大的指代老年人) 相对比较稳定;  $\rho$  代表群体的经济人口密度;  $c_1, c_2, c_3$  分别代表三因素对广义势的贡献因子. 这里只考虑广义势为负的情形 (整体是呈结构比较稳定的社会), 三贡献因子均为负. 式中  $c_{12}, c_{13}, c_{23}$  是耦合强度因子, 表示三因素间两两交叉耦合强弱的因子.

为了剖析群体决策导致的迁移行为, 引入随机演化动力学方程, 即 Langevin 方程<sup>[13]</sup>

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -2D \frac{\partial U}{\partial x} + \xi(t), \quad (2)$$

其中  $x$  是态矢量, 即  $x = (r, a, \rho)$ ,  $D$  是系统的扩散因子,  $\xi(t)$  是高斯白噪声, 是系统受到外界的随机驱动力, 这里一般指由地理因素、人文因素、政策因素等迫使人们执行的一些随机力. 随机力满足约束关系

$$\begin{aligned} \langle \xi(t) \rangle &= 0, \\ \langle \xi(t) \xi(t') \rangle &= 2D \delta(t - t'). \end{aligned} \quad (3)$$

对于上述态矢量随机演化方程, 可以将其转化成为概率跃迁的 Fokker-Planck 方程<sup>[10,11,13]</sup>, 即

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 2D \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial U}{\partial x} P \right) + D \frac{\partial^2}{\partial x^2} P. \quad (4)$$

方程满足边界 (初末时刻  $t_i$  和  $t_f$  的状态  $x_i$  和  $x_f$ ) 条件

$$\begin{aligned} x_i &= x(t_i), \\ x_f &= x(t_f). \end{aligned} \quad (5)$$

在此条件下, 对其做路径积分

$$\begin{aligned} &\int_{t_i}^{t_f} \frac{\partial P}{\partial t} dt \\ &= \int_{t_i}^{t_f} \left( 2D \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial U}{\partial x} P \right) + D \frac{\partial^2}{\partial x^2} P \right) dt. \end{aligned} \quad (6)$$

根据方程 (6) 及边界条件, 推导出系统随时间变化的条件跃迁概率

$$\begin{aligned} &P(x_f, t_f | x_i, t_i) \\ &= e^{-(U(x_f) - U(x_i))/2} \int_{x_i}^{x_f} e^{-S_{\text{eff}}[x]/D} dx(\tau). \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$S_{\text{eff}}[x] = \int_{t_i}^{t_f} \left( \left( \frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 / 2 + \frac{D^2}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 \right) dt$$

$$-D^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} dt. \quad (8)$$

将(8)式被积函数的后两项简记为

$$V_{\text{eff}}[x] = \frac{D^2}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 - D^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \quad (9)$$

并称之为有效势. (7)式的条件跃迁概率方程在有限的时间间隔内满足<sup>[13]</sup>

$$P(x, \tau | x, 0) = e^{-V_{\text{eff}}(x)\tau}. \quad (10)$$

因此, 对于较高的有效势点, 系统在Langevin扩散中处于高度的不稳定状态. 条件跃迁概率应满足归一化, 即有

$$\begin{aligned} 1 &= \int_{-\infty}^{+\infty} P(x_f, t_f | x_i, t_i) dx_f \\ &= e^{-U(x_i)/2} \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{x_i}^{x_f} e^{-\frac{U(x_f)}{2} - \frac{S_{\text{eff}}[x]}{D}} dx(\tau) dx_f. \end{aligned} \quad (11)$$

采用最陡降线积分原理, 可知其最可能的积分路径是方程(11)满足欧拉-拉格朗日方程的情形, 可以推导出有效拉格朗日  $L_{\text{eff}} = \frac{\dot{x}^2}{2} - V_{\text{eff}}$  满足的边界条件

$$\ddot{x} = 2 \frac{\partial V_{\text{eff}}}{\partial x}. \quad (12)$$

推导细节请参照文献<sup>[11, 17]</sup>.

