

文章编号:1006-2467(2015)04-0450-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2015.04.007

经济分布形态下的地区交通投资结构优化

于海松, 蒲云, 刘海旭, 王周全

(西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031)

摘要: 为了对地区交通投资结构进行有效决策, 基于交通基础设施产生的地区自身经济增长和地区间经济诱增, 以地区交通投资的经济效益最大化为目标, 以经济分布形态的协调进化为约束, 构建交通基础设施的地区投资结构优化模型. 该模型结合柯布道格拉斯生产函数、引力场理论和 Zipf 法则, 采用启发式算法对成都市统计数据进行了仿真计算. 结果表明, 该模型可有效分析不同的地区交通投资结构对经济效益和经济形态的影响, 提出政府对经济分布形态的干预强度是地区交通投资结构优化的关键, 对交通基础设施的地区投资分配决策具有参考价值.

关键词: 交通运输经济; 交通基础设施; 分布形态; 投资结构; Cobb-Douglas 生产函数

中图分类号: U 491 **文献标志码:** A

Regional Transportation Investment Structure Optimization Under Economic Distribution Pattern

YU Hai-song, PU Yun, LIU Hai-xu, WANG Zhou-quan

(School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To make effective decisions on regional transportation investment structure, considering self-regional and inter-regional induced economic growth that transportation infrastructure generated, a regional transport infrastructure investment structure optimization model was built, by defining maximum economic benefits of regional investment as objective function, coordination evolution of economic distribution pattern as constraints. The model combined Cobb-Douglas production function, Gravitation field theory and Zipf law, using heuristic algorithm to simulate Chengdu statistics. The results indicate that the model is valid for analyzing the influence of regional transportation investment structure on economic efficiency and distribution pattern. It is proposed that the key to the regional transportation investment structure optimization is the intervention intensity of the government on economic distribution pattern. The conclusion can provide strategic reference for decision making on regional transportation investment structure.

Key words: transportation economy; traffic infrastructure; distribution pattern; investment structure; Cobb-Douglas production function

交通基础设施建设使得经济资源能够有效聚集, 并改善地区经济发展的大环境, 同时经济规模发

展也对交通基础设施的建设提出了新的需求, 两者存在互动协调的发展模式^[1]. 目前, 已有的经济规模

收稿日期: 2014-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278429)

作者简介: 于海松(1988-), 男, 四川省眉山市人, 博士生, 主要研究方向为城市交通运输规划, E-mail: y_hs52999@163.com.

蒲云(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 028-87600165; E-mail: ypu@home.swjtu.edu.cn.

分布与交通基础设施关系的研究主要分成 2 类:① 基于经济模型,使得交通基础设施建设带来最大化的经济效益;② 基于地区经济的公平性,以地区发展的均衡为模型目标.前者的研究在经济函数模型的基础上取得了较大的进展,如王利彬等^[2]改进传统投入-产出法,提出了交通运输投资对经济拉动作用的计算模型;Morisugi^[3]应用费用-效益模型,评价交通基础设施建设是否取得最大化的效益;孙莹莹等^[4]运用生产函数理论,结合交通基础设施网络指标和经济发展水平,建立了交通基础设施和城市规模的关系模型.后者的研究在近年来随着城乡一体化需求而不断增多,如马辉等^[5]改进节点重要度模型,从交通资源分配的公平性、公路网布局结构的均衡性出发,提出了基于公平性的干线路网布局模型;Litman^[6]提出了横向和纵向的公平性要求,且在纵向公平性中提出,交通要给予低收入地区更多的补偿;杨朗等^[7]基于 wilson 熵分布建立了道路项目投资地区公平性的评价模型;Caminal^[8]探讨了城市规划管理者如何在均衡条件下对不同地区分配基础设施的问题.随着这 2 种研究的不断完善,将两者结合的研究也逐渐受到关注.例如:王选仓等^[9]基于城市人口、经济规模增长对路网的需求,建立了公路网总量规模的函数模型;孙强等^[10]利用宏观经济增长理论和信息熵理论建立了多阶段交通基础设施投资的地区结构优化模型,但是基于均衡的思路将引导城市形态向均质化发展,致使模型结果偏重于低发展地区;梁国华等^[11]提出公路网均衡发展不是削峰填谷,而是造峰扬谷,对均衡提出了新的要求.

