

文章编号: 1009-6000(2024)01-0107-07
中图分类号: U12 文献标识码: B
doi: 10.3969/j.issn.1009-6000.2024.01.016

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“汽车智能化对安全、节能减排及缓解拥堵影响的系统评估方法”(U1764265)。

作者简介: 刘宗巍, 博士, 清华大学汽车产业与技术战略研究院、汽车安全与节能国家重点实验室副研究员, 中国汽车工程学会技术管理分会秘书长, 主要研究方向为汽车企业管理、汽车智能出行等;

张望, 博士生, 清华大学汽车产业与技术战略研究院、汽车安全与节能国家重点实验室, 主要研究方向为智能网联汽车与智能交通系统效益评估、汽车出行模式等;

陈铭, 硕士, 清华大学汽车产业与技术战略研究院、汽车安全与节能国家重点实验室, 主要研究方向为汽车共享商业模式;

赵福全, 博士, 清华大学汽车产业与技术战略研究院、汽车安全与节能国家重点实验室教授, 博士生导师, 世界汽车工程师学会联合会终身名誉主席, 主要研究方向为汽车产业发展、技术发展路线。

中国典型城市交通出行特征及未来 道路交通演变研究

Research on the Characteristics of Transportation and the
Future Evolution of Road Traffic in Typical Cities in China

刘宗巍 张望 陈铭 赵福全

LIU Zongwei ZHANG Wang CHEN Ming ZHAO Fuquan

摘要:

为建立适合不同城市特点的交通体系, 并明确定位汽车在其中承担的作用, 文章首先从外部环境和交通工具两大维度出发, 建立了表征城市整体交通出行情况的多层级评价体系; 并基于一级指标的得分, 对选取的9座中国典型城市的交通出行特征进行了聚类分析, 确定了城市的不同类型; 然后通过多元回归分析, 识别了影响城市道路交通的主要因素; 最后通过相关因素变化的情景假设, 预测了各城市道路交通效率可能的演变情况, 并提出了相关政策建议。

关键词:

城市交通出行; 道路拥堵; 评价指标体系; 聚类分析; 情景演变

Abstract: To develop transportation systems tailored to the unique characteristics of different cities and clearly define cars' role in these systems, this research first established a multi-level evaluation system representing the urban traffic situation in terms of external environment and traffic tools. Based on the first-level index scores, the traffic characteristics of nine selected typical cities in China were analyzed and classified into clusters. Subsequently, using multiple regression analysis, the main factors affecting urban road traffic were identified. Finally, by assuming scenarios of changes in related factors, the potential evolution of road traffic efficiency in each city was predicted, leading to the formulation of relevant policy suggestions.

Key words: urban transportation; road congestion; evaluation index system; cluster analysis; scenario evolution

0 引言

移动出行技术的进步加速着城市经济的发展和边际的扩张, 也导致了各类社会问题。人类进入汽车社会之后, 交通供需失衡和道路拥堵已经

成为全球大型城市共同面临的挑战^[1], 给城市带来出行成本增加、时间延误、污染增加、社会压力增大等诸多问题^[2]。中国正在经历快速城镇化和机动化, 跑步进入汽车社会, 大中城市

的拥堵问题日渐凸显。这不仅直接影响城市居民个人的出行效率和生活品质，而且致使资源不能顺畅流通、社会运行效率和生产效率下降，最终表现为城市整体效能无法有效发挥甚至是经济受损^[3]。据测算，美国2018年由于交通拥堵造成的经济损失总额达到870亿美元，平均每人1348美元^[4]，北京每年因交通拥堵导致的人均经济损失同样接近8000元^[5]，可见改善城市交通出行急需良策。

实现城市高效出行是多因素交织的复杂系统工程^[6]，涉及多个维度，包括人口地理条件、基础设施配套、多种交通方式供给及配合等^[7]。目前，城市道路拥堵是阻碍交通运行效率的主要原因，其中汽车是道路的核心工具，在城市交通中占有极高比例。此外，在不久的将来，自动驾驶、车联网等以汽车为载体的新兴技术的出现，会使得城市道路及配套基础设施出现颠覆式改变，而支撑这些基础设施投入的前提是前瞻性城市发展战略规划。因此以汽车作为切入点研究中国典型城市交通出行特征及未来道路交通演变，可以为改善以汽车为主的各类型城市的交通出行结构提供建议，同时也可以为之后因汽车智能化、网联化带来的城市交通出行影响提供研究基础。

1 研究框架与方法

对城市交通精准施策的前提是明确道路拥堵问题的产生原因，而这部分往往涉及多方面深层次因素，现有研究主要集中在如下5个方面：

(1) 人口增长带来的出行需求增加。

米勒(Miller)等人通过对美国城市动态交通状况调查研究发现，导致道路拥堵的原因主要来源于人口增长、汽车保有量快速增加、汽车使用时空集中化以及道路交通设施增量滞后^[8]。赵鹏军等人通过比较中国大型城市和国际大都市道路拥堵的共同点和差异性发现，人口数量和机动化程度的快速提升是导致道路拥堵的根本性因素^[9]。

