

北上广深城市人口预测及其资源配置

王勇^{1,2}, 解延京¹, 刘荣¹, 张昊¹

(1. 东北财经大学统计学院, 大连 116025; 2. 东北财经大学博士后科研流动站, 大连 116025)

摘要: 人口数量持续增长是困扰超大型城市发展的重要因素, 适度人口为研究人口增长下的城市资源合理分配提供了较好的思路。本文以适度人口为切入点, 利用可能—满意度模型测算北京、上海、广州和深圳4座超大型城市2035年适度人口规模, 同时利用灰色BP神经网络模型预测各市2035年常住人口规模, 并基于适度人口规模测算和常住人口规模预测结果对各市部分资源的配置、规划情况进行倒逼分析, 提出人口增长下的资源配置方案。研究发现: ①在可能—满意度水平为0.6的条件下, 北上广深2035年适度人口规模分别为2152.69万人、2309.68万人、1498.93万人和1352.19万人, 均未超出政府规划红线; ②预测结果显示, 北上广深2035年常住人口规模均将超出适度人口规模和政府规划红线, 表现为适度人口规模<政府规划红线<常住人口规模; ③从适度人口角度出发, 在不影响经济社会发展与居住满意度前提下, 为应对未来人口增长, 2035年北京发电量和公园绿地面积需达到当前水平的2倍以上; 上海发电量、公园绿地面积和公共交通营运车辆分别需达到当前水平的2.27倍、2.22倍和2.35倍; 广州能源供应量和发电量需达到当前水平的3倍以上; 深圳能源供应量、发电量和卫生机构床位数需达到当前水平的3倍以上。本文有利于为协调大型城市人口与资源之间的可持续发展提供科学依据。

关键词: 超大城市; 适度人口; 人口增长; 可能—满意度; 资源配置

DOI: 10.11821/dlxb202102008

1 引言

人口大规模向大城市迁移是经济社会发展的客观规律, 大城市人口激增已在世界范围内成为普遍现象。随着大城市人口的不断聚集, 城市资源消耗和环境污染等问题愈发严峻^[1], 再加上大城市在应对人口增长方面存在诸多不足, 使得城市发展与城市人口增长之间的矛盾日益凸显, 城市可持续发展由此受到经济、社会、资源、环境等多方面因素的限制^[2]。出于对大城市病的担忧, 中国各大城市相继出台了人口总量控制政策, 但从历史发展看, 北京、上海等制定或预测的人口控制目标不断被突破, 刚性管控对于有效控制大城市人口规模在短期之内具有一定效果, 长期来看, 人口向大城市流动则取决于市场规律。大城市人口规模快速增长而没有提前的应对预案会引发一系列的大城市病, 严重影响城市的长远健康发展。

作为超大型城市, 北京、上海、广州和深圳(以下简称“北上广深”)4座城市面

收稿日期: 2020-03-09; 修订日期: 2020-09-30

基金项目: 国家社科基金青年项目(19CTJ008); “兴辽英才”计划青年拔尖人才(XLYC1907012); 辽宁省经济社会发展研究课题(2020lslktyb-036); 辽宁省教育厅项目(LN2019Q48) [Foundation: National Social Science Foundation of China, No.19CTJ008; "Xingliao Talent" Program, No.XLYC1907012; Economic and Social Development of Liaoning Province, No.2020lslktyb-036; Research Project of Education Department of Liaoning Province, No.LN2019Q48]

作者简介: 王勇(1988-), 男, 山东临沂人, 副教授, 硕导, 研究方向为人口统计、城市经济。E-mail: ywang@dufe.edu.cn

面临着不同程度的人口增长问题。根据北京、上海和广州的城市总体规划, 各市2035年常住人口规模分别控制在2300万人、2500万人和2000万人左右。虽然近年来北京、上海的人口增长速度得到了有效控制, 但两市当前人口规模已接近2035年的规划目标, 人口增长空间分别只有145.8万人和76.22万人, 急需进行资源规划和调整; 广州、深圳虽然人口增长还有一定空间, 但2018年两市的人口密度已分别达到2005人/km²、6484人/km², 因此提升人口容纳量、促进城市各类资源配置优化对广州和深圳同样重要。北上广深4市2018年人口情况如表1所示, 人口密度为常住人口规模与城市全域面积的比值。

表1 2018年北上广深4市人口情况

Tab. 1 The population data of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen in 2018

	北京	上海	广州	深圳
常住人口规模(万人)	2154.20	2423.78	1490.44	1302.66
人口密度(人/km ²)	1313.00	3823.00	2005.00	6484.00
城镇化率(%)	86.50	88.10	86.38	99.75
距2035年政府规划红线增长空间(万人)	145.80	76.22	509.56	697.34

适度人口是指在一定条件和目标之下区域能够承载的最适宜的人口规模, 它以区域内的最优人口数量为依托, 寻求人口增长与外部要素之间的平衡点, 对指导当今社会的人口发展有重要的作用^[3]。适度人口与实际人口之间的数量差异不仅能够反映城市人口压力, 衡量一座城市居民的生产和生活质量, 还能够反映城市各类资源设施对人口的容纳能力。适度人口能够更准确地发现当前城市发展中的盈余和不足, 促使在持续推进中国城市化进程中兼顾经济、环境、社会及各类资源、基础设施之间的均衡发展, 因此, 适度人口为可持续发展背景下大型城市应对人口快速增长提供了理论依据。早期的适度人口理论是在一定的自然资源、技术水平标准下对适度人口做静态分析且局限于单一的经济领域^[4], 即没有考虑城市经济的发展及社会资源承载能力的变化; 随着社会的发展和科学的进步, 适度人口与社会可持续发展之间的联系越来越紧密, 适度人口理论考虑到人口增长率的变化^[5], 并且逐步由单要素分析转向多要素分析, 由静态分析转向动态分析^[6], 社会资源、生态环境等因素开始引起学者的重视, 与经济因素一同被纳入适度人口的测算指标体系之中^[7-10]。总体来看, 适度人口问题的研究主要集中在经济、生态环境和社会资源领域^[11-14], 且大多是在单要素分析的基础上确定各指标权重并进行综合分析^[15], 以此来确定城市适度人口规模。

适度人口的测算方法主要有: 生态足迹法^[16]、P-E-R模型^[17]、可能—满意度(P-S)模型^[18]等方法。生态足迹法通过生物物理量定量测定人类活动生产的生态足迹和区域内生态承载力, 以此来测算生态适度人口容量并度量城市可持续发展程度, 但生态足迹模型只能测算生态适度人口, 不能衡量经济和社会发展等因素对适度人口规模的影响; P-E-R模型基于人口、经济和资源三要素, 通过研究区与参照区的对比计算获得研究区的相对适度人口规模; 可能—满意度模型^[19-20]是多目标决策模型中的一种, 它基于客观条件和特定目标标准, 将可能度函数与满意度函数进行并合, 进而得到综合多种影响条件下的可能—满意度结果。在可持续发展理念的引导下, 可能—满意度模型的应用逐渐成熟, 在研究中国城市适度人口规模上取得了较好的效果。

