城市经济与交通系统动力演化模型及仿真*

于海松，张殿业，沈　犁，张东旭
（西南交通大学 交通运输与物流学院，成都 610031）

摘　要：城市是具有自组织模式的大型耗散系统，经济和交通是其最重要的两个子系统，两者作为城市的动力系统，有明确的动力演化过程，在互动演化的进程中促进城市发展。在城市自组织模式的条件下加入政府干预的他组织因素，以系统稳定性发展为前提，构建经济与交通的互动演化模型，通过 MATLAB 软件编程模拟，实现在均衡动力、交通动力、经济动力三种模式下的演化进程仿真，以此探明两者之间的互动演化机制，对了解不同条件下的城市发展进程、预测未来城市发展走势有着重要的作用。

关键词：城市经济；交通；互动演化；微分方程；稳定性分析
中图分类号：U491　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2013)09-2622-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.016

Model and simulation on dynamic evolutionary between urban economy and transportation system

YU Hai-song, ZHANG Dian-ye, SHEN Li, ZHANG Dong-xu
(*School of Transportation & Logistics*, *Southwest Jiaotong University*, *Chengdu* 610031, *China*)

Abstract: City is a large dissipative system with the self-organizing model. Economy and traffic are the most important subsystems. As the engines of urban system, they both have a clear dynamic evolution process. The process of interactive evolution promotes the development of cities. Under the conditions of the urban self-organizing model, this paper added the government intervention as hetero-organization factors. At the same time ,this article introduced how to construct the economy and traffic mutual evolution model by presupposing the stable development of the system. Through the MATLAB software programming to realize the evolutionary process simulation under the balanced power, transport power and economic power, explored the evolution of the interaction between two mechanisms that played an important role in understanding the processes of urban development under the different conditions and forecasting the future trends of urban development.

Key words: urban economy; traffic; interactive evolution; differential equation; stability analysis

0　引言

自组织发展是复杂系统演化的自然法则，城市和经济发展都能够体现出自组织的本质[1]。交通系统作为城市巨系统的配套部分，其发展实质是对交通供需的演变过程[2]，在城市发展的每个阶段都能看到经济和交通互相协调地动态提升，说明交通系统与经济水平存在互动演化的协调机制。Jiang 等人[3]通过国内经济与铁路的发展情况探究经济与交通的互动关系；王新明等人[4]从循环经济角度揭示交通管理举措和经济发展的影响关系；刘海洲等人[5]通过实际的分析指出交通环境变化对区域经济产生的影响，经济发展也将刺激交通发展；冯旭杰等人[6]利用上海数据，通过协整理论研究了综合运输需求与产业结构之间的关系；刘奕等人[7]基于 logistic 模型、程祖德[8]运用协同学的观点，研究交通与经济协调演化的自组织作用机制；Krugman[9]构造了基于运输半径和人口经济的自组织演化模型；Straussfogel[10]利用 A-S 模型，从人口变化和土地承载等方面对自组织演化过程进行了数学模拟；程开明[11]通过研究指出城市系统内部作用是非线性形式，并建立系统演化的自组织模型；仲维庆等人[12]通过灰色关联度分析了黑龙江交通与经济的发展协调水平；窦小燕[13]根据新疆实际情况，提出经济与交通协同发展的手段。但是目前探究经济水平与交通能力的互动演化模型较少，为此本文分析了经济与交通的演化模式，试图揭示两者的互动演化进程。

1　互动演化机制

城市经济与交通系统是一对互为动力的演化整体，在城市经济高发展区域产生城市聚集效应，促使经济规模演变，交通的供给使经济区域得以持续发展，两者存在明确的动力演化关系，在不同的发展阶段也有着不同的演化机制。

1）经济动力机制　在城市发展的自组织意识中，经济发展为先，经济水平的提升引导区域空间的变革，聚集效应扩张，产生不断加大的交换量，即区域的交通需求加大。一定交通供给条件下，交通需求的突增造成区域交通能力短缺，交通能力的滞后制约经济水平进一步提高。在此过程中，经济能力远大于交通能力，经济提供系统演化动力。

2）交通动力机制　在城市建设高效且超前的发展情况

收稿日期：2013-01-11；**修回日期**：2013-02-25　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(51108390)

作者简介：于海松(1988-)，男，四川眉山人，博士研究生，主要研究方向为城市交通运输规划(y_hs52999@163.com)；张殿业(1958-)，男，教授，博导，博士，主要研究方向为城市交通规划、交通运输安全；沈犁(1986-)，男，四川成都人，博士研究生，主要研究方向为城市交通运输规划；张东旭(1988-)，男，山东成武人，硕士研究生，主要研究方向为城市交通运输规划.