(2) 城市结构带来的职住分离及通勤潮汐现象。

切尔韦洛(Cervero)通过分析美

国40多个主要郊区就业中心的数据后发现，职住分离严重的地区步行和骑车出行的人数占比较低，同时这些地区与高速公路连接处的拥堵程度较高^[10]。赵鹏军等人通过对北京住房市场和就业通勤的实证研究发现，在控制交通可达性、人口密度和就业者经济特征等因素的情况下，职住平衡与就业者的通勤时间具有显著的相关性^[11]。

(3) 汽车保有量总量饱和与空间分布不合理。

郭继孚等指出，纽约、东京等国际大都市发展历程显示人均机动车保有量与人口密度呈反比的机动化分布规律，而以北京为代表的中国大型城市的汽车保有量则恰好相反，呈现“中心城区高、外围低”的分布特点^[12]。

(4) 道路设施及规划带来拥堵差异。

布哈特(Bhat)等人基于路网特征和交通控制策略对路网交通流的运行状态进行仿真，结果显示道路车道数、道路限速、信号灯周期长度以及单行道距离占比对路网运行效率有关键作用^[13]。刘有军等利用元胞传输模型对环形放射性路网和方格网式路网的交通流运行情况进行仿真，发现环形放射性路网更容易产生交通拥堵^[14]。

(5) 公共交通和非机动化出行比例低，出行结构不合理。

目前中国城市中大运量公共交通成熟度普遍不够，缺乏足够的竞争力，难以吸引私家车出行向更集约化的公交出行转变^[15]，而城市道路设施的规划对于自行车或者步行等绿色出行方式又不够友好，导致非机动化出行比

例逐渐萎缩，增加了机动化出行的运载压力^[16]。

本研究在已有研究的基础上，重点关注中国典型城市交通出行特征的共性与个性并进行量化分析，探讨不同城市类型的道路交通效率和交通出行特征的差异，并结合各类城市的发展规律预测道路交通效率的演变(图1)。首先选择合理指标建立城市交通出行指标体系；然后选取中国典型城市进行交通出行特征的量化，在宏观层面进行横向比较，并采用聚类分析的方法，整合共性、提炼规律、把握差异，绘制聚类后的城市画像；再利用多元回归识别出影响城市道路交通出行的关键要素；最后通过设置不同情景，合理假设关键参数的变化来预测各城市道路交通效率的演变情况，进而形成相关政策建议。

在研究对象的选择上，本研究在考虑城市发达程度、区域地理特征与空间历史演变的基础上，有针对性地选取了9座中国大型城市：北京、上海、广州、深圳、杭州、武汉、重庆、成都和南京。在城市发达程度层面，这9座城市的经济发展水平在中国位居前列，城市交通出行密集，保证了样本数据容量，同时也体现了一、二线兼顾的原则。在区域地理特征层面，这9座城市地形覆盖类型广泛，既有普通的平原城市，又有山地、盆地和河流密集型城市，地形特点对城市交通的影响可以被充分反映出来。在空间历史演变层面，既有历史悠久的名城，又有后起之秀的新城，城市历史演变下的空间格局差异

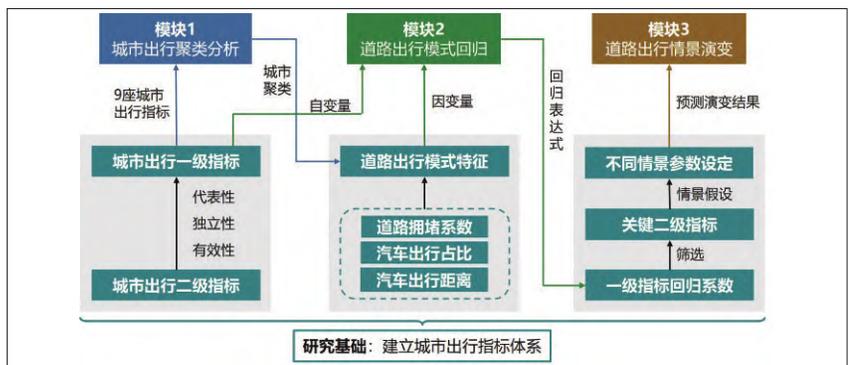


图1 总体研究框架

会塑造出不同的出行样态。需要指出的是,这9座城市并非全部位于中国最拥堵城市排行榜前列,一方面是考虑样本综合发展水平,另一方面是分析拥堵情况不算严重的城市可以为解决严重拥堵提供参考对象。

2 城市交通出行指标体系建立与聚类画像分析

2.1 城市交通出行指标体系建立与评估

本研究的城市交通出行指标体系是在吸收借鉴既有学术研究范式和新型数据统计报告,并结合公安部等部门颁布的《城市道路交通管理评价指标体系》^[17]的基础上建立的。

在指标筛选的过程中,通过计算关键词频度、相关系数以及变差系数来确保指标的代表性、独立性和有效性。此外,本研究将指标体系进行了两级细分,一级指标侧重概括性,二级指标相对具体,既有利于将数据选细选实,又利于后续总结规律。最终在外部环境方面选取了“人口及面积”“道路设施”两个一级指标;交通工具方面选取了“轨道交通”“地面公交”“汽车保有量(包括私家车和出租车)”3个一级指标;道路交通政策方面综合限行和限购两类关键政策设置了“限行限购”1个一级指标;在各一级指标下细化选取了人口密度、限行程度、限购程度等18个二级指标。