在对人口规模预测的研究中, 主要方法有Logistic模型^[21]、灰色模型^[22]和神经网络模型^[23]等。其中, 灰色模型^[24]所需的样本量较少, 且原始数列的随机性可以通过对原始数列进行累加而减弱; 神经网络模型^[25]具有类似人脑的学习能力, 对于很多复杂的非线性函数都可以做到近似逼近。这两种模型在人口预测中的应用更为广泛, 但是, 鉴于人口

规模的发展受到多种因素的影响,利用单一模型进行预测的局限性不可避免,组合模型在预测方面的应用逐渐受到学者们的欢迎,有研究将灰色模型与神经网络模型相结合得到灰色神经网络模型^[26-27],该模型结合了以上两种模型的优点,在应对不确定因素时精度更高,效果更好,在很多领域都有了较为广泛的应用。

总体来看,已有针对城市人口问题的研究存在以下几个方面的局限性:①目前少有同时针对多个大型城市适度人口的比较研究。仅对单一城市进行研究不利于发现各城市的相对优势及劣势,从而无法提出具有针对性的建议。②在指标选取方面,适度人口测算指标体系构建并不全面。现有大多研究的指标体系缺少对城市基础设施、科研经费等方面的考虑。同时,对逆向指标的考虑不足,如垃圾产生量、废水排放量等关乎城市生态和居民的生活环境,忽视此类指标将降低对城市短板问题分析的准确性。③当前研究缺少从适度人口角度对城市人口增长进行资源配置研究。已有研究缺乏利用适度人口模型及常住人口规模预测对城市容纳人口所需资源量的分析,忽视了适度人口规模对城市未来发展的倒逼作用,从而无法更深入、合理地城市未来资源进行规划。

基于以上分析,本文重点回答以下几个问题:①按照现行政策规划,北上广深4个超大型城市2035年的适度人口规模是多少?②2035年北上广深常住人口规模是多少?③如果2035年常住人口规模超出政府规划红线和适度人口规模(按照历史经验,这是大概率要发生的事情),城市将如何进行资源配置?由此,本文首先构建适度人口测算指标体系,利用可能—满意度模型对北上广深2035年的适度人口规模进行测算,然后利用灰色BP神经网络模型,预测2035年各市常住人口规模,最后基于适度人口规模测算和常住人口规模预测结果,对各市的城市资源进行倒逼分析,为各市应对未来人口增长提供资源配置方案。

与已有研究相比,本文的主要工作和创新点体现在以下几点:①同时对北上广深4座超大城市的适度人口规模进行测算。作为中国超大型一线城市,北上广深是中国城市发展的先行者和引领者,4座城市具有一定同质性的同时又有着不同的发展规律,但是同时面临着人口快速增长的现实压力。②从经济水平、资源供给、生态环境和社会生活4个方面构建更加完善的适度人口测算指标体系。综合考虑影响适度人口规模的各方面因素,构建包括教育、居民生活等因素在内的指标体系,有利于更准确地发现城市发展短板。③基于适度人口对北上广深的城市资源进行倒逼研究。国内外特大城市人口的发展经历表明,单纯的人口规模管控无法真正控制城市人口的增长。本文基于适度人口视角,对城市资源进行科学调整,确保城市资源配置达到最优以应对未来的人口增长,为各市未来可持续发展提供更科学的指导和建议。

2 模型构建与数据来源

2.1 基于可能—满意度模型的适度人口规模测算模型

可能—满意度模型是一种多指标综合评价方法,可以同时考虑多种因素对人口发展的影响,分为可能度和满意度两个方面。在适度人口测算体系中,可能度主要用来反映各类相关因素的总量指标在客观上达到某种程度的可能度大小,满意度主要用来反映居民对各类相关因素的人均指标在主观上的满意度大小。由可能度和满意度并合得到的可能—满意度则可以表示各指标同时满足客观的可能性和主观的满意性时的人口容纳能力,可能—满意度水平与城市适度人口规模的关系为:可能—满意度水平越高,说明居民的城市生活水平越好,则城市能够容纳的适度人口规模越小。

2.1.1 适度人口规模测算的指标体系构建 确定合适的影响人口规模变动的相关因素是测算城市适度人口规模的关键, 本文从北上广深4市的社会发展状况出发, 基于已有研究和数据的可得性、指标的代表性和可比性等原则, 将影响适度人口规模的各个指标归为经济水平、资源供给、生态环境和社会生活4个方面, 筛选出的22个指标及各指标对应各市权重如表2所示, 指标权重由公式(3)~(8)计算得到。

表2 可能一满意度指标体系
Tab. 2 The index system of possibility-satisfiability model

指标类型	可能性指标 (总量指标)	满意性指标 (人均指标)	权重			
			北京	上海	广州	深圳
经济水平	P_1 GDP(亿元)	S_1 人均GDP(元/人)	0.040	0.050	0.045	0.043
	P_2 第二产业增加值(亿元)	S_2 第二产业人均增加值(元/人)	0.032	0.035	0.032	0.044
	P_3 第三产业增加值(亿元)	S_3 第三产业人均增加值(元/人)	0.043	0.060	0.049	0.041
	P_4 社会消费品零售总额(亿元)	S_4 社会消费品人均零售额(元/人)	0.038	0.065	0.043	0.035
	P_5 进出口总额(亿美元)	S_5 人均进出口总额(美元/人)	0.031	0.035	0.036	0.055
	P_6 旅游外汇收入(万美元)	S_6 人均旅游外汇收入(美元/人)	0.035	0.026	0.044	0.026
	P_7 就业人口(万人)	S_7 就业人口占总人口比例(%)	0.039	0.058	0.043	0.042
资源供给	P_8 耕地面积(万 hm^2)	S_8 人均耕地面积(m^2 /人)	0.032	0.025	0.034	0.027
	P_9 全年用水总量(亿 m^3)	S_9 全年人均用水总量(m^3 /人)	0.078	0.054	0.053	0.038
	P_{10} 全年用电总量(亿 $kw \cdot h$)	S_{10} 全年人均用电总量($kw \cdot h$)	0.036	0.035	0.040	0.047
	P_{11} 能源消费总量(万 t 标准煤)	S_{11} 人均能源消费总量(t 标准煤/人)	0.030	0.032	0.041	0.050
生态环境	P_{12} 废水排放总量(万 t)	S_{12} 人均废水排放总量(t/人)	0.024	0.029	0.042	0.090
	P_{13} 生活垃圾产生量(万 t)	S_{13} 人均生活垃圾产生量(t/人)	0.032	0.030	0.047	0.039
	P_{14} 公园绿地面积(hm^2)	S_{14} 人均公园绿地面积(m^2 /人)	0.060	0.030	0.048	0.054
社会生活	P_{15} 卫生机构床位数(张)	S_{15} 每万人卫生机构床位数(张/万人)	0.050	0.052	0.045	0.043
	P_{16} 道路面积(万 m^2)	S_{16} 人均道路面积(m^2 /人)	0.072	0.026	0.064	0.024
	P_{17} 房屋建筑施工面积(万 m^2)	S_{17} 人均房屋建筑施工面积(m^2 /人)	0.037	0.054	0.080	0.052
	P_{18} 公共交通营运车辆(辆)	S_{18} 每万人公共交通营运车辆(辆/万人)	0.056	0.059	0.044	0.072
	P_{19} R&D经费内部支出(亿元)	S_{19} 人均R&D经费内部支出(元/人)	0.037	0.062	0.042	0.040
	P_{20} 快递件数(万件)	S_{20} 人均快递件数(件/人)	0.073	0.131	0.049	0.059
	P_{21} 大学生在校生数(万人)	S_{21} 每万人大学生在校生数(人)	0.069	0.021	0.034	0.033
	P_{22} 中小学生在在校生数(万人)	S_{22} 每万人中小学生在在校生数(人)	0.055	0.032	0.044	0.044