下,交通基础设施建设发展程度高,交通供给能力远大于区域经济发展需求,交通为经济发展提供保障,城市自组织发展过程中,经济所受交通限制较小,发展速度快,交通提供系统的演化动力。

3)均衡动力机制　随着经济动力机制和交通动力机制的发展,系统演化关系逐渐发生变化。在经济动力模式下,随着政府介入性加强,交通基础设施投入加大,交通配合经济发展,能力快速提升;在交通动力模式下,经济保持较高速度发展,交通和经济差距缩小,回到协调波动发展阶段。两种动力演化机制都会在一定的土地承受条件下继续磨合,形成均衡动力发展模式。

2　互动演化模型

系统的互动演化模型既要反映出经济与交通发展的互动机制,又要反映系统自身发展的非线性特征。考虑政府对交通和经济的决策动作,并以土地地租为经济指标的代表,以描述系统的动力协调演化模式。假设:

a)无论外界条件如何,仅影响经济和交通的发展速度,发展程度不会倒退。

b)设政府交通和经济的总投入为 1,交通投入为 T,经济投入为 E,则有 $T+E=1$。

c)Logistic 模型已被广泛应用于自组织现象的分析,描述系统的自组织演化过程[7]。假设在自组织发展条件下交通能力与土地价值之间的差距符合 logistic 模型。

政府交通投入表示为

$$T_{(x,y)}=\mathrm{pre}+l-m(1-x)-n(1-y) \tag{1}$$

其中:pre 为政府固定的交通投入量;x 为交通能力与土地价值差距,最大差距为 1;y 为城市土地地租水平,最高水平为 1;m 为交通负外部性对交通发展的影响系数;l 为无约束条件下的交通自发展;n 为政府对经济的投入系数,在 0.3 ~ 0.6 之间;$n(1-y)$ 为地租期望影响的政府经济投入。

自组织条件下交通能力与土地价值之间的发展差距满足 logistic 模型,表示为 $sx(1-x)$。

考虑政府交通投入下的交通能力与土地价值之间的差距为

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=sx(1-x)-k_1T_{(x,y)}xy \tag{2}$$

其中:s 为自组织发展系数,k_1 为交通投入影响系数。

地租增长与政府交通投入量的关系为

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=wy-k_2T_{(x,y)}y \tag{3}$$

其中:w 为自组织条件下的地租增长系数,k_2 为经济投入的影响系数。

由式(1)~(3)可得

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=sx(1-x)-k_1(\mathrm{pre}+l-m-n)xy-k_1mx^2y-k_1nxy^2\\ \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=y[w-k_2(\mathrm{pre}+l-m-n)]-k_2ny^2-k_2mxy\end{cases} \tag{4}$$

简化得

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=sx(1-x)-Bxy-Fx^2y-Gxy^2\\ \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=yK-Hy^2-Jxy\end{cases} \tag{5}$$

3　模型稳定性分析

为研究模型在 $t\to\infty$ 时的 x、y 演变规律,对微分方程组式(5)进行稳定性分析。

令 $\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=0$、$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=0$,有

$$\begin{cases}sx(1-x)-Bxy-Fx^2y-Gxy^2=0\\ yK-Hy^2-Jxy=0\end{cases} \tag{6}$$

利用 Mathematica7.0 软件[14]分析方程组式(6),得四组平衡点 $D_1(0,0)$、$D_2(1,0)$、$D_3(0,K/H)$、$D_4(x_i,y_i)$,仅当 $0<(x,y)<1$ 时,模型才具有实际意义。将不同平衡点的方程组进行泰勒展开,取展开式的一次项,得到方程组的线性化近似方程系数矩阵[15],判断稳定性如表 1 所示。

表 1　模型平衡点与稳定性

平衡点	特征方程系数矩阵	稳定性及稳定条件	现实解释意义
$D_1(0,0)$	$\begin{bmatrix}s & 0\\ 0 & K\end{bmatrix}$	不稳定	无解释意义(经济、交通均不存在)
$_2(1,0)$	$\begin{bmatrix}s & 0\\ 0 & K-J\end{bmatrix}$	当 $K-J<0$,为系统的稳定平衡点;当 $K-J>0$ 时,则不稳定	无解释意义(经济不存在)
$D_3(0,K/H)$	$\begin{bmatrix}s-\frac{BK}{H}-\frac{GK^2}{H^2} & 0\\ 0 & -K\end{bmatrix}$	当 $s-\frac{BK}{H}-\frac{GK^2}{H^2}<0,K>0$ 时,为系统的稳定平衡点	基本无解释意义(经济交通完全无差别)
$D_4(x_i,y_i)$	$\begin{bmatrix}A_1 & B_1\\ A_2 & B_2\end{bmatrix}$	$A_1+B_2<0,A_1B_2-B_2A_2>0,D_4(x_i,y_i)$ 为系统的稳定平衡点	有一定解释意义(经济与交通能够磨合)

