

## 用系统科学和智能方法研究城市发展问题

吴澄<sup>1</sup> 刘民<sup>1</sup> 郝井华<sup>1</sup> 董明宇<sup>1</sup>

**摘要** 我国正处于城镇化的快速发展阶段。然而,在城镇化的过程中,决策者常常面临这样的问题:一个城市的资源能支撑多大的人口规模?对产业结构进行怎样的调整才能最大化释放人口承载力?下一年度的城市国内生产总值(Gross domestic product, GDP)增幅为多少合理?GDP增幅与居民消费价格指数(Consumer price index, CPI)、就业的定量关系如何?财政投资应投向哪些领域才能最大程度地提高居民满意度?哪些决策影响城市协调发展?等等。如何在城镇化的大背景下化解上述难题,做好城市发展的顶层规划与设计,是一类重大而复杂的难题。针对此类问题,本文采用系统科学和智能方法,定性定量相结合,首先建立城市GDP、财政收入等关键指标的智能预报模型以及GDP增幅与CPI、就业的定量关系模型,在此基础上建立城市人口承载力与城市协调发展的优化决策模型,并针对我国某大型城市的若干重要决策场景进行了案例分析。结果表明,采用系统科学与智能方法,是研究和解决该类难题的新颖且行之有效的办法,相关成果有助于城市决策者提高决策水平,实现定性定量相结合的科学决策。

**关键词** 城镇化,复杂系统,承载力,协调发展,智能方法

**引用格式** 吴澄,刘民,郝井华,董明宇.用系统科学和智能方法研究城市发展问题.自动化学报,2015,41(6):1093-1101

**DOI** 10.16383/j.aas.2015.c150147

## Research on Urban Development Problem by System Science and Intelligent Methods

WU Cheng<sup>1</sup> LIU Min<sup>1</sup> HAO Jing-Hua<sup>1</sup> DONG Ming-Yu<sup>1</sup>

**Abstract** China is in the stage of rapid development of urbanization. However, policy makers often face such problems in the urbanization process: What is the maximal population scale that the resources of a city can support? How to adjust the industrial structure in order to maximize the population carrying capacity? What is the reasonable setting value of gross domestic product (GDP) growth for the next year? What is the quantitative relationship between GDP growth and consumer price index (CPI), employment? Which areas should be invested in by financial investment in order to maximize resident satisfaction? What decisions affect the coordinated development of a city? And so on. How to meet these problems in the context of urbanization, and how to make good top-level plannings and designs of urban development are major and complex problems. For such problems, by using system science and intelligent methods combing qualitative and quantitative analysis, we first construct an intelligent forecasting model of key indexes of urban development such as GDP growth and government revenue, also we investigate a quantitative relationship model between GDP growth and CPI, Employment. Then we construct the optimization model for improving the urban population carrying capacity and the coordinated development of the city. We also make an extensive case study for some important decision scenarios of a large city. The results show that the proposed method is a novel and effective one which can be used to study and solve such problems, and that the experimental results may contribute to improving the decision making level of urban policy-makers, achieving scientific decision-making qualitatively and quantitatively.

**Key words** Urbanization, complex system, carrying capacity, coordinated development, intelligent method

**Citation** Wu Cheng, Liu Min, Hao Jing-Hua, Dong Ming-Yu. Research on urban development problem by system science and intelligent methods. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(6): 1093-1101

2012年,我国城镇化率达到52.6%,已达到世界平均水平<sup>[1]</sup>。城镇化进程中的核心问题之一是城

市的发展问题,城市的协调发展对城镇化能起到良好的带动和促进作用。然而,另一方面,我国若干大中型城市在发展过程中涌现出了一系列“城市病”,如交通过度拥堵、环境污染、水资源极度短缺等,这严重制约了我国城市经济社会的快速协调发展,同时也影响了城镇化进程。如何克服这些突出问题,做好城市发展的顶层规划与设计,实现城市的协调发展和可持续发展,是摆在城市决策者面前的一道重要难题。

收稿日期 2015-03-24 录用日期 2015-04-13  
Manuscript received March 24, 2015; accepted April 13, 2015  
中国工程院重点咨询项目(2013-XZ-25)资助  
Supported by Key Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (2013-XZ-25)  
本文责任编辑 王飞跃  
Recommended by Associate Editor WANG Fei-Yue  
1. 清华大学自动化系 北京 100084  
1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084

城市发展的顶层规划与设计是一个重大而复杂的问题,涉及多个重要方面:

1) 经济发展: 经济是城市存在和发展的基础,城市必须拥有能够创造价值的产业,才能吸引就业,提高居民生活水平. 从我国当前城市管理学的角度,经济发展水平往往是制定相关决策时最为关注的目标.

2) 生态环境: 随着社会的发展和进步,人们越来越关注生态环境状况. 近年来我国多地雾霾天气长期持续出现,已引发了社会各界的广泛关注,尤其是城市作为人口的聚集地,打造良好的生产和生活环境的重要性不言而喻.

3) 民生: 城市发展要以人为本,要提升城市居民的满意度. 满意度体现在很多方面,最为关键的满意度指标应涵盖居民消费价格指数 (Consumer price index, CPI) 和就业率,这直接影响着城市居民的幸福指数. 另外,医疗、交通、教育、文化设施、社会安全等方面的基础设施和服务也是民生领域的重要内容. 民生问题是城市的顶层规划与设计需要重点考虑的问题.

在困扰我国当前城市发展的若干重要因素背后,存在两个核心问题:

1) 城市人口承载极限问题: 若干专家和学者已从不同的角度说明,我国的若干城市,尤其是特大型城市如北京、上海等,已达到或接近人口承载力的极限. 然而,对于城市人口承载力的定量分析和评估,目前的研究仍缺少统一的共识. 对城市的人口承载能力进行定量分析,对指导城市的发展规划及产业决策具有重要的指导作用.

2) 城市协调发展问题: 对城市来说,城市人口承载力是一个发展底线,在此底线之上,城市发展的目标是经济要增长、就业要保证、物价要平稳、环境要宜居、社会要安定等. 然而,这些目标之间往往是相斥的. 因此,对城市决策者而言,如何针对城市当前的经济、资源、人口等状况,通过财政投入、政策引导、产业结构调整等策略,引导城市的协调发展和可持续发展,是至关重要的一类问题.