合理的交通地区投资结构既应保证经济效益最优,又应引导经济分布的形态向合理方向进化,如何把握地区投资分配比例的度,成为了能否促进地区协调发展的关键.本文基于已有的研究基础,利用 Zipf 法则分析地区经济分布形态,考虑交通基础设施产生的地区自身经济增长和地区间的经济诱增,以全地区经济发展水平最大化为目标,以经济分布形态的协调演化方向为约束,提出一种基于经济分布形态的交通基础设施地区投资结构优化模型,为交通投资分配提供战略性的决策依据.

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

组团是城市中经济、人口聚集形成的空间上相对分离的城市团块.本文为了使得研究更具实际意义,将文中的组团用行政区划的概念代替;交通基础设施从地域角度,分为组团间交通基础设施和组团

内交通基础设施,组团间交通基础设施能够对经济增长产生诱导作用,由地区管理者决策建设,在确定地区投资结构之前,已确定了建设及投资方案;组团内的交通基础设施主要服务于组团内部交通流动,完善的内部交通能够促进经济增长,组团、组团间交通基础设施、组团内交通基础设施三者之间的空间关系如图 1 所示.地区的管理者对各组团的交通基础设施建设进行资金补助,用于提升组团内的交通条件.假设某地区共有 $n(i \in n)$ 和 m 个组团 ($j \in m$) 间交通基础设施项目,地区管理者拟补助的交通投资总量为 M ,对第 i 个组团的交通基础设施投入占该地区交通总投入的比例为 $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,交通基础设施投入组团后,经济规模将发生变动,组团经济的变动造成地区经济规模的分布形态发生改变,合理的投资结构既要满足各组团经济 (E_i) 之和最大,又要使得地区经济分布形态较投资之前更为优化.

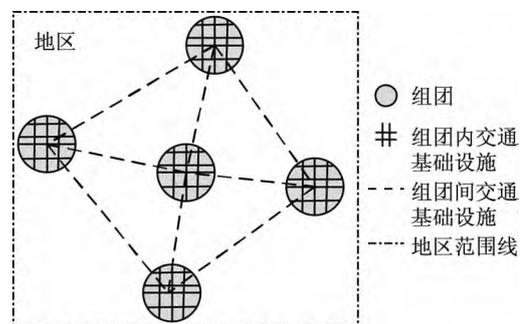


图 1 地区组团结构示意图

Fig. 1 Diagram of regional group structure

1.2 假设及约束条件

约束条件的建立基于以下假设:

(1) 地区管理者将交通投资预算全部用于交通建设,不存在资金结余,即各组团的投入比例之和等于 100%.

(2) 地区管理者考虑一定的均衡原则,不会出现过多的组团发生最低限的投资,若最低限投资为 1%,则这种投资比例为 1%的组团数量约束为 Ω .

(3) 地区管理者能够认识经济的分布形态,了解城市经济的协调演化方向. Zipf 法则对分析城市规模的分布形态具有良好效果,该法则在形态研究上与分形理论有着内在联系,能够有效地解释复杂系统部分与整体之间的自相似特性^[12-13],按照 Zipf 法则原理,各组团经济规模分布存在 Pareto 的对数变换式:

$$\ln E_r = \ln E_1 - q \ln r \quad (1)$$

式中: E_1 为第 1 位城市的经济规模,即区域经济的

最高水平; E_r 为第 r 位城市的经济水平, r 为城市经济规模位次; q 为 Zipf 分布指数, 当 $q > 1$ 时且较大, 反映城市经济规模分布差异较大, 第 r 位城市与首位城市具有较大差距; 当 $q < 1$ 时且较小, 经济反映规模分布较为均衡, 第 r 位城市与首位城市差距较小. 政府的最佳投资方向应使得 Zipf 指数向 1 方向靠近, 假定初始形态为 q_0 , 则考虑城市演化的阶段性和承载力, 拟定分布形态的进化步长为 ζ .

1.3 目标函数

模型以地区交通投资结构对经济产生的效益最优为目标, 并考虑交通基础设施组团促进和区域诱导两方面特征. 组团促进包括组团内交通基础设施和组团外交通基础设施对组团自身经济的促进能力; 区域诱导用交通基础设施对区域经济的诱导力表示, 模型构建思路如图 2 所示.

