

城市汽车保有量极限值分析与预测

姚广铮^{1,2}, 刘小明¹, 陈艳艳¹, 崔凯俊²

(1.北京市交通工程重点实验室, 北京工业大学, 北京 100124; 2.南京市城市与交通规划设计研究院股份有限公司, 江苏南京 210002)

摘要: 准确判断城市汽车拥有水平对于汽车产业发展和城市交通规划具有重要意义。利用解释结构模型, 构建影响城市汽车拥有水平的整体框架体系, 将 15 个影响因素划分为 4 个层次。识别了城市人口规模、城市人口密度等影响汽车拥有水平的根本性因素, 以及居民可支配收入水平、公共交通服务水平等最直接的影响因素。构建城市建成区人口密度、城市人口规模与千人汽车保有量极限值的回归模型, 发现城市建成区人口密度相比于城市人口密度具有更好的解释力, 负指数模型比线性模型有更好的解释力。通过模型推算, 中国超大城市、特大城市和大城市远期的千人汽车保有量将分别处于 300 辆·千人⁻¹, 350 辆·千人⁻¹和 400 辆·千人⁻¹左右的水平, 小城市可能达到 450 辆·千人⁻¹甚至更高水平。

关键词: 交通政策; 汽车保有量; 影响因素; 解释结构模型; 回归分析; 千人汽车保有量

Forecasting Maximum Automobile Ownership in Urban Areas

Yao Guangzheng^{1,2}, Liu Xiaoming¹, Chen Yanyan¹, Cui Kaijun²

(1.Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.Nanjing Institute of City & Transportation Planning Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210002, China)

Abstract: Accurately identifying the level of urban automobile ownership is important for the development of automobile industry and urban transportation planning. Utilizing the cause-effect interpretive structural model (ISM), this paper develops a framework system that explore the relationship between urban automobile ownership and 15 influential factors in four levels. The urban population and population density are the fundamental factors to automobile ownership, and residents' income and public transportation level of service directly affect the automobile ownership. The developed regression model reveals that the population density in urban built-up areas is more explicable than the overall urban population density to automobile ownership, and the negative exponential model works better than the linear model. The modeling results show that the long-term automobile ownership in China's megacities, supercities and large cities will be around 300, 350, and 400 automobiles per thousand people respectively, while the ownership in small cities may reach 450 automobiles per thousand people or even higher levels.

Keywords: transportation policy; automobile ownership; influencing factors; interpretive structural model; regression analysis; automobile ownership per thousand people

收稿日期: 2020-04-30

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目“多方式公共交通运行协同优化关键技术研究”(9174027)

作者简介: 姚广铮(1978—), 男, 辽宁沈阳人, 在读博士研究生, 高级工程师, 南京市城市与交通规划设计研究院股份有限公司北京分院副院长, 主要研究方向: 交通规划与政策。

E-mail: 6903880@qq.com

0 引言

随着中国经济发展、家庭购买能力提升, 汽车保有量也随之快速增长。截至 2019 年底, 中国的汽车保有量达到 2.6 亿辆。小汽车的大范围普及促进了国民经济发展, 方便百姓出行, 但同时也带来交通拥堵、停车

困难、尾气污染和能源消耗等一系列问题。

为了控制上述负面影响, 北京、上海等城市纷纷实施限购、号牌拍卖和限行等措施控制小汽车的快速增长和使用。但国家发展改革部门希望将汽车产业作为重要的产业来发展, 不止一次要求各地取消限行和限购措施。在此背景下, 判断中国的汽车保有量究

竟能达到什么水平，对于中国汽车产业和城市交通都具有重要意义。

国外早在20世纪30年代就开始了汽车保有量预测方面的研究^[1]。汽车保有量预测模型主要包括集计和非集计两种^[2-3]，其中非集计模型以家庭为单位，通过建立效用函数确定家庭拥有小汽车的数量^[4]，而集计模型主要是从时间进程、经济、人口等宏观因素出发对国家或地区汽车的保有量进行预测^[5]。

最初的宏观模型是以时间为序列的，文献[6]认为千人汽车保有量随时间推进按照S形曲线的形态接近曲线顶部，达到极限值，并处于稳定状态。文献[7]认为千人汽车保有量水平与收入密切相关，随着收入的提高按照S形曲线的形态达到极限值；不同学者对于千人汽车保有量会达到什么水平看法不一，文献[8]最初认为极限值达到0.45，文献[9]认为极限值能够达到0.6，后来又修正为0.9。文献[9]在1982年就意识到：不同国家甚至一个国家的不同地区，最终都可能达到不同的极限值。

随着经济社会发展和居民收入水平提高，中国于20世纪90年代进入小汽车快速发展阶段，大量学者开始关注中国汽车保有量预测问题。文献[10-12]采用不同的集计模型对部分城市和中国汽车保有量进行预测，但对于极限值的取值都是基于假设，缺少令人信服的论证。

本文期望深入探讨影响汽车保有量水平的机理，预测中国城市的汽车保有量水平。

1 影响城市汽车保有量的因素及机理

通过查阅大量相关文献，本文确定了影响城市汽车保有量水平的15个宏观因素。

1) 居民可支配收入水平。

居民可支配收入水平可衡量居民的购买力，对于小汽车尚未达到极限值的城市，是汽车拥有水平的决定性因素。在获取人均可支配收入有困难的情况下，人均GDP可以作为衡量居民可支配收入的参考。很多学者的研究都证实，千人汽车保有量与人均GDP呈现高度相关性，且随着人均GDP的增长呈现先缓慢增长，然后快速增长，最后缓慢地趋近于极限值的S型增长过程。