这22个指标基本涵盖了城市人口规模变动的各方面相关因素, 每个指标又可以按照总量指标和人均指标分为可能度情况和满意度情况两个方面, 可能度情况由总量指标表示, 满意度情况由人均指标表示。

2.1.2 可能一满意度模型构建 将可能一满意度模型中可能度和满意度分别定义为 $P \in [0, 1]$ 和 $S \in [0, 1]$ 。如果一个事物同时具有可能度和满意度两种属性, 则可以将可能度和满意度并合成一条关于属性 α 的可能一满意度曲线, 从而定量地描述该事物既可能又满意的程度, 记可能一满意度为 ω , 当 $\omega = 0$ 时, 表示或者完全不可能, 或者完全不能令人满意; 当 $\omega = 1$ 时, 表示 100% 的既可能又满意, 因此, ω 的取值位于 $[0, 1]$, 该区间的实数便可以表示不同程度的可能一满意度。本文采用将可能度和满意度进行弱并合的方法, 得到基于可能一满意度模型的适度人口规模测算模型见公式(1):

$$\omega(\alpha) = \begin{cases} \frac{-r_B + \alpha s_B}{(r_A - r_B) - \alpha(s_A - s_B)}, & 0 < \omega < 1 \\ 1, & \omega \geq 1 \\ 0, & \omega \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

当 $0 < \omega < 1$ 时, 将式 (1) 稍作变形, 得到式 (2):

$$\alpha = \frac{\omega(r_A - r_B) + r_B}{\omega(s_A - s_B) + s_B} \quad (2)$$

式中: ω 表示可能—满意度; α 表示适度人口规模; r_A 、 r_B 、 s_A 、 s_B 分别表示可能目标和满意目标的下限值和上限值。

各指标的可能度和满意度下限值 r_A 、 s_B 取各市的当前水平, 而上限值 r_B 、 s_A 则根据各市的实际情况, 参照各市城市规划及预测结果给出; 逆向指标 (如废水排放量、生活垃圾产生量) 的满意度上限值 s_A 取当前水平, 下限值 s_B 由城市规划或预测结果给出。各正向指标 r_B 、 s_A 及逆向指标 r_B 、 s_B 确定方法有 4 种。① 可能度和满意度上限值均根据各市 2035 年城市规划得到。这类指标包括北京全年用水总量、能源消费总量、公园绿地面积、卫生机构床位数、上海耕地面积、全年用水总量、公园绿地面积、R&D 经费内部支出及广州卫生机构床位数; ② 各市经济水平指标可能度和满意度上限值均根据指标历年增长规律测算得到。例如对于北京 GDP 指标, 自 2015 年以来北京地区生产总值增速保持在 6%~7% 左右, 且呈现逐年下降的趋势, 为适应经济高质量发展的要求, 将北京 2019—2035 年经济平均增速设定为 6%, 进而测算北京 2035 年地区生产总值上限值; ③ 各市道路面积指标可能度和满意度上限值均根据国家建设标准 (7~15 m²/人) 得到。例如北京 2017 年人均道路面积为 4.77 m²/人, 所以将北京道路面积满意度上限值设为 10 m²/人, 而北京道路面积可能度上限值根据 2035 年城市规划及国家建设标准设为 23000 万 m²; ④ 各市其他指标可能度和满意度上限值均以年份为自变量, 指标历年取值为因变量, 做回归拟合, 根据回归预测结果得到。例如对于北京全年用电总量指标, 取指标预测值的置信水平为 0.99 时的置信区间, 将总量指标的置信区间左端点值设为可能度上限值, 将人均指标的置信区间右端点值设为满意度上限值。

赋予可能—满意度不同的值, 则可得到不同可能—满意度水平下的适度人口规模, 可能—满意度水平取值在 [0, 1] 之间, 取值越高代表居民的生活水平越好, 0.6~1 为普遍可接受的可能—满意度水平, 其中, 0.6 为目前研究普遍采用的可能—满意度基准标准^[19], 低于 0.6 一般表示城市的可能—满意度水平较差。本文分别测算可能—满意度水平为 0.6、0.7、0.8 和 0.9 下的适度人口规模, 并且将可能—满意度达到 0.6 作为基准标准。

得到不同可能—满意度下各指标对应的适度人口规模后, 考虑到一些指标相对其他指标对适度人口规模具有更强的约束力, 且城市经济水平、资源供给、生态环境及社会生活的各个指标之间存在相互影响、相互协调, 为做到主客观相结合, 本文采用线性加权求和的方法, 得出各市 2035 年综合各个指标影响下的适度人口规模。首先选取极差法对原始数据进行无量纲化处理, 以消除各指标间因单位不同造成的影响, 其次, 利用熵值法确定各指标权重 (表 2)。对适度人口规模测算指标体系的赋权步骤如下:

(1) 数据无量纲化处理 (极差法)

正向指标:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)}, \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

逆向指标:

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_j) - X_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)}, \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: X_{ij} 为第 i 年份第 j 项指标数据; X'_{ij} 为第 i 年份第 j 项指标数据标准化后的值; $\max(X_j)$ 为该项指标数据中的最大值; $\min(X_j)$ 为该项指标数据中的最小值; m 为评价年数; n 为指标数。

(2) 计算第 i 年第 j 项指标的占比:

$$p_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (5)$$

(3) 计算第 j 项指标信息熵:

