

文章编号:1007-6735(2013)05-0457-06

基于 Lotka-Volterra 模型的上海低碳化产业结构调整系统仿真研究

高广阔, 孙一鸣

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 从上海三次产业的产值及其碳排放量出发, 利用 Lotka-Volterra 模型对上海二三产业调整进行模拟分析. 运用系统动力学的理论和方法, 研究上海产业低碳化及其发展运行的内在动力机制, 并据此对上海经济的低碳发展路径进行预测与展望, 提出政策建议. 研究表明: 低碳产业替代高碳产业是上海经济发展的必然趋势, 同时也应促进产业整体的和谐发展、低碳发展.

关键词: 低碳化; 产业结构调整; Lotka-Volterra 模型; 系统动力学; 仿真

中图分类号: F 062.9 **文献标志码:** A

System Simulation Study on Shanghai's Low-carbon Industrial Structure Adjustment Based on the Lotka-Volterra Model

GAO Guang-kuo, SUN Yi-ming

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Simulation analysis on the adjustment of secondary and tertiary industries in Shanghai was carried out based on Lotka-Volterra model, according to the output values and carbon emissions of the three sequencies of industries. Industrial low-carbonization and the inherent dynamic mechanism of its development were studied with the help of theories and methods of system dynamics. The forecast and outlook of the low-carbon development path were discussed and policy proposals were presented. The results show that the alternation of high-carbon industry is the inevitable trend of economic development, and the harmonious and low-carbon development of industry should be promoted.

Key words: low-carbon; industrial restructuring; Lotka-Volterra model; system dynamics; simulation

目前全球气候异常, 资源日渐枯竭, 传统的经济增长模式已不能满足人类可持续发展的需求. 而人类

的活动, 尤其是化石燃料的使用所产生的大量 CO₂ 排放是造成气候异常的最主要原因^[1]. 目前, 我国能源

收稿日期: 2013-03-22

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(10BJY005); 上海市教委科研创新资助项目(14ZS118)

第一作者: 高广阔(1966-), 男, 教授. 研究方向: 产业生态学及统计学. E-mail: gaoguangkuo@aliyun.com

消费结构仍是以煤炭、石油和天然气等化石燃料为主,各行业均呈“高碳特征”.发展低碳经济,不仅有利于我国转变经济发展方式,实现资源环境的可持续发展,还有利于在新一轮产业结构调整 and 分工中占据有利态势.文献[2]中指出,低碳经济是用更少的自然资源和污染排放获得更大的产出,更高的资源生产率将带来更高的生活水平和更好的生活质量.庄贵阳^[3]认为低碳经济对中国的含义是要全力提高中国的能源利用率,使单位 GDP 的碳排放逐步降低.由于服务业的碳排放强度远低于工业的碳排放强度,通常将降低第二产业比重、提高第三产业比重称为产业结构低碳化,对于上海 CO₂ 排放状况,从总体上看,碳排放强度不断降低,从结构上看,第二产业碳排放量占碳排放总量的 60% 左右,第三产业碳排放强度相当于第二产业的 45%.根据历年数据可发现上海碳排放总量逐年上升,增长迅速;人均碳排放量较高,高于人口能级相当的其它发达地区水平;通过提高能源效率来减少碳排放量,其效果受到经济发展水平和能源消费结构的制约^[4].在“十二五”规划中,上海不仅要大力发展服务业,而且要推进制造业服务化和服务业制造化,促进产业融合.

1 三次产业分析

林艳君等^[5]认为上海产业结构变化与能源利用效率的提高是促使能源强度下降的两大主要因素,而后者的影响更大,但在其研究中忽略了产业内部的结构调整.唐忆文^[6]则对上海直接节能和间接节

能的贡献度进行测算,其中结构节能的贡献高达 2/3,技术节能贡献占到 1/3,并分析了不同行业的能源利用情况.但没有涉及产业之间的相互关系,未作出产业发展预测.

罗勇等^[7]利用灰关联矩阵分析方法对中国的三次产业相关性进行研究,其中二三产业的关联程度最高,其次是一三产业和一二产业,第三产业处于枢纽地位,对第一产业和第二产业产生重要影响.