目前,对上述两类重大的城市发展决策问题,从学术界来说目前还没有科学有效的定量辅助决策手段,仍主要依赖人工经验、领导意志进行. 针对城市人口承载力极限的研究,学术界大部分是针对单一资源的静态承载力研究<sup>[2]</sup>,如水资源承载力、土地承载力、公共服务承载力等,重点是测算单项资源所能容纳的人口极限. 个别学者近年提出综合承载力的概念<sup>[3]</sup>,定性地指出城市承载力应该综合考虑上述多项承载力指标,但方法上仍采用简单加权的方式来处理,缺乏科学有效的定量综合分析工具. 总体来说,已有的针对城市人口承载力极限的研究大部分是静态的,没有定量地考虑城市的动态发展以及相

关宏观发展决策 (如产业结构调整与财政投入等) 对承载力极限的影响.

针对城市协调发展方法的研究,目前主要是采用定性研究手段,定性分析和推演各个可能的调控决策手段的利害关系,仍普遍缺乏有效的定量分析手段. 如文献 [4-5] 针对城市或区域发展的战略决策问题,结合相关经济与环境统计数据,定性分析了不同决策的优缺点,进而指出了可行的协调发展途径和政策建议. 然而,已有方法在数据处理上仍停留在对原始数据进行较为简单的统计和相关分析上,未做到对数据的综合分析利用. 城市决策者仍主要依赖经验以及领导个人意志来制定相关重大决策,缺少能够定量地进行“what-if”场景分析的方法和工具,使得决策水平很大程度上依赖于领导的个人意志,主观性强,一定程度上影响了城市发展科学决策水平的提高.

城市协调发展研究中的一个重要基础性问题是对城市 GDP、财政收入等相关运行指标进行预报. 目前,学术界存在两类指标预测方法. 一类是以基于历史经济运行数据,采用智能建模方法或统计方法建立预测模型. 如法国蓬图瓦兹大学 Alquier 等<sup>[6]</sup>采用时间序列和统计分析方法,根据前若干年的 GDP 增长率、人口增长率、经济景气指标、通货膨胀、汇率等信息,对法国 GDP 进行预测. 印尼 Teknik Informatika 大学的 Liliana 等<sup>[7]</sup>采用人工神经网络技术,对该国的 GDP 值进行预测. 虽然上述方法可对 GDP 等指标进行智能预测,但在应用于我国城市的相关经济运行指标预测时,由于历史数据少 (我国城市的经济运行数据基本上从 1995 年开始才有较为全面的统计) 等难点,这类方法的预测精度很难令人满意. 另一类方法是根据相关运行指标的计算机理,获取详尽的数据,在此基础上进行 GDP、财政收入等指标的预测,该类方法一般由政府部门主导. 此类方法需要动用的资源较多,实际上是对上述指标进行粗计算,难以适应在城市发展决策优化阶段进行建模和优化的需要.

从系统工程的角度看,城市系统是一个典型的开放的复杂巨系统<sup>[8-9]</sup>,涉及资源、经济、人口、民生、环境、政策等诸多方面,各相关因素之间存在复杂的耦合关系,难以定量描述. 尤其是在当前的市场经济环境下,政府对城市发展进程所能直接左右和调控的手段大大减少,这进一步提高了针对城市系统的演化过程进行数学建模和优化的复杂性. 对城市这一复杂社会系统的建模、优化与决策,目前还没有令人满意的解决办法,特别是定量的方法.

针对上述难题,我们认为,城市的人口承载力以及协调发展程度是一个动态的概念,其与资源状况、GDP 规模、产业结构、财政投向等具有密切的

关系. 在此基础上, 本文采用系统的观点, 定性定量相结合, 在城市人口承载力极限的定量动态分析、城市 GDP 等关键指标智能预报、面向城市协调发展的定量优化决策方法方面进行了若干研究. 其中, 在城市关键指标智能预报上, 我们针对城市 GDP、财政收入等关键指标的特点, 将已有方法的优点相结合, 采用机理和数据相结合的建模方法, 提出一种数据与机理相结合的指标智能预报方法. 在该方法中, 提出了可处理小样本的基于区间数的数据模型, 同时, 基于 GDP 等指标的计算机理选出与其紧密相关的因素, 建立指标的机理模型, 在此基础上, 将数据模型和机理模型相结合, 实现对上述的智能预报; 在城市人口承载力极限的动态分析和面向城市协调发展的优化决策上, 我们将城市承载力和城市的协调发展程度与城市的产业结构、宜居城市标准、财政投向、城市可利用的关键资源状况等建立了有效关联, 并以此为基础建立了相应的动态优化决策模型, 考虑了不同的城市发展决策场景并进行了案例分析. 结果表明, 采用系统科学的思路和方法, 定性定量相结合, 通过建立合适的智能预报、优化决策模型并进行求解和场景分析, 能显著提高城市发展科学决策水平, 在一定程度上实现科学决策.

## 1 智能预报模型

根据若干影响城市经济发展的因素对下一年度的关键运行指标 (如 GDP 增长率、财政收入、人均收入等) 进行预报, 对城市决策者制定相关产业经济政策及改革措施具有重要的意义和作用. 本节以城市 GDP 增长率为例, 来说明智能预报模型的建立思路. 影响一个城市 GDP 的因素有很多, 包括城市所施行的经济政策、国内外经济环境、政府的调控手段等等. 结合国内外关于 GDP 预报模型的文献分析, 根据影响 GDP 的“三驾马车”(投资、消费和出口) 以及 GDP 的三种计算公式 (生产法、收入法和支出法) 中的各特征变量, 影响城市 GDP 增长率的因素可分为如下三类:

1) 城市发展和运行的调控变量, 即政府通过决策可改变和调控的变量, 反映了政府对 GDP 增长率的调控. 如财政资金投向、产业结构调整 (即各主要细分行业的经济规模调控量) 等. 财政资金的投向可分为教育、环保、医疗、固定资产投资、工业等. 不同的城市对 GDP 增长率影响较大的属性不同, 在建模时需要根据具体城市的特点进行选择.

