

李国旗,王 萍,吴婉姗,等.供需平衡视角下城市轨道交通分层与分类方法[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(5):87-96.

LI Guo-qi,WANG Ping,WU Wan-shan,et al. Urban rail transit stratification and classification method based on perspective of supply and demand balance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(5): 87-96.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.05.009

供需平衡视角下城市轨道交通分层与分类方法

李国旗^{1,2},王 萍^{1,3},吴婉姗^{1,3},施 路⁴

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院,四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室,四川 成都 611756; 3. 西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室,四川 成都 611756; 4. 中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都 610031)

摘 要:针对当前城市轨道交通规划建设与运营过程中存在的供需结构性矛盾,系统评价了中国主要城市 2025 年的轨道交通客流需求强度与线网供给间的失衡程度。首先,在熵值理论和交通需求分析法的基础上,提出城市轨道交通供给潜力分层方法,以及基于供给潜力分层的交通需求分析模型,对城市轨道交通供给潜力量化分层、客流需求强度进行预测;其次,基于人均密度和负荷强度指标对城市轨道交通进行分类;最后,选择中国 14 个典型大城市作为研究样本,验证提出方法的合理性和模型的可行性。研究结果表明:60%的高潜力城市易出现供给富余,这与城市多中心空间结构导致的轨道交通分担率不高以及现有负荷强度偏高有关,其中广州负荷强度过高以及西安线网规模偏小导致了供给富余的假象;60%的中潜力城市和 75%的低潜力城市供给不足,这与城市职住地失衡较为严重,而线路密度和负荷强度偏低有关;按照人均密度和负荷强度变化情况,2025 年样本城市有望形成 5 种类型,其中北京为高密度高负荷城市,线网运行效益较好,广州、重庆、南京为高密度中负荷城市,天津、深圳、沈阳、长春、大连为中密度高负荷城市,西安、上海为中密度中负荷城市,这 4 类城市供需更趋协调平衡;杭州、成都、武汉为高密度低负荷城市,应重新评估路网布局的科学性,有效提升客流需求强度。

关键词:交通工程;轨道交通;需求分析;供需平衡

中图分类号:U491

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2020)05-0087-10

Urban rail transit stratification and classification method based on perspective of supply and demand balance

LI Guo-qi^{1,2}, WANG Ping^{1,3}, WU Wan-shan^{1,3}, SHI Lu⁴

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong

University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation

Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;

4. China Railway Eryuan Engineering Group CO. LTD, Chengdu 610031, Sichuan, China)

收稿日期:2020-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(71603219);四川省科技计划应用基础项目(2019YJ0217);

中铁二院工程集团有限责任公司科技项目[KYY2019093(19-21)]

作者简介:李国旗(1984-),男,江西南昌人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:guoqi@swjtu.edu.cn。

Abstract: Aiming at the current structural contradictions between supply and demand in the planning, construction, and operation of urban rail transit (URT), the degree of imbalance between the demand for URT passenger flow and the network supply in major cities were evaluated in China in 2025. Firstly, a tiered method of URT supply potential and a transport demand analysis model was proposed based on tiered supply potential on the basis of the entropy theory and traffic demand analysis method, to predict the quantified and hierarchical supply potential of URT and the passenger demand intensity. Secondly, based on the per capita density and passenger flow intensity indicators, URT was classified. Finally, the 14 typical large cities in China were selected as research samples to verify the rationality of the method and the feasibility of the model. The results show that 60% of high-potential cities are prone to supply surplus, which is related to the low share rate of URT passenger flow caused by the urban polycentric space and the high passenger flow intensity. Among them, Guangzhou's excessive passenger flow intensity and the small network scale of the Xi'an have led to the illusion of surplus supply. 60% of the medium-potential cities and 75% of the low-potential cities are under-supplied, which is related to the serious job-housing imbalance and the low network density and passenger flow intensity. As of 2025, the samples will be divided into five types, based on the changes of population density and passenger flow. Among them, Beijing is a high-density and high-intensity city, with good network operational benefits. Guangzhou, Chongqing, and Nanjing are high-density and medium-intensity cities. Tianjin, Shenzhen, Shenyang, Changchun, and Dalian are medium-density and high-intensity cities. Xi'an and Shanghai are medium-density and medium-intensity cities. The supply and demand of these four types of cities are more coordinated and balanced. High-density and low-intensity cities, such as Hangzhou, Chengdu and Wuhan, should re-evaluate the scientific nature of the road network layout and rapidly the demand for passenger flow. 6 tabs, 2 figs, 25 refs.