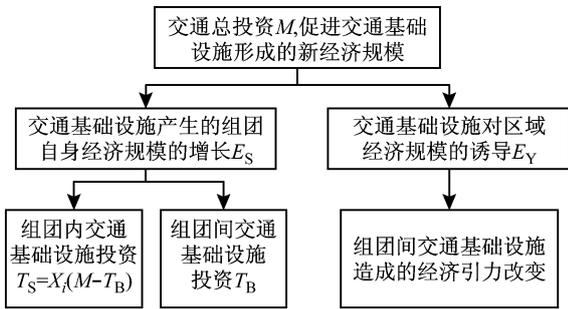


图 2 模型构造思路

Fig. 2 Concept of model construction

(1) i 组团拥有的组团间交通基础设施投资量

$$T_{Bi}(l, k) = l_{i,j}(s_j\mu_i + \eta_j)k_j^i \quad (2)$$

$$s_j = 1.5\omega_j \quad (3)$$

式中: $l_{i,j}$ 为 j 项目在 i 组团的长度; η_j 为 j 项目的单位长度建设成本; s_j 为 j 项目每公里占地面积, 为便于与实际应用结合, 式(3)将面积换算为亩; μ_i 为 i 组团的单位土地成本(亿元/亩); j 项目的征地宽度为 ω_j ; j 项目经过 i 组团则 $k_j^i = 1$, 否则为 0. 则式(2)表示项目的建设土地费用总和.

(2) i 组团拥有的组团内交通基础设施投资量

$$T_{Si}(x_i, T_{Bi}) = x_i(M - \sum_{i=1}^n T_{Bi}) \quad (4)$$

(3) 交通基础设施投资造成的组团自身经济增长. Cobb-Douglas(C-D)是研究经济与能源、交通关系的有效工具^[9,14]. 定义: Y 为地区生产总值; T 为地区基础设施投资总量; P 为地区社会总消费; A 为地区基础设施影响因子; c 为社会消费、社会劳动力、社会基建的关系系数; α, β 为基础设施投资和社会消费的产出弹性, 得出传统 C-D 模型的变换式:

$$Y = AT^\alpha P^\beta c \quad (5)$$

变换式(5), 引入交通基础设施投资对社会消费的影响系数 λ , 假定组团 i 的初始经济规模为 E_i^0 , 则交通基础设施投入后所产生的组团经济规模可表示为

$$E_{Si}(T_{Bi}, T_{Si}) = E_i^0 \frac{(T_i + T_{Bi} + T_{Si})^{\alpha_i} [P_i + \lambda_i(T_{Bi} + T_{Si})]^{\beta_i}}{T_i^{\alpha_i} P_i^{\beta_i}} \quad (6)$$

(4) 组团间交通基础设施投资造成的组团经济诱增. 组团间的经济诱增程度用地区引力增加值表示, 用最短通行时间替换空间概念, 并认为该作用力的本质在于每个组团的中心都存在一个类似万有引力势能场的引力势能场, 假定 $d_{i,s}$ 和 $v_{i,s}$ 分别为 (i, s) 组团间的最短通道长度和最短通道的出行速度, 地区经济引力变化带来的地区经济诱增系数为 π , 定义势能场的经济牵引系数为 φ , 在 j 项目建成后 $d_{i,s}$ 和 $v_{i,s}$ 分别变为 $d'_{i,s}$ 和 $v'_{i,s}$, θ 为参数, 则有 j 项目给 i 组团带来的经济诱增为

$$E_{Yij}(E_{Si}, v, d) = \pi E_{Si} \varphi \left(\frac{v'_{i,s} d'_{i,s}}{v_{i,s} d_{i,s}} \right)^\theta k_j^{i,s} \quad (7)$$