2) 城市发展和运行的相关环境变量, 如国际经济发展指数、国家 GDP 增长率目标值、国家财政收入、社会固定资产投资额、物价指数 (CPI)、就业率等等. 对于外向型经济的城市而言, 国际经济发展指数对其 GDP 增长率影响较大, 而国家 GDP 增长率

则是反映了国内的经济景气程度以及中央政府的相关调控手段 (如货币政策、税收政策、产业振兴计划等), 因而对城市 GDP 增长率也有较大影响.

3) 城市 GDP 的历史值, 包括过去若干年度的 GDP 增长率、实际 GDP 值等等. 这反映了当前城市的经济活跃程度, 对下一年度 GDP 增长率有较大影响.

所建立的城市 GDP 增长率预报模型由两个子模型组成: 反映 GDP 增长客观规律的基于数据的 GDP 增长率区间预报模型和反映下一年度特定城市 GDP 增长率贡献值的基于细分行业产值的校正模型. 两个模型的输出之和为 GDP 增长率的最终预报结果. 两个子模型分别表示如下:

$$X_1(k) = \begin{bmatrix} x_{11}(k), x_{11}(k-1), \dots, x_{11}(k-t_1) \\ x_{12}(k), x_{12}(k-1), \dots, x_{12}(k-t_2) \\ \vdots \\ x_{1m}(k), x_{1m}(k-1), \dots, x_{1m}(k-t_m) \end{bmatrix}$$

$$Y_1(k+1) = f_1(X_1(k))$$

$$Y_2(k+1) = a_1 x_{21}(k+1) \dots + a_n x_{2,n}(k+1) = AX_2(k+1)$$

$$Y = Y_1 + Y_2$$

其中,  $X_1(k)$  为待预报年份之前各年份的特征属性矩阵, 共有  $m$  维变量, 每维变量均为时间序列型数据,  $X_2(k+1)$  为预报年份的重点细分行业产值预估值向量,  $Y_1(k+1)$  和  $Y_2(k+1)$  分别为采用模型 1 (区间预报模型) 和模型 2 (校正模型) 所获得的 GDP 增长率初步预报值和校正值,  $A$  为城市细分行业权重向量. 进一步, 针对模型 1, 我们建立了以基于残差熵和双层支持向量机的城市 GDP 增长率区间预报模型 (Twin support vector regression based on residual entropy, TSVR). 该方法以残差熵度量训练误差绝对值小于  $\varepsilon$  的样本信息残余量, 建立双层支持向量机模型以提高预报精度. 首先通过常规支持向量机模型在较大尺度上建立外层预测模型, 当新数据到达时, 采用外层支持向量机中二次优化问题的 KKT 条件判断该新数据在模型修正中的作用, 如其不满足外层 KKT 条件, 则将该新数据用于修正外层支持向量机, 同时得到外层支持向量机训练误差序列: 如满足外层 KKT 条件, 则将该新数据直接作为外层支持向量机的输入, 并求得训练误差序列. 在得到训练误差序列后, 采用残差熵度量外层支持向量机误差序列中所含信息的确信程度, 当残差熵较大时, 利用外层误差序列和训练误差小于误差阈值的样本建立较细尺度上的内层支持向量机模型. 如内层模型已建立, 则用新数据及其外层

预报误差步在线修正内层支持向量机模型,从而实现模型的高效学习.在优化过程中,分别优化搜索模型输入变量种类和各变量的阶数,以确定不同城市的最佳输入变量种类和其相应的时间阶数,从而反映不同城市的发展和运行指标的变化规律.在用城市 GDP 相关实际统计数据建立 TSVR 模型后,即可确定  $f_1$ ,从而得出  $Y_1$  值.但是,  $Y_1$  与  $Y$  仍有偏差,我们采用校正模型  $Y_2$  以进一步提高预测精度,即使用 TSVR 的预测误差作为校正模型的输出值,  $Y_2 = Y - Y_1$ .从而可通过最小二乘法确定线性参数  $A$ .

采用我国两座特大型城市的 GDP 相关数据进行了数值计算实验(GDP 增长率及各年度相关特殊属性的取值数据来自《中国城市统计年鉴-2013》),并将该方法与标准支持向量机(Support vector machine, SVM)方法及标准反向传播神经网络(Neural network, NN)方法进行了对比,其中,NN 采用 3 层结构,隐层节点数为 15 个,采用 BP(反向传播)方法对 NN 进行训练.结果如表 1 所示.

表 1 基于 TSVR 的城市 GDP 预报模型与其他预报模型的对比结果

Table 1 Comparison results of TSVR-based prediction model and other prediction models for GDP growth

城市	TSVR 区间误差	标准 SVM 区间误差	NN 区间误差
特大型城市 1	0.2671	0.5431	0.6917
特大型城市 2	0.6151	1.1667	1.2059

可以看出,TSVR 模型在城市 GDP 增长率预报上相比较标准 SVM 方法和 NN 方法取得了明显的改进,能达到较高的预报精度.

利用课题组所提出的上述 TSVR 智能建模方法,我们进一步研究了 GDP 增长率和 CPI 增长率、GDP 增长率和就业人口增长率之间的定量关系模型,从而可在已知城市的 GDP 增长率的前提下,结合对指标有影响的其他相关特征因素,对 CPI 增长率及就业人口增长率进行预报.针对我国某大城市,采用上述 TSVR 方法与线性拟合算法进行预测的相关结果如图 1 和图 2 所示.在建立预测模型时,所使用的训练数据为自 1998 年至 2009 年的相关数据.在图 1 和图 2 中,“真实值”为相应年份 CPI 增长率或就业人口增长率的实际值,“线性算法”为直接采用线性拟合算法所获的相应指标的预测值,“非线性算法”为采用上述 TSVR 智能建模方法所获的相应指标的预测值(其中,1998 年至 2009 年的数据为训练数据,2010 年至 2012 年的数据为测试数据).

从图 1 和图 2 可以看出,TSVR 方法的预测精

度明显高于线性拟合算法,且与实际值差距较小.该模型可应用于对下一年度 CPI 增长率及就业人口增长率进行预测,从而辅助城市相关决策,提升科学决策水平.