在各城市数据的采集方面,本研究扩充了数据渠道,通过横向梳理归纳主要典型城市现有文献数据,获取了包括城市交通出行情况调查、地方交通管理年报、交通评价学术论文、地方年鉴以及第三方大数据在内的结果,并结合城市政策规划与情景案例等进行校正,尽可能得到相对系统、客观、口径统一的数据^[18-32]。

在数据处理方面,首先采用离差标准化的方法,将原始数据映射到[0,1]区间,从而去除不同二级指标的量纲限制;再通过计算相同二级指标内不同城市的相对占比对数据进行归一化,从而更加清晰地反映出城市间二级指标的相对差异;最后采用熵权法,根据指标样本包含的信息熵大小判断其

在综合评价中所能起到的作用,从而对指标进行权重分配。具体的城市交通出行指标体系如表1所示,各城市一级指标的评估结果如表2所示。

2.2 典型城市交通出行特征聚类画像分析

尽管不同城市的交通出行特征各不相同,但相关宏观政策的制定应该既不失特殊性又不失一般性,对9座城市进行聚类分析有助于系统性把握中国的城市面貌。本研究基于各城市一级指标数据之间的亲缘度对城市进行分类,通过分组迭代使得每种类型内部差异尽可能小、类型间差异尽可能大。具体而言,每座城市都由一级指标构成的向量 $X_k = (X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{k6})^T$ 表示,本研究定义a、b两座城市之间的亲缘度为平方欧式距离:

$$D_{ab} = \sum_{i=1}^6 (X_{ai} - X_{bi})^2 \quad (1)$$

“聚类”的实现通过如下步骤迭代得到:(1)计算城市间两两距离,形成距离矩阵。(2)将距离最近的两个城市合并为一个类别,计算新产生的

类别和其他类别之间的距离,形成新的距离矩阵。(3)按照相同的原则,继续合并类别,若剩余类别个数仍大于1,则继续重复本步骤,直到所有的城市都合并为一个类别。以上步骤通过树状图表现,见图2。

以树状图为基础,本研究将城市划分为4类:北京、上海和广州为第一类;深圳、杭州和成都为第二类;武汉和南京为第三类;重庆单独作为第四类。从城市基本情况出发,上述分类具有较强的合理性,例如北上广都是在历史基础上发展起来的一线城市,重庆则具有“山城”的独特性。为了更直观表明每组聚类的共性与个性,本研究根据一级指标数值的相对大小将城市分为1-4档并通过雷达图表现,形成城市交通出行特征画像,如图3所示。

分析第一组聚类后发现,北京、上海、广州在人口及城市面积指标和轨道交通指标上相比其他指标更加突出,说明此类城市的人口规模大、城

表1 城市交通出行指标体系

一级指标 X_i	标准化二级指标 $X_i^{(j)}$	权重 $w_i^{(j)}$
人口及面积指标 $X_{pop\&area}$	建成区面积	0.132
	人口密度	0.090
道路设施指标 X_{road}	建成区路网密度	0.117
	人均道路面积	0.080
	平均道路宽度	0.089
	建成区桥梁密度	0.188
限行限购指标 X_{policy}	限购程度	0.123
	限行程度	0.167
地面公交指标 X_{bus}	人均公交车线路里程	0.089
	千人公共汽车保有量	0.087
	人均乘公交次数	0.115
轨道交通指标 X_{rail}	线路条数	0.097
	换乘站比例	0.109
	人均轨道里程	0.149
	人均轨道交通乘坐次数	0.132
汽车保有量指标 X_{car}	汽车千人保有量	0.089
	单位面积汽车数量	0.087
	出租车在汽车中占比	0.115

表2 各城市一级指标标准化数值

城市	人口及城市面积指标	道路设施指标	限行限购指标	地面公交指标	轨道交通指标	汽车保有量指标
北京	0.725	0.266	1.000	0.546	0.996	0.767
上海	0.714	0.496	0.664	0.012	0.702	0.552
深圳	0.379	0.568	0.323	0.703	0.590	0.467
广州	0.545	0.136	0.267	0.426	0.646	0.298
杭州	0.057	0.600	0.684	0.833	0.000	0.533
武汉	0.129	0.384	0.383	0.411	0.438	0.544
重庆	0.616	0.300	0.000	0.100	0.133	0.062
南京	0.158	0.866	0.000	0.357	0.693	0.541
成都	0.204	0.272	0.575	0.719	0.214	0.614

市面积广且轨道交通发达，因此称其为“相对成熟的超大城市”。整体来看，此类城市的地面交通和道路设施的总量虽然已经达到一个相对较高的水平，但人均资源的提升仍然面临较大的瓶颈，城市的汽车承载能力已经趋于饱和，这与发展较早的传统一线城市特征相符。同时，轨道交通由于运量大、运行快且准时，在这类城市中起到的作用日益突出，表明未来超大城市将以公共交通为导向的发展趋势。

分析第二组聚类后发现，深圳、杭州、成都的道路设施指标、地面公交指标和汽车保有量指标上具有相对优势，说明此类城市道路设施相对完善，道路交通出行方式吸引力高，因此称其为“道路交通出行突出的城市”。汽车保有量多说明此类城市经济发展较好，而道路交通供给充裕和地面公交发达也说明此类城市道路规划更具科学性，符合新兴发展城市的特征。