2) 汽车的购买费用、拥有费用和使用费用。

汽车购买、拥有和使用的费用对家庭购买车辆的决策有影响，也间接地影响城市、

国家和地区的汽车保有量水平。例如，两次石油危机导致全球油价大涨期间，汽车的拥有水平就受到影响。

3) 城市交通政策、小汽车限购和限行政策。

城市交通政策及小汽车拥有和使用政策对小汽车拥有的影响更为直接。例如，新加坡采取的车辆定额配给制度，日本东京、大阪等城市采取的以位购车政策，中国北京的摇号、上海的拍卖等限购政策，以及各城市采取的限行政策等都直接影响人们对小汽车的拥有和使用水平。

4) 道路设施水平。

高水平的道路设施为汽车的通行提供良好的条件，使汽车的使用效益更高，人们就更愿意购买汽车。而且密集路网上设置的路内停车位也为车辆停放提供了条件，提高了城市对汽车的容纳能力。

5) 公共交通设施及服务水平。

很多学者的研究都证实了公共交通服务水平对于汽车的拥有水平具有负相关性^[2]。公共交通设施和服务越好的地区，人们对小汽车的依赖性越低。如香港的公共交通服务水平非常高，人们的日常出行可以方便地利用公共交通，香港千人汽车保有量约为110辆·千人⁻¹，在国际大都市中处于最低水平。

6) 汽车产业政策。

对于拥有汽车产业的国家或城市，出于产业发展的角度，对小汽车采取更为宽容的政策，与小汽车拥有和使用相关的基础设施条件更好，购买和使用费用相对较低，对汽车拥有水平的提高有正向影响。

7) 城市人口规模和城市人口密度。

城市人口规模、密度乃至形态对城市交通发展模式和城市交通政策有本质影响。高密度大城市往往更加依赖公共交通，尤其是轨道交通，对小汽车往往采取更为严苛的政策。例如，新加坡、伦敦等城市采取拥堵收费政策，纽约、柏林等城市采取差别化停车收费政策等。而小城市的公共交通水平低，人们的出行则更加依赖小汽车。城市人口规模和城市人口密度对汽车拥有水平的影响如图1和图2所示。

8) 汽车文化。

汽车文化是在一定国情和环境下，消费者买车、开车、用车的方式与特点。中国和印度等地学者的研究表明^[13]，拥有小汽车不仅仅是使用需求决定的，还有一些购车人认为汽车是身份和地位的象征。而在有些环保

主义盛行的国家和地区，有人认为不开车有利于环境保护，会主动减少小汽车的使用和购买^[14]。

9) 环境约束。

小汽车在为人们生产、生活带来便利的同时，也产生了空气污染、能源消耗等一系列环境问题。随着人们对于环境质量的要求越来越高，全球都在倡导绿色、可持续的交通发展模式。美国的清洁空气法案、欧盟的空气质量政策框架等都在积极地削减小汽车的排放影响，这些政策都会间接地传导给家庭，影响其购车决策。

城市汽车保有量的影响因素较多，且每个影响因素对城市汽车保有量的影响方式、影响程度和作用机理不尽相同。通常情况下，影响因素并不是独立存在的，各影响因素间会存在一定的伴生、衍生和转化等相关关系。

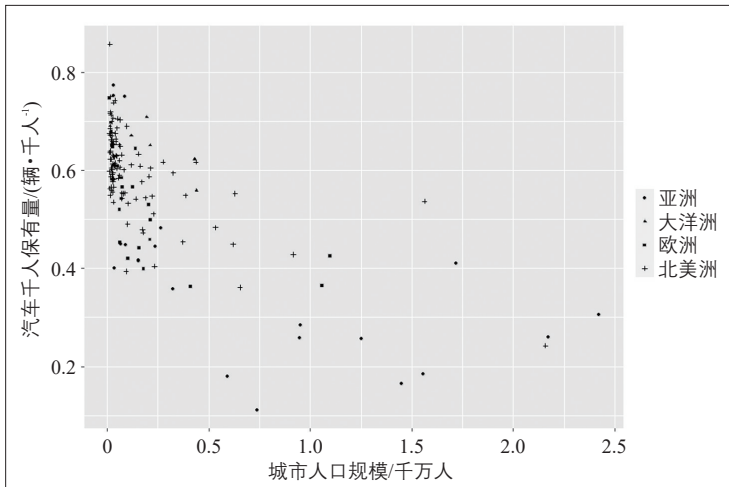


图1 城市人口规模对汽车拥有水平的影响
Fig.1 Impact of urban population on automobile ownership

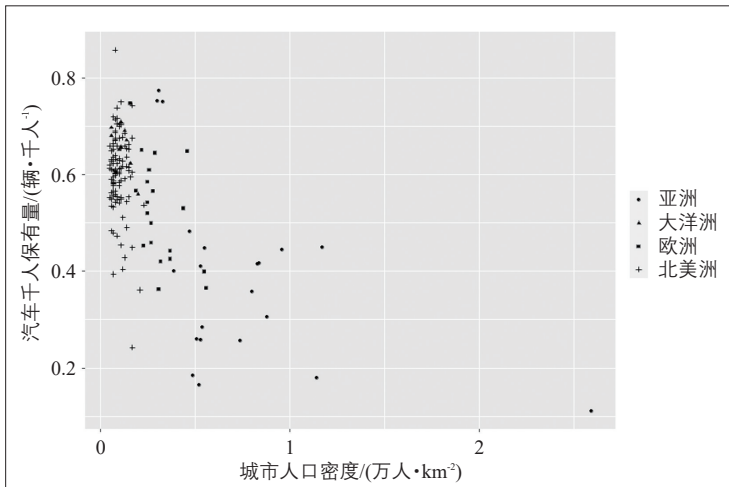


图2 城市人口密度对汽车拥有水平的影响
Fig.2 Impact of urban population density on automobile ownership