Key words: traffic engineering; rail transit; demand analysis; supply and demand balance

0 引言

自 2003 年《关于加强城市快速轨道交通建设管理的通知》(国办发[2003]81 号)发布以来,中国城市轨道交通保持平稳快速发展,有效提升了城市公共交通供给质量和效率、缓解了城市交通拥堵。2018 年中国开通轨道交通并投入运营的城市达到 35 个,累计运营里程 5 761.4 km,已成为世界轨道交通大国。与此同时,受交通线网规划周期短、客流量预测难度大等因素影响,轨道交通供需结构性矛盾较突出,普遍存在运营亏损现象。因此,对城市轨道交通客流需求及线网供给能力进行量化评价及分类评估尤为迫切。

客流预测一般分为宏观预测与微观预测 2 个方面。宏观客流预测多使用土地利用法^[1]和四阶段法。过秀成等考虑轨道交通方式与土地利用间相互反馈的动态平衡关系,提出一种基于改进四阶段法的轨道交通客流预测方法,其研究体现了

轨道交通与其他运输方式的竞合关系^[2]。微观客流预测主要包括回归模型、支持向量机、神经网络、灰色模型等。Chan 等将已建成环境,社会经济,公交服务等影响因素和现有乘客量建立回归模型,预测加拿大魁北克蒙特利尔的地铁客流需求^[3]。王卓等采用改进的 BP 神经网络,建立铁路客运量时间序列神经网络预测模型^[4]。潘杰等基于灰色理论和马尔科夫理论,建立传统的灰色预测模型和灰色马尔科夫预测模型,对西安地铁客流量数据进行分析预测^[5]。为提高客流预测精度,弥补不同预测方法的不足,组合预测模型被广泛运用。Sun 等将小波变换(wavelet)和支持向量机(support vector machine, SVM)相结合,提出一种新的混合模型,将客流数据分解为高频和低频序列,采用支持向量机方法学习和预测相应的高频和低频序列,最后再通过小波重构各种预测序列^[6]。Wei 等将经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和反向传播神经网络(back-

propagation neural network, BPN) 结合, 提出混合 EMD-BPN 预测方法对地铁短期客流进行预测^[7]。杨静等提出一种基于变点模型、小波变换、自回归滑动平均模型的组合预测模型^[8]。毛静将神经网络和支持向量机结合, 建立城市轨道交通短期客流预测组合模型^[9]。

线网规模测算方法通常包括需求分析法、线网服务覆盖面积、服务水平分析法、回归分析等。周厚文采用交通需求法测算珠三角区域城际轨道交通线网规模, 用于城际轨道交通线网规划方案^[10]。陈坚等基于熵值理论, 将需求分析法、服务水平法以及回归分析法结合起来, 建立城市轨道交通合理规模综合计算模型, 并对重庆市 2020 年的合理规模进行预测^[11]。还有部分学者从转移客流、诱增客流的角度对线网规模进行测算。安学武等从综合交通系统的角度, 基于城市道路交通供需平衡视角, 对城市轨道交通线网规模进行测算^[12-14]。

综上, 现有研究多集中于对单一线路、单个城市的轨道交通供给或需求的预测, 从供需平衡视角进行多城市综合分析, 以及多情景模拟的实证研究稍显不足。不同城市人口、经济规模和交通需求特性差异较大、且轨道交通发展阶段不同。合理确定差异化参数, 能够为城市轨道交通供需评价和类型划分提供依据。本文根据各城市轨道交通 2017 年的供需现状数据, 首先提出基于熵值理论的城市轨道交通供给潜力分层方法, 并根据潜力值对城市分层; 其次, 基于城市分层对城市轨道交通需求分析模型的参数进行多情景标定, 讨论多情景模拟下交通需求量的动态变化; 最后, 以 2025 年城市轨道交通需求与供给状态为基准, 依据负荷强度和线网密度指标值, 划分不同的城市类型, 为从宏观总体视角认识不同城市的轨道交通发展状态提供参考。

1 城市轨道交通供给潜力分层方法

1.1 评价指标确定

城市轨道交通供给潜力反映其未来的发展空间。由于不同城市上线列车数、高峰频率、最小间隔、设施设备等技术指标获取难度大, 既有研究多结合人口、城市面积和线路里程等进行轨道交通能力评价。考虑数据的可得性和可靠性, 主要选择地均密度、人均密度以及在建里程指标, 进行城市轨道交通供给潜力评价。其中, 考虑现有地铁

路网主要集中在城市区域, 地均密度采用建成区面积来计算; 人均密度采用市区常住人口计算。

1.2 客观权重计算

熵权法是使用各指标熵值所提供信息量大小来决定指标权重的一种客观赋值法, 避免了主观干预, 被广泛使用。在城市轨道交通供给潜力评价中, 为使各指标具有统一的评价标准, 对指标进行量纲一化处理: 若指标为正向指标, 指标经过规范化后的值如式(1)所示; 若指标为负向指标, 指标经过规范化后的值如式(2)所示。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (1)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (2)$$

式中: i 为城市数量, $i=1, 2, \dots, m$, m 为城市个数; j 为评价指标, $j=1, 2, \dots, n$, n 为评价指标数; x_{ij} 为 i 城市的第 j 项指标值; x'_{ij} 为 i 城市第 j 项评价指标规范化后的值。

将指标数据同度量化, 得到决策矩阵 \mathbf{Y} 为

$$y_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^m x'_{ij} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = \{y_{ij}\}_{m \times n} \quad (4)$$

式中: y_{ij} 为 i 城市第 j 项指标规范化、量纲一化后的值。

根据决策矩阵 \mathbf{Y} , 确定第 j 项指标的熵为

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (5)$$

式中: H_j 为第 j 项指标的信息熵。

其中, 第 j 项指标的客观权重为

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (6)$$

式中: ω_j 为第 j 项指标的客观权重。

最后, 得到各城市的供给潜力值为

$$h_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \omega_j \quad (7)$$

式中: h_i 为 i 城市的供给潜力值。

2 基于多情景模拟的城市轨道交通需求分析模型

当前, 交通需求分析法、服务水平分析法、线网覆盖面积法、“溢出+转移”交通需求法在预测中国同一城市的交通需求中, 结果较为一致。基于基础数据的一致性和结果可比较性原则, 选用交通需求