式中, $i, s \in n$. 若 j 项目能够缩短 (i, s) 组团间的出行时间, 则 $k_j^{i,s} = 1$, 否则为 0

(5) 目标函数. 为使得交通基础设施投资的分配比例对地区经济促进度最大, 结合交通基础设施产生的组团自身经济和组团间的诱增经济, 考虑地区经济分布形态约束, 定义 E'_i 为交通投资后组团 i 形成的新经济规模. 结合式(1)~(7)建立如下目标函数:

$$\begin{aligned} \max F = \max \sum_{i=1}^n E'_i &= E_{Si} + E_{Yij} = \\ &\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{E_i^0}{T_i^{\alpha_i} P_i^{\beta_i}} \left\{ T_i + l_{i,j}(s_j\mu_i + \eta_j)k_j^i + \right. \\ &x_i \left[M - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{i,j}(s_j\mu_i + \eta_j)k_j^i \right]^{\alpha_i} \cdot \\ &\left. \left\{ P_i + \lambda_i \left[l_{i,j}(s_j\mu_i + \eta_j)k_j^i + x_i M - \right. \right. \right. \\ &x_i \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{i,j}(s_j\mu_i + \eta_j)k_j^i \left. \left. \right\}^{\beta_i} \cdot \right. \\ &\left. \left[1 + \pi\varphi \sum_{i,s=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{v'_{i,s} d'_{i,s}}{v_{i,s} d_{i,s}} \right)^\theta k_j^{i,s} \right] \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (9)$$

$$0.01 \leq x_i < 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \delta(x_i) \leq \Omega \quad (11)$$

$$\delta(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i = 0.01 \\ 0, & x_i \neq 0.01 \end{cases}$$

$$q_0 + \zeta < q^* \leq 1 \cup 1 \leq q^* < q_0 - \zeta \quad (12)$$

$$q^* = - \frac{\sum_{r=1}^n \ln r^* \cdot \ln E_r^* - n \overline{\ln r^*} \cdot \overline{\ln E_r^*}}{\sum_{r=1}^n \ln r^{*2} - n \overline{\ln r^*}^2} \quad (13)$$

$r^* \in [1, n]$

式(9)为假设(1)的恒等约束,式(10)和(11)为假设(2)的均衡约束,式(12)为假设(3)的协调进化约束,其中 ζ 为经济分布形态的进化步长,表示经济分布形态向 ζ 方向进化,主要受政府的干预强度影响确定.将交通基础设施投入后的 n 个组团经济规模(E_i)进行降序排序, r^* 为排序名次,第 1 名经济规模为 E_1^* ,第 r 名经济规模为 E_r^* , q^* 的取值代表着区域经济规模分布的形态是否均衡,初始分维值为 q_0 ,按照线性回归理论得出式(13)约束条件.

2 模拟计算

算例城市由 15 个组团组成,为使得算例具有现实指导意义,采用成都市组团结构和实际统计数据拟合模型参数,城市组团及组团间交通通道基础设施网络拓扑结构(d, v)如图 3 所示.图中:实线段 $a \sim q$ 表示已建成的交通基础设施网络;虚线段 $A \sim E$ 表示算例城市拟在近期进行的 5 项组团间交通通道

基础设施建设.

5 项组团的交通通道基础设施建设分别为:A 为高速路($v=120 \text{ km/h}, w=40 \text{ m}, \eta=0.8$ 亿元);B 为快铁($v=200 \text{ km/h}, w=30 \text{ m}, \eta=1.1$ 亿元);C 为快速路($v=100 \text{ km/h}, w=35 \text{ m}, \eta=0.6$ 亿元);D 为快铁($v=200 \text{ km/h}, w=30 \text{ m}, \eta=1.1$ 亿元);E 为主干道路($v=80 \text{ km/h}, w=25 \text{ m}, \eta=0.3$ 亿元),网络拓扑结构中各参数释义见式(2)、(3)和(7),拟建的 5 项组团间交通通道基础设施在各组团内的长度 $l_{i,j}$ 如表 1 所示.根据算例城市的网络拓扑信息,计算各组团在新建项目环境下的引力参数见表 2.

通过式(1)计算成都市 2010 年经济分布指数 $q_0=0.694$;财政资本大的地区基础设施建设对社会消费的挤进效益高,依据成都市经济数据, λ 取值拟定中心城市(区号 1)为 0.18;二圈城市(区号 2~7)为 0.15;三圈城市(区号 8~15)为 0.09. α, β 通过成都 2000~2010 年统计数据拟合,征地成本 μ_i 参照图 3 中的 B 项目实际费用; $M=700$ 亿, $\pi=0.4, \theta=0.1, \varphi=0.1, \Omega=1$.按照政府对经济规模分布形态的干预强度,对 ζ 进行分强度设置,低、中、高 3 种干预强度取 0.05、0.15、0.25.模型参数如表 3 所示.