分析第三组聚类后发现，武汉和南京人口和面积指标排名靠后，在轨道交通指标、汽车保有量指标上具有较为明显的相对优势，但地面公交指标较弱。由于此类城市的人口和面积扩张不如其他超大城市，带来的总体出行需求相对较低，因此称其为“交通出行需求较低的城市”。此类城市拥有较为完善的轨道交通与较多的汽车保有量，与中国典型的大型省会城市特征相符。

单独将重庆列为一类，是由于该城市具有相比其他城市更特殊的城市环境和交通情况：除了人口和面积指标排名靠前，在其他指标上的相对排名均靠后。这与重庆“山城”的独特地理特征密不可分，因此称其为“交通出行情况特殊的城市”。

3 城市道路交通出行情况影响要素回归分析

以汽车作为政策切入点来改善道路拥堵，核心落脚点是分析汽车在主要交通工具中的出行承担量比例、使用强度及其带来的交通出行效率改变。本研究对应选取了汽车出行占比、汽车出行距离和道路拥堵系数作为回归分析的因变量，具体定义如表3所示。其中，道路拥堵系数是本研究重点关注的核心因变量，直接反映城市整体的道路交通出行效率和交通治理情况，通过研究能针对性提出改善城市交通运行的建议；而汽车出行占比和汽车出行距离则作为辅助变量，可以为汽车共享等新出行模式的政策制定提供有效支撑。

通过与各城市一级指标评估结果对比发现，三大因变量均有相应一级指标与之存在较为明显的线性关系，因此本研究采用多元线性回归的方法来探讨一级指标（相关符号标识已在2.1节定义）具体如何影响城市道路交通出行，为规避新冠病毒感染疫情影响

响，使用2019年前后的数据进行建模，得到了如下3个多元回归表达式（均满足相关性和残差独立性检验要求）：

$$Y_{cong} = 0.581X_{pop\&area} + 0.491X_{car} + 0.055X_{bus} - 0.258X_{policy} - 0.144X_{rail} - 0.119X_{road} + 1.578 \quad (2)$$

$$Y_{prep} = 11.5\%X_{car} + 0.6\%X_{bus} - 0.5\%X_{pop\&area} - 0.5\%X_{policy} - 10.3\%X_{rail} - 1.7\%X_{road} + 38.7\% \quad (3)$$

$$Y_{dis} = 10.69X_{pop\&area} + 8.88X_{car} + 2.31X_{road} - 2.72X_{policy} - 2.47X_{rail} - 0.10X_{bus} + 8.93 \quad (4)$$

从回归表达式和显著性水平来看：影响道路拥堵系数最显著的指标是人口及城市面积（正相关）和汽车保有量（正相关），限行限购政策（负相关）和轨道交通（负相关）也存在一定影响；影响汽车出行占比最显著的指标是汽车保有量（正相关）和轨道交通（负相关）；影响汽车出行距离最显著的指标是人口及城市面积（负相关）和汽车保有量（正相关）。总体而言，汽车保有量直接决定了城市整体汽车使用情况，对道路拥堵系数、汽车出行占比和汽车出行距离均起到了较大影响；人口面积直接决定了城市交通出行需求，对汽车出行距离、道路拥堵系数的影响均排在首位；轨道交通由于对汽车存在明显的替代效应，对汽车出行占比有较大影响。