上海 1978~2011 年的三次产业产值显示,从总量上看,第一产业产值增长较少;从比重上看,第一产业产值占比呈逐年下降趋势,如图 1 所示.实际上,目前第一产业对 GDP 增长的贡献度已经为负值,第二产业和第三产业对 GDP 增长的贡献度分别为 17.2% 和 82.9%^[8].二三产业通过吸引投资和消费互相竞争,且都受到资源、能源的限制,低碳化更是对二三产业的发展提出了更高的要求,同时二三产业互相提供发展基础、互相依存;但在某些阶段,由于产业结构不合理、管理混乱等使得二三产业互相阻碍抑制.

利用 Lotka-Volterra 模型分析上海二三产业的关系,以此为上海低碳化产业结构调整提供研究基础.该模型能够很好地对二三产业之间的动态关系进行分析.

Lotka-Volterra 模型的一般表达式

$$\frac{dx(t)}{dt} = a_1 x(t) - b_1 x(t)^2 - c_1 x(t)y(t) \quad (1)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = a_2 y(t) - b_2 y(t)^2 - c_2 x(t)y(t) \quad (2)$$

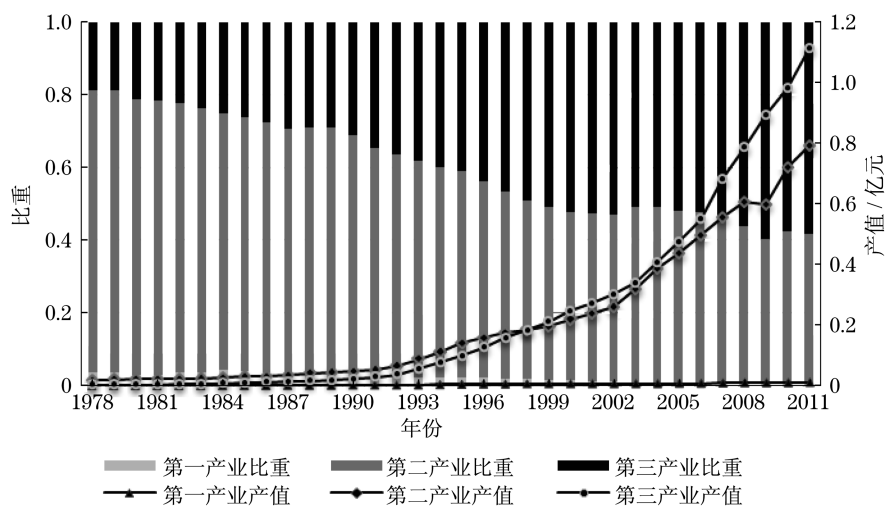


图1 上海三次产业产值及其所占比重

Fig.1 Output value and proportion of the three industries

式中, a_i 为只有一种产业存在时产业的发展速度; b_i 为由于市场的作用产业自身发展所产生的抑制或促进作用; c_i 为另一种产业发展对该产业形成的抑制或促进作用. 当 $c_1 > 0, c_2 > 0$ 时, 二三产业为竞争关系; 当 $c_1 < 0, c_2 < 0$ 时, 二三产业为互惠关系; 当 $c_1 > 0, c_2 < 0$ 时, 二三产业为捕食-被食关系; 当 $c_1 = 0, c_2 < 0$ (或者 $c_1 < 0, c_2 = 0$) 时, 二三产业为偏利关系; 当 $c_1 = 0, c_2 > 0$ (或者 $c_1 > 0, c_2 = 0$) 时, 二三产业为偏害关系; 当 $c_1 = 0, c_2 = 0$ 时, 二三产业为两者之间没有关系.

对于离散的时间数据, Lotka-Volterra 模型的离散形式为

$$x(t+1) = \frac{\alpha_1 x(t)}{1 + \beta_1 x(t) + \gamma_1 y(t)} \quad (3)$$

$$y(t+1) = \frac{\alpha_2 y(t)}{1 + \beta_2 y(t) + \gamma_2 x(t)} \quad (4)$$

其中

$$a_i = \ln \alpha_i, \quad b_i = \frac{\beta_i \ln \alpha_i}{\alpha_i - 1}, \quad c_i = \frac{\gamma_i \ln \alpha_i}{\alpha_i - 1}, \quad i = 1, 2$$

使用非线性最小二乘法估计模型参数的方法对参数的初值比较敏感, 不同的参数初值会得到不同的结果^[9]. 因此, 假设上海二三产业产值满足 Lotka-Volterra 模型的基本条件, 采用灰色直接建模法估计模型参数.