### 3 H-J方程以及群体迁移的结构相变

#### 3.1 H-J方程

动力学方程的解代表相空间点随时间的演化. 经典力学第三种表述方案就是H-J理论, 其基本思想是将相空间点随时间演化看成相空间中动点  $x(t)$  与固定点  $x(t_i)$  之间的正则变换, 这里对应方程(8)积分上限变为任意时刻  $t$  的情形(不同  $t$  代表不同的演化轨道), 即为Hamilton主函数

$$S = \int_{t_i}^t L_{\text{eff}}(x_c, \dot{x}_c, t) dt. \quad (13)$$

它反映系统历经的各种可能轨道(状态)的统计信息, 具有熵的性质, 可做如下理解.

人类迁移系统可以类比于一个经典粒子系统, 满足 Boltzmann 分布, 即

$$P(x_f, t_f | x_i, t_i) = \frac{e^{-U(x_f)/k_B T}}{Z}, \quad (14)$$

$Z$  是系统的配分函数

$$\begin{aligned} Z &= \int e^{-\frac{U(x)}{k_B T} \theta} \\ &\quad \times (k_B T - (U(x) - U(x_c))) dx, \end{aligned} \quad (15)$$

其中  $T$  为与系统接触的热浴温度,  $x_c$  表示系统处于非平衡定态, 即有  $U'(x_c) = 0$ . 对势能作泰勒级数展开则有

$$\begin{aligned} Z &= \int e^{-\frac{U(x_c) + 1/2 U''(x_c)(x-x_c)^2}{k_B T} \theta} \\ &\quad \times \left( k_B T - \frac{1}{2} U''(x_c)(x-x_c)^2 \right) dx. \end{aligned} \quad (16)$$

利用信息熵  $S_{\text{inf}} = -\frac{\partial}{\partial T} k_B T \ln Z$ , 可以得到

$$S_{\text{inf}} \propto \ln L_{\text{eff}}. \quad (17)$$

由于本文关注的是非平衡定态, 能量取极值, 则有  $L_{\text{eff}} = \frac{1}{2k_B T} U''(x)$ . 此时, 信息熵  $S_{\text{inf}}$  取极值. 系统有序性越高, 这个极值越小. 假设系统演化趋向于有序性很高的定态,  $S_{\text{inf}}$  很小, 于是方程(17)可写为

$$L_{\text{eff}} \propto e^{S_{\text{inf}}} \sim S_{\text{inf}}. \quad (18)$$

这实际就是方程(13)的被积函数, 因此将函数  $S$  称为信息熵<sup>[10,11,17]</sup>. 对方程(13)的作用量变分得

$$S = \int_{t_i}^t \left( \frac{\delta L_{\text{eff}}}{\delta x} \delta x + \frac{\delta L_{\text{eff}}}{\delta \dot{x}} \delta \dot{x} \right) dt. \quad (19)$$

根据微分算子的性质便有

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} = L_{\text{eff}}, \quad (20)$$

以及

$$L_{\text{eff}} - \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} = -H. \quad (21)$$

将方程(20)代入方程(21)得到H-J方程

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -H \left( x, \frac{\partial S}{\partial x}, t \right). \quad (22)$$

利用最陡降线积分<sup>[18]</sup>, 将高维的H-J方程变换为

$$S = \int_{t_i}^t -\text{Tr}H \left( x_j, \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) d\tau, \quad (23)$$

其中  $\text{Tr}H$  是Hamilton函数  $H = \frac{1}{2} \dot{x}^2 + U$  的海森堡矩阵  $\left( \frac{\partial^2 H}{\partial x_i \partial x_j} \right)$  的迹, 因此方程(23)可变为

$$\begin{aligned} S &= - \int_{t_i}^t \left[ \alpha(\alpha+1)(c_1 + c_{12}(a-a_0)^2 + c_{13}\rho) \right. \\ &\quad \left. \times r^{-\alpha-2} + 2(c_2 + c_{12}r^{-\alpha} + c_{23}\rho) \right] dt. \end{aligned} \quad (24)$$