4 城市道路交通演变的情景预测

城市发展存在不确定性，而政策制定又需要前瞻性，因此本研究进一步对城市道路交通演变情况进行情景

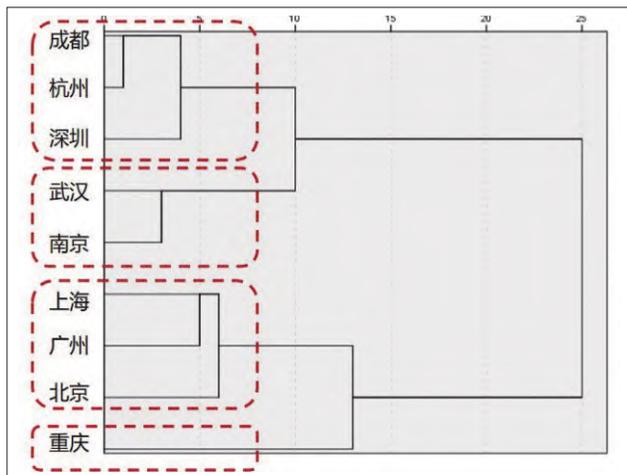


图2 城市交通出行层次聚类树状图

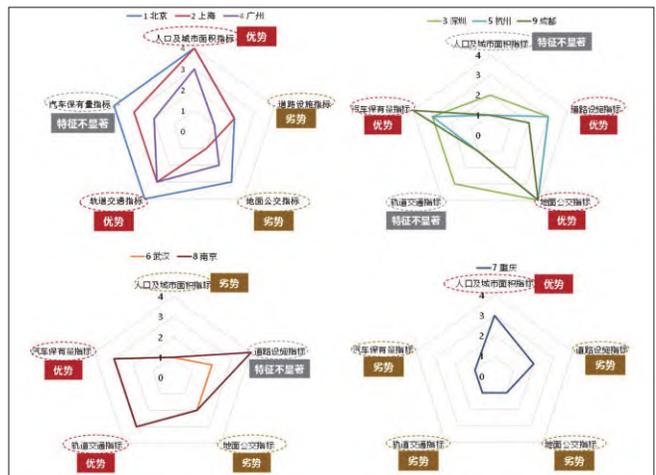


图3 城市交通出行特征聚类画像

预测。经过初步推演发现，大部分样本城市的汽车出行占比和汽车出行距离相对变化量不明显，又考虑到只有显著性较高的指标才会引起较为明显的边际变化，因此本研究以缓解城市道路拥堵为目标，对汽车保有量指标、人口面积指标以及轨道交通指标等关键影响因素的变化量设置不同情景，将公式(5)作为城市道路拥堵系数情景演变的预测模型：

$$\Delta Y_{cong} = 0.581\Delta X_{pop\&area} + 0.491\Delta X_{car} - 0.144\Delta X_{rail} \quad (5)$$

本研究主要设置3个情景，情景1作为基准情景，主要根据城市历史发展规律对相关参数进行线性外推，同时辅以部分公开政策以及最新数据进行修正^[34-42]。情景2以加强轨道交通建设为原则，对于相对成熟的超大城市和道路交通出行突出的城市，假设轨道交通建设速度提升一倍；对于交通出行需求较低的城市，由于目前轨道建设速度已经较快，假设轨道交通建设速度提升25%。情景3以限制汽车保有量为原则，基于现有政策合理假设进一步限制发放车牌的数量。除上述情景，考虑到交通出行情况特殊的城市的地理特征与汽车增速，汽车与轨道交通应该结合起来考虑，本研究专门设置了特殊情景，将情景2改为控制汽车保有量，情景3改为在情景2基础上同时加强轨道交通建设，且轨道里程增长较普通情景2更多。

由于城市规划多以10年为一个阶段，本研究选择的预测时间点为2025年和2030年，预测结果可为未来5~10年内的政策制定提供参考，具体参数假设如表4所示。

4.1 相对成熟的超大城市的道路交通演变

北京、上海、广州的道路拥堵系数情景演变结果如图4所示。由于北京和广州已对汽车增量进行控制，拥堵程度虽然仍会继续恶化，但变化较慢。但上海不同，由于持续的限购政策，目前上海的汽车保有量不高，但如果沪C牌照发放继续维持近些年的高速，将导致全市拥堵情况快速恶化，甚至超过北京。对比不同情景的

演变结果可以发现，对于北京和广州，加快轨道交通建设或者进一步控制汽车增长对缓解拥堵均有效果（情景2、情景3）；而对于上海，控制过快增长的汽车保有量效果最明显（情景3）。

4.2 道路交通出行突出城市的道路交通演变

深圳、杭州、成都的道路拥堵系数情景演变结果如图5所示。尽管此类城市的道路设施优势突出，目前深圳、杭州的拥堵情况都不算特别严重，但是随着汽车保有量持续增加，拥堵情况将会加剧，尤其对于目前没有限购政策的成都，拥堵恶化将会更加迅速。对比不同情景的演变结果可以发现，对于深圳，加快轨道交通建设能更有效地防止拥堵加剧（情景2）；对于杭州，加快轨道建设和进一步控制汽车保有量增长对缓解拥堵均能起到一定效果；对于成都，短期内如果继

续保持汽车保有量快速增长，拥堵将会快速加剧，加快轨道交通建设虽然能延缓拥堵（情景2），但长期效果不如控制汽车保有量（情景3）。

4.3 交通出行需求较低城市的道路交通演变

武汉、南京的道路拥堵系数情景演变结果如图6所示。武汉和南京当前拥堵情况已经比深圳、杭州等新兴发展城市更加严峻，且恶化速度不容小觑。对比不同情景的演变结果可以发现，对于轨道交通建设已经具备优势且仍在持续投入的武汉和南京而言，控制汽车保有量增长（情景2）比加快轨道建设（情景3）能更有效地改善拥堵，城市管理者需要把政策制定重心转移至汽车领域。

4.4 交通出行情况特殊城市的道路交通演变

重庆的道路拥堵系数情景演变结

表3 因变量定义

因变量	定义	数据来源
道路拥堵系数 Y_{cong}	全市范围内拥堵高峰期道路车辆通过的旅行时间和自由流通过的旅行时间的比值 ^[33]	高德地图 ^[18]
汽车出行占比 Y_{prop}	私家车和出租车出行量之和与城市总出行量的比值	各城市交通发展年报/文献 ^[24-32]
汽车出行距离 Y_{dist}	全市范围内汽车通勤活动平均出行距离(km)	行业大数据报告 ^[18-19]