表 1 中:

$$A_1=s-2sx_i-k_1y_i(\mathrm{pre}+l+m(x_i-1)+n(y_i-1)+mx_i),A_2=-k_2my_i$$

$$B_1=-k_1x_i(\mathrm{pre}+l+m(x_i-1)+n(y_i-1)+ny_i)$$

$$B_2=w-k_2(\mathrm{pre}+l+m(x_i-1)+n(y_i-1)+ny_i)$$

$$x_i=\frac{K}{J}-\frac{FKH+sH^2-BHJ\pm H\sqrt{4s(K-J)(FH-GJ)+(sH-FK-BJ)^2}}{2J(FH-GJ)}$$

$$y_i=\frac{FK-sH-BJ\pm\sqrt{4s(K-J)(FH-GJ)+(sH-FK-BJ)^2}}{2(FH-cJ)}$$

4　数值模拟

利用 MATLAB 软件模拟[16]不同情况下的区域经济和交通系统动力发展过程,依据第 3 章分析,四处平衡点仅有平衡点 $D_4(x_i,y_i)$ 符合社会发展实际,依据 D_4 的全局稳定要求,模拟不同发展动力模式和不同政府经济扶持情况下的演化过程,并依据仿真验证模型发展稳定性。对参数赋值:$s=0.05$,$k_1=0.9$,$\mathrm{pre}+l=0.4$,$m=0.38$,$k_2=1.5$,$w=0.06$,迭代次数 t 取为 10 000。

a)固定政府对经济的扶持(n),模拟不同初始情况下(x_0,y_0)的系统演变过程。

x_0 越大,交通与经济的初始差距越大,y_0 越大,经济的初始水平越高,$0<(x_0,y_0)<1$,依据(x_0,y_0)的取值,将系统演化模式分为均衡动力、经济动力、交通动力三种,如表 2 所示。

表 2　不同动力模式下的初始值参数

参数	交通动力模式	经济动力模式	均衡动力模式
x_0	0.8	0.7	0.2
y_0	0.3	0.8	0.8

注:经济扶持系数 $n=0.45$

模型参数稳定性仿真结果(图 1)验证了平衡点 D_4 满足全局稳定。交通动力模式下(图 2),交通建设远大于经济需求,经济发展基本不受制约,发展阶段经过简单磨合就能够形成较稳定的发展前景,在经济有极大发展潜力的条件下,城市经济能够有较快的发展速度,这种方式需要政府提前给予足够的交通供给。

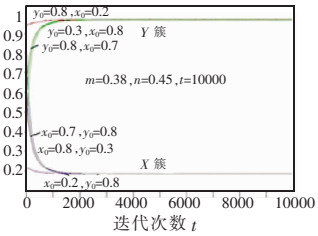

图 1　参数标定稳定性验证

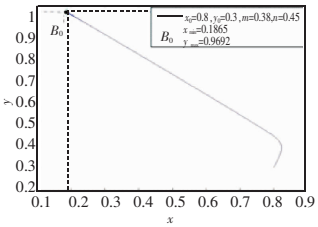

图 2　交通动力模式下的系统发展演变过程

经济动力模式下(图 3),交通追随经济,经济作为系统动力。一定时期内,经济受到落后的交通能力制约,造成下降趋势,同时系统的自组织规则促进交通快速发展,该段转型期间,经济发展受阻,而交通发展加快,两者差距缩小。进入转点 A_1 后交通基本能够满足经济需求,系统匹配度提高,两者的互动演化机制促进系统有序稳定化发展。

均衡动力模式下(图 4),经济发展和交通系统差距较小,城市自组织发展需求较高,在一定时期内,经济提升速度高于交通发展速度,两者差距加大。到达一定程度后,城市他组织干预发挥作用,交通系统发展以缩小两者差距,经过转点 A_2 后进入波动且稳定发展阶段。

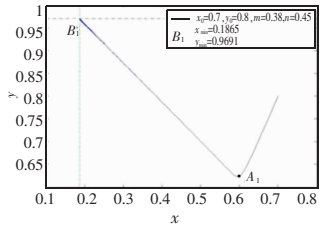

图 3　经济动力模式下的系统发展演变过程

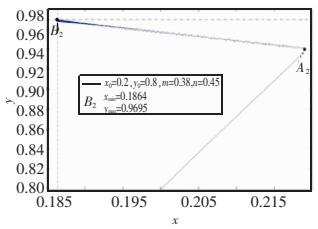

图 4　均衡动力模式下的系统发展演变过程

b)固定的系统发展初始条件(x_0,y_0),模拟不同的政府经济扶持(n)影响条件下的系统演变。n 越大表示政府对经济发展投入越大。表 3 为不同政府扶持方案下的参数取值。