将上式联立方程 (12), 通过数值求解可得到信息熵. 具体做法是给出方程 (12) 的三分量形式并将方程 (24) 写成微分形式后联立, 即有

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} &= -\alpha(\alpha+1)\left(c_1+c_{12}(a-a_0)^2+c_{13}\rho\right) \\ &\quad \times r^{-\alpha-2}-2\left(c_2+c_{12}r^{-\alpha}+c_{23}\rho\right), \\ \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} &= -2D^2\alpha(\alpha+1)r^{-(\alpha+3)} \\ &\quad \times\left(c_1+c_{12}(a-a_0)^2+c_{13}\rho\right) \\ &\quad \times\left(\alpha r^{-\alpha}\left(c_1+c_{12}(a-a_0)^2+c_{13}\rho\right)\right. \\ &\quad \left.-\alpha-2\right), \\ \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} &= 8D^2(a-a_0)\left(c_2+c_{12}r^{-\alpha}+c_{23}\rho\right), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 2D^2\left(c_3+c_{13}r^{-\alpha}+c_{23}(a-a_0)^2\right). \end{aligned} \quad (25)$$

用四阶龙格-库塔法求解方程组, 结果由图 1, 图 2 给出. 信息熵是描写社会结构变化的特征量之一 [19,20], 跟踪信息熵可以把握迁移导致社会结构演化的动态过程. 通过大量数值调研, 在一定范围的参数组合下, 都能给出下文所讨论的结果.

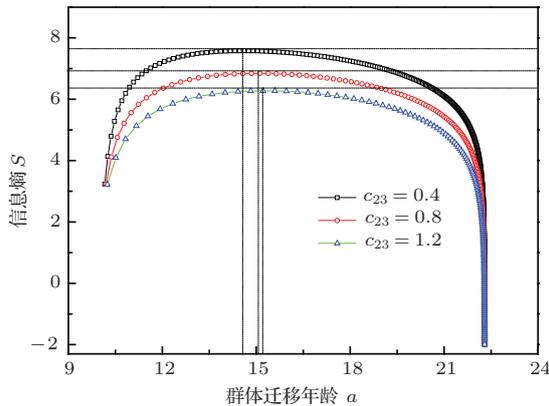


图 1 (网刊彩色) 在  $c_{12}=0.93, c_{13}=4.5 \times 10^{-3}$  的条件下,  $S$  与  $a$  之间的关系, 信息熵随  $c_{23}$  的增大而降低

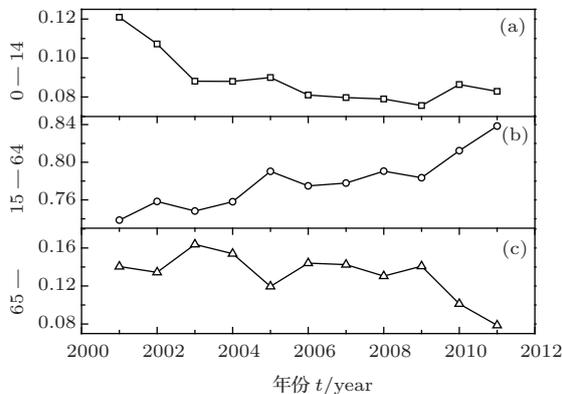


图 2 上海市人口结构时间演化分布图

本文选择其中一组:  $c_1 = -1.2 \times 10^2, c_2 = -2.0 \times 10^{-1}, c_3 = -8.3 \times 10^{-3}, a_0 = 22.3, \alpha = 9.58 \times 10^{-5}$ ; 变量组初值取为  $r = 0.17, a = 10.7, \rho = 1.07$ .