分析法,对预测年人口规模、居民出行强度、公共交通分担率、轨道交通分担率及负荷强度等参数标定,对线网规模进行推算,其计算为

$$l_{it}=Q_{it}\alpha_{it}\beta_{it}/q_{it}$$

(8)

式中: l_{it} 为*i*城市*t*年的线网规模; Q_{it} 为*i*城市*t*年的居民日出行总量; α_{it} 为*i*城市*t*年公共交通出行比例; β_{it} 为*i*城市*t*年的城市轨道交通出行占公共交通出行的比例; q_{it} 为*i*城市*t*年的负荷强度。

2.1 居民出行总量

居民出行总量是城市交通系统承受能力限度的度量指标,计算为

$$Q_{it}=m_{it}\tau_{it}$$

(9)

式中: τ_{it} 为*i*城市*t*年的人均日出行强度; m_{it} 为*i*城市*t*年市区人口。

2.1.1 城市人口规模

考虑现阶段城市轨道交通主要服务区域为市区,使用 Logistic 模型进行市区人口预测,计算为

$$m_{it}=a_i/b_i(1+e^{-a_i(t_i-t_{i0})})^{-1}$$

(10)

$$a_i=\frac{1}{\tau_i}\ln((1/m_{i0}-1/m_{i1})(1/m_{i1}-1/m_{i2})^{-1})$$

(11)

$$b_i=a_i(e^{a_i\tau_i}/m_{i1}-1/m_{i0})(e^{a_i\tau_i}-1)^{-1}$$

(12)

$$t_{i1}-t_{i0}=t_{i2}-t_{i1}=\tau_i$$

(13)

式中: a_i 、 b_i 为*i*城市的计算系数; t_i 为*i*城市预测年; t_{i0} 为*i*城市调查数据初始年; m_{i0} 、 m_{i1} 、 m_{i2} 分别为*i*城市调查数据初始年市区人口、中间年市区人口和调查数据末年市区人口; t_{i1} 、 t_{i2} 分别为*i*城市调查数据中间年及末年; τ_i 为*i*城市年份差。

2.1.2 居民出行强度

居民出行强度主要受城市空间结构、经济实力、交通基础设施条件等因素影响。中国典型城市居民人均日出行次数大多在 2.5 左右,如表 1 所示。东京 1968 年人均出行强度为 2.48 次,1978 年为 2.53 次,长期保持稳定。据此,采用现状或 2020 年的居民出行强度预测值作为 2025 年预测值。

2.2 多情景模拟的参数标定

2.2.1 公共交通分担率的标定方法

公共交通分担率的标定受居民出行距离、不同交通方式的经济性、舒适性等综合影响,是城市规划中的一个难点,存在数据难以获取、处理难度高等问题。

为得到 2025 年的公共交通分担率,本文以

2017 年为基准,根据各城市的总体规划以及十三五规划文件得到 2020 年的公共交通分担率,基于各城市过去 5 年间公共交通分担率的高增长值和低增长值,确定 2025 年分担率的最高值和最低值。表 2 为中国部分城市公共交通分担率。

表 1 中国部分城市居民人均日出行次数及预测值^[15-22]

Tab. 1 Number of resident daily trips per capita in some cities of China and its predicted values^[15-22]

年份	1986	2006	2020
北京	1.91	2.64	2.75
上海	1.91	1.95	2.57
南京	1.90	2.44	2.44
重庆	2.36		2.58
成都	2.16	2.56	2.70
天津	2.02	2.44	2.50
广州	2.14	1.86	2.55
大连	2.09	1.88	2.47
武汉	1.80	2.84	2.50
沈阳	2.43		2.40
西安		2.34	2.40
长春	2.08	2.54	2.54
杭州	2.07	2.07	2.46
深圳		1.59	2.57

表 2 中国部分城市的公共交通分担率

Tab. 2 Public transportation ridership in some cities of China

%

年份	2000	2005	2010	2015
北京	15.35		29.80	39.70
上海		25.00	34.00	36.00
天津	5.06	15.20		30.00
广州		21.80	16.60	14.10
深圳		44.20	38.30	56.00
南京		22.00	31.00	40.00
成都				30.00
重庆			33.00	
长春	31.29		19.00	28.00
西安	29.09			
武汉	8.62		24.30	
沈阳				43.70
杭州	22.20			

2.2.2 负荷强度的标定方法

负荷强度是反映城市轨道交通运力与运量匹配程度的运营效率指标。以 2017 年线网负荷强度值为基准,以 0.1 为间隔,分析其增长到现状最高负荷强度(2.1 万人次/(km·d))的过程中,2025 年线网需求规模动态变化情况。

3 算例分析

3.1 研究样本与数据来源

在轨道交通已运营的 35 个城市中,选取数据相对完备的北京、天津、上海、广州、长春、大连、深圳、武汉、南京、重庆、成都、沈阳、西安、杭州 14 个城市作为样本。2025 年线网供给量的线路里程和在建里程,以及用于计算负荷强度的日均客运量来自《城市轨道交通 2017 年度统计和分析报告》;市区常住人口数及建成区面积来自各城市 2017 年统计年鉴;交通分担