2 解释结构模型的构建

根据前文对城市汽车保有量的影响因素的分析，本文从系统论的观点出发，通过构造城市汽车保有量影响因素的解释结构模型，识别众多影响因素之间的层次结构关系，从而确定城市汽车保有量的直接、间接和根源影响因素及各因素之间的相关关系。

解释结构模型(Interpretative Structural Modeling, ISM)是复杂网络中的一种建模分析方法，主要是对要素之间的静态关系结构进行分析，了解各个要素之间的逻辑关系，将复杂的要素系统分为若干子系统，构造一个多级递阶的结构模型^[15]。其计算原理如下^[16]：

对于有 n 个因素的系统 $S(S_1, S_2, \dots, S_n)$ ，构建 S 的有向邻接矩阵 A ，并计算得到 A 的可达矩阵 M 。

$$A = [a_{ij}] = \begin{cases} 1, & \text{因素 } S_i \text{ 对因素 } S_j \text{ 有影响} \\ 0, & \text{因素 } S_i \text{ 对因素 } S_j \text{ 无影响} \end{cases}, \quad (1)$$

其中， $i, j = 1, 2, \dots, n$ ，且 $i \neq j$ ；

$$M = [m_{ij}] = (A + I)^k = (A + I)^{k+1}, \quad (2)$$

式中： I 为单位矩阵， k 为邻接矩阵加上单位矩阵后按布尔代数法则进行自乘的次数。当 $k+1$ 阶段计算的矩阵与 k 阶段计算的矩阵相同时停止迭代。

求出可达矩阵 M 的可达集 $R(S_i)$ 、可达矩阵 M 的前因集 $H(S_i)$ 及可达集与前因集的相交集 $C(S_i)$ 。

$$R(S_i) = \{S_j | m_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n\}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$H(S_i) = \{S_j | m_{ji} = 1, i = 1, 2, \dots, n\}, j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

$$C(S_i) = \{S_j | R(S_j) \cap H(S_i), i = j = 1, 2, \dots, n\}. \quad (5)$$

当 $R(S_i) = C(S_i)$ 时，将 $R(S_i)$ 中的因素 S_j 加入最高级要素集合 L_1 ；其次将集合 L_1 中的要素从可达矩阵 M 相应的行、列中剔除，重复公式(3)~(5)，依次从剩下的 $R(S_i)$ 和 $H(S_i)$ 中获取新的最高级要素集合 L_2, L_3, \dots ，直到穷尽所有元素。

1) 建立邻接矩阵 A 。

本文用 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{15}$ 分别表示居民可支配收入水平、汽车产业政策、城市人口规模、城市人口密度、汽车文化、城市交通政策、小汽车限购政策、小汽车限行政策、道路设施水平、公共交通设施、汽车购买费用、汽车拥有费用、汽车使用费用、公共服务水平、环境约束。在分析讨论及咨询

专家学者的基础上，确定15个影响因素间的逻辑关系，得到邻接矩阵 A (见表1)。

2) 生成可达矩阵 M 。

利用公式(2)和 Matlab 软件编程运算，可得影响因素的可达矩阵 M (见表2)。

3) 可达矩阵层次化。

首先，根据公式(3)~(5)求出可达矩阵 M 的可达集 $R(S_i)$ 、前因集 $H(S_i)$ 和相交集 $C(S_i)$ ，如表3所示。

依据 $R(S_i) = C(S_i)$ 进行层级分解，可得到最高级要素集合 $L_1 = (1, 7, 8, 11, 12, 13, 14)$ ，

表1 影响因素邻接矩阵 A

Tab.1 Adjacency matrix A of influencing factors

因素	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
S3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0
S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表2 影响因素可达矩阵 M

Tab.2 Accessibility matrix M of influencing factors

因素	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
S1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
S3	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
S4	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
S5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
S6	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
S7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
S15	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1

在原有可达矩阵 M 基础上剔除因素 $S_1, S_7, S_8, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}$ ，对应的行和列重新计算，直至穷尽所有元素，最终得到4层分级结构(见表4)。

4) 建立解释结构模型。

依据得到的层级分解结果，建立影响因素的解释结构模型。先将系统中各影响因素按层级间划分的关系依次排序，然后依据可达矩阵，利用有向边依次画出相邻层级要素间的关系。各层级要素间的相关关系如图3所示。

由影响因素的解释结构模型可知，居民可支配收入水平、小汽车限购政策、小汽车限行政策、汽车购买费用、汽车拥有费用、汽车使用费用和公共交通服务水平这7个因素为表层因素，直接影响城市汽车拥有水平；第二层为道路设施水平和公共交通设施，为设施层因素，通过影响汽车使用费用和公共交通服务水平间接影响城市汽车拥有