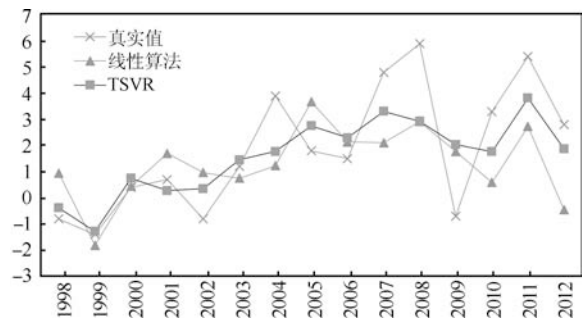


图 1 CPI 增长率预报结果对比

Fig. 1 Comparison of prediction results of CPI growth

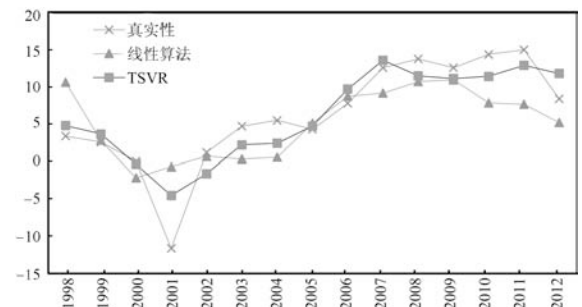


图 2 就业人口增长率预报结果对比

Fig. 2 Comparison of prediction results of working population growth

另外,我们还针对特定类型的城市关键运行指标预报问题,提出了针对性的预报模型建立方法,如针对有些城市运行指标模型的输入/输出数据是区间型变量的特点(如财政收入增长率为区间数等),提出基于区间数的 ELM 建模方法:针对有些城市运行指标与城市运行数据存在多重不确定滞后的特点(如政府出台的相关扶持和惩罚政策、资金投入等对相关城市运行指标的影响存在滞后现象且滞后时间不确定等),提出一种基于过程神经网络和灵敏度分析的不确定多重时滞过程建模方法等.

## 2 城市人口承载力模型研究及场景仿真

研究城市的承载力,了解城市的关键资源所能承载的人口极限,并进一步掌握如何通过相关调控手段改善人口承载力,对制定城市发展相关重大决策具有重要作用.与以往的研究不同,本文认为,城市的人口承载力水平是动态变化的,其与城市的产业结构、财政资金投入等具有密切关联.因此,本文重点在于建立反映资源、经济、人口、生态环境之间逻辑关系的人口承载力动态分析模型.

影响城市经济发展的因素错综复杂,且不同城市在经济发展中面临的具体问题又有很大区别,在研究城市人口承载力模型时,我们试图把握影响人口承载力的关键因素以及它们之间的关联关系.从系统论的角度出发,结合人口承载力的视角,人口系统、经济系统与生态环境系统为一个整体,它们之间相互联系又互相制约.例如:发展经济需要就业人口的支持,但某些产业一定程度上会对生态环境造成负面影响,进而对人口承载力施加一定限制.在所构建的城市人口承载力模型中,我们认为:城市所能承载的人口由其总就业人口决定,而城市的就业人口需要由各个行业的GDP来支撑(即不同行业要产生一定量的GDP,则需按照一定比例吸纳就业人口),各个行业可以贡献财政收入,但又同时消耗一定的资源,并产生一定的环境污染(废水废气等);城市居民需要消耗一定的资源.上述资源(包括生产资源和生活资源,具体涵盖水、电力、医疗资源、绿地、道路、居住用地、废水废气处理能力等)受城市的资源总量所约束,并可通过财政资金投入在一定程度上予以改变.上述各项要素之间的逻辑关系如图3所示.

基于上述分析,所建立的最大化城市人口承载力的模糊规划模型如下:

$$\max POP$$

$$\text{s.t.}$$

$$POP = POP_c + POP_u$$

$$GDP = f(GDP_1, \dots, GDP_k, m_w, m_e, m_s, m_p, m_b)$$

$$GDP_{\min} \leq GDP \leq GDP_{\max}$$

$$a_1GDP_1 + a_2GDP_2 + \dots + a_kGDP_k + x_l \leq \widetilde{W}_{\max}$$

$$b_1GDP_1 + b_2GDP_2 + \dots + b_kGDP_k + y_l \leq \widetilde{E}_{\max}$$

$$x_l = c_1POP_c + c_2POP_u$$

$$y_l = d_1POP_c + d_2POP_u$$

$$e_1GDP_1 + e_2GDP_2 + \dots + e_kGDP_k \leq \widetilde{C}_{\max}$$

$$f_1GDP_1 + f_2GDP_2 + \dots + f_kGDP_k + g x_l \leq \widetilde{P}_{\max}$$

$$h_1(POP_c + POP_u) \leq \widetilde{S1}_{\max}$$

$$h_2(POP_c + POP_u) \leq \widetilde{S2}_{\max}$$

$$h_3(POP_c + POP_u) \leq \widetilde{S3}_{\max}$$

$$h_4(POP_c + POP_u) \leq \widetilde{S4}_{\max}$$

$$\widetilde{W}_{\max} = \widetilde{W}_{c\max} + r_w m_w$$

$$\widetilde{E}_{\max} = \widetilde{E}_{c\max} + r_e m_e$$

$$\widetilde{P}_{\max} = \widetilde{P}_{c\max} + r_p m_p$$

$$\widetilde{S3}_{\max} = \widetilde{S3}_{c\max} + r_s m_s$$

$$\widetilde{S4}_{\max} = \widetilde{S4}_{c\max} + r_b m_b$$

$$m_w + m_e + m_s + m_p + m_b \leq \widetilde{M}_{\max}$$

$$r_1GDP_1 + r_2GDP_2 + \dots + r_kGDP_k \leq r_0POP$$

$$GDP_i \in [GDP_i^{\min}, GDP_i^{\max}], i = 1, 2, \dots, k, l$$

$$POP_c \in [POP_c^{\min}, POP_c^{\max}]$$

$$POP_u \in [POP_u^{\min}, POP_u^{\max}]$$

模型中涉及的符号解释如下:

1)  $POP_c$  和  $POP_u$  分别表示农村人口和城市人口数量;

2)  $GDP_1, \dots, GDP_k$  分别表示第一产业、第二产业各行业和第三产业的GDP;