率来自各城市国民经济和社会发展第十三个五年规划、城市轨道交通建设规划及城市总体规划。

3.2 城市轨道交通供给潜力分层结果

根据式(1)~式(6),得到地均密度、人均密度及在建里程权重分别为 0.23、0.33、0.44。根据式(7)得到各城市轨道交通供给潜力值,以样本城市的平均值(60 分)为基准线,上下波动约 20 分,且兼顾数量均衡性的原则,分为高、中、低潜力 3 个层级。样本城市轨道交通供给潜力分层结果及 2025 年轨道交通线网供给量如表 3 所示。

表 3 样本城市轨道交通供给潜力分层结果及 2025 年线网供给量

Tab.3 Stratified results of rail transit supply potential and network supply of sample cities in 2025

高潜力城市潜力值(≥78,均值 82.8)			中潜力城市潜力值(55~71,均值 61.2)			低潜力城市潜力值(≤50,均值 32.5)		
城市	潜力值	供给量/km	城市	潜力值	供给量/km	城市	潜力值	供给量/km
杭州	94	445.3	深圳	71	563.1	长春	50	161.2
成都	82	725.3	北京	62	1 143.5	上海	42	992.1
广州	80	890.6	武汉	62	731.7	南京	25	555.2
西安	80	318.3	重庆	56	485.2	大连	13	217.5
天津	78	409.9	沈阳	55	229.2			

3.3 基于多情景模拟的需求预测结果

根据式(9)~式(13)以及表 1,得到 14 个样本城市 2025 年市区常住人口及出行强度,主要指标如表 4 所示。天津、长春、大连平均负荷强度低于《城

市轨道交通工程项目建设标准》(建标 104—2008)中初期客流负荷强度应大于 0.7 万人次/(km·d)的标准。杭州、成都、重庆、沈阳、南京等城市负荷强度均低于 1 万人次/(km·d)。

表 4 主要指标取值

Tab.4 Values of main indicators

城市类型		市区常住 人口/万人	出行强度/ (次·人 ⁻¹)	2020 年公共交 通分担率/%	增长 区间/%	2025 年公共交 通分担率/%	2025 年轨道交 通分担率区间/%	2017 年负荷强度/ (万人次·(km·d) ⁻¹)
高 潜 力	杭州	745	2.46	32	6~10	38~42	40~45	0.90
	成都	1 450	2.70	33		39~43		0.80
	广州	1 957	2.55	34		40~44		2.11
	西安	838	2.40	42		48~52		1.86
	天津	1 687	2.50	36		42~46		0.55
中 潜 力	深圳	1 477	2.57	60	5~9	65~69	45~50	1.33
	北京	2 212	2.75	60		65~69		1.51
	武汉	1 146	2.50	36		41~45		1.01
	重庆	940	2.58	47		52~56		0.77
	沈阳	679	2.40	46		51~55		0.71
低 潜 力	长春	547	2.54	42	4~8	46~50	50~55	0.30
	上海	2 449	2.57	30		34~38		1.32
	南京	949	2.44	60		64~68		0.74
	大连	552	2.47	40		44~48		0.24

3.3.1 多情景模拟公共交通分担率标定

2025 年的公共交通分担率由 2020 年的公共交通分担率及增量确定。2020 年的公共交通分担率来自各城市的总体规划以及十三五规划文件,见表

4。其中大部分城市增量在 3%~10%之间。考虑高供给潜力类城市的人均密度和地均密度较低、在建里程数高,假设公共交通分担率增值在 6%~10%之间,中潜力类城市公共交通分担率增值稍低

于高潜力类城市,低潜力类城市由于土地或客流等因素的限制,城市轨道交通发展空间偏小,增值在4%~8%之间。

3.3.2 多情景模拟轨道交通分担率标定

轨道交通分担率来自各城市轨道交通规划,主要获取到北京市(50%~55%)、广州市(45%~50%)、沈阳市(60%~88%)、青岛市(60%~65%)、长春市(21%)、大连市(70.3%)数据,数据缺失城市结合各

城市总体发展规划,按高低2种情景确定各层级城市2025年的分担率区间最高值及区间最低值。

3.4 城市轨道交通供需评价结果

基于式(8)以及表3、表4数据,得到不同类型城市2017~2025年不同情境下交通需求量,结合2025年线网供给量以及日本东京(负荷强度2.08万人次/(km·d))、法国巴黎(负荷强度1.64万人次/(km·d))等数据,如图1、图2所示。