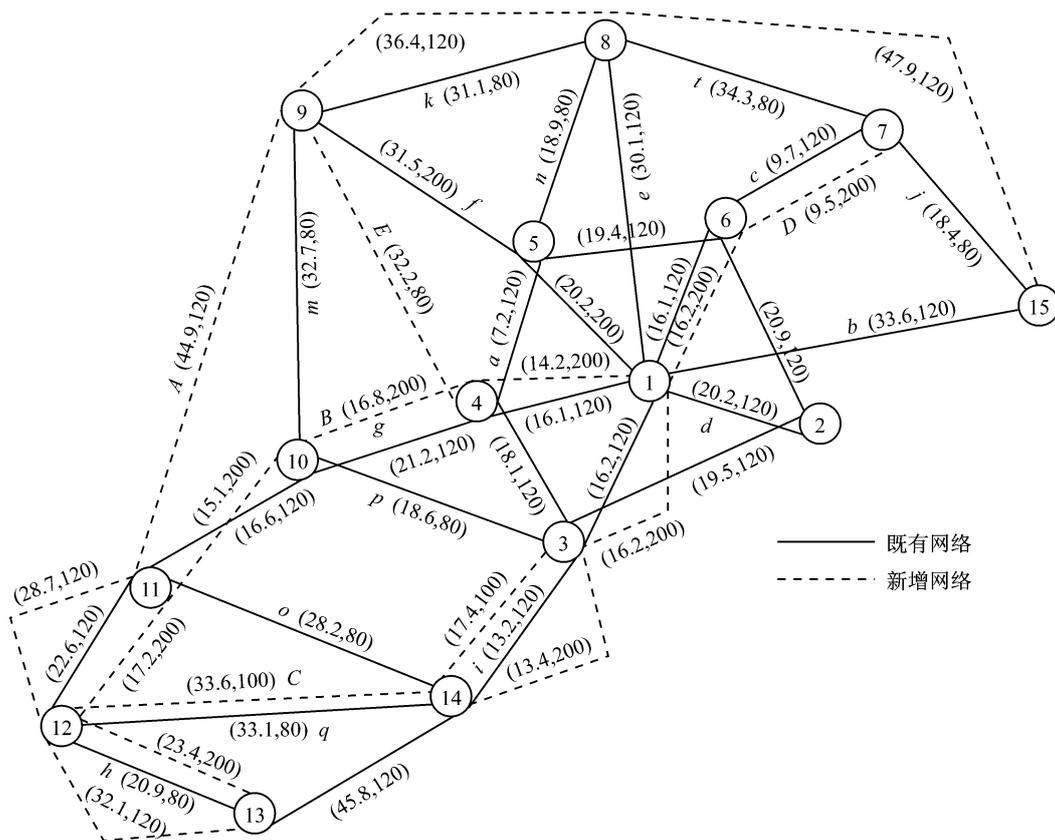


图 3 算例城市的通道网络拓扑结构

Fig. 3 Channel network topology of example city

表 1 新建项目在各组团内的长度
Tab. 1 Length of new projects in each group

新建项目	组团号														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A								42	47.2		27.6	24.6	25.4		22.6
B	6			12.8						16.9	13.3	14.3	23.4		
C			7.1									31.5		15.4	
D	18.6		15.7			8.5	6.2							7.7	
E				6.7					24.7						

表 2 新建项目产生的组团引力参数变动

Tab. 2 Group gravitational parameter changes generated by new projects

组团号	$\frac{v'_{i,s}d_{i,s}}{v_{i,s}d'_{i,s}}$	组团号	$\frac{v'_{i,s}d_{i,s}}{v_{i,s}d'_{i,s}}$	组团号	$\frac{v'_{i,s}d_{i,s}}{v_{i,s}d'_{i,s}}$
1	15.896	6	19.055	11	22.858
2	8.337	7	21.549	12	24.472
3	14.410	8	10.469	13	21.273
4	18.162	9	10.937	14	17.889
5	10.830	10	21.284	15	14.483