已知灰色系统两组非负序列

$$X = \{x(t) \mid t \in T\},$$

$$Y = \{y(t) \mid t \in T\} \quad T = 1, 2, 3, \dots, n$$

对于 $X = \{x(t) \mid t \in T\}$, 按照灰色直接建模法, 以 $x(t+1) - x(t)$ 作为 $dx(t)/dt$ 的白化值, 对 X 作紧邻均值生成, 令

$$t < t' < t+1, \quad x(t') = \frac{x(t) + x(t+1)}{2},$$

$$t = 1, 2, \dots, n$$

同理

$$y(t') = \frac{y(t) + y(t+1)}{2}, \quad t = 1, 2, \dots, n$$

则称

$$\begin{aligned} x(t+1) - x(t) &\approx a_1 \frac{x(t) + x(t+1)}{2} - \\ b_1 \left(\frac{x(t) + x(t+1)}{2} \right)^2 &- c_1 \frac{x(t) + x(t+1)}{2} \cdot \\ \frac{y(t) + y(t+1)}{2}, \quad t &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

为 Lotka-Volterra 模型的基本形式.

用矩阵表示为

$$Y = B a$$

其中

$$\begin{aligned} Y &= \begin{bmatrix} x(2) - x(1) \\ x(3) - x(2) \\ \vdots \\ x(n) - x(n-1) \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{x(1) + x(2)}{2} & \left(\frac{x(1) + x(2)}{2} \right)^2 & \frac{x(1) + x(2)}{2} \frac{y(1) + y(2)}{2} \\ \frac{x(2) + x(3)}{2} & \left(\frac{x(2) + x(3)}{2} \right)^2 & \frac{x(2) + x(3)}{2} \frac{y(2) + y(3)}{2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x(n-1) + x(n)}{2} & \left(\frac{x(n-1) + x(n)}{2} \right)^2 & \frac{x(n-1) + x(n)}{2} \frac{y(n-1) + y(n)}{2} \end{bmatrix} \\ a &= [a_1, b_1, c_1]^T \end{aligned}$$

在最小二乘准则下, 有

$$a = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

同理, 可估计式(2)的参数.

选取上海 1979~2011 年的二三产业产值作为原始数据, 分别对 1979~1989 年、1990~2000 年、2001~2011 年的数据进行参数估计, 所得结果如表 1 所示 (见下页).

在 1979~1989 年的 Lotka-Volterra 模型中, c_1 为正, c_2 为负, 说明上海二三产业之间是捕食-被食

关系, 第三产业充当捕食者, 第三产业在第二产业的基础上发展迅速, 而第二产业发展却受到抑制, 更多的投资和消费被第三产业所吸引. 1990~2000 年间, 上海实施“三二一”产业发展方针, 第三产业发展迅速, 公共投资和外贸出口成为上海经济增长的主要拉动力^[10]. 1979~2000 年, c_1 一直为正, c_2 一直为负, 说明第三产业一直在第二产业的基础上迅速发展, 但 c_1, c_2 的绝对值逐渐减小, 说明二三产业之间的相互影响逐渐减弱. 2001~2011 年, c_1 为负, c_2

表 1 上海二三产业 Lotka-Volterra 模型参数
Tab.1 Parameters of Lotka-Volterra model of the secondary and tertiary industries in Shanghai

年份	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2
1979~1989	0.374 961	0.721 547	-0.001 427	0.003 615	0.002 554	-0.002 290
1990~2000	0.358 477	0.412 818	-0.000 099	-0.000 003	0.000 028	-0.000 062
2001~2011	0.158 626	0.547 306	-0.000 003	-0.000 030	-0.000 001	0.000 046

为正,说明此时第二产业对第三产业的发展已经有所阻碍,第三产业开始反哺第二产业,但这种作用很不显著.上海的现代服务业和制造业并重是上海产业结构演化的一个重要特征^[11],但当前的制度环境是不利于服务业发展的.

2 系统动力学仿真

系统动力学是研究复杂系统中信息反馈行为的有效仿真方法,它以系统结构为基础,注重系统的动态变化和因果影响,全面把握系统特征与行为^[12].对于产业结构调整的研究,传统的方法是研究经济产值与能耗值之间的关系,显然,更应该从产业结构本身进行探讨研究.低碳经济系统动力学模型如图 2 所示.