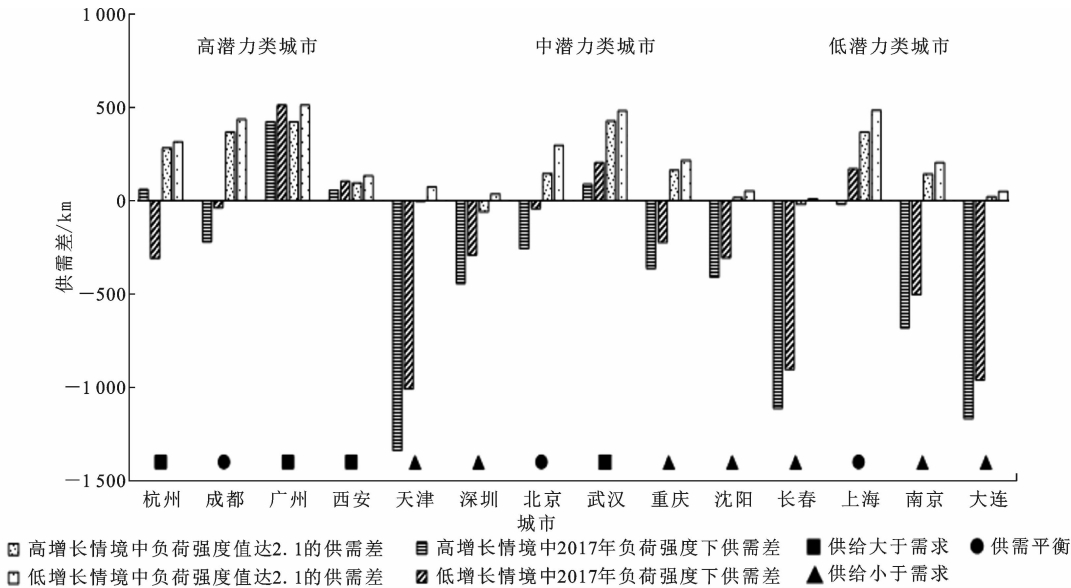


图1 不同潜力城市轨道交通供需差

Fig.1 Differences in supply and demand for URT in cities with different potential

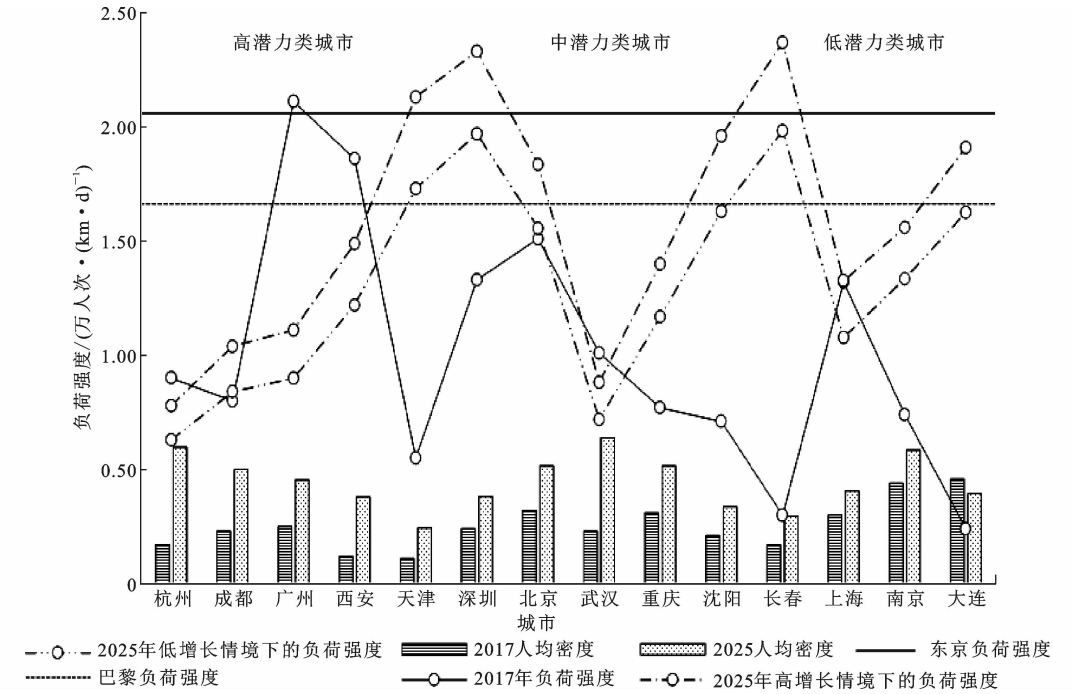


图2 不同潜力城市轨道交通人均密度及负荷强度

Fig.2 Per capita densities and passenger flow intensities of URT in cities with different potential

对样本城市轨道供需关系分 3 种情形讨论。

(1)供需平衡城市为成都、北京和上海。假定维持 2017 年负荷强度不变,到 2025 年处于供需平衡状态。据百度地图发布的《2018 年度中国城市交通报告》,2018 年北京高峰拥堵延时指数和职住地不平衡指数分别为 1.939、0.62,处于偏高水平,北京市城市轨道交通负荷有望继续提高,有望实现高质量平衡;上海的高峰拥堵延时指数和职住地不平衡指数分为 1.648、0.59,低于北京,而且其城市空间结构较北京更为分散,轨道交通分担率提高是实现高质量平衡的关键。据百度地图发布的《2018 年度中国城市活力研究报告》数据,成都市人口吸引力指数仅次于北上广深,具有更大的需求潜力,且现状负荷强度仅为 0.8 万人次/(km·d),有望通过负荷强度提高实现更高水平的平衡,但也有供给过剩的风险。