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (0 \leq e_j \leq 1) \quad (6)$$

(4) 计算第 j 项指标的信息熵冗余度:

$$g_j = 1 - e_j \quad (7)$$

(5) 计算指标 X_j 的权重:

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (8)$$

城市总适度人口计算公式为:

$$\alpha = \sum_{j=1}^n W_j \alpha_j \quad (9)$$

式中: α 表示总适度人口规模; n 为指标数; W_j 为第 j 项指标的权重; α_j 为第 j 项指标对应的适度人口规模。

2.2 常住人口规模预测模型——灰色 BP 神经网络

2.2.1 灰色 GM(1, 1) 模型 GM(1, 1) 模型是一阶单变量的微分方程动态模型, 计算方法为:

(1) 设原始人口数据量为 m , 对原始人口数据 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(i), i = 1, 2, \dots, n\}$, 按照 $x^{(0)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$ 进行累加, 生成新序列 $x^{(1)}$:

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(k), k = 1, 2, \dots, n\} \quad (10)$$

(2) 构造一阶线性微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + \alpha x^{(1)} = \mu \quad (11)$$

(3) 由最小二乘法求出参数 α 和 μ 的值;

(4) 得到微分方程的时间响应序列:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{\mu}{\alpha} \right] e^{-\alpha k} + \frac{\mu}{\alpha} \quad (12)$$

(5) 对生成序列的人口预测值进行累减还原, 得到还原序列的人口预测公式:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (13)$$

2.2.2 BP 神经网络模型 BP 神经网络又称误差反向传播神经网络, BP 算法的学习过程分为向前传播和向后传播两部分, 向前传播方向为输入层—隐含层—输出层, 每一层神经元影响下一层的神经元, 但不跨层次影响, 网络输出与样本的期望输出相减得到误差 e , 如果误差 e 不能满足事先设定的阈值, 则进行反向传播, 沿着原来路径逐层返回, 调整

各个神经元之间的权重,再进行正向传播,不断循环这个过程,直到误差达到事先设定的阈值,则停止传播。神经网络模型将数据集分为训练集和测试集,训练集用来训练网络,测试集用来检验网络模型的拟合效果。

2.2.3 基于灰色BP神经网络的北上广深常住人口规模预测步骤 灰色GM(1, 1)模型建模所需的数据量较少,运算方便且可以弱化数据的随机性,但对于非线性数据的处理能力较弱;神经网络模型可以近似逼近任何非线性函数,但需要的数据量较大,小样本数据训练出的神经网络模型的外延性很差,不能对未来数据进行较好地预测。本文选取的各市人口数据较少,且4座城市的人口增长规律各有不同,利用单一预测模型不能得到相对于4座城市都较好的预测效果,而灰色神经网络模型恰好将灰色模型和神经网络模型相结合,两者优缺互补,可以有效减小模型的预测误差,所以本文选择灰色BP神经网络模型对未来常住人口规模进行预测。

灰色BP神经网络的原理是将GM(1, 1)模型的预测数据作为BP神经网络的输入值,将真实人口数据作为BP神经网络的输出值,对神经网络进行训练,随后将利用GM(1, 1)模型预测得到的未来人口数据作为输入部分,进行仿真,得到相应的常住人口规模。

基于数据的可获得性和各市人口数据的增长幅度,本文分别选取北京(1978—2017年)、上海(1978—2017年)、广州(2000—2017年)和深圳(2000—2017年)年末常住人口数据进行2035年常住人口规模的预测。构建灰色BP神经网络模型进行常住人口规模预测的基本步骤如下:①对原始数据用GM(1, 1)模型进行拟合,得到相应的人口预测数据;②将利用GM(1, 1)模型预测得到的北京(1978—2013年)、上海(1978—2013年)、广州(2000—2015年)和深圳(2000—2015年)人口数据作为BP神经网络训练集的输入层,各市人口相应的真实值作为训练集的输出层,对BP神经网络进行训练,得到相应的权值和阈值;③将利用GM(1, 1)模型预测得到的北京(2014—2017年)、上海(2014—2017年)、广州(2016—2017年)和深圳(2016—2017年)人口数据作为BP神经网络测试集的输入层,进行网络仿真,得到相应的各市人口预测值,判断模型拟合效果;④将各市利用GM(1, 1)模型预测得到的2018—2035年人口数据作为输入数据,利用训练好的网络模型对各市未来18年的常住人口规模进行预测。

2.3 数据来源

本文所选取的数据均来自历年《中国统计年鉴》《北京市统计年鉴》《上海市统计年鉴》《广州市统计年鉴》《深圳市统计年鉴》《中国城市统计年鉴》和各市2035年城市总体规划等资料文件。其中,选取各市2000—2017年各指标数据对2035年适度人口进行测算。需要说明的是,根据各市2035年城市总体规划,北京、上海和广州2035年常住人口规模分别控制在2300万人、2500万人和2000万人,深圳2035年城市总体规划尚未出台,考虑到深圳“十三五”规划中2020年人口规模控制在1480万人,与广州的1550万人相近,依目前来看,深圳人口少于广州人口,且人口密度更大,同时深圳与广州的发展趋势相近,因此本文认为深圳2035年政府规划红线将不会超过广州2035年政府规划红线,并以广州市2035年的2000万政府规划红线作为深圳2035年政府规划红线。

3 2035年北上广深适度人口规模测算

由可能—满意度计算公式及可能度、满意度临界值计算出不同可能—满意度下各指标对应的适度人口规模,同时利用由熵值法确定出的各指标权重对适度人口规模进行加权计算,得到不同可能—满意度水平下北上广深4市最终的2035年适度人口规模(表3)。

表3 2035年北上广深不同可能—满意度水平下适度人口规模
 Tab. 3 The optimum population of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen to different possibility-satisfiability degrees in 2035

		指标权重	不同可能—满意度水平下的适度人口规模(万人)			
			0.6	0.7	0.8	0.9
北京	经济水平	0.258	2369.18	2074.52	1808.55	1566.81
	资源供给	0.176	2115.50	2009.62	1908.72	1812.40
	生态环境	0.117	2132.10	2095.99	2059.79	2023.49
	社会生活	0.449	2048.23	1847.57	1668.80	1507.98
	总适度人口		2152.69	1963.71	1792.83	1637.05
上海	经济水平	0.329	2377.26	2043.57	1750.50	1490.66
	资源供给	0.146	2241.70	2059.94	1893.69	1740.76
	生态环境	0.090	2389.90	2315.40	2246.14	2181.48
	社会生活	0.436	2259.59	2009.63	1789.42	1593.41
	总适度人口		2309.68	2057.67	1834.73	1635.64
广州	经济水平	0.292	1678.59	1449.27	1242.36	1054.47
	资源供给	0.167	1347.01	1274.49	1207.58	1145.58
	生态环境	0.138	1613.60	1562.81	1513.06	1464.26
	社会生活	0.403	1392.45	1251.31	1126.23	1013.94
	总适度人口		1498.93	1355.97	1227.11	1109.90
深圳	经济水平	0.286	1402.11	1214.48	1046.74	895.45
	资源供给	0.162	1326.60	1223.00	1127.00	1037.59
	生态环境	0.183	1314.95	1278.04	1241.31	1204.57
	社会生活	0.369	1343.19	1160.99	990.04	853.58
	总适度人口		1352.19	1207.75	1074.43	959.60

