

# 城市轨道交通网络对公共交通可达性与社会公平性的影响研究动态

李毅喆<sup>1,2</sup>

(1.同济大学交通学院, 上海 201804; 2.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 选取来自国际学术期刊的论文, 以概述形式对城市交通理论方法、实证分析等学术研究成果进行总结性介绍, 旨在增强城市交通业界和学界对国际学术动向和研究热点的关注, 促进学术交流。《城市轨道交通网络对公共交通可达性与社会公平性的影响——以西安都市圈为例》一文以西安都市圈为例, 针对城市轨道交通网络对公共交通可达性与社会公平性的影响, 创新地将出行时间与票价成本共同纳入评估框架, 并采用出行成本加权可达性模型进行分析。结果发现, 城市轨道交通系统整体上显著提升了区域可达性, 促进了城市群融合发展。然而, 这种效益分布不均: 空间上, 可达性提升集中于城市轨道交通车站周边区域, 反而加剧了中心城区与郊区的空间不平等; 社会层面, 高收入群体因多居住于城市轨道交通便利区域, 获益远高于可达性本就较低的低收入群体, 导致垂直公平性恶化。

**关键词:** 城市轨道交通; 公共交通可达性; 社会公平性; 西安都市圈

Academic Dynamics on How Urban Rail Transit Network Affects Transit Accessibility and Social Equity

LI Yizhe<sup>1,2</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The paper “The Impact of Metro Networks on Transport Accessibility and Equity: A Case Study of the Xi’an Metropolitan Area” takes the Xi’an metropolitan area as an example to explore the effects of urban rail transit network on transit accessibility and social equity. It innovatively incorporates both travel time and fare costs into the evaluation framework and applies a travel cost-weighted accessibility model for analysis. The results reveal that urban rail transit network significantly enhances regional accessibility and promotes the integrated development of the urban agglomerations. However, these benefits are unevenly distributed: spatially, the improvement in accessibility is concentrated around urban rail transit stations, which instead exacerbates inequalities between the central area and peripheral areas; socially, high-income groups, who predominately reside in urban rail transit-accessible areas, benefit far more than low-income groups with inherently lower accessibility, leading to a decline in vertical equity.

**Keywords:** urban rail transit; accessibility; equity; Xi’an Metropolitan Area

收稿日期: 2024-12-11

作者简介: 李毅喆(2002—), 男, 安徽寿县人, 硕士研究生, 研究方向为交通规划、设计与运行管理, 电子邮箱 213576172@qq.com。

## 研究背景

随着中国各地城镇化进程的加速, 作为大城市公共交通系统的骨干, 城市轨道交通系统在过去 20 年迅速发展。截至 2024 年, 全国已有 54 城市开通运营 325 城市轨道交通线路, 总长度达到 10 945.6 km。城市轨道交通不仅节约了整体出行时间, 也对城市集聚发展起到了支撑作用。然而, 城市轨道交通

票价可能对低收入群体造成较大经济负担, 并加剧交通不平等。因此, 研究城市轨道交通网络对公共交通可达性和社会公平性的影响具有重要意义。

可达性用于衡量到达目的地的便利程度与成本, 可用于评估城市轨道交通服务效果及分析线路分布对城市房价的影响; 公平性则关注机会在空间或不同群体间的分布状

况,尤其关系到高度依赖公共交通的低收入群体。以往研究多基于时间成本评估可达性,较少纳入货币成本,也未能充分评估票价与出行时间对公共交通可达性和公平性的共同作用。因此,《城市轨道交通网络对公共交通可达性与社会公平性的影响——以西安都市圈为例》重点探讨了这两个因素的综合影响。

### 研究区域与数据

该研究以西安-咸阳及周边重点区县为研究区域,包含1个中心城市(西安市)、1个副中心城市(咸阳市)和3个边缘区县(泾阳县、高陵区、临潼区)。收集的数据主要包括以下几类:

1) 城市轨道交通线路与车站数据。研究区域内有8条城市轨道交通线路,总长252.6 km,共159个车站(其中14个为换乘站)。

2) 出行数据。从高德地图开放平台的路线规划Web API获取出行信息。通过设置“推荐模式”和“无城市轨道交通模式”,分别模拟“有城市轨道交通”和“无城市轨道交通”两种场景,获取包括票价、出行时间(初始不含等待时间)、出行距离、路线及换乘信息等数据,据此构建OD路径矩阵用于可达性计算。