(2)供给富余城市位于高潜力城市的杭州、广州、西安,以及中等潜力的武汉。其中:2018 年杭州职住地不平衡指数为 0.5,分担率处于 15%~19%之间,人均密度高达 0.64 km/万人,应通过提高轨道交通分担率,实现供需平衡;广州市区常住人口数量大,且外来流动人口多,负荷强度高,但线路里程比北京上海低,因此,现阶段的供给富余是建立在高负荷强度的基础上的,出现了供给富余的假象;未来,在广佛一体化以及轨道交通线网向外辐射情形下,负荷强度存在下降的可能。西安市 2018 年的职住地不平衡指数仅次于沈阳,为 0.65,且呈现“棋盘+放射式”网状结构,居民对城市轨道交通的依赖性强,但现有线网规模偏小,负荷强度高,实际处于供给不足的状况,也是因高负荷强度带来的供给富余假象。武汉作为多中心城市结构,2025 年的轨道交通分担率不高,在 18%~23%之间,而人均密度却位于样本城市第一,达 0.64 km/万人,需求不足,负荷强度低,应通过完善轨道交通开行方案,加强多中心客流联系提高出行需求以实现供需平衡。

(3)供给不足城市主要为低潜力城市的长春、大连、南京,中潜力城市的深圳、沈阳、重庆以及高潜力城市的天津。2018 年,东北三大核心城市的长春、大连、沈阳的职住地不平衡指数在样本城市中均处于较高的水平,分别为 0.63、0.63、0.66,且分担率均处于 22%~28%之间,也处于偏高的水

平,说明居民出行偏好城市轨道交通。但存在线网里程不足和负荷强度低的问题,其人均密度分别为 0.29、0.39、0.34 km/万人,应注重适度增加路网规模,完善路网结构,提高客流需求实现供需平衡,同时也应注意外来人口减少和经济活力不足对客流的影响。深圳市人口快速增加、流动性加强,2025 年轨道交通分担率处于 29%~35%之间,居民城市轨道交通出行需求大,但 2025 年的人均密度仅为 0.38 km/万人,随着路网规模提高和结构完善,将有望实现供需平衡。天津市 2025 年的人均密度为 0.24 km/万人,在样本城市中处于最低,约为北京和上海的二分之一,而天津的职住地不平衡指数为 0.63,均高于北京和上海;2017 年,天津市负荷强度仅为 0.55 万人次/(km·d),出现了供给不足的假象。重庆市道路拥堵和职住地分离较为严重,其指数值分别为 1.885、0.65;根据模拟结果,2025 年,其轨道交通分担率处于 23%~28%之间,线路里程不足,未来应加快核心区范围轨道交通的建设,减轻道路交通压力,实现供需平衡。与供需平衡的成都市相对比,南京市的高峰拥堵延时指数和轨道交通分担率分别为 1.7 和 32%~37%,需求旺盛而负荷强度低,出现了供给不足的假象。随着各线路的建设以及线网完善,当 2025 年负荷强度达到 1.33 万人次/(km·d)时,将实现供需平衡。

3.5 不同层级城市轨道交通分类结果

在供求关系分析基础上,参考王镇波等(2019)的划分标准^[23],结合人均线网密度差异,将三类潜力城市进一步划分为 5 种类型,划分标准如表 5、表 6 所示。

表 5 不同层级城市轨道交通发展划分标准
Tab. 5 Classification criteria of URT development in cities at different levels

分类		分类标准
线网人均规模/ (km·万人 ⁻¹)	高密度	0.40~0.64
	中密度	0.24~0.45
	低密度	0.11~0.23
线网负荷强度/ (万人次·(km·d) ⁻¹)	高负荷	大于 1.50
	中负荷	1.00~1.49
	低负荷	小于 1.00

(1)高密度高负荷城市北京。到 2025 年,北京人均线网规模将达到 0.52 km/万人,负荷强度为 1.56~1.84 万人次/(km·d),属于高密度高负

表 6 不同层级城市轨道交通发展分类结果

Tab. 6 Classification results of URT development in

cities at different levels

城市分类	高潜力城市	中潜力城市	低潜力城市
高密度高负荷		北京	
高密度中负荷	广州	重庆	南京
高密度低负荷	杭州、成都	武汉	
中密度高负荷	天津	深圳、沈阳	长春、大连
中密度中负荷	西安		上海

荷类城市,运行效益好。考虑到未来将严格控制人口规模,在人均线网密度增加的同时,应注重挖掘轨道交通利用率,优化开行方案以促进需求增长。

(2)高密度中负荷城市,包括广州、重庆、南京。广州市 2017 年城市轨道交通为中密度高负荷,重庆和南京现为中密度低负荷。到 2025 年,广州总运营里程突破 800 km,人均密度达到 0.46 km/万人,随着路网向外辐射和均衡发展,负荷强度下降了 1~1.21 万人次/(km·d)。重庆和南京需提高轨道交通占全方式出行比例,增强轨道交通服务能力,人均线网规模增加的同时负荷强度提高。

(3)高密度低负荷城市,包括杭州、成都、武汉。杭州和成都现为低密度低负荷,武汉为低密度中负荷,这类城市轨道交通在建里程较多,客流不均衡导致运行效益不高。应注重公共交通为导向的综合开发,适当降低票价,优化线路开行方案,提高负荷强度。