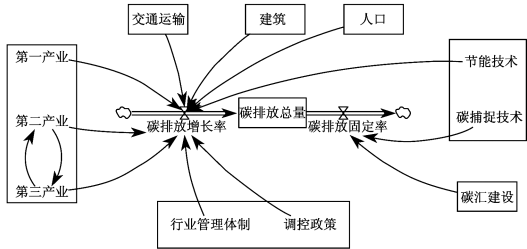


图 2 低碳经济系统动力学模型
Fig.2 System dynamics model of low-carbon economy

该模型包括了产业模块、交通运输及建筑模块、政策模块、人口模块、技术模块等.其中产业模块对发展低碳经济影响最大,也是本文研究的重点.根据上文的分析,构建图 3 所示的二三产业碳排放量的系统动力学流图.

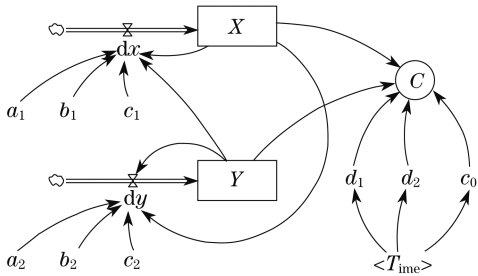


图 3 二三产业碳排放
Fig.3 Carbon emissions of the secondary and tertiary industries

其中, X 为第二产业产值; Y 为第三产业产值; dx 为第二产业产值增加值; dy 为第三产业产值增加值; C 为碳排放总量; C_0 为其它碳排放量; d_1 为第二产业碳排放强度; d_2 为第三产业碳排放强度; $<T_{ime}>$ 则为时间变量.

该系统的系统动力学方程可描述为

$$X.K = X.J + dx.JK \times DT$$

$$Y.K = Y.J + dy.JK \times DT$$

$$C.K = d_1 \times X.K + d_2 \times Y.K + C_0$$

$$dx.KL = a_1 \times X.K - b_1 \times X.K^2 - C_1 \times X.K \times Y.K$$

$$dy.KL = a_2 \times X.K - b_2 \times X.K^2 - C_2 \times X.K \times Y.K$$

式中, $X.K$ 为状态变量 X 在时刻 K 的取值; $X.J$ 为 X 在时刻 J 的取值; $dx.JK$ 为速率变量 dx 在 JK 时间内的取值; $DT=1/a$; $Y.K$ 为 Y 在时刻 K 的取值; $Y.J$ 为 Y 在时刻 J 的取值; $dy.JK$ 为 dy 在 JK 时间内的取值; $C.K$ 为 C 在时刻 K 的取值; $dx.KL$ 为 dx 在 KL 时间内的取值; $dy.KL$ 为 dy 在 KL 时间内的取值.

根据上海统计年鉴提供的能源终端消费量可求得三次产业及生活消费的碳排放量及碳排放强度^[13],如表 2(见下页)和表 3(见下页)所示.

在 2005 年的基础上,到 2020 年 CO_2 排放强度减少 40%~45%,即碳排放强度降低到 1.24~1.35 t/万元.自 2005 年以来,到 2011 年上海第二产业和第三产业的碳排放强度的降低率分别达到每年 5.84% 和 6.10%,表明近年来上海碳排放强度降低显著,而其降低主要来自于第二产业的碳排放强度的降低.

以 2011 年为基期,对上海产业经济系统进行 10 a 模拟,即到 2020 年.令 2011 年二三产业产值作为 X, Y 的初始值,即 $X_0 = 7\,927.89, Y_0 = 11\,142.86$.考虑碳排放强度的历年数据及经济、技术等原因,假设第二产业和第三产业的碳排放强度分别以 4% 和 3% 的速率降低.由于第一产业和生活消费的碳排放量和碳排放强度对整个经济系统的影响较小,本模型假设 2011 年以后两者的增长率不变.