3) 人口数据。人口数据来源于2020年中国第七次全国人口普查。原始数据以街道办事处辖区为单位发布,在该研究中,这些数据被进一步分配到800 m×800 m的网格单元中。

4) 居民出行调查数据。采用2015年西安市居民出行调查中的出行日记数据。该调查涵盖西安市和咸阳市的受访者,最终获得39 288份合格问卷和133 495条有效的出行链记录,内容包括每次出行的起点与终点、出行目的、出行方式、出行时间等。这些数据用于校准出行成本衰减函数,从而通过出行成本加权来计算可达性。

5) 房价数据。房价数据来源于贝壳网,共获取27 907条记录,根据价格划分为高、中、低3类,用于垂直公平性分析。该研究假设家庭(或住户)收入与房价呈正相关关系。

### 模型构建

#### 1) 累积机会测度。

首先,计算“有城市轨道交通”和“无

城市轨道交通”两种情景下的公共交通可达性;随后,以人口为机会目标,计算出行成本,综合考虑出行时间与票价成本,通过平均可支配收入估算出行时间的价值;最后,先将分散的可达性值进行聚合处理,再结合人口数据进行加权计算,最终生成人口加权可达性指标,并采用出行成本加权计算合并不同出行成本阈值下的可达性值。

公共交通可达性计算公式为:

$$A_{i,m,\tau} = \sum_j P_j \cdot f(C_{ij,m}, \tau),$$

式中,  $A_{i,m,\tau}$  为在出行成本阈值  $\tau$  下,起点  $i$  通过路径策略  $m$  (“有城市轨道交通”为“推荐模式”;“无城市轨道交通”为“无城市轨道交通模式”)所实现的人口可达性;  $P_j$  为目的地  $j$  的人口数量/人;  $f(C_{ij,m}, \tau)$  为阻抗函数,  $C_{ij,m}$  为出行成本,当  $C_{ij,m} < \tau$  时函数值为1,否则为0。

出行成本计算公式为:

$$C_{ij,m} = T_{ij,m} V + F_{ij,m},$$

式中,  $T_{ij,m}$  为路径策略  $m$  条件下  $i$  和  $j$  之间的出行时间/h;  $V$  为出行时间的价值/(元·h<sup>-1</sup>),通过平均可支配收入进行估算,  $V = E/H$ ,  $E$  为年人均可支配收入/元,  $H$  为年均年工作小时/h;  $F_{ij,m}$  为公共交通票价成本/元。

区域人均可达性加权求和公式为:

$$A_{\omega_p,m,\tau} = \frac{\sum_{i \in I} A_{i,m,\tau} \times P_i}{\sum_{i \in I} P_i},$$

式中,  $A_{\omega_p,m,\tau}$  为路径策略  $m$  在出行成本阈值  $\tau$  下的人口加权可达性;  $I$  为研究区域内所有800 m×800 m网格的集合。

出行成本加权测度公式为:

$$A_{i,m,\omega_2} = \sum_{\tau \in T} (A_{i,m,\tau_n} - A_{i,m,\tau_{n-1}}) f(\tau_n),$$

式中,  $A_{i,m,\omega_2}$  为基于路径策略  $m$  的起点  $i$  的成本加权可达性;  $\tau_n$  为第  $n$  个成本阈值;  $T$  为一组成本阈值的集合;  $f(\tau_n)$  为出行成本衰减函数,用于衡量不同成本阈值下的可达性权重。

#### 2) 人口分布估计模型。

基于街道办事处辖区层面的人口数据,综合考虑多种影响因素构建线性回归模型,将人口数据分配至网格尺度,并通过与外部数据对比验证模型的可靠性。

构建多元线性回归模型:

$$\rho_s = \alpha + \sum_n \beta_n x_{s,n}$$

式中,  $\rho_s$  为街道办事处辖区  $S$  的人口密度/(人·km<sup>2</sup>);  $\alpha$  为常数项;  $\beta_n$  为回归系数, 模型考虑的因素包括道路网密度、住宅兴趣点(POI)密度和夜间灯光分布等, 通过回归分析确定各因素的系数;  $x_{s,n}$  为影响人口分布的第  $n$  个影响因素。