(1) 在不同可能—满意度水平下, 广州和深圳的适度人口规模波动较小, 而北京和上海的适度人口规模波动较大。在0.6和0.9两种可能—满意度水平下, 广州适度人口规模分别为1498.93万人和1109.90万人, 深圳适度人口规模分别为1352.19万人和959.60万人, 北京适度人口规模分别为2152.69万人和1637.05万人, 上海适度人口规模分别为2309.68万人和1635.64万人。随着可能—满意度水平的降低, 北京、上海相比广州、深圳有着更大幅度的适度人口规模上涨, 也就是说, 北京、上海两市发展的优化空间更大, 更容易通过城市的科学合理规划提升适度人口规模, 经济发展水平的提高以及社会基础设施的完善可以进一步带动城市对适度人口的容纳能力; 北京、上海当前常住人口规模及2035年适度人口规模远高于广州、深圳, 说明北京、上海各方面指标对人口的容纳能力更强; 而各指标对人口的容纳能力往往存在上限, 因此北京、上海在城市发展规划中更加注重加强各方面因素之间的相互促进能力, 进而从整体上提高城市适度人口的容纳水平。

(2) 资源供给和生态环境作为城市适度人口容纳量的重要限制因素, 在广州和深圳表现更为明显。广州、深圳的资源供给和生态环境指标能够容纳的适度人口规模相对北京、上海较低, 在可能—满意度水平为0.6的条件下, 广州资源供给承载适度人口规模为1347.01万人, 深圳资源供给承载适度人口规模为1326.60万人, 低于北京资源供给承载适度人口规模2115.50万人和上海资源供给承载适度人口规模2241.70万人; 广州生态环境承载适度人口规模为1613.60万人, 深圳生态环境承载适度人口规模为1314.95万人, 低于北京生态环境承载适度人口规模2132.10万人和上海生态环境承载适度人口规模

2389.90万人。广州、深圳较低的资源供给和生态环境承载规模,反映了当前资源消耗高、浪费大、环境污染等问题,在城市发展中需更加注重资源调配和环境改善,其在城市资源供给和生态文明建设方面有较大的改进空间。

长期以来,北上广深4市更多的是追求经济的快速发展和城市建设规模的扩大,而忽略了生态环境的承载压力,造成了资源短缺、资源利用率低下和污染严重等一系列问题。虽然近几年在国家出台一系列保护生态环境的政策措施后,各大城市开始注重对资源和环境的保护,但生态环境在短期内并不能得到很好的改善,这是导致生态环境限制适度人口规模增长的重要原因。同时,生态环境承载能力的下降对经济和社会发展也会起到一定的限制作用,从而对城市的可持续发展构成巨大压力。

4 2035年北上广深常住人口规模预测及人口增长下的资源配置

4.1 2035年北上广深常住人口规模预测

为更好地结合2035年适度人口规模测算结果,对各市未来发展方向提出有针对性的合理建议,本文对2035年各市常住人口规模进行预测。灰色BP神经网络测试集输出结果如表4所示。通过计算可得,灰色BP神经网络模型测试集预测结果的平均绝对百分误差MAPE都控制在10%以内,说明灰色BP神经网络模型的预测效果较好,可以利用该模型对常住人口规模进行预测。

表4 北上广深灰色BP神经网络测试集输出结果(万人)

Tab. 4 The output of the grey BP neural network test set ($\times 10^4$)

	北京		上海		广州		深圳	
	真实值	预测值	真实值	预测值	真实值	预测值	真实值	预测值
2014年	2151.60	2158.20	2425.68	2452.80				
2015年	2170.50	2218.10	2415.27	2479.70				
2016年	2172.90	2274.60	2419.70	2503.50	1404.35	1425.00	1190.84	1112.40
2017年	2170.70	2327.00	2418.33	2524.80	1449.84	1499.60	1252.83	1125.60
MAPE(%)	3.60		2.91		2.45		8.37	

将各市利用GM(1, 1)模型预测出的2018—2035年人口数据作为输入数据,利用训练好的网络模型对各市未来18年的常住人口规模进行预测,得到北上广深2035年常住人口规模分别为2659.80万人、2663.20万人、2193.70万人和2028.00万人。各市未来人口预测增长趋势如图1所示。

《国家人口发展规划(2016—

2030年)》指出,中国人口总规模增长惯性减弱,农村人口向城镇转移势头将有所减弱。目前,中国超大型城市人口正逐渐摆脱以往高速扩张的发展模式,转为平稳增长,常住人口规模预测则应着重考虑近几年人口规模变化情况,从而发现人口增长的新规

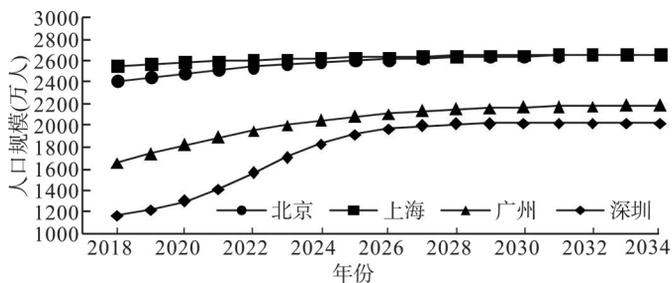


图1 北上广深未来人口预测增长趋势

Fig. 1 The future population growth trend of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen

律, 本文采用的灰色BP神经网络模型较为全面地考虑了近期数据, 弥补了时间序列等模型过于依赖历史数据的不足, 测试集预测结果的MAPE也表明模型较为可靠。实际上, 北京自2016年以来, 常住人口规模出现3年连降的情况, 上海2015年常住人口规模较2014年减少10.41万人, 2017年常住人口规模较2016年减少1.37万人, 由此可知, 北京和上海的人口增长趋势明显放缓, 图1也表明, 北京和上海的常住人口规模增长趋势已经趋于平稳; 而广州和深圳的人口数量在未来几年仍有部分上涨空间, 但当人口规模达到2000万左右时, 增长趋势同样趋于平缓, 人口规模的发展处于稳定状态, 预测结果进一步表明了中国超大型城市人口增长正趋于平稳的发展态势。