表 3　不同政府扶持方案下的参数取值

参数	低扶持方案	中扶持方案	高扶持方案
n	0.38	0.45	0.56

注:此处仅对均衡动力模式下,政府经济扶持对系统的影响进行仿真研究,x_0 取 0.3,y_0 取 0.8。经济和交通动力模式与均衡模式类似,不再赘述

图 5 表示拟定的模型参数能够满足系统的全局稳定要求。图 6 的仿真结果表征了政府经济扶持力度越大,最终经济与交通互动稳定程度越高。

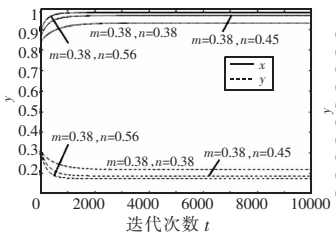

图 5　参数标定稳定性验证

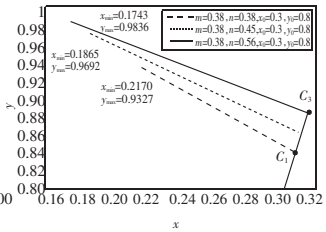

图 6　不同政府经济扶持条件下的系统演变过程

由图 6 可知,低扶持方案条件下,经济带动性不强,交通对经济发展的反应速度较快,系统发展转点 C_1 提前,在经济动力不强的情况下,较早进入协调发展过程,稳定程度不高(x_{min} = 0.2170,y_{max} = 0.9327)。

高扶持方案条件下,经济带动性增强,经济发展至一定程度时,交通产生反应,追随经济增长,至发展转点 C_3 处,两者基本实现协调发展过程,在较好的经济基础上,达到较高程度的稳定状态(x_{min} = 0.1743,y_{max} = 0.9836)。

5　结束语

经济发展和交通提升具有相互影响的互动演化模式,通过经济和交通的阶段性相互带动效果,引导城市互补式发展。城市发展的影响因素极多,经济是城市发展的关键配置,受交通影响最为强烈,本文考虑经济和交通作为城市演化动力,虽不全面但也有切实意义。在经济和交通的自组织模式下,本文考虑了政府决策的他组织影响,建立互动演化模型,通过软件进行仿真,模拟了不同的动力模式和政府经济投入条件下的系统演化过程。在城市的自组织发展过程中,经济始终在首位,提供发展动力,交通为满足经济需求而发展,当交通能力远高于经济需求时,交通能够为经济发展提供有效动力。

参考文献:

[1] 袁晓勤. 城市系统的自组织理论研究[D]. 长春:东北师范大学,2006:13-24.

[2] 姜克锦,张殿业,刘帆浚. 城市道路交通系统供需协同演化模型与实证研究[J]. 人类工效学,2008,14(4):29-32.

[3] JIANG Chao-nan,KONG Wei-yi,LIU Yuan-chu. Analysis of the relationship between transportation and the development of social economy [C]//Proc of the 11th National Annual Symposium on Industrial Technology of Economic Management Institutions. 2012:38-41.

[4] 王新明,李杨,孙敏,等. 基于循环经济的现代交通管理理论研究[J]. 中国西部科技,2011,10(25):47-49.

[5] 刘海洲,周涛,程礼芬. 交通环境变化下的交通与经济互动性分析[J]. 交通科技与经济,2008,10(3):92-96.

[6] 冯旭杰,孙全欣,钱堃,等. 区域综合交通运输需求与产业结构的协整关系分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2012,12(6):10-16.

[7] 刘奕,贾元华,税常峰. 区域运输结构的自组织演化机制研究——基于 logistic 模型的分析[J]. 技术经济与管理研究,2011(9):3-6.

[8] 程祖德. 论交通系统与经济系统发展的协同性[J]. 上海海运学院学报,1996,17(2):1-5.

[9] KRUGMAN P R. Self-organizing economy[M]. [S. l.]: Blackwell Publisher,1996.

[10] STRAUSSFOGEL D. Modeling suburbanization as an evolution system dynamic[J]. Geographical Analysis,1991,23(1):1-23.

[11] 程开明. 城市系统自组织演化机制与模型探析[J]. 现代城市研究,2007,22(12):54-60.

[12] 仲维庆,杨赞. 区域交通与区域经济灰色关联度分析[J]. 区域经济,2012(29):195-196.

[13] 窦小燕. 实现交通与经济协调发展分析研究[J]. 黑龙江交通科技,2012(10):159-161.

[14] 陈誌敏. 微分方程的 Mathematica 解法与可视化[J]. 天津职业院校联合学报,2007,9(5):80-83.

[15] 姜启源,谢余星,叶俊. 数学模型[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2003: 177-201.

[16] 刘志俭. MATLAB 应用程序接口用户指南——MATLAB 语言应用系列书[M]. 北京:科学出版社,2000:5-40.