水平；第三层为城市交通政策层，决定了城市基础设施的水平及与汽车使用相关的政策；第四层为城市人口密度、城市人口规模、汽车产业政策、汽车文化和环境约束5个因素，位于最底层，是本源性因素层，对影响城市汽车保有量水平起着根本性作用。

总的来说，本源性因素层、交通战略层、基础设施层和表层因素层这四个层次层层递进，由底层因素或直接或间接地影响上一层的因素，并最终通过表层因素直接对城市汽车保有量水平产生影响。如果想预测短期汽车保有量发展水平，表层因素更直接。不过，要想了解远期汽车保有量发展趋势，还应该从更深层次考虑。

3 预测模型形式

城市汽车保有量是各城市组团和乡村汽车保有量的总和

$$N_t = \sum N_{Uit} + N_{Rt}, \quad (6)$$

式中： N_t 为年份 t 时城市的汽车保有量/辆； N_{Uit} 为年份 t 时第 i 个城市组团的汽车保有量/辆； N_{Rt} 为乡村在年份 t 时的汽车保有量/辆。

式(6)可改写为

$$N_t = \sum V_{Uit} P_{Uit} + V_{Rt} P_{Rt}, \quad (7)$$

式中： V_{Uit} 和 V_{Rt} 分别为第 i 个城市组团和乡村的千人汽车保有量/(辆·千人⁻¹)； P_{Uit} 为年份 t 时第 i 个城市组团的人口/千人； P_{Rt} 为年份 t 时乡村的人口/千人。

令 $V = S\rho = Sf(GDP)$ ，其中 S 为城市组团或乡村的千人汽车保有量极限值， ρ 为经济发展水平系数，是收入水平或 GDP 的函数。函数可以采取 Gompertz 函数^[17]或 logistic 函数的形式^[12]。 ρ 为取值为 0~1 的系数，GDP 越高， ρ 越接近于 1。

$$\rho = f(GDP) = e^{ae^{bGDP}}, \quad (8)$$

$$\text{或 } \rho = f(GDP) = \frac{1}{1 + be^{-aGDP}}. \quad (9)$$

不同城市组团和乡村的 GDP 水平可能并不一致，所以，汽车保有量可以写成

$$N_t = \sum S_{Uit} \rho_{Uit} P_{Uit} + S_{Rt} \rho_{Rt} P_{Rt}, \quad (10)$$

式中： S_{Uit} 和 S_{Rt} 分别为第 i 个城市组团和乡村的千人汽车保有量极限值； ρ_{Uit} 和 ρ_{Rt} 为第 i 个城市组团和乡村的经济发展水平系数。由此，城市千人汽车保有量

$$V_t = \frac{N_t}{P_t} = \sum S_{Uit} \rho_{Uit} \frac{P_{Uit}}{P_t} + S_{Rt} \rho_{Rt} \frac{P_{Rt}}{P_t}. \quad (11)$$

表3 可达集、前因集和相交集

Tab.3 Reachable set, antecedent set and intersection set

因素	$R(S)$	$H(S)$	$C(S)$
S1	1	1	1
S2	2,6,7,8,9,10,11,12,13,14	2	2
S3	3,6,7,8,9,10,12,13,14	3	3
S4	4,6,7,8,9,10,12,13,14	4	4
S5	5,6,7,8,9,10,12,13,14	5	5
S6	6,7,8,9,10,12,13,14	2,3,4,5,6,15	6
S7	7	2,3,4,5,6,7,15	7
S8	8	2,3,4,5,6,8,15	8
S9	9,13	2,3,4,5,6,9,15	9
S10	10,14	2,3,4,5,6,10,15	10
S11	11	2,11	11
S12	12	2,3,4,5,6,12,15	12
S13	13	2,3,4,5,6,9,13,15	13
S14	14	2,3,4,5,6,10,14,15	14
S15	6,7,8,9,10,12,13,14,15	15	15