表4 城市道路交通情景演变参数假设

类型	城市	情景1(基准)		情景2	情景3	
		人口	汽车保有增量/%	轨道交通建设	加强轨道交通建设	限制汽车增量/%
相对成熟超大城市	北京	接近上限	8~6**	每年新开通1条	每年新开通2条轨道，里程增加80	4~2
	广州	延续2%增长	4~4	轨道，里程增加40 km	轨道，里程增加80 km	2~1
	上海	接近上限	20~10	加30 km	加30 km	8~2
道路交通出行突出城市	深圳	维持3%~2%的增长率	4~4	每年新开通1条	每年新开通2条轨道，里程增加60	3~2
	杭州		6~6	轨道，里程增加30 km	轨道，里程增加60 km	4~2
	成都		20~10	加30 km	加30 km	10~5
交通出行需求较低城市	武汉			每年新开通2条轨道，里程增加50 km	每年新开通2.5条轨道，里程增加80 km	10~5
	南京	稳定2%增长	15~10	加50 km	加50 km	
交通出行情况特殊城市	重庆	稳定1%增长	30~15	每年新开通1条轨道，里程增加25 km	*每年新增车牌15%~5%	*情景2+每年新开通2条轨道，里程增加80 km

注：*表示该城市的情景假设与其他城市不同，为特殊情景；**表示第一个数字为2025年之前的汽车保有增量，第二个数字为2025—2030年的汽车保有增量，表中其余数字同理。

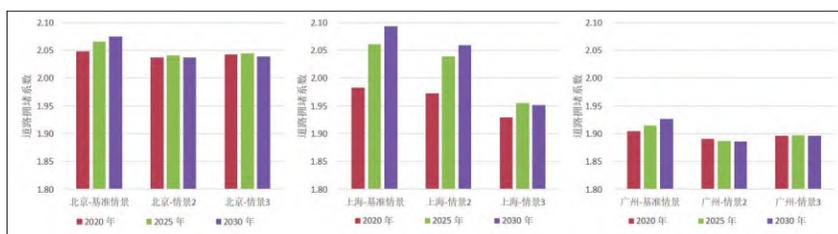


图4 相对成熟超大城市的情景演变结果

果如图7所示。基准情景下，快速增长的汽车保有将导致重庆道路拥堵愈发严重，甚至超过北京，要实现城市交通的长期可持续发展必须提前布局。对比不同情景的演变结果可以发现，通过控制汽车保有量增长能一定程度减缓拥堵恶化（情景2），如果能同时加快轨道交通建设，有望长期降低道路拥堵系数（情景3）。此结果意味着城市管理者需要从多维度对城市交通管理综合施策，对政府的治理能力提出挑战。

4.5 城市道路交通演变结果讨论

从4类城市的道路拥堵系数情景演变结果中可以发现，所有城市的道路交通拥堵情况在基准情景下都呈现恶化趋势，而控制汽车保有量对于减缓拥堵恶化具有较强作用。不过需要特别指出的是，这并不意味着各地政府应采取如限购等强制性行政措施来抑制汽车绝对数量的增长。一方面，出于公平原则，城市内所有公民都应拥有享受汽车生活的相同权利，能够便捷地使用汽车也是城市居民生活质量提高的重要标志之一，对汽车消费“一限了之”只是治标不治本的权宜之计，甚至有损公民权益。另一方面，未来在物联网、大数据、云计算、人工智能等技术的赋能下，自动驾驶、智能交通等新型交通出行形态将逐渐普及，进而带来城市面貌和交通效率的根本性变革，由此城市交通系统能够承载的汽车保有量以及汽车在其中的重要作用都将与以往大不相同。

进一步来说，针对交通拥堵等汽车社会问题来探索创新解决方案，也是中国抢占未来智能出行科技集群战略制高点并引领全球大中型城市可持续发展范式的重要契机。因此，城市管理者应从汽车的使用端入手进行科学疏导，做到既不强制约束汽车消费，又能有效降低城市居民的汽车使用强度，并自发地选择公共交通作为日常出行方式。在市场调控层面，政府应认真评估并借鉴东京、伦敦等城市的经验^[43-44]，改善公共交通服务水平、提升私人出行成本；在社会文化层面，政府应加强宣传低碳生活方式，鼓励

国民使用绿色共享出行等^[45-47]。

5 结论

基于各城市道路交通出行情况的情景演变结果及讨论，本研究得到如下结论与政策建议：

(1) 公共交通对于替代汽车出行、缓解城市拥堵具有显著效果，中国大型城市应以发展公共交通和共享交通为主，有条件的城市应加快轨道交通建设。

(2) 对于轨道交通已具备优势的城市（如上海、成都、武汉、南京等），进一步增加轨道交通供给对缓解拥堵的边际效果正在减弱，此类城市应鼓励多种交通工具共同发展，多维度并行提升交通效率。

(3) 对于交通出行情况特殊城市

（如重庆），一方面要加强大运量交通方式的供给，另一方面还要从城市布局和道路规划综合施策，均衡城市内部不同地区的出行需求。

(4) 即使道路拥堵情况较好的城市，汽车出行占比快速增加也将使道路交通很快不堪重负，应该积极疏导小汽车出行转向公交及轨道出行等，比如通过多元化收费方式的组合增加汽车出行成本（如过桥费、入城费、停车费、拥堵费等）。