4.2 北上广深适度人口规模、政府规划红线、常住人口规模的综合比较

通过对北上广深2035年适度人口规模的测算以及常住人口规模的预测, 结合政府规划数据, 得到北上广深4市人口情况汇总结果(表5)。

表5 北上广深4市人口情况汇总(万人)

Tab. 5 Summary of the population data of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen ($\times 10^4$)

	北京	上海	广州	深圳
2017年常住人口规模	2170.70	2418.33	1449.84	1252.83
2035年政府规划红线	2300.00	2500.00	2000.00	2000.00
2035年适度人口规模($\omega=0.6$)	2152.69	2309.68	1498.93	1352.19
2035年常住人口规模	2659.80	2663.20	2193.70	2028.00

由表5可知, 2035年北上广深4市的人口增长都将超出政府规划红线。北京和上海2017年常住人口规模已经完全超出2035年适度人口规模, 而2035年常住人口规模并没有远超适度人口规模。这意味着在2035年之前, 北京和上海的人口规模并不会出现爆发性增长。广州和深圳2017年常住人口规模与2035年适度人口规模相比还有一定上升空间, 但2035年两市常住人口规模却远超适度人口规模, 说明未来十几年内, 广州和深圳将迎来一波人口规模的大增长, 相对于2017年, 2035年广州常住人口规模预计将增长700万人, 深圳常住人口规模预计将增长800万人。

4.3 2035年常住人口规模超出适度人口规模下的城市资源配置

城市资源的承载能力及城市基础设施的建设水平是城市赖以生存和发展的基础, 在一定程度上可以反映城市的综合发展潜力。本部分利用常住人口规模预测结果对城市部分资源和基础设施情况进行倒逼, 测算可能一满意度水平为0.6条件下的满足城市人口增长所需的资源量, 并对城市资源的合理配置进行分析, 以此来实现城市适度人口规模逐步向城市实际人口规模的靠近。

资源配置指标的选择: 考虑到未来很长一段时间内促进经济发展仍然是各城市的主要发展方向, 资源配置研究将不考虑经济发展相关指标; 资源供给和生态环境是城市适度人口容纳量的主要相关因素, 人口增加将使城市资源、环境压力不断增大, 因此城市资源供给、生态环境相关指标将作为资源配置研究的重点; 对于社会生活, 本文将选取与居民生活密切相关的指标进行资源配置研究, 其中医疗卫生是保障居民健康的关键, 公共交通则是日常生活中必不可少的城市设施, 并且此类指标在本文构建的指标体系中所占权重大、能容纳的人口量低, 因此着重考虑医疗和交通两类指标, 而对于与居民生活相关性较小或权重较低的指标不做分析。综上, 选择耕地面积、全年用水总量、全年用电总量、能源消费总量、公园绿地面积、卫生机构床位数和公共交通营运车辆7项指标进行倒逼分析, 得出可能一满意度水平为0.6条件下的2035年理想值, 并给出各指标理想值与现状值的比值(表6)。

表6 2035年北上广深应对人口增长的资源配置结果

Tab. 6 The results of resource allocation to cope with population growth of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen in 2035

		北京	上海	广州	深圳
耕地面积(万 hm ²)	现状值	21.37	27.94	9.21	0.37
	理想值	38.49	40.94	16.92	1.00
	比值	1.80	1.47	1.84	2.71
全年用水总量(亿 m ³)	现状值	39.50	104.80	23.81	19.58
	理想值	75.54	178.73	66.67	38.28
	比值	1.91	1.71	2.80	1.96
全年用电总量(亿 kw·h)	现状值	1066.89	1526.77	869.59	884.49
	理想值	2607.68	3463.91	3726.29	4544.81
	比值	2.44	2.27	4.29	5.13
能源消费总量(万 t 标准煤)	现状值	7132.80	11858.96	5961.97	4272.64
	理想值	13640.36	24263.49	19272.48	14499.72
	比值	1.91	2.05	3.23	3.39
公园绿地面积(hm ²)	现状值	31019	19805	26863	19980
	理想值	64385	44036	62043	65629
	比值	2.08	2.22	2.31	3.28
卫生机构床位数(张)	现状值	120557	134607	90222	43868
	理想值	246164	225959	260944	187698
	比值	2.04	1.68	2.89	4.28
公共交通营运车辆(辆)	现状值	30966	17461	17260	17430
	理想值	61925	40974	39130	47694
	比值	2.00	2.35	2.27	2.74

(1) 不同城市缓解人口压力的紧迫性不尽相同, 表现为深圳紧迫性最强, 其次为广州、上海和北京。北京和上海各个指标的比值大部分介于1.5~2.5之间, 而广州和深圳各个指标的比值大部分高于2.5, 特别是深圳全年用电总量、能源消费总量、卫生机构床位数3个指标比值均大于3.3, 这意味着广州和深圳提升城市人口承载能力的需求更加迫切。从现实角度看, 北京和上海由于人口政策的严格控制, 城市压力随着人口增速的下降得到缓解; 而广州和深圳相对宽松的落户政策和就业机会吸引了大量外来人员, 两市正处于人口规模快速增长阶段, 对于城市资源的需求逐步加大。

(2) 北京需着重在发电量和城市绿化方面加大调节力度。北京2017年全年用电总量和公园绿地面积分别为1066.89亿kw·h和31019 hm², 而2035年理想值分别为2607.68亿kw·h和64385 hm², 是当前水平的两倍以上, 这两项指标是北京将来最需要提升的两方面。北京市所有指标的比值均大于1, 说明当前资源量并不能满足2035年适度人口承载需求。全年用水总量、能源消费总量、卫生机构床位数和公共交通营运车辆这4项指标的比值分别为1.91、1.91、2.04和2.00, 均面临供应量不足的风险。值得注意的是, 北京公共交通营运车辆现状值为30966辆, 远高于上海、广州和深圳, 但未来仍将会有一倍的额外公共交通营运车辆需求, 这意味着北京市增加公共交通营运车辆、提升公共交通营运效率同样紧迫。

(3) 上海需着重在发电量、城市绿化和公共交通方面加大调节力度。上海2017年全年用电总量、公园绿地面积和公共交通营运车辆分别为1526.77亿kw·h、19805 hm²和

17461辆,2035年理想值分别为3463.91亿 $\text{kw}\cdot\text{h}$ 、44036 hm^2 和40974辆,这3项指标是上海提升人口容纳量最迫切的3个方面。其中,上海当前全年用电总量在4个城市中处于最高水平,因此提高电力供应方面的紧迫性较改善城市绿化和公共交通更高。上海市所有指标的比值均大于1,都面临供应不足的风险。耕地面积、全年用水总量、能源消费总量和卫生机构床位数的比值较低,分别为1.47、1.71、2.05和1.68,并且在4座城市所有指标的比值中均处于较低水平,反映出上海的耕地面积、水资源、电量供应和卫生医疗服务相对其他3市较为充足和完善。