3)  $a_1, a_2, \dots, a_k$  分别表示第一产业、第二产业各行业和第三产业的单位GDP用水量,  $x_l$  为生活用水,  $\widetilde{W}_{\max}$  为用水总量约束(其值可通过投资改变),为一模糊数;

4)  $b_1, b_2, \dots, b_k$  分别表示第一产业、第二产业

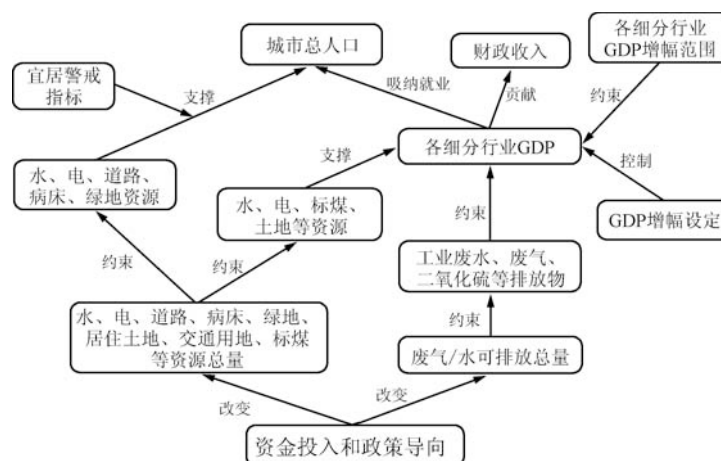


图3 资源、经济、人口、环境之间的内在逻辑关联

Fig. 3 Internal relation of resource, economics, population and environment

各行业和第三产业的单位 GDP 用电量,  $y_i$  为生活用电,  $\tilde{E}_{\max}$  为用电总量约束 (其值可通过投资改变), 为一模糊数;

5)  $c_1$  和  $c_2$  分别表示农村和城市的人均用水量;

6)  $d_1$  和  $d_2$  分别表示农村和城市的人均用电量;

7)  $e_1, e_2, \dots, e_k$  分别表示第一产业、第二产业各行业和第三产业的能耗系数, 其随着时间的推移逐渐降低,  $\tilde{C}_{\max}$  为能耗总量约束;

8)  $f_1, f_2, \dots, f_k, g$  分别表示第一产业、第二产业各行业和第三产业及生活污水产生系数,  $\tilde{P}_{\max}$  为污水排放总量约束 (其值可通过投资改变);

9)  $h_1, h_2, h_3, h_4$  分别表示居住用地、绿地、交通用地和病床的人均下限值, 其中若  $POP \leq 500$  (万),  $h_3 = 10$ , 否则,  $h_3 = 10 + ((POP - 500)/200)$ ;

10)  $\tilde{S1}_{\max}, \tilde{S2}_{\max}, \tilde{S3}_{\max}, \tilde{S4}_{\max}$  分别表示居住用地、绿地、交通用地和病床上限, 其中交通用地和病床的上限可通过投资改变;

11)  $m_w, m_e, m_s, m_p, m_b$  分别表示水、电、道路、污水、病床投资额;

12)  $r_w, r_e, r_s, r_p, r_b$  分别表示水、电、道路、污水、病床投资对于资源的供应系数;

13)  $\tilde{W}_{\max}, \tilde{E}_{\max}, \tilde{P}_{\max}, \tilde{S3}_{\max}, \tilde{S4}_{\max}$  分别表示水、电、道路、污水、病床的目前已有的总量;

14)  $\tilde{M}_{\max}$  为投资总额约束;

15)  $r_1, r_2, \dots, r_k$  分别表示第一产业、第二产业各行业和第三产业的单位 GDP 吸纳就业人口数量,  $r_0$  为就业率下限;

16)  $GDP_{\min}$  和  $GDP_{\max}$  分别表示 GDP 的上限和下限值, 其取值需兼顾当前城市的 CPI、就业人口相关约束, 具体可通过上一节中的智能预报模型进行反推得到;

17)  $GDP_i^{\min}$  和  $GDP_i^{\max}$  分别为相应产业或行业 GDP 的上下限约束。

所建立的模糊规划模型中, 各资源上限 (不失一般性, 资源以  $x$  表示) 的隶属度函数取梯形模糊数, 如图 4 所示。其中, 取  $x_{\min} = x_{\max} \times (1 - 5\%)$ 。

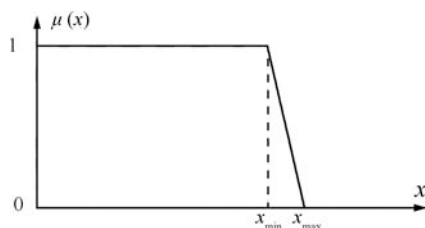


图 4 资源的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of resources

考虑到上述模型为多目标模糊规划模型, 在求解时, 首先对两项目标函数进行模糊化, 然后通过最大化各关键资源和人口指标的隶属度值 (均取相同

值), 将上述不确定性模糊规划问题转化为确定性的单目标规划问题, 进而采用基于内点法与遗传算法相结合的优化方法对上述模型进行求解。

根据上述所构建的城市综合承载力模型, 可进行城市人口承载力的多种场景仿真分析, 包括分析不同 GDP 增幅和投资总额对城市人口承载极限的影响, 及固定三产增幅, 分析投资总额对人口承载极限的影响和细分产业的调整方向等。下面以某城市为例, 分别给出上述两种场景的数值计算结果。其中, 数据来自《XX 市 2013 年统计年鉴》、《XX 市水资源公报》(2007-2013)、《城市用地分类与规划建设用地标准》GB50137-2011 等。

场景一: 分析不同 GDP 增幅和投资总额对城市人口承载极限的影响。

场景仿真参数设定:

1) 按城市宜居警戒指标<sup>[10]</sup> 设定  $h_1, h_2, h_3, h_4$ ;

2) GDP 增幅固定: 6%, 7%, 8%, 9%;

3) 投资额: 57 亿元 (2012 年), 70 亿元, 80 亿元, 100 亿元;