表4 影响因素层级分解表

Tab.4 Hierarchy of influencing factors

层级	层级内要素
L_1	1,7,8,11,12,13,14
L_2	9,10
L_3	6
L_4	2,3,4,5,15

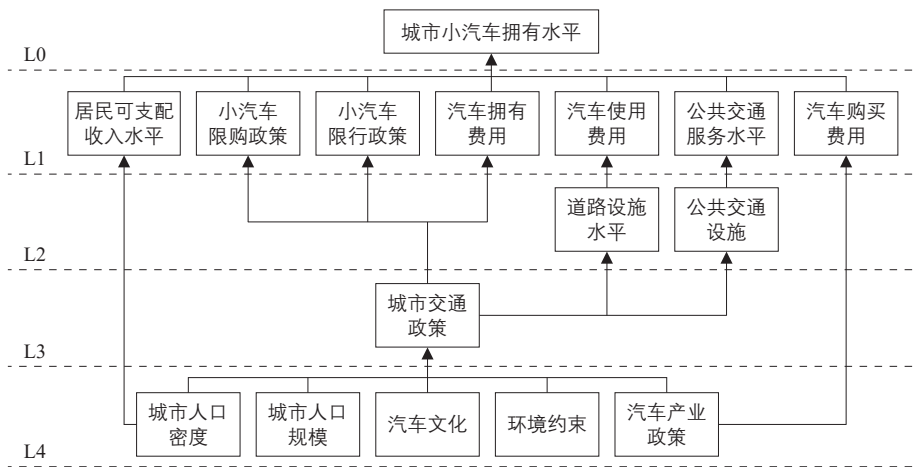


图3 影响因素的解释结构模型

Fig.3 Interpretive structural model of influencing factors

当城乡居民的收入水平足够高时，经济发展水平系数达到1，城市的千人汽车保有量达到极限值，即

$$S = \sum S_{U_i} \frac{P_{U_i}}{P_i} + S_R \frac{P_{R_i}}{P_i}, \quad (12)$$

即城市的千人汽车保有量极限值为各个城市组团和乡村千人汽车保有量极限值按人口的加权平均值。

为了简化计算，假设各城市组团的汽车保有量极限值相等，则有

$$S = S_U \frac{P_{U_i}}{P_i} + S_R \frac{P_{R_i}}{P_i}. \quad (13)$$

令城镇化率 $U = P_{U_i}/P_i$ ，则有

$$S = US_U + (1-U)S_R. \quad (14)$$

随着社会经济的不断发展，城乡的居民消费能力都将持续稳步提高，终有一天乡村的消费能力足够负担汽车。乡村的汽车保有量将达到极限值 S_{max} 。

考虑到城镇地区的汽车保有量极限值与城市人口密度、规模和城市形态等因素有关，即

$$S_U = g(\text{Density}, \text{Scale}, \text{Form}, \text{Policy}, \dots), \quad (15)$$

城市的汽车保有量极限值

$$S = Ug(\text{Density}, \text{Scale}, \text{Form}, \text{Policy}, \dots) + (1-U)S_{max}. \quad (16)$$

4 预测模型的数据选取

4.1 城市的选取

为了研究城市千人汽车保有量的极限值，最理想的途径是找到已经达到极限值的城市，研究相关因素与该极限值的关系。

根据文献[6]的研究，当城市人均GDP

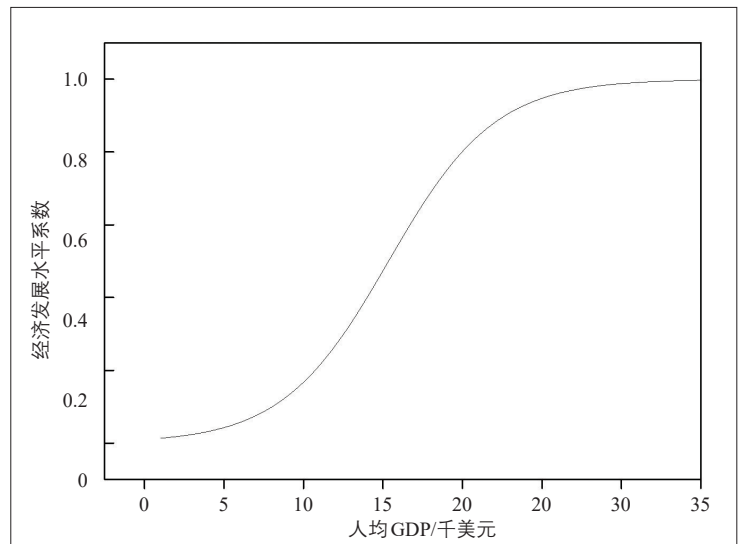


图4 经济发展水平系数 ρ 随人均GDP的变化

Fig.4 Economic development level coefficient ρ with different GDP per capita

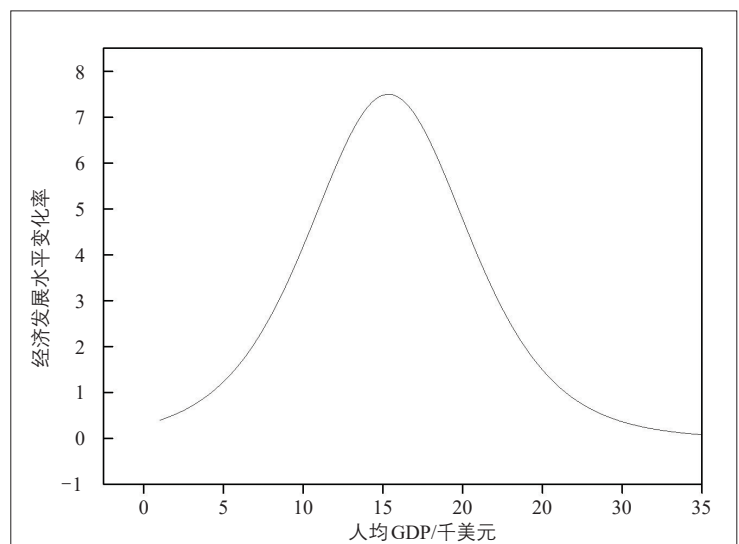


图5 经济发展水平变化率随人均GDP的变化

Fig.5 Change rate of economic development level with different GDP per capita

处于较高水平时,汽车保有量水平增长趋于平稳。或者说,当汽车增长经历了先快速增长后缓慢增长的过程,这个城市的汽车保有量也就基本达到极限值了。

根据本文搜集到的各个国家的城市数据,计算并绘制经济发展水平系数 ρ 及经济发展水平变化率随GDP的变化曲线(见图4和图5)。综合人均GDP水平和近几年城市汽车增长率,按照人均GDP大于2万美元且汽车保有量增速相对于GDP(千美元)的增速弹性(汽车保有量变化比例/人均GDP变化比例)小于1的标准,挑选出可能达到极限值的城市并按地区进行汇总(见表5)。其中,各个国家GDP的数据来源于世界银行统计数据(<https://data.worldbank.org.cn/>),千人汽车保有量数据来自世界各国统计年鉴(<http://data.stats.gov.cn/gjwz.htm>),美国各城市人均GDP的数据来自美国商务部的信息分析部门