根据回归模型结果将人口数据分配至每个网格。街道辖区约束下的网格人口密度分配计算公式为:

$$\rho_g = \omega_g \rho_s, \quad \omega_g = \frac{\hat{\rho}_g}{\sum_{k \in S} \hat{\rho}_k}$$

式中,  $\rho_g$ ,  $\rho_k$  分别为网格  $g, k$  的人口密度/(人·km<sup>2</sup>),  $g$  属于街道办事处辖区  $S$ ;  $\omega_g$  为网格  $g$  的人口分配权重, 由模型估计的网格人口相对比例确定。

## 研究结论

### 1) 人口分布估计结果。

人口与公共汽车线路、住宅兴趣点密度的线性回归模型结果显示, 两者对人口分布具有显著正向影响, 且模型调整后的  $R^2$  值为 0.925, 表明模型拟合效果良好。

基于模型结果将人口分配至网格并绘制人口密度图。结果显示: 西安市和咸阳市中心城区人口密集, 且有多条城市轨道交通线路交会, 人口密度向周边递减; 西安市西北角的汉长安城遗址区人口密度骤降; 咸阳市中心城区人口聚集范围半径小于西安市, 周边 3 个县城中心则呈现出相对孤立的人口分布特征。

将本文的人口分布估计结果与 WorldPop Hub 数据集进行对比来验证模型可靠性。两者的 Pearson 相关系数为 0.75, 且标准偏差椭圆在长轴长度、短轴长度、地理中心位置和旋转角度等参数上差异较小, 这验证了人口分布估计模型的可靠性。

### 2) 可达性测度。

“有城市轨道交通”和“无城市轨道交通”两种场景下, 人口可达性的空间分布模式及变化趋势基本相似。在“有城市轨道交通”场景中, 西安市和咸阳市中心城区可达性高, 远郊区较低, 整体呈现距中心越远而递减的态势。在较低出行成本阈值条件下, 3 个县城中心的公共交通主要服务于区内出行; 出行成本阈值升高后, 这些区域的可达性大幅提升。当出行成本阈值较高时, 西

安-咸阳城市轨道交通走廊沿线网格的可达性甚至超过咸阳市中心城区, 导致城市中心与县城中心之间的边界趋于模糊。这表明, 在较高的成本下, 公共交通有助于促进区域间联系和城市群发展。

### 3) 城市轨道交通网络对可达性的影响。

对比两种情景可知, 城市轨道交通系统在所有给定出行成本阈值条件下均提升了公共交通可达性, 这主要是由于城市轨道交通运行速度高于公共汽车, 尽管票价较高, 但其速度优势仍占主导地位。

城市轨道交通对提升公共交通系统整体效率具有积极作用。在低出行成本阈值条件下, 城市轨道交通线路附近区域的可达性改善最为显著, 这主要归因于城市轨道交通车站的直接服务范围(集水区效应)。随着出行成本阈值增加, 改善区域扩大。公共汽车与城市轨道交通换乘方案的增加进一步增强了城市轨道交通的可达性优势, 即使起讫点距离城市轨道交通网络较远, 但城市轨道交通仍因其速度优势而具有吸引力。

从可达性计算结果来看, 城市轨道交通网络附近的起讫点受益最大, 可达性提升显著, 尤其在西安和咸阳市中心。随着距离增加, 可达性提升效果减弱, 表明城市轨道交通的邻近效应明显。与仅考虑出行时间相比, 同时考虑出行时间和票价时, 城市轨道交通的实际影响范围更大。仅考虑出行时间会低估轨道交通网络的影响范围, 忽略票价对低收入群体的影响, 导致评估偏差。因此, 建议在公共交通系统规划时, 综合考虑出行时间和票价, 以更全面地评估可达性, 并优化轨道交通网络布局和票价结构, 提高公平性和轨道交通利用效率。