### 3.2 信息熵随迁移群体年龄的变化

图 1 显示, 系统信息熵随迁移群体年龄变化呈现一个单峰. 这可做如下理解: 在迁移群体年龄小于 14.5 岁的年龄段, 未成年人的迁移一般都随监护人, 不具独立决策行为, 其特征同监护人一样. 随着进入成年, 自主决策意愿增强; 随着进入大学, 自主选择的迁移得以实现; 此后的就业基本属于自主决策的迁移. 然而刚进入成年的人群迁移带有一定的盲目性. 盲目迁移将导致社会结构的无序化, 因此信息熵呈递增趋势. 跨过信息熵峰值, 意味着随年龄的增长, 个体社会阅历日渐丰富, 判断日趋理性, 选择更加合理, 流动更加有序, 因此信息熵呈递减趋势. 显然, 信息熵峰值点是随着迁移群体年龄增长群体结构从无序走向有序的转变点, 我们称之为相变点. 图像显示, 当群体迁移年龄和经济人口密度之间的耦合增强即  $c_{23}$  增大时信息熵曲线下移, 相变点右移. 前一变化意味着加强系统中迁移年龄和经济人口密度之间的耦合强度, 即加强了系统中群体的信息交流, 提高了个体的认知能力和判断能力, 做出盲目判断的可能性降低, 社会结构有序性增强; 后一变化说明尽管随所获知识的增多, 群体中每个成员都增强了社会认知能力, 出现前一变化, 但是当面对大量信息时, 年龄较大者因其具有较为丰富的社会阅历更容易做出理性判断和合理选择, 所以导致从无序到有序的相变点向年龄增大的方向偏移. 上海市的人口结构分布以及生产总值 [2] 的变化为此提供了实证.

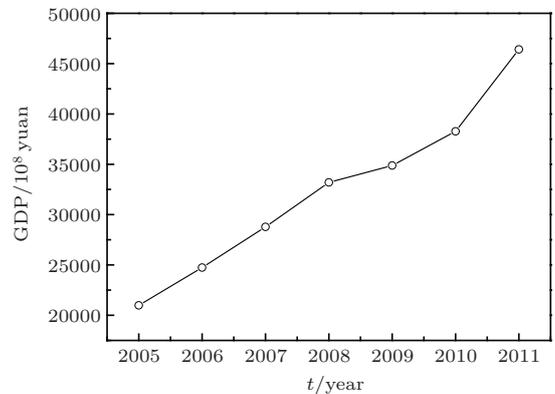


图 3 上海市总产值的发展趋势图

图2显示上海市的人口结构分布,其中(a)描述随着时间推移儿童(0—14岁)人数的比率逐渐下降,(c)中老年人口(65岁以上)的综合比例也逐渐下调,而(b)中活力大(劳动能力强)的人口比例逐渐提高,对应于图3所显示的上海市生产总值随着时间的推移逐渐增加,表明人口结构处于年轻化时,其活力比较高,能创造比较多的价值,能为社会的发展贡献更多的动力.当然,以上海为例可能不具有普适性,但它是不以能源为主城市的典型代表,可以帮助我们获得一些理解.

从以上结果看,群体决策行为的有效性主要体现在所拥有的信息量,这可能主要依赖于个体之间的不断交流.

### 3.3 信息熵与群体迁移距离及其所表征的相变

图4给出不同迁移距离与迁移群体年龄因素之间的耦合强度下,信息熵随迁移距离的变化关系.比较3种情况下的曲线变化趋势,不同点在于:图4(a)表明信息熵随群体的迁移距离沿凹型曲线递减,图4(b)显示信息熵近似线性递减,图4(c)表明信息熵呈凸型曲线递减;共同点在于:三种情形的信息熵随群体迁移距离的增大而减小,即  $dS/dr < 0$ . 这可理解为迁移距离越大,群体掌握的信息越多,其判断和选择就越合理,迁移就越有序.而不同点则体现了信息熵随群体迁移距离增大而减小的方式不同:图4(a)的  $d^2S/dr^2 > 0$ ,表明  $c_{12}$  较小时信息熵随迁移距增大而减小的幅度趋缓;图4(c)的  $d^2S/dr^2 < 0$ ,表明  $c_{12}$  较大时信息熵随迁移距离增大而减小的幅度趋紧;图4(b)对应  $d^2S/dr^2 = 0$  则是这两种情形的临界.显然,  $S-r$  图像的这种以直线为临界由凹转凸的变化可以看做是一种相变,体现了群体迁移距离与所掌握信息对系统影响方式的转变.一个很自然的问题是上述相变意味着什么?如前所述,耦合因子  $c_{12}$  代表迁移距离与年龄两因素耦合起来对广义势贡献的大小,而年龄的大小意味着所掌握信息的多寡.  $c_{12}$  较小时信息熵随迁移距离增大而减小的幅度趋缓的原因可以理解为当年龄的影响不大,亦即迁移群体所掌握的信息量较少时,随迁移距离的增大所拥有的信息量增加相对缓慢;  $c_{12}$  较大时信息熵随迁移距离增大而减小的幅度趋紧的原因可以理解为当年龄的影响变大,亦即迁移群体所掌握的信息量较多时,随迁移距离的增大所拥有的信息量增加相对