(5) 研究合理的汽车保有量调节手段，原则是首先保证居民拥有享受汽车生活便利性的权利，同时尽可能提高城市交通出行效率。

参考文献：

[1]CHEN M, ZHAO F Q, LIU Z W. Innovation

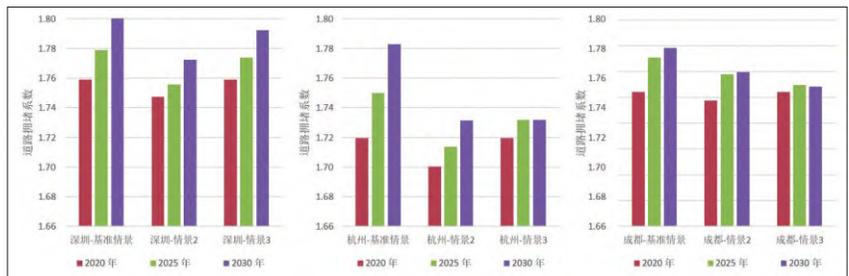


图5 道路交通出行突出城市的情景演变结果

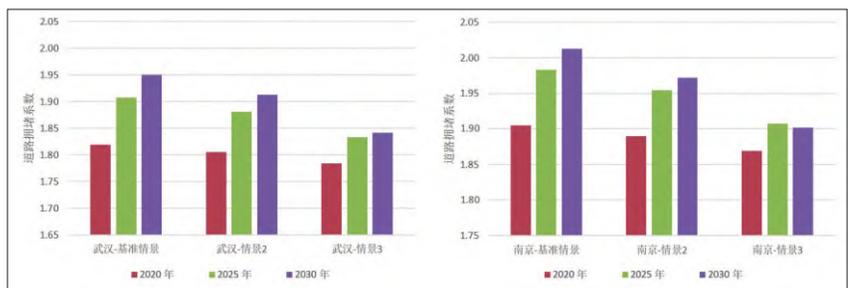


图6 交通出行需求较低城市的情景演变结果

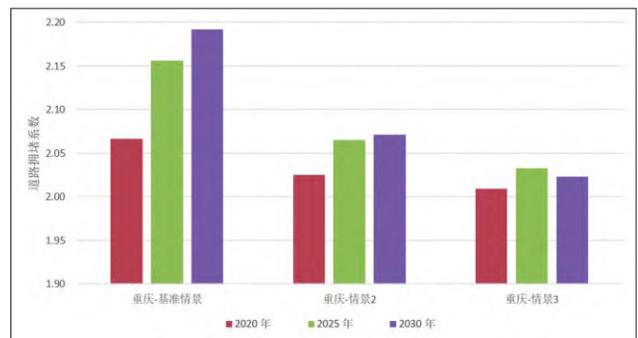


图7 交通出行情况特殊城市的情景演变结果

- approach of sustainable urban mobility in China[C]// Proceedings of SAE-China Congress,2018.
- [2] 邵源,林培群,郑健,等. 交通拥挤负外部成本量化模型及应用研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2021,21(2):1-6.
- [3] 汪光焘,王婷. 贯彻《交通强国建设纲要》,推进城市交通高质量发展[J]. 城市规划,2020,44(3):31-42.
- [4] RODRIGUES D O, MAIA G, BRAUN T, et al. Exploring hybrid-multimodal routing to improve user experience in urban trips[J]. Applied sciences, 2021, 11(10):4523.
- [5] 滴滴, CBNDData. 2015 年中国智能出行大数据报告 [EB/OL]. [2016-01-21]. <http://www.199it.com/archives/432118.html>.
- [6] BANISTER D. The sustainable mobility paradigm[J]. Transport policy, 2008, 15(2): 73-80.
- [7] 吴放,竺越,沈济黄. 空间环境对交通出行特征的影响:拥有大规模公交体系的城市比较研究[J]. 城市规划,2017,41(8):98-106.
- [8] MILLER H J, WU Y H, HUNG M C. GIS-based dynamic traffic congestion modeling to support time-critical logistics[C]//Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on Systems Sciences. HICSS-32. Abstracts and CD-ROM of Full Papers. IEEE, 1999.
- [9] 赵鹏军,万海荣. 我国大城市交通拥堵特征与国际治理经验借鉴探讨[J]. 世界地理研究,2016,25(5):48-57.
- [10] ROBERT C. Jobs-housing balancing and regional mobility[J]. Journal of the American planning association, 1989, 55(2):136-150.
- [11] ZHAO P, LV B, DE R G. Impact of the jobs-housing balance on urban commuting in Beijing in the transformation era[J]. Journal of transport geography, 2011,19(1):59-69.
- [12] 郭继孚,刘莹,余柳. 对中国大城市交通拥堵问题的认识[J]. 城市交通,2011,9(2):8-14,6.
- [13] BHAT, SUDARSHANA C. Effects of geometric and control features on network traffic: a simulation study[D]. Arlington: The University of Texas, 1994.
- [14] 刘有军,田聪. 不同路网形态下城市交通拥堵特性分析[J]. 中国公路学报,2013,26(1):163-169,190.
- [15] 杨保军. TOD 在中国 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [16] 杨向前. 民生视角下的北京城市交通拥堵问题[J]. 北京交通大学学报(社会科学版),2012,11(2):79-85.
- [17] 公安部,建设部.《城市道路交通管理评价指标体系》(2002年版)各类城市评价指标明细表[J]. 道路交通管理,2002(6):45-46.
- [18] 高德地图.2019 中国主要城市交通分析报告 [EB/OL].[2020-02-28].<http://www.199it.com/archives/1012031.html>.
- [19] 极光大数据.2018 年中国城市通勤研究报告 [EB/OL].[2018-06-15].<http://www.199it.com/archives/737728.html>.
- [20] 邹胜蛟. 重庆主城区空间结构与城市交通系统协调发展研究 [D]. 重庆:重庆交通大学,2011.
- [21] 北京交通发展研究院.2019 年北京交通发展年报 [EB/OL].[2020-01-06].<https://www.deliwenku.com/p-2220846.html>.
- [22] 上海市城乡建设和交通发展研究院.2020 年上海市综合交通运行年报 [EB/OL].[2020-03-31]. <http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw2319/nw32905/nw32914/nw32994/nw33007/>.