表 2 上海各产业及生活碳排放量

Tab.2 Carbon emissions of the three industries and living in Shanghai

万 t

年份	碳排放总量	第一产业	第二产业	第三产业	生活消费
2002	15 558.87	287.86	10 029.01	3 978.93	1 263.08
2003	16 867.00	294.98	10 719.14	4 459.10	1 393.78
2004	18 609.47	285.80	11 445.87	5 318.95	1 558.85
2005	20 825.41	162.06	13 031.07	5 932.59	1 699.68
2006	22 458.78	156.05	13 672.17	6 739.64	1 890.92
2007	24 569.94	160.11	14 632.50	7 656.41	2 120.93
2008	25 719.21	165.68	14 866.38	8 318.88	2 368.30
2009	26 250.29	165.41	14 739.30	8 840.76	2 504.80
2010	28 599.25	167.44	15 722.83	9 476.79	2 656.26
2011	28 866.01	171.88	16 409.80	9 481.28	2 803.05

表 3 上海碳排放强度

Tab.3 Carbon emissions intensity of Shanghai

t/万元

年份	碳排放总量	第二产业	第三产业
2002	2.71	3.82	1.31
2003	2.52	3.34	1.31
2004	2.31	2.94	1.30
2005	2.25	2.97	1.24
2006	2.12	2.75	1.22
2007	1.97	2.63	1.12
2008	1.83	2.44	1.06
2009	1.74	2.46	0.99
2010	1.67	2.18	0.96
2011	1.50	2.07	0.85

令参数 $a_1 = 0.1$, $a_2 = 0.15$, $b_1 = 15 \times 10^{-7}$, $b_2 = 10 \times 10^{-7}$. 分别考虑二三产业竞争关系 C_P 、互惠关系 M 以及偏利第三产业 C_T , 3 种情况对参数 c_i 赋值. 模拟结果如表 4 和图 4(见下页).

从图 4(a)可以看出, 第二产业在互惠关系情况下发展迅速; 根据图 4(b), 第三产业在竞争条件下的产值不如在其它情况下的产值高, 第二产业在竞争条件下更具竞争力, 此时需要政府给予第三产业的发展以一定支持; 图 4(c)则说明第三产业占 GDP 的比重在未来 10 a 都能达到 0.6 以上的水平, 尤其是偏利第三产业的情况下, 第三产业占比能超过 0.7; 图4(d)表明在互惠情况下的碳排放量最高, 这

表 4 2020 年模拟结果

Tab.4 Results of simulation in 2020

参数	C	M	C_T
c_1	0.000 001	- 0.000 001	0.000 001
c_2	0.000 001	- 0.000 001	- 0.000 001
第二产业产值/万元	14 026.4	19 038.9	13 852.4
第三产业产值/万元	31 083.7	36 739.3	36 332.1
第三产业占比	0.686	0.656	0.721
碳排放量/万 t	48 133.7	59 317.1	51 611.3
碳排放强度/ (t·万元 ⁻¹)	1.062	1.06	1.024

与第二产业在互惠情况下发展迅速以及第二产业的碳排放量是碳排放总量的最主要部分相符合; 由图 4(e)可以看出, 碳排放强度都能由 1.5 降到 1.1 以下, 且 3 种情况下的碳排放强度相差不大, 其中偏利第三产业的情况下的碳排放强度最小.

从碳排放量上来看, 互惠关系情况下的碳排放量最大, 竞争关系情况下的碳排放量最小; 在偏利第三产业的情况下, 第三产业所占比重是最高的, 而互惠关系情况下最低. 总的来说, 二三产业处于竞争关系, 上海碳排放总量最少, 但 GDP 也是最低的; 处于互惠关系, GDP 最高, 但碳排放量也最高; 在偏利第三产业的情况下, 碳排放强度是最低的.