(4)广州需着重在发电量、能源供应两方面加大调节力度。广州2017年全年用电总量和能源消费总量分别为869.59亿 $\text{kw}\cdot\text{h}$ 和5961.97万t标准煤,2035年理想值分别为3726.29亿 $\text{kw}\cdot\text{h}$ 和19272.48万t标准煤,两项指标的比值均高于3,应成为广州提升人口容纳量的首要方面。全年用水总量、公园绿地面积、卫生机构床位数和公共交通营运车辆4项指标的比值均大于2而又小于3,是广州提升人口容纳量的重要方面。其中全年用水总量的比值均高于其他3座城市的相应比值,说明广州是4座城市中最需要提高供水量的城市。广州耕地面积比值为1.84,资源调整的紧迫性相对低于其他指标,但也需要进行合理调配,从整体上提高城市人口容纳能力。

(5)深圳需着重在发电量、能源供应和卫生医疗服务3个方面加大调节力度。深圳2017年全年用电总量、能源消费总量和卫生机构床位数分别为884.49亿 $\text{kw}\cdot\text{h}$ 、4272.64万t标准煤和43868张,2035年理想值分别为4544.81亿 $\text{kw}\cdot\text{h}$ 、14499.72万t标准煤和187698张,理想值均超出现状值的两倍,急需从以上3方面提升城市人口容纳量。全年用水总量、公园绿地面积和公共交通营运车辆指标的比值分别为1.96、3.28和2.74,同样居于较高水平。耕地面积现状值为0.37万 hm^2 ,远低于北京、上海和广州,但其比值为2.71,说明相对于其他城市来说,耕地面积对深圳人口容纳量的制约作用较大。深圳人口增速快且密度大,是制约城市人口容纳量的一个关键因素,因此引导过密区域人口向城市外围转移以降低人口密度是提升深圳人口容纳量的重要方面。

5 结论与政策建议

5.1 结论

(1)在可能—满意度水平为0.6的条件下,北上广深2035年适度人口规模分别为2152.69万人、2309.68万人、1498.93万人和1352.19万人,均未超出政府规划红线。且北京和上海在不同可能—满意度水平下的适度人口规模波动大于广州和深圳,城市发展的优化空间也更大。

(2)预测结果显示,北上广深2035年常住人口规模均将超出适度人口规模和政府规划红线,表现为适度人口规模<政府规划红线<常住人口规模。

(3)北京需着重在发电量和城市绿化方面加大调节力度,2035年发电量和公园绿地面积均需达到当前水平的2倍以上;上海需着重在发电量、城市绿化和公共交通方面加大调节力度,2035年发电量、公园绿地面积和公共交通营运车辆分别需达到当前水平的2.27倍、2.22倍和2.35倍;广州需着重在发电量和能源供应方面加大调节力度,2035年发电量和能源供应量均需达到当前水平的3倍以上;深圳需着重在发电量、能源供应和卫生医疗服务方面加大调节力度,2035年发电量、能源供应量和卫生机构床位数均需达到当前水平的3倍以上。

5.2 政策建议

(1) 北京应以提升发电能力和城市绿化的人口容纳量为重点。逐渐摆脱传统发电方式对发电量的限制,提高配电网及电力设备质量;进一步扩大绿地面积,改善城市绿化,加强生态环境建设;加快北京非首都功能疏解集中承载地雄安新区的基础设施和公共服务设施建设,做好北京与雄安新区的资源对接;推动顺义、怀柔等区域经济结构向“高精尖”转型,着力推进怀柔科学城建设发展,提升原始创新和技术应用能力;加强交通网络体系建设,利用市郊铁路发展北京区域快线,实现北京周边地区的高效互通,减轻北京人口压力。

(2) 上海应以提升发电能力、城市绿化以及公共交通的人口容纳量为重点。保证高温条件下城市电网安全运行,加大对城市发电技术创新的资金投入,提高发电能力和电网负荷能力;合理规划用地规模,增加城市绿地面积,加大重点区域绿化建设,推进工业区转型增绿;优化地面公交线网,继续拓展水上客运服务功能,加快长三角区域城际铁路网规划和建设,为郊区和长三角毗邻地区提供便捷服务;同时,依托长三角城市群,加强区域间紧密协作,逐渐向近郊区、远郊区依次疏解城市非核心功能。

(3) 广州应以提升能源供应和发电能力的人口容纳量为重点。加大科研经费投入和环保投资,发展太阳能、风能、和海洋能等新技术,尽快实现产业转型升级;将能源发展与“互联网+”相结合,发展智慧能源产业,实现能源信息互联互通;有序向周边城市疏解非核心功能,推进南沙副中心建设,实现产业和人口的合理扩散,制定科学的公共服务政策;积极研发节水技术,严格水资源管理。

(4) 深圳人口密度过大造成其对各类资源的需求都比较大,因此应重点降低密集城区人口密度。健全城市公共设施建设,促进公共服务的均等化分配;对各类旧区进行综合整治,推进城中村、旧工业区拆除重建,引导城市结构更新;加快深汕特别合作区建设,完善深圳、飞地及周围地区之间的轨道交通建设,扩大人口社会经济活动半径,缓解深圳产业用地压力,通过企业和新技术的流入带动汕尾发展,为飞地及周围地区创造更多的就业机会,从而解决深圳人口众多、住房压力大等问题。

参考文献(References)

- [1] Niu Fangqu, Sun Dongqi. Modelling the sustainability of China's growth based on the resource and environmental carrying capacity. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2604-2613. [牛方曲, 孙东琪. 资源环境承载力与中国经济发展可持续性模拟. *地理学报*, 2019, 74(12): 2604-2613.]
- [2] Wang D L, Shi Y H, Wan K D. Integrated evaluation of the carrying capacities of mineral resource-based cities considering synergy between subsystems. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105701. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105701.
- [3] Liu Chang. The research of optimum population theory's formation evolution and practical significance [D]. Kunming: Yunnan University, 2016. [刘畅. 适度人口理论的形成、演化及其现实意义研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.]
- [4] Dasgupta P S. On the concept of optimum population. *The Review of Economic Studies*, 1969, 36(3): 295-318.
- [5] Renström T I, Spataro L. The optimum growth rate for population under critical-level utilitarianism. *Journal of Population Economics*, 2011, 24(3): 1181-1201.
- [6] Liu Yulin. Analysis on early warning and proper degree scale of population for sustainable development in China. *China Population, Resources and Environment*, 2000, 10(3): 97-99. [刘渝琳. 我国可持续发展中的人口适度规模及预警分析. *中国人口·资源与环境*, 2000, 10(3): 97-99.]
- [7] Shi L Y, Li D, Zhao J Z. A method to estimate urban optimum population conditions: A case study of Xiamen, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2010, 17(4): 324-328.
- [8] Pimentel D, Giampietro M, Bukkens S G F. An optimum population for North and Latin America. *Population and Environment*, 1998, 20(2): 125-148.
- [9] Pimentel D, Harman R, Pacenza M, et al. Natural resources and an optimum human population. *Population and*