(4)中密度高负荷城市,包括天津、深圳、沈阳、长春、大连。天津、沈阳和长春现为低密度低负荷、深圳现为中密度中负荷;大连现为高密度低负荷。天津、沈阳和长春在成网运行后,居民轨道交通出行量有望较大幅度增加;深圳在出行人口和线网规模增加的同时,轨道交通出行比例有所提高,深圳增加了 0.64~1 万人次/(km·d)。

(5)中密度中负荷城市,包括西安、上海。西安现为低密度高负荷城市,上海保持不变。西安 2017 年线网负荷强度达 1.86 万人次/(km·d),接近东京轨道交通强度,未来随着人均密度的提高以及路网向外辐射,其负荷强度有望下降。上海新建里程能满足其新增轨道交通需求,处于稳态。

4 结 语

(1)提出了基于熵值理论的城市轨道交通供给潜力分层方法和多情景模拟的城市轨道交通需求分析模型,以 14 个大城市为研究对象,进行城市轨道交通分层与分类评价。从城市轨道交通供给潜力视角,可将样本城市划分为高、中、低 3 个层级。高潜力城市轨道交通在多情景模拟过程中呈现供给大于需求的状态,这类城市普遍处于轨道交通大建设大发展阶段;中潜力城市供给大于需求、供需平衡、供给小于需求 3 种状态并存,处于动态变化过程;低潜力城市多呈现供给不足的状态,处于运营为主的阶段或发展初级阶段。

(2)将 14 个城市按照 2025 年人均线网规模和负荷强度指标,可划分为 5 种城市类型。高密度高负荷城市的北京,供需协调性最高,在实现收支平衡的基础上有望盈利;高密度中负荷的广州、重庆、南京,中密度高负荷的天津、深圳、沈阳、长春、大连以及中密度中负荷的西安、上海等城市轨道交通供需协调适中;杭州、成都、武汉为高密度低负荷的城市,应重新评估路网规划的科学性,并完善运营方案。

(3)从负荷强度变化来看,在多情景模拟过程中供给大于需求的城市,2025 年负荷强度有所下降,且其降幅与供需差正相关;供给不足城市,2025 负荷强度有所上升,且其增幅与供需差负相关。

(4)城市轨道交通线网供需状况受线网布局、人口规模、站点数、汽车保有量、职住地平衡、公共交通分担率等多因素综合影响,对其变化规律认识还有待深化^[24-25]。本文研究考虑了各指标数据的客观性以及预测数据的可靠性等,但在指标的取值、划分标准等方面仍受数据完备性、城市差异性等影响,指标取值和划分标准具有一定主观性。随着中国城市轨道交通进入成熟期以及数据量的丰富,本文方法的科学性和有效性将得到进一步验证。在现有轨道交通路网总体处于建设和运营并重,且部分城市线网逐步完善情形下,研究结果能够为深入认识轨道交通发展阶段的差异,以及路网水平差异提供重要参考,既丰富了城市轨道交通评价理论,也能够为不同类型城市轨道交通运营管理提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 陆化普,朱 军,王建伟,等.城市轨道交通规划研究与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
LU Hua-pu, ZHU Jun, WANG Jian-wei, et al. Research and practice of urban rail transit planning[M]. Beijing:China Waterpower Press,2001.
- [2] 过秀成,吕 慎.基于合作竞争类OD联合方式划分轨道客流分配模型研究[J].中国公路学报,2000,13(4):91-94.
GUO Xiu-cheng, LU Shen. Study of URT's joint modal split assignment model on cooperative and competitive OD matrix[J]. China Journal of Highway and Transport,2000,13(4):91-94.
- [3] CHAN S, MIRANDA-MORENO L F. A station-level ridership model for the metro network in Montreal, Quebec[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013,40(3):254-262.
- [4] 王 卓,王艳辉,贾利民,等.改进的BP神经网络在铁路客运量时间序列预测中的应用[J].中国铁道科学,2005,26(2):127-131.
WANG Zhuo, WANG Yan-hui, JIA Li-min, et al. Application of improved BP neural network in time series forecast of railway passenger volume[J]. China Railway Science,2005,26(2):127-131.
- [5] 潘 杰,马超群.基于改进灰色马尔科夫模型的地铁客流预测[J].交通科技与经济,2018,20(6):52-56,69.
PAN Jie, MA Chao-qun. Passenger flow forecast based on improved grey Markov model [J]. Technology & Economy in Areas of Communications,2018,20(6):52-56,69.
- [6] SUN Y X, LENG B, GUAN W. A novel wavelet-SVM short-time passenger flow prediction in Beijing subway system[J]. Neurocomputing,2015,166:109-121.
- [7] WEI Y, CHEN M C. Forecasting the short-term metro passenger flow with empirical mode decomposition and neural networks [J]. Transportation Research Part C,2011,21(1):148-162.
- [8] 杨 静,朱经纬,刘 博,等.基于组合模型的城市轨道交通短时客流预测[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(3):119-125.
YANG Jing, ZHU Jing-wei, LIU Bo, et al. Short-term passenger flow prediction for urban railway transit based on combined model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2019,19(3):119-125.
- [9] 毛 静.城市轨道交通客流短期预测方法及实证研究[D].北京:北京交通大学,2012.
MAO Jing. Short-term forecasting method and empirical research on urban rail transit passenger flow[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2012.
- [10] 周厚文.珠三角区域城际轨道交通线网规划方案研究[J].铁道工程学报,2009,131(8):96-100.
ZHOU Hou-wen. Research on the intercity rail transit network plan for pearl river delta region[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 131 (8): 96-100.
- [11] 陈 坚,李 武,赵翰林,等.城市轨道交通合理规模综合计算模型研究[J].铁道运输与经济,2016,38(2):71-75.
CHEN Jian, LI Wu, ZHAO Han-lin, et al. Study on comprehensive calculation mode of reasonable scale of urban rail transit[J]. Railway Transport and Economy,2016,38(2):71-75.
- [12] 安学武,杜殿虎,马超群,等.基于溢出交通需求的城市轨道交通线网规模测算模型[J].交通运输工程学报,2008,8(3):82-85.
AN Xue-wu, DU Dian-hu, MA Chao-qun, et al. Computation model of network scale for urban rail transit based on traffic demand overflow[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8 (3): 82-85.
- [13] 宋传增,李鑫磊,张 朔.基于供需平衡的城轨线网规模计算方法[J].山东建筑大学学报,2015,30(6):532-536.
SONG Chuan-zeng, LI Xin-lei, ZHANG Shuo. Calculation method of the scale of rail transit network based on supply and demand balance theory[J]. Journal of Shandong Jianzhu University,2015,30(6):532-536.
- [14] 王智鹏,罗 霞.综合交通系统条件下城市轨道交通线网规模测算[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(增1):193-197.
WANG Zhi-peng, LUO Xia. Measurement of urban rail transit network size under the condition of integrated traffic system[J]. Journal of Chang'an University,2015,35(增1):193-197.