3 结论与政策建议

数据分析表明, 第三产业的发展是以一定的第

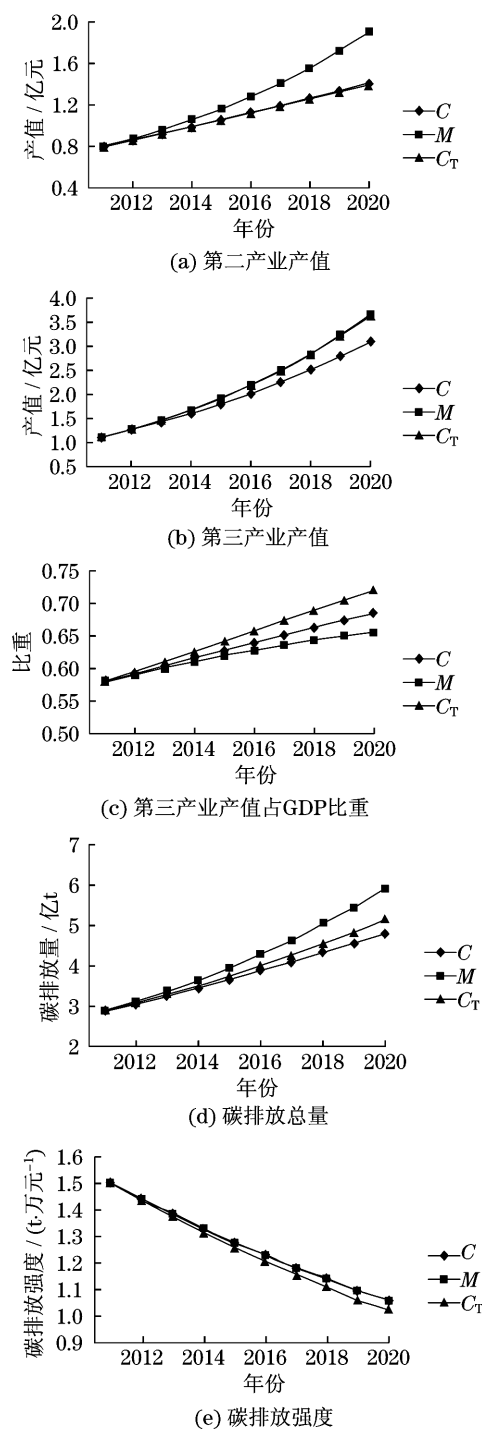


图4 模拟结果

Fig.4 Results of simulation

二产业为基础,降低第二产业比重,大力推进第三产业发展对降低碳排放强度极其有效,但过分偏重于第三产业对经济整体发展有一定不利影响.在注重产业结构调整的同时,也应注意增强产业经济的整体实力.竞争模式能有效降低碳排放量,这也是以牺

牲一定的经济发展为代价.

在未来相当长的时间内,可再生能源很难替代传统能源,因此提高能源利用效率、实现低碳化产业结构调整是实现低碳经济可持续发展的有效手段.政府在推动产业结构调整低碳化的过程中应注意:
a. 经济增长的数量与质量并重,可将单位碳排放量的GDP产出水平,即碳生产率纳入经济增长的指标;
b. 能源效率的提高与产业结构的调整并重,与发达国家相比,上海提升能源效率与产业结构调整的空间还很大;
c. 制度创新与技术创新并重,制度创新和技术创新从不同层面保证上海经济低碳化发展.

基于系统动力学研究上海低碳化产业结构调整涉及诸多学科,并需要分析各系统变量之间的关系,由于实践条件的限制以及未来的不确定性,模型还有待进一步完善.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: synthesis report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] UK Department of Trade and Industry. Our energy future: creating a low carbon economy [R]. London: The Stationary Office, 2003.
- [3] 庄贵阳. 低碳经济引领世界经济发展方向[J]. 世界环境, 2008, 2(2): 34-36.
- [4] 诸大建, 陈飞. 上海建设低碳经济型城市的研究[M]. 上海: 同济大学出版社, 2010.
- [5] 林艳君, 冯春萍. 上海市产业结构变化对能源强度的影响[J]. 能源研究与信息, 2006, 22(1): 30-35.
- [6] 唐忆文. 能源消费、能源结构与上海的转型发展[J]. 上海节能, 2012(8): 1-5.
- [7] 罗勇, 曹丽莉. 三次产业的灰关联矩阵分析[J]. 管理科学, 2005, 18(6): 82-87.
- [8] 沈开艳. 上海经济发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2012.
- [9] 陈海俊, 娄喜娟, 刘洁, 等. Lotka-Volterra 模型参数的灰色估计法及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(23): 108-113.
- [10] 肖林. 八五时期上海经济发展的特点[J]. 上海经济研究, 1995(11): 40-41.
- [11] 李敦瑞. 上海产业结构演化的特征及趋势分析——基于现代服务业发展的视角[J]. 生产力研究, 2012(2): 177-179.
- [12] 李旭. 社会系统动力学: 政策研究的原理、方法和应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2009.

(编辑: 金虹)