4) 仿真周期: 2 年, 4 年, 6 年, 8 年。

图 5 中, 横坐标为年份, 纵坐标为人口承载力估算值。从图 5 可看出, 该城市的人口承载极限随着 GDP 增幅的提高而显著增长, 随着财政投资额的提升也有一定增长, 这说明在资源许可的条件下, GDP 是提高人口承载力的重要支撑因素。继续提高该城市人口承载力的主要约束是水资源总量限制和吸纳就业人口的限制。

场景二: 固定三产增幅, 分析投资总额对人口承载极限的影响和细分产业的调整方向。

场景仿真参数设定:

1) 按城市宜居警戒指标<sup>[10]</sup> 设定  $h_1, h_2, h_3, h_4$ ;

2) 三产占比增幅: 1%, 3%, 5%, 10%;

3) 投资额: 57 亿元 (2012 年), 70 亿元, 80 亿元, 100 亿元;

4) GDP 增幅: 8%;

5) 仿真周期: 8 年 (极限场景)。

从表 2 和图 6 可看出, 对于该特大型城市而言, 随着三产在 GDP 中占比的增加, 人口承载极限稳步增加; 随着投资总额的增加, 人口承载极限稳步增长, 在未来 8 年内, 其人口承载极限约为 1500 万人; 为进一步提升人口极限承载力, 产业结构调整方向主要为: 发展三产、电子信息、汽车等行业, 控制钢铁、装备制造等行业, 其中第三产业占比由 47.9% 提高至 58.0%, 汽车行业由 9.2% 提高至 11.3%, 钢铁行业由 5.2% 降低至 1.6%。上述结果与项目组在该城市进行调研时所了解到的当前该城市决策者在释放城市承载力方面的看法是基本一致的, 这从另一个角度说明了模型的有效性。

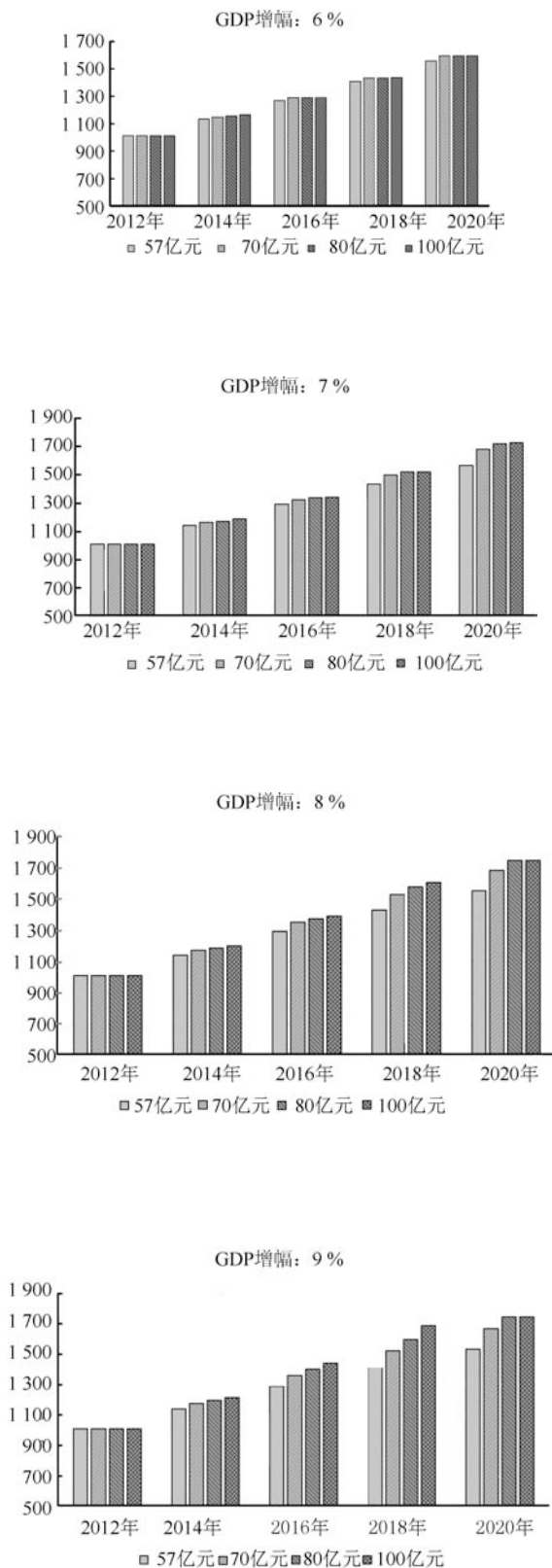


图5 不同GDP增幅和投资总额对城市人口承载极限的影响

Fig. 5 Influence of GDP growth and investment on population capacity of the city

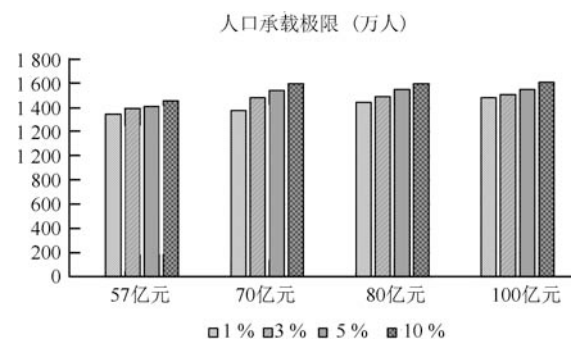
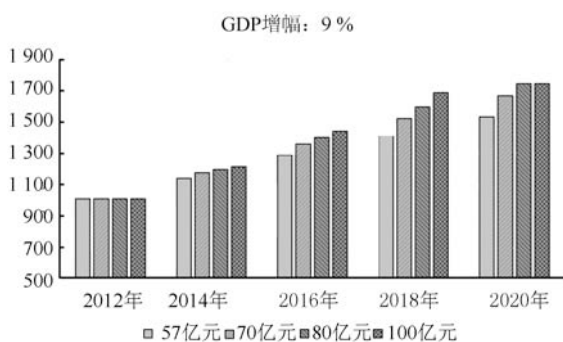
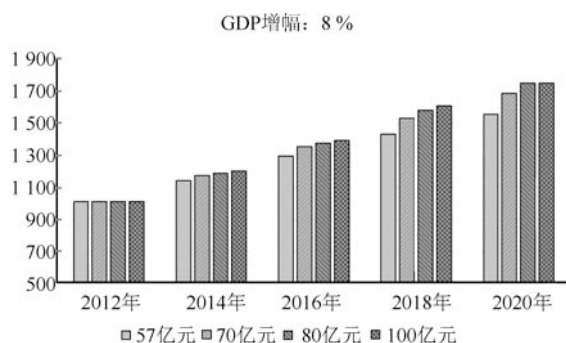
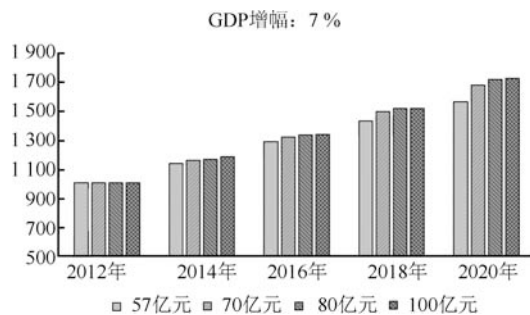
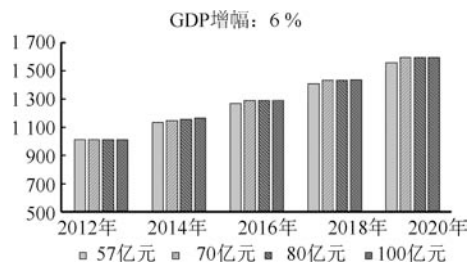