- Environment, 1994, 15(5): 347-369.
- [10] Gao Xiaolu, Chen Tian, Fan Jie. Population capacity in the Wenchuan earthquake reconstruction areas. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(2): 164-176. [高晓路, 陈田, 樊杰. 汶川地震灾后重建地区的人口容量分析. *地理学报*, 2010, 65(2): 164-176.]
- [11] Lianos T P, Pseiridis A. Sustainable welfare and optimum population size. *Environment, Development and Sustainability*, 2016, 18(6): 1679-1699.
- [12] Gao Jiankun. On the optimum population problem. *Journal of Management*, 2010, 23(1): 57-61. [高建昆. 适度人口问题研究综述. *管理学报*, 2010, 23(1): 57-61.]
- [13] Jaeger K, Kuhle W. The optimum growth rate for population reconsidered. *Journal of Population Economics*, 2009, 22(1): 23-41.
- [14] Zheng X P. Measurement of optimal city sizes in Japan: A surplus function approach. *Urban Studies*, 2007, 44(5-6): 939-951.
- [15] Lin Xiaojuan, Fang Shifeng, Du Jiaqiang, et al. Study on optimum population of Beijing based on the comprehensive carrying capacity. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(11): 1495-1503. [林晓娟, 房世峰, 杜加强, 等. 基于综合承载力的北京市适度人口研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(11): 1495-1503.]
- [16] Lu Y. Urban optimum population size and development pattern based on ecological footprint model: Case of Zhoushan, China. *International Journal of Built Environment Sustainability*, 2016, 3(3): 134-141.
- [17] Liu Yaxuan, Zhang Xiaolei, Lei Jun. Preliminary study on optimum population of Xinjiang province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(5): 35-40. [刘雅轩, 张小雷, 雷军. 新疆适度人口初步研究. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(5): 35-40.]
- [18] Zhou W, Feng N, Mi H. Optimum population and urbanization in Zhejiang province under the restriction of energy. *Advanced Materials Research*, 2012, 524-527: 2819-2826.
- [19] Tong Yufen, Wang Jingwen, Liang Zhao. China's optimum population: An environmental perspective. *Population Research*, 2016, 40(2): 3-11. [童玉芬, 王静文, 梁钊. 资源环境约束下的中国适度人口研究. *人口研究*, 2016, 40(2): 3-11.]
- [20] Wang Huanchen. The adoption of a multi-objective decision making method based on possibility and satisfiability. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 1982, 2(1): 14-22. [王浣尘. 采用可能度和满意度的多目标决策方法. *系统工程理论与实践*, 1982, 2(1): 14-22.]
- [21] Xie Tianyi, Zhu Mutian, Xu Haiming. Research on the population structure of the family planning policy adjustment. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(11): 122-124. [谢天怡, 朱牧天, 徐海铭. 计划生育新政策下人口数量及结构的预测模型. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(11): 122-124.]
- [22] Gao H, Yao T X, Kang X R. Population forecast of Anhui province based on the GM(1, 1) model. *Grey Systems: Theory and Application*, 2017, 7(1): 19-30.
- [23] Riiman V, Wilson A, Milewicz R, et al. Comparing artificial neural network and cohort-component models for population forecasts. *Population Review*, 2019, 58(2): 100-116.
- [24] Men Kepei, Zeng Wei. A study on the prediction of the population of China over the next 50 years. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2004, 21(3): 12-17. [门可佩, 曾卫. 中国未来50年人口发展预测研究. *数量经济技术经济研究*, 2004, 21(3): 12-17.]
- [25] Shi Jia, Ji Juhai. Study on population prediction of the middle and lower reaches of the Yellow River based on BP neural network. *Science and Technology Management Research*, 2014, 34(6): 245-250. [史佳, 冀巨海. 基于BP神经网络的黄河中下游人口预测研究. *科技管理研究*, 2014, 34(6): 245-250.]
- [26] Xu Lili, Li Hong, Li Jin. Research on population prediction based on grey prediction and radial basis function network. *Computer Science*, 2019, 46(6A): 431-435. [徐丽丽, 李洪, 李劲. 基于灰色预测和径向基网络的人口预测研究. *计算机科学*, 2019, 46(6A): 431-435.]
- [27] Li Guocheng, Wu Tao, Xu Shen. Prediction model of population gross based on grey artificial neural network and its application. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(16): 215-218. [李国成, 吴涛, 徐沈. 灰色人工神经网络人口总量预测模型及应用. *计算机工程与应用*, 2009, 45(16): 215-218.]

Population prediction and resource allocation in megacities from the optimum population perspective: A case study of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen

WANG Yong^{1,2}, XIE Yanjing¹, LIU Rong¹, ZHANG Hao¹

(1. School of Statistics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China;

2. Postdoctoral Research Station, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China)

Abstract: Continuous population growth is an important factor affecting the development of megacities. Optimum population can advance the rational allocation of urban resources amidst the continuous growth. By taking the optimum population as a pointcut, this study first uses the possibility- satisfiability (P- S) model to calculate the optimum population size of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen in 2035, and then uses the grey back propagation neural network model to predict the resident population of all the four first-tier cities in 2035. Finally, it analyzes all the cities' allocation and planning of resources or infrastructure based on the results, and proposes optimum resource allocation to address an unexpected population growth. The results show that: (1) When the P-S degree is 0.6, the optimum population size of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen in 2035 is 21.5269 million, 23.0968 million, 14.9893 million and 13.5219 million, respectively, all below the red line of government planning. (2) The resident population of Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen in 2035 will exceed the moderate population size and the red line of government planning, while the moderate population size will be lower than the red line of government planning, and the red line of government planning will be lower than that of the resident population. (3) From the perspective of optimum population, in order to cope with future population growth without affecting economic and social development and residential satisfaction, in 2035, the power generation and green areas of Beijing are expected to reach twice the current levels; power generation, green areas, and public transport vehicles of Shanghai will be 2.27, 2.22 and 2.35 times the current levels, respectively; the energy supply and power generation of Guangzhou are expected to reach three times the current levels; the energy supply, power generation, and the number of beds in health institutions of Shenzhen will be three times the current levels. This study provides a scientific basis for coordinating the sustainable development of population and urban resources in large cities.

Keywords: megacity; optimum population; population growth; possibility- satisfiability; resource allocation