表 3 模型参数取值

Tab. 3 Model parameters

圈层	区号	小区名	E_i^0	T	P	λ	α	β	μ
中心城市	1	五城区	8.592	1 804.9	1 716.6	0.18	0.088	0.832	0.007 2
	2	龙泉驿	6.261	261.0	63.1	0.15	0.763	0.168	0.006 2
	3	双流	5.121	372.5	126.8	0.15	0.299	0.442	0.006 2
二圈城市	4	温江	5.847	220.6	49.5	0.15	0.167	0.738	0.005 6
	5	郫县	4.529	204.7	52.1	0.15	0.102	0.889	0.006 0
	6	新都	4.706	244.5	78.0	0.15	0.336	0.419	0.006 0
	7	青白江	4.863	151.0	35.7	0.15	0.413	0.348	0.003 6
三圈城市	8	彭州	1.865	180.1	40.9	0.09	0.331	0.028	0.003 6
	9	都江堰	2.355	203.4	60.9	0.09	0.137	0.461	0.003 6
	10	崇州	1.681	106.3	40.5	0.09	0.031	0.845	0.003 2
	11	大邑	1.790	106.1	28.8	0.09	0.130	0.424	0.002 8
	12	邛崃	1.591	111.1	37.8	0.09	0.082	0.717	0.002 5
	13	蒲江	2.166	52.2	14.6	0.09	0.377	0.341	0.002 5
	14	新津	3.872	126.6	35.1	0.09	0.276	0.441	0.004 7
	15	金堂	1.481	110.5	37.1	0.09	0.134	0.816	0.002 5

$$w_q = \begin{cases} \left| 50 \left(q^* - \frac{q_0 + 1}{2} \right) \right|, & q^* < q_0 + \zeta < 1 \cup q^* > q_0 - \zeta > 1 \\ 1, & q_0 + \zeta < q^* \leq 1 \cup 1 \leq q^* < q_0 - \zeta \end{cases}$$

依据不同的形态演化干预强度,计算城市经济发展和形态指数,模型计算过程中使用人均经济概念,使得计算所得的交通基础设施投资更具有社

将模型参数带入目标函数,利用等式约束下的遗传算法^[15],种群规模为 200,最大进化代数为 100,交叉概率为 0.9、变异概率为 0.1,假设个体 x_i 不满足等式约束降维 ($0.01 \leq 1 - \sum_{i=2}^n x_i \leq 0.99$) 的数目为 k ,则种群 $U^{(m)}$ 的适应度 eval 按下式计算:

$$\text{eval}(U^{(m)}) = \frac{F}{\tau w_k \tau w_q}$$

$$w_k = \begin{cases} 200(k+1), & k \geq 1 \\ 1, & k = 0 \end{cases}$$

会性的经济均衡特征,3 种干预强度下的系统适应度迭代结果如图 4 所示.模型仿真结果表明,低干预强度下,迭代至 51 次系统进入稳定,目标函数值 F 为 65.128,但 Zipf 分布指数(0.754 9)相对高干预强度(0.949 0)较低;在高干预强度下,经济分布 Zipf 指数较高,但经济效益水平低于低干预强度,在迭代至 33 次时,仿真结果稳定,最终目标函数值 F