### 4) 城市轨道交通网络对公平性的影响。

#### ① 空间公平性。

公共汽车线路分布不均衡, 导致西安市中心城区公共交通可达性高, 而农村地区较低。城市轨道交通网络虽然可以改善西安市中心城区的可达性, 但对其他地区影响有限。车站周边 1 km 范围内可达性提升明显, 且随距离增加效果降低。“有城市轨道交通”场景下, 公共交通可达性的空间公平性较差。尽管城市轨道交通网络扩大了整体空间差异, 但西安市中心城区 0~5 km 范围内的基尼指数出现下降, 表明该区域可达性差距因城市轨道交通而缩小。总体来看, 离西安市中心城区越远, 城市轨道交通对空间公平性的负面影响越大。若以城市轨道交通

车站为核心设置环状缓冲区,加入城市轨道交通网络后基尼指数降低,各环内空间公平性有所改善,说明城市轨道交通系统相较于单纯依赖公共汽车交通更为公平。

### ② 垂直公平性。

高收入群体在公共交通可达性方面优势显著。即使在仅有公共汽车交通的情况下,其获得的机会也多于低收入群体;城市轨道交通网络加入后进一步扩大了这一优势,原因在于高收入群体更倾向于居住在交通便利地段。

低收入群体的公共交通可达性较低,且从城市轨道交通建设中获益有限。因其多居住在城市外围或中心区老旧社区,这些区域城市轨道交通车站密度较低,导致可达性差距进一步扩大。

## 研究总结

1) 城市轨道交通网络对可达性和城市发展的影响。

西安市城市轨道交通网络在整体上提升了区域可达性,促进了城市群发展。西安市和咸阳市中心城区以及城市轨道交通走廊沿线享有更高的可达性,因此,城市轨道交通加强了区域交通联系与城市融合。然而,城市轨道交通对可达性的影响存在空间不均衡性;城市轨道交通线路邻近区域的可达性虽提升明显,但随着与中心城区距离的增加,改善效果迅速减弱。远郊区及城市轨道交通未覆盖区域的可达性依然较低,导致整体上空间差距扩大,基尼指数上升。

2) 城市轨道交通网络对公平性的影响及改进措施。

垂直公平性评估显示,不同社会群体在公共交通可达性方面存在显著不平等。低收入群体不仅公共交通可达性最低,而且从城市轨道交通建设中获益最少;其居住位置与城市轨道交通车站密度的不匹配进一步加剧了这种不平等。

为改善这一状况,建议交通政策向低收入群体倾斜。例如:优化城市轨道交通运行速度(特别是在郊区),提升整体交通效率;调整票价结构,例如推出周票、月票或区域票价等多样化票制,减轻低收入群体经济负担;同时,政府应持续支持廉租房建设,为其提供住房保障,从居住和出行两方面共同提升生活质量。

### 3) 研究方法对决策的意义。

该研究提出的综合考虑出行时间和票价成本的评估方法,为城市轨道交通规划提供了更为全面有效的分析工具。决策者可运用该方法评估城市轨道交通网络规划调整及相关政策变化对不同区域和社会群体的影响,明确成本与效益分布情况,从而制定更合理的交通规划与政策,促进公共交通系统朝着更加公平和可持续的方向发展。

资料来源: YU L J, CUI M Y. How subway network affects transit accessibility and equity: a case study of Xi'an metropolitan area[J]. Journal of transport geography, 2023, 108: 103556.

(上接第72页)

[21] 赵琳. 多因素影响下的城市道路人行道服务水平评价体系研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.

ZHAO L. Research on evaluation system of pedestrian level of service on urban sidewalks influenced by multi-factors[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.

[22] DOI M, AMANO K. A survey of pedestrian behavior to determine sidewalk width under desirable service level[J]. Infrastructure planning review, 1986, 4: 237-243.

[23] 陈然, 董力耘. 中国大都市行人交通特征的实测和初步分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2005, 11(1): 93-97.

CHEN R, DONG L Y. Observations and preliminary analysis of characteristics of pedestrian traffic in Chinese metropolis[J]. Journal of Shanghai University (natural science), 2005, 11(1): 93-97.

[24] 叶建红, 陈小鸿, 俞梦骁. 个体特征对步行通道行人最大通过量的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 1834-1840.

YE J H, CHEN X H, YU M X. Impact analysis of individual characteristics on pedestrian maximum volume[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2015, 43(12): 1834-1840.