变快.

此相变过程存在一个特征关系,即迁移距离  $r$  与耦合强度因子  $c_{12}$  之间服从指数标度关系

$$r \propto \exp(-k |c_{12} - c_{120}|), \quad (26)$$

其中  $k = -0.103$ ,  $c_{120} = 0.2$  是相变临界点参数,  $|c_{12} - c_{120}|$  表示系统离临界状态的距离.表明群体迁移距离随系统参数离临界值的距离增大而指数衰减.

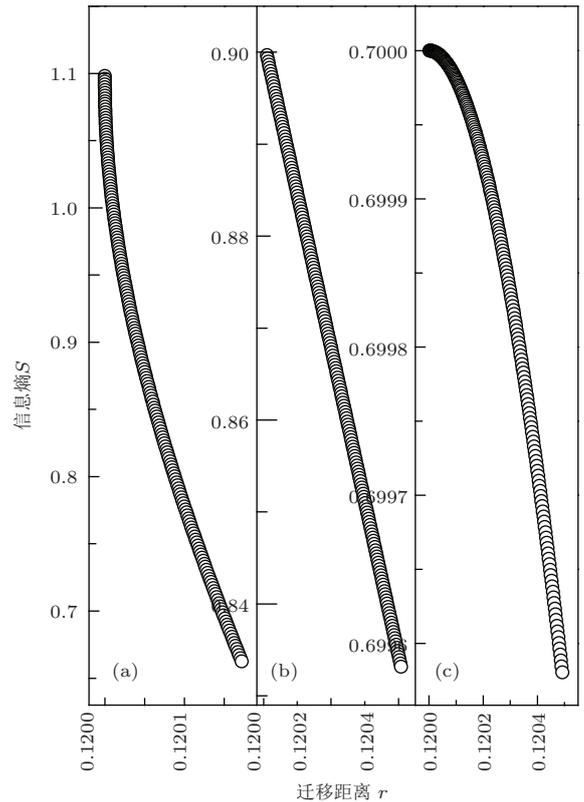


图4 在参数  $c_{13} = 4.5 \times 10^{-3}$ ,  $c_{23} = 2.0 \times 10^{-3}$  情况下,  $S$  和  $r$  的随着  $c_{12}$  耦合强度变化的图像 (a)  $c_{12} = 6.2 \times 10^{-2}$ ; (b)  $c_{12} = 1.8 \times 10^{-1}$ ; (c)  $c_{12} = 3.4 \times 10^{-1}$

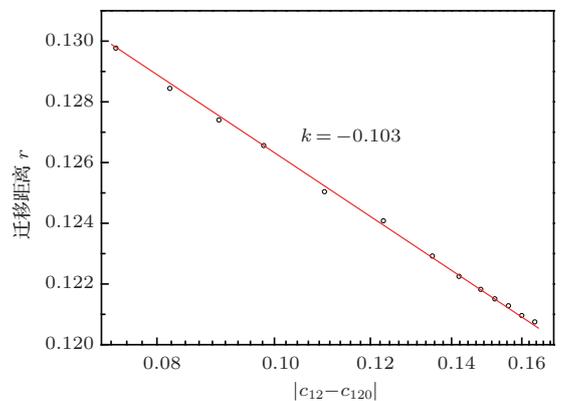


图5 在参数  $c_{13} = 4.5 \times 10^{-3}$ ,  $c_{23} = 2.0 \times 10^{-3}$  情况下, 迁移距离  $r$  与耦合强度因子  $c_{12}$  之间的标度关系

