

【交通物流 / Transportation Logistics】

基于辐射范围的城市轨道站点可达性研究

马书红¹, 唐大川², 李逍¹, 孙杏芳¹

1) 长安大学运输工程学院, 陕西西安 710064; 2) 天津城市基础设施建设投资集团有限公司, 天津 300401

摘要: 可达性是评价交通基础设施效率的重要指标, 准确测算轨道站点可达性有助于进一步优化站点服务设施和接驳环境. 从城市轨道站点可达性的定义出发, 建立轨道站点接驳方式选择的多项logit模型, 并确定各类型站点对不同接驳方式的辐射范围. 考虑轨道站点周边的建成环境和出行成本, 建立基于辐射范围的轨道站点可达性模型. 以中国西安市为例, 计算轨道站点步行、自行车和公交接驳的可达性以及站点可达性. 结果表明, 轨道站点可达性在空间上呈现出从中心位置到外围“圈层”式递减的形态. 换乘站各接驳方式的可达性值均处于较高水平, 始末站处于较低水平. 中间站根据位置的不同, 可达性存在差异, 越接近始末站可达性越低, 越接近换乘站和市中心可达性越高.

关键词: 交通运输规划与管理; 可达性; 城市轨道站点; 辐射范围; 接驳方式; 多项logit模型

中图分类号: U491

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2022.03296

The accessibility of urban rail stations based on the catchment area

MA Shuhong¹, TANG Dachuan², LI Xiao¹, and SUN Xingfang¹

1) College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi Province, P. R. China

2) Tianjin Infrastructure Investment Group, Co. Ltd., Tianjin 300401, P. R. China

Abstract: Accessibility is an important index to evaluate the efficiency of transportation infrastructure. Accurately measuring the accessibility of rail stations can help to further optimize the station service facilities and connection environment. Based on the definition of urban rail station accessibility, we establish a multinomial logit model for the selection of rail station connection methods and determine the radiation range of various types of stations to different connection modes. And then we establish a track site accessibility model based on the catchment area by considering the built environment and travel cost around the rail station. Taking the city of Xi'an as an example, we calculate the stations' accessibilities via walking, bicycle and bus, and the total accessibility. Results show that railway stations' accessibilities decrease from city center to the periphery in space. The accessibilities of transfer stations are usually at a high level, while the accessibilities of the starting and terminal stations are at a lower level. Also, the accessibilities of intermediate stations vary a lot according to the locations. The closer the intermediate stations to the terminal stations, the lower the accessibility, and the closer to the transfer stations and downtown, the higher the accessibility.

Key words: transportation planning and management; accessibility; urban rail station; catchment area; access mode; multinomial logit model

Received: 2020-11-04; **Revised:** 2021-08-31; **Accepted:** 2021-09-04; **Online (CNKI):** 2021-11-25

Foundation: National Key Research and Development Program of China (2018YFB1601300); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JM-246); Fundamental Research Foundation for the Central Universities (300102210214)

Corresponding author: Professor MA Shuhong. E-mail: msh@chd.edu.cn

Citation: MA Shuhong, TANG Dachuan, LI Xiao, et al. The accessibility of urban rail stations based on the catchment area [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(3): 296-304. (in Chinese)



轨道交通作为城市公共交通的重要组成部分, 在城市出行结构中所占份额不断上升, 已成为居民出行的重要方式之一. 随着可达性在公共交通系统评价上的应用, 研究城市轨道站点可达性, 能够为轨道交通的建设提供理论支持, 对进一步提升轨道交通服务品质和吸引力具有重要意义.

城市轨道交通可达性研究主要集中在轨道网络可达性和轨道站点可达性方面. 面向轨道交通网络的可达性模型已有较多研究, 如LATORA等^[1]以轨道交通网络的运行效率为指标, 定量测算了轨道交通网络的可达性; 余伟等^[2]基于复杂网络理论, 建立含地铁在内的公共交通网络Space L和Space P模型, 衡量地铁对城市公共交通网络的改善作用; 谭杉^[3]考虑出行时间、票价、换乘次数和乘坐站点数等因素, 构建轨道交通可达性定量测算模型; 郭谦等^[4]以通达时间为基础构建可达性评价方法, 对中国北京市轨道交通线路和网络整体可达性进行评价; 李旭东等^[5]基于网络模型分析上海市轨道交通网络可达性, 并对3个不同时期的轨道交通网络通行效率进行评价; 陈少沛等^[6]基于图及时间和潜力可达性测度模型, 并结合地理信息系统(geographic information system, GIS)技术, 研究广州市地铁网络可达性的时空分布形态和区域差异特征. 相较而言, 轨道站点可达性的相关研究较为匮乏, 程昌秀等^[7]考虑换乘次数的影响将空间句法应用于北京地铁站点可达性评价; 魏攀一等^[8]考虑轨道-常规公交换乘便利性和轨道交通站点间通达便利性来计算轨道交通站点可达性, 并对比分析北京地铁14号线开通前后可达性的变化; 吴韬等^[9]从“出发地-城市轨道交通-目的地”的角度出发, 在站间和站域可达性层面综合评价轨道交通站点可达性.