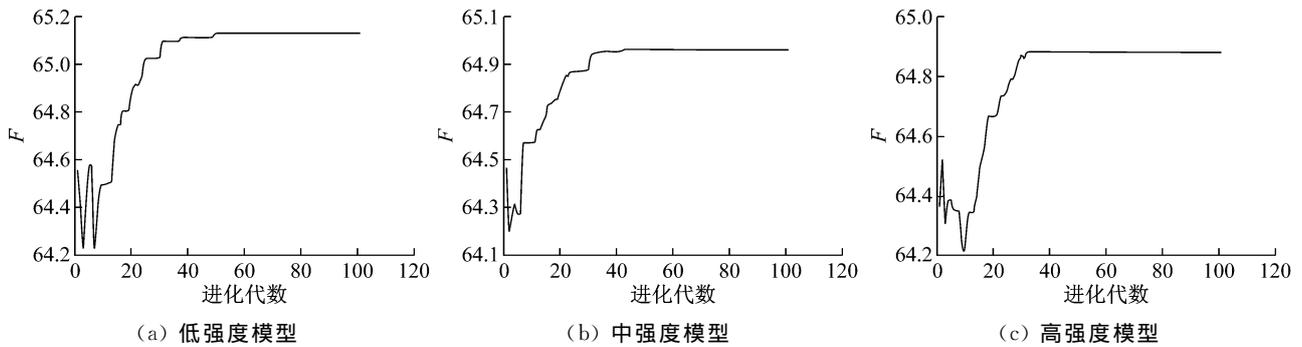


图 4 不同干预强度下的模型仿真结果

Fig. 4 Model simulation results at different intervention intensities

表 4 模型计算结果

Tab. 4 Results of model calculation

区号	E_i^0	低干预强度		中干预强度		高干预强度	
		$\zeta=0.05$		$\zeta=0.15$		$\zeta=0.25$	
		$q^*=0.7549$		$q^*=0.8486$		$q^*=0.9490$	
		X_i	E_i	X_i	E_i	X_i	E_i
1	8.592	0.09	9.107	0.15	9.119	0.16	9.121
2	6.261	0.15	7.116	0.14	7.080	0.14	7.080
3	5.121	0.09	5.693	0.09	5.693	0.12	5.727
4	5.847	0.15	7.009	0.13	6.948	0.11	6.887
5	4.529	0.10	5.002	0.11	5.026	0.12	5.050
6	4.706	0.07	5.208	0.02	5.120	0.05	5.173
7	4.863	0.15	5.819	0.11	5.681	0.09	5.611
8	1.865	0.02	2.118	0.02	2.118	0.02	2.118
9	2.355	0.02	2.680	0.02	2.680	0.02	2.680
10	1.681	0.02	1.865	0.03	1.871	0.03	1.871
11	1.790	0.03	2.103	0.06	2.124	0.02	2.096
12	1.591	0.03	1.947	0.02	1.941	0.02	1.941
13	2.166	0.03	3.351	0.07	3.462	0.02	3.323
14	3.872	0.02	4.425	0.02	4.425	0.07	4.529
15	1.481	0.03	1.688	0.01	1.672	0.01	1.672
合计	56.72	1.00	65.128	1.00	64.957	1.00	64.879

为 64.879, 计算结果如表 4 所示。3 种干预强度下, 成都市的经济形态演化步长与地区交通投资的经济效益呈反比, 这是一种博弈, 如何合理确定经济形态的干预力度, 是城市管理者地区交通投资结构优化决策的重要问题。

由表 4 可见, 无论在何种干预强度下, 均需要加大中心城及二圈城市交通基础设施投资, 并尽可能对三圈层新津、蒲江方向的组团(成新走廊)进行适当的交通投资补偿, 以促进地区经济的共生发展, 结论符合成都市 2010 年以来南部新区规划、地铁工程、二环高架、红星路南延线、农村公路改善提升工

程等交通项目的事实一致, 在一定程度上印证了成都市交通基础设施建设投资结构安排的合理性。

3 结 论

以地区经济分布形态为约束条件, 通过最大化经济效益的目标函数, 试图揭示交通基础设施投资对地区经济发展的重要作用。模型仿真结果证明, 通过城市管理者对交通基础设施投资结构的有效决策能够引导地区经济形态的协调演化, 如何合理确定对经济形态的干预力度, 是城市管理者对地区交通投资结构有效决策的重要问题。本文模型参数针对短期内的经济分布条件, 随着地区发展, α 、 β 和 λ 等参数将随时间发生变化, 故本文研究的投资结构优化适用于短期的政府投资决策, 对于长期性的投资决策需要城市进行长期的经济数据统计, 并对未来发展进行预测, 依据不同时间阶段的参数波动, 构建分阶段的模型参数拟合模型, 进而使模型更适用于长期性的交通投资决策。

参考文献:

[1] Rephann T. Highway investment and regional development[J]. *Urban Studies*, 1993, 30(2): 437-450.

[2] 王利彬, 吴群琪. 运输业投资对经济拉动作用的计算方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 72-75.
WANG Li-bin, WU Qun-qi. Contribution measuring method of transportation development to national economy growth[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2006, 26(3): 72-75.