表5 汽车保有量可能达到极限值的城市数据

Tab.5 Data on cities where automobile ownership may reach the maximum

地区	城市数量/ 个	平均千人汽车保有量/ (辆·千人 ⁻¹)	平均人口密度/ (人·km ²)	平均人口/ 万人
北美	104	602	986	136
欧洲	23	512	314	217
大洋洲	11	663	113	143
亚洲	21	383	734	727

表6 模型拟合参数表

Tab.6 Fitting parameters of the model

参数	模型1		模型2		模型3		模型4	
	参数估计值	显著水平	参数估计值	显著水平	参数估计值	显著水平	参数估计值	显著水平
α_1	-0.197	$<2 \times 10^{-16}***$						
β_1	-0.155	$6.02 \times 10^{-13}***$						
γ_1	0.644	$<2 \times 10^{-16}***$						
α_2			-0.234	$<2 \times 10^{-16}***$				
β_2			-0.186	$1.48 \times 10^{-11}***$				
γ_2			0.638	$<2 \times 10^{-16}***$				
α_3					-0.456	$6.08 \times 10^{-19}***$		
β_3					-0.405	$5.17 \times 10^{-13}***$		
γ_3					-0.406	$<2 \times 10^{-16}***$		
α_4							-0.485	$2.90 \times 10^{-10}***$
β_4							-0.403	$2.23 \times 10^{-11}***$
γ_4							-0.641	$<2 \times 10^{-16}***$
R^2	0.60		0.55		0.67		0.61	

注:***表示模型系数的显著性水平小于0.05,表明模型可信。

(Bureau of Economic Analysis, BEA)。由于BEA将部分城市整合在大都市区范围进行统计,因此,对于大都市区内城市的数据沿用了其所在大都市区的数据;对于那些没有被统计的城市,采用了所在州的人均GDP数据进行替代。

4.2 参数的选取

根据前文分析,影响城镇地区汽车保有量水平的属性很多,但从根本上影响远期城市汽车保有量的因素包括:城市人口规模、城市人口密度、汽车文化、环境约束,以及所在国家或地区的汽车产业政策等。

本文综合数据获取的可能性,选取能够量化的城市人口规模和城市人口密度两个指标作为影响城市远期汽车保有量水平的指标进行考察。

城市人口规模以城市市域范围为统计口径,而城市人口密度以建成区范围作为统计口径。之所以选择建成区作为城市人口密度的统计口径,是考虑到城市建成区更能反映城市密集程度的真实状态,而用市域范围的人口密度可能会导致偏差。例如,重庆的人口密度按照市域范围统计是409人·km²,而按照建成区范围统计,其人口密度可以达到6000人·km²。本文采用的建成区面积数据来源于2018年Demographia世界城市数据,

其统计方法是根据“城市脚印”(在晴朗的夜空中从卫星观测到的城市夜光区域)来衡量城市建成区面积,并根据同区域的人口测算建成区人口密度。

5 预测模型构建与结果分析

假设所研究的城市汽车保有量已经达到极限值,且处于稳定的状态,即 $f(GDP)=1$ 。结合国内外学者的研究,本文主要分析城市人口规模和城市人口密度对于千人汽车保有量极限值 S 的影响,模型主要分为两类,一类为线性模型:

$$S = \alpha UrbanDensity + \beta Population + \gamma, \quad (17)$$

另一类为负指数模型:

$$S = e^{\alpha UrbanDensity + \beta Population + \gamma}. \quad (18)$$

对城市人口密度、城市人口规模与千人汽车保有量极限值构建回归模型,其中模型1、模型2采用线性模型,模型3、模型4采用负指数模型,通过最小二乘法对参数进行标定,模型拟合参数如表6所示。

对比模型参数的显著性,可以发现模型的参数全部显著,表明回归变量与因变量之间具有很强的解释力。对比模型的拟合度,可以发现负指数模型的拟合度更高。模型1与模型3采用的数据为城市建成区人口密度,模型2与模型4采用的数据为城市人口密度,可以发现城市建成区人口密度相比于城市人口密度具有更好的解释力。

分析模型各因素对于城市汽车保有量的影响情况:

1) 城市人口密度的影响。

城市建成区人口密度对千人汽车拥有水平的影响非常显著(见图6)。随着城市建成区人口密度的增加,汽车拥有水平呈现下降趋势,当人口密度超过 $5\,000$ 人 \cdot km $^{-2}$ 时,城市千人汽车保有量迅速下降。美国、澳大利亚大多数城市的建成区人口密度比较低,这些城市的千人汽车保有量可以达到 600 辆 \cdot 千人 $^{-1}$ 以上;而欧洲城市的建成区人口密度相较于美国和澳大利亚而言相对高一些,这些城市的千人汽车保有量下降到 $400\sim 600$ 辆 \cdot 千人 $^{-1}$;中国大多数城市的建成区人口密度高,千人汽车保有量也更低,大都聚集在 $150\sim 300$ 辆 \cdot 千人 $^{-1}$;香港和新加坡的城市人口密度更高,千人汽车保有量也更低,特别是香港达到了 110 辆 \cdot 千人 $^{-1}$ 的水平。

呈现该现象的主要原因是城市人口密度

越高,土地资源就越稀缺,用于发展小汽车的道路和停车设施的用地资源就越有限。高密度的城市一般都会选择优先发展公共交通而限制小汽车拥有或使用的政策,所以高密度的城市往往汽车的拥有水平比较低。