### 3.4 信息熵与经济人口密度

计算不同  $c_{13}$  取值, 即迁移距离与经济人口密度之间耦合强度不同时, 信息熵随经济人口密度的变化. 结果由图 6 给出, 图中显示, 系统信息熵随经济人口密度呈现一个单峰. 可以认为是在经济人口密度相对较低时, 受人均占有资源量的限制, 迁移的选择性有限, 理想的迁移愿望难以实现, 这样的迁移一定程度上会带来社会结构无序性的增加. 随着经济人口密度的增加, 迁移能力有所增强, 社会结构变化趋于活跃, 但仍受占有资源的限制, 依然难以实现理想的迁移, 信息熵增大. 当经济人口密度比较大时, 较高的资源占有量, 能够支持理想迁移愿望的实现, 所作的选择更加理性, 迁移导致社会结构的有序化, 因此信息熵单峰的存在是很自然的. 图像显示单峰位置会随着耦合强度因子  $c_{13}$  的增加而上升, 同时向右移. 如前所述, 耦合因子  $c_{13}$  代表迁移距离与经济人口密度两因素耦合起来对广义势贡献的大小.  $c_{13}$  越大, 广义势越高, 迁移越活跃. 在经济人口密度小的情况下, 所发生的迁移越无序, 信息熵的峰值越高, 实现由非理想迁移到理想迁移转变的阈值将增加, 单峰位置右移.

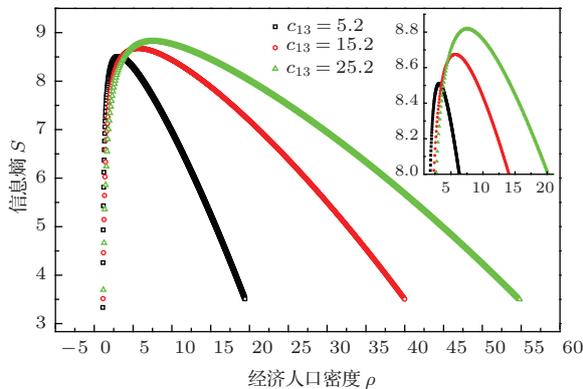


图 6 在参数  $c_{12} = 0.18$ ,  $c_{23} = 0.02$  情况下, 不同  $c_{13}$  下信息熵随经济人口密度的变化

## 4 结论与讨论

基于迁移人口年龄, 迁移距离和迁出地经济人口密度对迁移的影响, 建议用由这三因素表示的广义势描写迁移的活跃程度. 通过随机动力学将此模型转化为 Hamilton-Jacobi 方程. 方程的解揭示了: 1) 由迁移者年龄所决定的经验、知识等导致所做迁移选择的合理性差异, 系统信息熵随迁移群体年龄变化呈现一个单峰, 并以上海市的人口结构为例帮助我们理解这一结果. 2) 信息熵随迁移距离不断

下降, 说明社会结构在此过程中不断有序化过程, 意味着长程迁移是导致有序化的重要因素之一; 发现这个过程中存在由  $d^2S/dr^2$  取值穿零变化对应的社会结构有序化方式的相变; 此相变的特征标度关系由指数函数所描写的  $r$  与  $|c_{12} - c_{120}|$  之间的关系所表征. 3) 经济人口密度的高低, 决定了所做出的迁移是否为理想选择, 从而决定了信息熵随经济人口密度变化呈现一个单峰. 这给我们提供了一个重要启示: 有序化的迁移, 特别是那些经济人口密度低的贫困地区的迁移需要社会引导和扶持, 需要政府帮助其做理想迁移. 迁移的背后是一个浩大的政府工程.