图6 投资总额和GDP增长率对人口承载极限的影响

Fig. 6 Influence of financial investment and GDP growth on population capacity

### 3 城市协调发展综合优化决策模型研究及场景仿真

城市人口承载力模型有助于城市决策者掌握当前城市资源所能承载的人口极限, 本文同时研究了城市协调发展综合优化决策模型. 与城市人口承载力极限模型不同, 在城市协调发展综合优化决策模型中, 优化目标为城市的协调发展度, 所考虑的约束为城市宜居约束. 其中, 协调发展度定义为协调度和发展度二者的乘积, 发展度为人均GDP, GDP增长率和三产比重三者的加权和, 协调度为经济、生态、民生三者的方差(生态指标为单位GDP能耗、人均绿地面积的加权和, 而民生指标为人均道路面积、人均绿地面积、千人病床数三者的加权和, 另外, 在计算GDP时直接采用第2节所建立的GDP预报模型, 在计算GDP的上下限时利用第2节所获得的GDP增长率与CPI增长率、就业人口增长率的关系模型进行反推得到. 除上述方面外, 模型的决策变量和约束条件与人口承载力极限模型相同.

采用该模型对我国某城市的综合优化决策场景进行了场景仿真.

场景一: 优化确定GDP增幅.

场景仿真参数设定:

- 1) 以城市协调发展度最大化为优化指标;
- 2) 按城市宜居指标<sup>[10]</sup>设定  $h_1, h_2, h_3, h_4$ ;
- 3) GDP增幅: 由模型优化确定;
- 4) 投资额: 57亿元(2012年), 70亿元, 80亿元, 100亿元;
- 5) 仿真周期: 2年, 4年, 6年, 8年.

该场景对应于这样的情形: 国家层面的GDP增幅已经给定, 如何针对当前城市的状况确定下一年度的GDP增幅, 以更好地调控城市发展. 从图7可看出, 由于采用了城市宜居指标, 与采用宜居警戒指标相比, 人口承载能力显著下降; 随着财政投资额的增加, 人口承载力和GDP增幅都有一定增长.

表 2 产业结构调整优化结果 (GDP 增幅设定为 8%, 年财政投资 100 亿元) (%)

Table 2 Optimization results of industrial structure adjustments (GDP growth is set as 8%, and financial investment is set as 100 million yuan) (%)

细分产业	第一产业	汽车	装备制造	钢铁	电子信息	食品烟草	能源环保	其他工业	第三产业
2012 年 GDP 占比	3.8	9.2	6.8	5.2	6.4	5.8	6.8	8.2	47.9
优化后的 GDP 占比	2.8	11.3	5.7	1.6	8.5	6.4	5.8	5.1	58.0

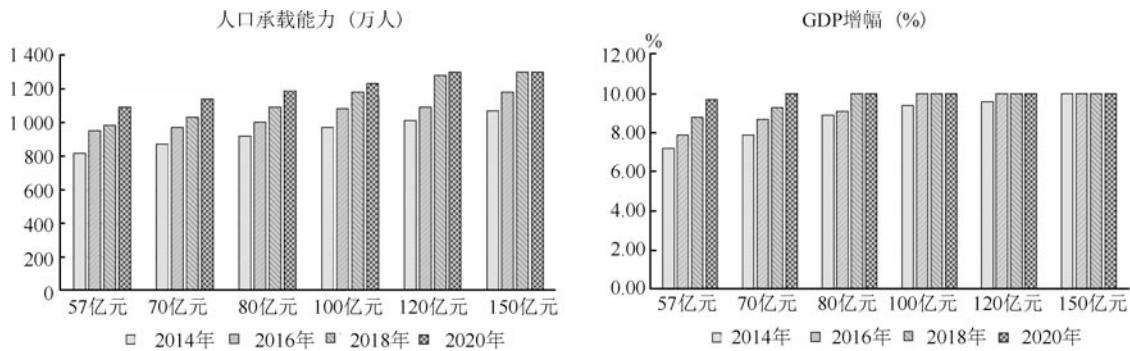


图 7 GDP 增幅的优化及对应的人口承载力变化

Fig. 7 Optimization of GDP growth and the corresponding population capacity

场景二: 优化确定财政资金的投入方向.

场景仿真参数设定:

- 1) 以城市协调发展度最大化为优化指标;
- 2) 按城市宜居指标<sup>[10]</sup> 设定  $h_1, h_2, h_3, h_4$ ;
- 3) 固定 GDP 增幅: 8%;
- 4) 投资额: 80 亿元;
- 5) 仿真周期: 2 年.

该场景对应于这样的情形: 在 GDP 增幅以及城市可调配的财政资金已经确定的情况下, 如何确定财政资金的投入方向, 以最大化协调发展度. 从图 8 中可看出, 依据城市宜居指标, 制约该城市协调发展度进一步提高的主要瓶颈是道路、病床和绿地, 需要大力增加投入予以改善.