- sity; Natural Science Edition, 2015, 35(S1): 193-197.
- [15] 北京交通发展研究中心. 北京第四次交通综合调查分析报告[R]. 北京: 北京交通发展研究中心, 2012.
Beijing Transportation Development Research Center. Analysis report of the fourth comprehensive transportation survey in Beijing[R]. Beijing: Beijing Transportation Development Research Center, 2012.
- [16] 赵慧臻. 城市轨道交通线网合理规模研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
ZHAO Hui-zhen. Research on reasonable scale of urban rail transit network[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [17] 马克平, 曹伯虎, 范小勇. 天津市居民出行特征分析与交通政策探讨[J]. 交通科技与经济, 2007, 9(4): 112-113, 116.
MA Ke-ping, CAO Bo-hu, FAN Xiao-yong. Analysis on the resident trip characteristics and study on the transport policies in Tianjin[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2007, 9(4): 112-113, 116.
- [18] 刘海洲, 张石石, 高志刚. 重庆一小时经济圈轨道交通线网合理规模研究[J]. 科技信息, 2009(20): 314-315.
LIU Hai-zhou, ZHANG Shi-shi, GAO Zhi-gang. Reasonable scale of rail transit network in Chongqing one-hour economic circle[J]. Science & Technology Information, 2009(20): 314-315.
- [19] 杨京帅. 城市轨道交通线网合理规模与布局方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
YANG Jing-shuai. Study on reasonable scale and layout method of urban rail transit network[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [20] 邹志云, 蒋忠海, 梅亚南, 等. 大中城市居民出行强度的聚类分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007, 5(2): 8-13.
ZOU Zhi-yun, JIANG Zhong-hai, MEI Ya-nan, et al. Cluster analysis on the trip intensity of residents in the large and medium cities[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2007, 5(2): 8-13.
- [21] 聂华波. 快速公交线网规划探索——武汉市为例[C]//中国城市规划学会. 2013 年中国城市交通规划年会暨第 27 次学术研讨会论文集. 北京: 中国城市规划学会, 2014: 1-8.
NIE Hua-bo. Exploration of BRT network planning—Taking Wuhan as an example[C]//Academic Committee of Urban Planning Society of China. Proceedings of 2013 China Urban Transportation Planning Conference and 27th Academic Symposium. Beijing: Academic Committee of Urban Planning Society of China, 2014: 1-8.
- [22] 秦文军, 梁成文. 沈阳市快速轨道交通合理规模研究[J]. 城市规划, 1999(9): 48-50.
QIN Wen-jun, LIANG Cheng-wen. Research on reasonable scale of rapid rail transit in Shenyang[J]. Urban Planning, 1999(9): 48-50.
- [23] 王镇波, 李昱澄, 叶霞飞. 国内各城市的轨道交通线网负荷强度比较分析——中国城市轨道交通协会数据分析的研究报告之二[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 1-6.
WANG Zhen-bo, LI Yu-cheng, YE Xia-fei. Comparative analysis of passenger flow intensity on rail transit network in Chinese cities—The second report of the data based on the urban rail transit association of China[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 1-6.
- [24] 彭其渊, 刘杰. 城市轨道交通规划网络与城市规划的综合协调性量化分析[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(3): 134-144.
PENG Qi-yuan, LIU Jie. Comprehensive coordination quantitative analysis of urban rail transit planning network and urban planning[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(3): 134-144.
- [25] 王玉萍, 马超群. 城市轨道交通客运量影响因素与成长规律[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(3): 69-75.
WANG Yu-ping, MA Chao-qun. Influencing factors and development trends of urban rail transit passenger flow[J]. Journal of Chang'an University: Nature Science Edition, 2013, 33(3): 69-75.