### 参考文献

- [1] Barabasi A L 2005 *Nature* **435** 207
- [2] Li N N, Zhou T, Zhang N 2008 *Complex System and Complexity Science* **5**(2) 15 (in Chinese) [李楠楠, 周涛, 张宁 2008 复杂系统与复杂性科学 **5**(2) 15]
- [3] Fan C, Guo J L, Han X P, Wang B H 2011 *Complex System and Complexity Science* **8**(2) 1 (in Chinese) [樊超, 郭进利, 韩筱璞, 汪秉宏 2011 复杂系统与复杂性科学, **8**(2) 1]
- [4] Boyd R, Richerson P J 2009 *J. Theor. Biol.* **257** 331
- [5] Reynolds C 1987 *Comput. Graph.* **21** 25
- [6] Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, Cohen I, Shochet O 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1226
- [7] Helbing D, Farkas I, Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487
- [8] Sung M, Gleicher M, Chenney S 2004 *Eurographics* **23** 519
- [9] Nie L R, Mei D C 2007 *EPL* **79** 20005
- [10] Corradini O, Faccioli P, Orland H 2009 *Phys. Rev. E* **80** 061112
- [11] Faccioli P, Sega M, Pederiva F, Orland H 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 108101
- [12] Chai L H 2004 *Int. J. Therm. Sci.* **43** 1067
- [13] Haken H 1983 *Advanced Synergetics* (Berlin: Springer-Verlag) 42
- [14] Gong K, Tang M, Shang M S, Zhou T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 098901 (in Chinese) [龚凯, 唐明, 尚明生, 周涛 2012 物理学报 **61** 098901]
- [15] González M C, Hidalgo C A, Barabási A L 2008 *Nature* **453** 779
- [16] Brockmann D D, Hufnagel L, Geisel T 2006 *Nature* **439** 462
- [17] Sega M, Faccioli P, Pederiva F, Garberoglio G, Orland H 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 118102
- [18] Ovidiu C 2009 *Asymptotics and Borel summability* (Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press) pp33-88
- [19] Lin Z Q, Ye G X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 058201
- [20] Xu X L, Fu C H, Liu C P, He D R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 060501R
- [21] 中国统计年鉴 <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/> [2013-10-2]

# Theoretical and empirical studies on group behaviors\*

Feng Chen-Jie<sup>1)</sup> Wang Peng<sup>1)2)</sup> Wang Xu-Ming<sup>1)3)†</sup>

1) (*School of Physic and Electrical Information, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*)

2) (*Department of Physics, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China*)

3) (*Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Yinchuan 750021, China*)

( Received 2 January 2014; revised manuscript received 11 September 2014 )

## Abstract

Human behaviors are usually determined by some social and/or economic trend. In the past few years, many attempts have been made, in the field of complex scientific systems, to describe the dynamics of these behaviors quantitatively and have an accurate understanding of the corresponding mechanisms. In this paper, a generalized potential, that is, a migration desire function defined by the age of the migrating people, the migrating distance, and the so-called economic-population density of the emigration area, is proposed. It can be transformed into Hamilton-Jacobi equation by using a random dynamical method, Langevin equation, so that the decision-making behavior can be investigated, based on a statistic framework during a group migration process. By taking use of the multi-dimensional steepest descent method, the Hamilton-Jacobi equation is solved; the solution shows that the information entropy of the system varies, leading by a single peak, as the age of the migrating people increases. It also demonstrates that the second derivative of the migrating distance to the information entropy has a change of zero-crossing (which actually means a phase change). The third characteristic of the solution is that the information entropy follows another single peak as the economic-population density increases. A deeper analysis reveals the significance behind these findings and the corresponding mechanisms. So some new understandings of the group human behaviors can be obtained, and some worthy references can be provided for some related administrative offices.

**Keywords:** Hamilton-Jacobi equation, effective potential, group of migration structure

**PACS:** 05.10.Gg, 89.70.Cf, 02.50.-r

**DOI:** 10.7498/aps.64.030502

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11265011).

† Corresponding author. E-mail: [wang\\_xm@126.com](mailto:wang_xm@126.com)