资源投入方向 (GDP 设定 8%, 年投资 80 亿)

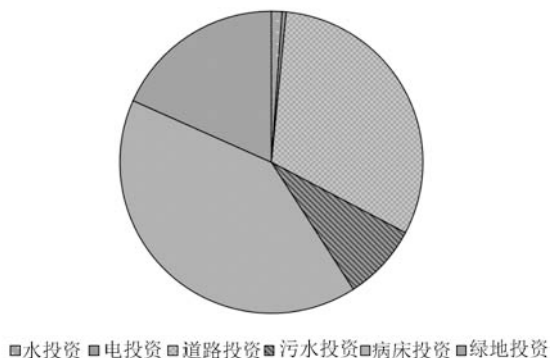


图 8 财政资金投入方向的优化结果

Fig. 8 Optimization results of financial investment fields

## 4 结束语

本文用系统科学的思想和方法以及智能方法, 对我国城市发展和运行过程中的一些重大问题进行了定量研究和分析. 所提出的方法应用于城市决策过程后, 有利于改变目前城市重大决策中主要依靠定性方法的现状, 对科学决策有推进作用. 同时, 所提出的方法是学科交叉和融合的成果, 形成了一个开放的研究领域, 学术上也很有发展前景. 下一步, 将重点深入特定城市的实际需求, 建立针对性更强的指标预报和分析模型, 辅助城市决策者进行相关决策.

## 致谢与说明

本文是作者相关工作报告和文章的整合, 部分内容引自作者之前的工作, 并在纪念钱学森诞辰 103 周年学术研究报告上报告, 特此说明. 过去几年中, 作者的研究工作得到了多个政府机构和科研院所的许多专业人士的支持和帮助, 在此深表感谢.

## References

- 1 Zhou Xi-Tan. Scientific development "Correct" China's city dream. *Science China Press*, Vol. 4, 5th, June, 2013 (周熙檀. 科学发展 "纠偏" 中国城市梦. *中国科学报*, 2013 年 6 月 5 日第 4 版)
- 2 Wang Li-Fang, Chen Chun-Xue. Decision model and its application of the development of water environment carrying capacity and economy coordination. *Science and Technology Management Research*, 2010, **30**(22): 214-218



(王莉芳, 陈春雪. 城市水环境承载力与经济协调决策模型及应用. 科技管理研究, 2010, **30**(22): 214–218)

- 3 Fu Hong-Yuan, Hu Yan. Review on the studies on urban comprehensive carrying capacity. *Urban Problems*, 2009, (5): 27–31  
(傅鸿源, 胡焱. 城市综合承载力研究综述. 城市问题, 2009, (5): 27–31)
- 4 Dang Xing-Hua, Zhao Jing, Zhang Ying-Xu. Research on theories and methods of measuring the coordinated development of urban agglomeration. *Modern Economic Science*, 2007, **29**(6): 110–115, 126  
(党兴华, 赵璟, 张迎旭. 城市群协调发展评价理论与方法研究. 当代经济科学, 2007, **29**(6): 110–115, 126)
- 5 Ma Hao. The research on the imbalanced economic coordinate development in Shandong Province. *China Business and Market*, 2011, **25**(2): 63–67  
(马浩. 山东经济非均衡协调发展的战略研究. 中国流通经济, 2011, **25**(2): 63–67)
- 6 Alquier P, Li X Y. Prediction of quantiles by statistical learning and application to GDP forecasting. In: *Proceedings of the 15th International Conference*. Lyon, France: Springer, 2012. 22–36
- 7 Liliana, Napitupulu T A. Artificial neural network application in gross domestic product forecasting: an Indonesia case. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Computing, Control and Telecommunication Technologies (ACT)*. Jakarta: IEEE, 2010. 89–93
- 8 Zhou Gan-Shi. Urban area as a representative complex metasystem. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2002, **2**(1): 7–9  
(周干峙. 城市及其区域 — 一个典型的开放的复杂巨系统. 交通运输系统工程与信息, 2002, **2**(1): 7–9)
- 9 Qian Xue-Sen. A new discipline of science — The study of open complex giant system and its methodology. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2011, **33**(6): 526–532  
(钱学森. 一个科学新领域 — 开放的复杂巨系统及其方法论. 上海理工大学学报, 2011, **33**(6): 526–532)
- 10 Chinese Society for Urban Studies, Scientific Evaluation Criteria for Livable City. Released by Ministry of Construction, PRC, 30 May, 2007  
(中国城市科学研究会, 宜居城市科学评价标准. 建设部 2007 年 5 月公布)



吴澄 清华大学自动化系教授, 中国工程院院士. 清华大学电机工程系本科及研究生. 主要研究方向为计算机集成制造系统、复杂系统 (包括制造系统和社会系统) 的建模、仿真和优化. 本文通信作者. E-mail: wuc@tsinghua.edu.cn

(WU Cheng Professor in the Department of Automation, Tsinghua University, a member of Chinese Academy of Engineering. He graduated from the Department of Electrical Engineering, Tsinghua University. His research interest covers computer integrated manufacturing system (CIMS), modeling, simulation and optimization of complex systems, including manufacturing systems and social systems. Corresponding author of this paper.)



刘民 清华大学自动化系教授. 主要研究方向为复杂制造系统的智能调度、智能操作优化.

E-mail: lium@tsinghua.edu.cn

(LIU Min Professor in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers intelligent scheduling and intelligent operational optimization of complex manufacturing systems.)



郝井华 2007 年在清华大学自动化系获得博士学位. 主要研究方向为复杂制造系统的建模、智能调度与优化.

E-mail: haojinghua@tsinghua.edu.cn

(HAO Jing-Hua Received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2007. His research interest covers modeling, intelligent scheduling and optimization of complex manufacturing systems.)



董明宇 2006 年在清华大学自动化系获得博士学位. 主要研究方向为复杂制造系统的建模、智能调度与优化.

E-mail: dmy@tsinghua.edu.cn

(DONG Ming-Yu Received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2006. His research interest covers modeling, intelligent scheduling and optimization of complex systems.)