2) 城市人口规模的影响。

城市人口规模也会对汽车拥有水平产生一定影响(见图6)。人口规模较小的城市汽车拥有水平一般都比较低,随着人口数量的增加汽车拥有水平逐渐下降并趋于稳定,当城市人口规模超过 500 万人时,城市的千人汽车保有量迅速下降。原因在于当城市人口规模很小时,人口规模难以支撑公共交通的良好运转,居民出行对小汽车的依赖程度高;同时,人口规模小的城市往往居民出行距离短,同样出行次数情况下占用道路资源少,即人口规模较小的城市对于小汽车的容

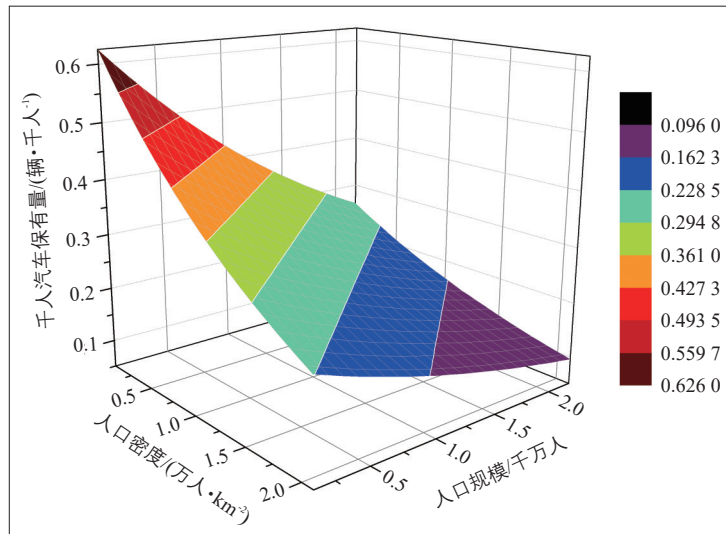


图6 城市人口密度、人口规模对城市汽车拥有水平的影响

Fig.6 Impact of urban population density and population on automobile ownership

表7 中国各类城市千人汽车保有量预测

Tab.7 Forecasting automobile ownership per thousand people in different cities in China

城市类型	人口规模/万人	建成区人口密度/(人 \cdot km $^{-2}$) ¹⁾	千人汽车保有量/(辆 \cdot 千人 $^{-1}$)
超大城市	>1 000		224~298
特大城市	500~1 000		224~366
大城市(I型)	300~500		274~396
大城市(II型)	100~300	8 700~15 000	297~430
中等城市	50~100		322~439
小城市(I型)	20~50		329~445
小城市(II型)	<20		332~445

1) 根据《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB 50137—2011),中国城市的建设用地区面积为人均 $65\sim 115$ m 2 ·人 $^{-1}$ 。

纳能力比较强。

6 各类城市汽车保有量预测

根据中国城市的人口规模分类标准和密度要求, 预测各类城市的千人汽车保有量(见表7)。考虑模型可能出现的误差, 中国超大、特大和大城市远期的千人汽车保有量将分别达到300辆·千人⁻¹, 350辆·千人⁻¹和400辆·千人⁻¹左右的水平; 而小城市远期的千人汽车保有量可能达到450辆·千人⁻¹以上甚至更高, 会远超北上广深这些大城市。

7 结语

本文利用解释结构模型构建了影响城市汽车拥有水平的整体框架体系, 将影响因素分为4个层级: 本源性因素层、交通战略层、基础设施层和表层因素层, 并建立了重要因素的回归预测模型。研究发现, 城市人口规模、城市人口密度等底层因素决定了城市交通战略, 进而影响交通基础设施乃至远期城市汽车拥有水平。对比发现, 城市建成区人口密度相对于城市人口密度有更好的解释力, 负指数模型相对于线性模型有更好的解释力。

由于土地资源稀缺, 中国的城镇化采取集约化发展的模式, 城市人口规模大且密度高。出于城市交通可持续发展的考虑, 随着政策的不断调整, 这类城市远期的千人汽车保有量不会太高, 切不可盲目地认为这些城市能发展到美国千人汽车保有量800辆·千人⁻¹的水平。但对于一些小城镇而言, 北上广深等城市千人汽车保有量绝不是增长的极限, 随着经济的发展, 综合这些城市自身交通特点, 其千人汽车保有量很可能大幅超越一线大城市。

参考文献:

References:

- [1] Whelan G. Modelling Car Ownership in Great Britain[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2007, 41(3): 205-219.
- [2] Anowar S, Yasmin S, Eluru N, et al. Analyzing Car Ownership in Quebec City: A Comparison of Traditional and Latent Class Ordered and Unordered Models[J]. *Transportation*, 2014, 41(5): 1013-1039.
- [3] Anowar S, Eluru N, Miranda-Moreno L F. Al-

ternative Modeling Approaches Used for Examining Automobile Ownership: A Comprehensive Review[J]. *Transport Reviews*, 2014, 34(4): 441-473.