- [23] 陆锡明,顾啸涛. 上海市第五次居民出行调查与交通特征研究[J]. 城市交通,2011,9(5):1-7.
- [24] 广州市交通规划研究院. 广州市交通发展年报(2019)[EB/OL].[2020-01-05].http://www.gztpri.com/html/academic_research/annual_report.html.
- [25] 企鹅智酷,腾讯. 城市出行半径大数据报告 [EB/OL].[2017-02-15]. <http://www.199it.com/archives/564122.html>.
- [26] 杭州市交通运输局. 2019 年杭州市交通经济运行分析报告 [EB/OL].[2020-06-15]. http://tb.hangzhou.gov.cn/art/2020/6/15/art_1229356859_3557159.html.
- [27] 罗斌,叶盈,谭永朝,等. 杭州市交通拥堵综合治理实践[J]. 城市交通,2016,14(3):35-42,53.
- [28] 武汉市自然资源与规划局. 2020 年武汉市交通发展年度报告 [EB/OL].[2020-09-23]. <http://gtghj.wuhan.gov.cn/pc-1516-51822.html>.
- [29] 李剑锋. 基于大数据分析的南京都市圈出行特征研究[J]. 科技创新与应用,2017(34):1-3.
- [30] 王宇环,靳诚,杜家祺. 基于多源数据的成都市居民出行热点时空特征分析[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2020,78(2):86-93.
- [31] 重庆市规划和自然资源局.2019 年重庆市中心城区交通发展年度报告 [EB/OL].[2020-05-20]. http://ghzrzyj.cq.gov.cn/zwxx_186/mtgz/202005/t20200520_7460441.html.
- [32] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社,2020.
- [33] SCHRANK D, LOMAX T. 2001 urban mobility report[M]. Texas: Texas Transportation Institute, 2001.
- [34] 北京市交通委员会. 北京交通发展纲要(2014—2030年) [EB/OL].[2014-01-25]. <http://www.chinahighway.com/news/2014/804187.php>.
- [35] 中共中央,国务院. 关于对《北京城市总体规划(2016—2035)》的批复 [EB/OL]. [2017-09-27]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/27/content_5227992.htm.
- [36] 上海市人民政府. 上海市城市总体规划(2017—2035年) [EB/OL].[2018-01-07]. <http://www.shanghai.gov.cn/newshanghai/xgkfj/2035001.pdf>.
- [37] 广州市国土资源和规划委员会.《广州市城市总体规划(2017—2035年)》草案公示 [EB/OL]. [2018-08-26]. <http://www.gz.gov.cn/gzgov/s5828/201802/ca95c46a18fb40808fa6835bca784e83.shtml>.
- [38] 深圳市人民政府. 关于印发人口与社会事业发展“十三五”规划的通知 [EB/OL]. [2017-01-11]. http://www.sz.gov.cn/zfgb/2017/gb987/201701/t20170111_5879219.htm.
- [39] 成都市人民政府.《成都市城市总体规划(2016—2035年)》草案公示 [EB/OL]. [2018-03-06]. <http://ask.cdgh.gov.cn/CMSCMScgh/201803/201803060255026.pdf>.
- [40] 武汉市人民政府. 武汉市推进户籍制度改革实施意见 [EB/OL].[2017-06-13]. <http://wh.bendibao.com/live/2017613/87039.shtm>.
- [41] 南京市人民政府. 南京市“十三五”人口发展规划 [EB/OL].[2018-01-31]. http://www.nanjing.gov.cn/njxx/201801/20180131_367121.html.
- [42] 重庆市政府网. 重庆市人口发展规划(2016—2030年) [EB/OL].[2017-07-19]. http://www.sohu.com/a/158315698_349061.
- [43] 李振宇,高平. 日本城市交通发展的经验与启示 [J]. 建设科技,2009(17):42-43.
- [44] LITMAN T. London congestion pricing: implications for other cities[J]. CESifo DICE report, 2005, 3(3):17-21.
- [45] 刘宗巍,陈铭,赵福全. 基于网联化的全天候汽车共享模式效益分析及实施路径[J]. 企业经济,2015,34(7):44-48.
- [46] CHEN M, ZHAO F, HAO H, et al. Time-sharing car lease business model in China current situation, features and suggestion[C]//Proceedings of SAE-China Congress, 2017.
- [47] 张望,石萌,肖育德,等. 基于 DMAIC 方法的“共享汽车”纠纷应对体系优化设计[J]. 汽车工程学报,2021,11(6):463-471.