[3] Morisugi H. Evaluation methodologies for transport projects in Japan [J]. *Transport Policy*, 2000, 7(1): 35-40.

[4] 孙莹莹, 吉达鹏, 肖忠斌. 交通基础设施对城市规模的影响研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(6): 27-31.
SUN Ying-ying, JI Da-peng, XIAO Zhong-bin. The

- influence of transport infrastructure on urban size[J]. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, 2013, 13(6):27-31.
- [5] 马辉,王建军,付会萍,等.基于公平性的干线公路网布局方法[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(1):78-84.
MA Hui, WANG Jian-jun, FU Hui-ping, *et al.* Layout method of arterial highway network based on fairness[J]. **Journal of Chang'an University: Natural Science Edition**, 2013, 33(1):78-84.
- [6] Litman T. Evaluating transportation equity[J]. **World Transport Policy & Practice**, 2002, 8(2):50-65.
- [7] 杨朗,石京,陆化普.道路设施项目投资公平性的评价方法[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(9):1162-1165.
YANG Lang, SHI Jing, LU Hua-pu. Equity evaluation of road projects investment[J]. **Journal of Tsinghua University: Science & Technology**, 2005, 45(9):1162-1165.
- [8] Caminal R. Personal redistribution and the regional allocation of public investment[J]. **Regional Science and Urban Economics**, 2004, 34(1):55-69.
- [9] 王选仓,于江霞,王秉刚.基于需求函数模型的公路网规模预测[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(3):59-62.
WANG Xuan-cang, YU Jiang-xia, WANG Bing-gang. Reasonable highway network scale prediction based on demand function[J]. **Journal of Chang'an University: Natural Science Edition**, 2006, 26(3):59-62.
- [10] 孙强,王庆云,高咏玲.交通基础设施投资的地区结构优化模型[J].北京交通大学学报:社会科学版,2012,11(4):12-21.
SUN Qiang, WANG Qing-yun, GAO Yong-ling. An optimized model of regional allocation of transport infrastructure investment[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University: Social Sciences Edition**, 2012, 11(4):12-21.
- [11] 梁国华,张景峰,雷剑,等.公路网均衡规模确定方法[J].交通运输工程学报,2013,13(6):83-89.
LIANG Guo-hua, ZHANG Jing-feng, LEI Jian, *et al.* Determination method of equilibrium scale for highway network[J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2013, 13(6):83-89.
- [12] 谈明洪,范存会. Zipf 维数和城市规模分布的分维值的关系探讨[J].地理研究,2004,23(2):243-248.
TAN Ming-hong, FAN Cun-hui. Relationship between Zipf dimension and fractal dimension of city-size distribution [J]. **Geographical Research**, 2004, 23(2):243-248.
- [13] Singh S L, Prasad B, Kumar A. Fractals via iterated functions and multi-functions[J]. **Chaos, Solitons and Fractals**, 2009, 39(3):1224-1231.
- [14] Wolde-Rufael Y. Energy consumption and economic growth: The experience of african countries revisited [J]. **Energy Economics**, 2009, 31(2):217-224.
- [15] 胡宽,常新龙,宋笔锋,等.求解含等式约束优化问题的遗传算法[J].上海交通大学学报,2011,45(7):966-969.
HU Kuan, CHANG Xin-long, SONG Bi-feng, *et al.* Genetic algorithm to solve optimization problem with equality constrains[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2011, 45(7):966-969.

(上接第449页)

- [13] Eslami M, Shareef H, Mohamed A. Power system stabilizer design using hybrid multi-objective particle swarm optimization with chaos[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2011, 18(5):1579-1588.
- [14] Liang Jun-yi, Zhang Jian-long, Zhang Xi, *et al.* Energy management strategy for a parallel hybrid electric vehicle equipped with a battery/ultra-capacitor hybrid energy storage system[J]. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**, 2013, 14(8):535-553.
- [15] May R M. Simple mathematical models with very complicated dynamics[J]. **Nature**, 1976, 261(5560):459-467.
- [16] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach[J]. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, 1999, 3(4):257-271.
- [17] Schott J R. Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization [D]. Cambridge MA: Massachusetts Institute of Technology, 1995.