- [4] Jong D C G. Simulating Car Costs Changes Using an Indirect Utility Model of Car Ownership and Annual Mileage[J]. *Acta Crystallographica*, 1989, 43(a1): 193-204.
- [5] Ingram G K, Liu Z. Motorization and the Provision of Roads in Countries and Cities[R]. WPS 1842. Washington DC : World Bank Group, 2010.
- [6] Dargay J, Gately D. Income's Effect on Car and Vehicle Ownership, Worldwide: 1960—2015[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1999, 33(2): 101-138.
- [7] Mogridge M J H. The Prediction of Car Ownership[J]. *Journal of Transport Economics & Policy*, 1967, 1(1): 52-74.
- [8] Mogridge M J H. The Prediction of Car Ownership and Use Revisited: The Beginning of the End?[J]. *Journal of Transport Economics & Policy*, 1989, 23(1): 55-74.
- [9] Hudson P. Car Ownership Modelling and Forecasting[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1982, 33(7): 680.
- [10] 周溪召, 杨佩昆. 大城市小客车拥有率的预测及分析[J]. *中国公路学报*, 1996(4): 76-82.
- Zhou Xizhao, Yang Peikun. The Prediction and Analysis of the Rate of Ownership of Light Passenger Train in Big Cities[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1996(4): 76-82.
- [11] 王旖旎. 中国汽车需求预测: 基于Gompertz模型的分析[J]. *财经问题研究*, 2005(11): 45-52.
- Wang Yini. Car Ownership Forecast in China: An Analysis Based on Gompertz Equation[J]. *Research on Financial and Economic Issues*, 2005(11): 45-52.
- [12] 陈尚和, 刘小明. 基于逻辑增长模型的北京市小汽车发展趋势研究[J]. *公路交通科技*, 2007, 24(9): 132-135.
- Chen Shanghe, Liu Xiaoming. The Developing Trend of Cars in Beijing Based on the Logistic Increase Model[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(9): 132-135.
- [13] Wu G, Yamamoto T, Kitamura R. Vehicle

- Ownership Model that Incorporates the Causal Structure Underlying Attitudes Toward Vehicle Ownership[J]. *Transportation Research Record*, 1999, 1676(1): 61-67.
- [14] Flamm B J, Agrawal A W. Constraints to Green Vehicle Ownership: A Focus Group Study[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(2): 108-115.
- [15] 陈森发. 复杂系统建模理论与方法[M]. 东南大学出版社, 2005.
- [16] Warfield J N. On Arranging Elements of a Hierarchy in Graphic Form[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, SMC-3(2): 121-132.
- [17] Dargay J, Gately D, Sommer M. Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030[J]. *Energy Journal*, 2002, 28(4): 143-170.

(上接第44页)

- [15] 张天然. 基于手机信令数据的上海市域职住空间分析[J]. *城市交通*, 2016, 14(1): 15-23.
- Zhang Tianran. Job-Housing Spatial Distribution Analysis in Shanghai Metropolitan Area Based on Cellular Signaling Data[J]. *Urban Transport of China*, 2016, 14(1): 15-23.
- [16] 邹海翔, 乐阳, 李清泉. 城市交通状态的空间依赖性和异质性分析[J]. *城市交通*, 2015, 13(3): 9-16+23.
- Zhou Haixiang, Yue Yang, Li Qingquan. Spatial Dependence and Heterogeneity of Urban Traffic State[J]. *Urban Transport of China*, 2015, 13(3): 9-16+23.
- [17] 冉斌. 手机数据在交通调查和交通规划中的应用[J]. *城市交通*, 2013, 11(1): 72-81+32.
- Ran Bin. Use of Cellphone Data in Travel Survey and Transportation Planning[J]. *Urban Transport of China*, 2013, 11(1): 72-81+32.
- [18] Clauset A, Shalizi C R, Newman M E J. Power-Law Distributions in Empirical Data[J]. *SIAM Review*, 2009, 51(4): 661-703.
- [19] 程学旗, 沈华伟. 复杂网络的社区结构[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2011, 8(1): 57-70.
- Cheng Xueqi, Shen Huawei. Community Structure of Complex Networks[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2011, 8(1): 57-70.
- [20] Newman M E J, Girvan M. Finding and Evaluating Community Structure in Networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 026113.
- [21] 宋小冬, 王园园, 张开翼, 等. 考虑通勤距离的职住分离测度方法[J]. *城市规划学刊*, 2017(6): 25-32.
- Song Xiaodong, Wang Yuanyuan, Zhang Kaiyi, et al. Measurement of Jobs-Housing Separation Based on Commuting Distance[J]. *Urban Planning Forum*, 2017(6): 25-32.
- [22] 刘大有, 金弟, 何东晓, 等. 复杂网络社区挖掘综述[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(10): 2140-2154.
- Liu Dayou, Jin Di, He Dongxiao, et al. Community Mining in Complex Networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(10): 2140-2154.
- [23] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast Unfolding of Communities in Large Networks[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory*, 2008(10): 10008.
- [24] Lancichinetti A, Fortunato S. Community Detection Algorithms: A Comparative Analysis[J]. *Physical Review E*, 2009, 80(5): 056117.
- [25] Clauset A, Newman M E J, Moore C. Finding Community Structure in Very Large Networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 70(6): 066111.
- [26] Csardi G, Nepusz T. The Igraph Software Package for Complex Network Research[J]. *InterJournal, Complex Systems*, 2006, 1695(5): 1-9.
- [27] 刘岳峰, 司若辰, 康葳. 城市出租车客流网络结构复杂性特征研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(5): 873-879.
- Liu Yuefeng, Si Ruochen, Kang Wei. Complex Structural Properties of Urban Taxi Passenger Flow Network[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(5): 873-879.