以上成果从不同角度对轨道交通的可达性进行研究, 但鲜有基于轨道站点辐射范围和综合考虑站点内外联系的可达性研究. 因此, 本研究以轨道站点为研究对象, 结合居民出行全过程, 在轨道站点接驳方式和辐射范围研究基础上, 综合站点周边建成环境和出行成本研究轨道站点的可达性测算, 以期为更好发挥轨道交通系统的作用提供参考.

1 轨道站点可达性概念

由于线路和站点位置的限制, 轨道交通只能提供“站到站”服务, 不能提供“门到门”服务, 轨

道交通须与其他接驳交通方式进行协调合作. 根据这一特点, 本研究对轨道站点可达性定义为: 出行者采用某种交通方式接驳轨道站点的程度, 反映出行者到达轨道站点的难易程度. 有研究表明, 在轨道交通接驳方式中, 步行、自行车及常规公交的总占比达到95%^[10], 因此, 本研究轨道站点接驳方式只考虑步行、自行车和常规公交.

2 城市轨道站点辐射范围确定

2.1 基本思路

城市轨道站点辐射范围指城市轨道交通能够吸引客流区域范围, 是出行者通过某种交通方式(步行、自行车或常规公交)在一定时间内到达轨道交通站点的可接受距离, 可细分为轨道站点步行辐射范围、轨道站点自行车辐射范围及轨道站点公交辐射范围.

由于出行距离和站点属性是轨道站点辐射范围的主要影响因素^[10], 本研究以不同功能站点(换乘站、中间站及始末站)为研究对象, 重点考虑出行距离和站点属性, 建立轨道交通接驳方式选择模型, 确定出行距离对站点接驳方式选择的影响; 通过改变出行距离确定轨道站点接驳方式的分担率, 进而确定各功能站点对不同接驳方式的辐射范围, 为模型建立提供依据. 轨道站点辐射范围建模思路如图1.

2.2 分析过程

为研究轨道站点接驳方式的分担率及辐射范

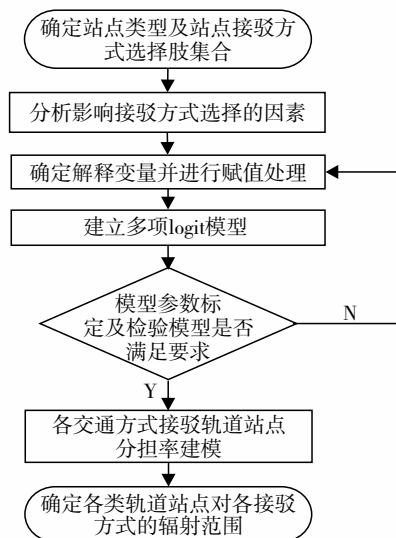


图1 辐射范围分析思路

Fig. 1 The analysis frame of catchment area

围,以不同功能站点(换乘站、中间站及始末站)为研究对象,以性别、年龄、职业、月收入、出行目的、出行时间、出行费用、出行距离、准时性、方便性、舒适性、安全性及经济性作为自变量,以接驳方式作为因变量,建立多项logit模型.

依据随机效用最大化理论,建立轨道站点接驳方式选择模型为

$$P_n(i) = \frac{\exp(V_{in})}{\sum_{j \in A_n} \exp(V_{jn})} = \frac{1}{\sum_{j \in A_n} \exp(V_{jn} - V_{in})}, i \in A_n \quad (1)$$

其中, $P_n(i)$ 为出行者 n 采用方式 i 接驳轨道交通的分担率; V_{in} 、 V_{jn} 分别表示出行者 n 采用 i 、 j 接驳方式的效用; A_n 为接驳方式集合. 以式(1)为基础推导式(2), 并令其等于 V_i , 则有

$$\ln\left(\frac{P_n(i)}{P_n(j)}\right) = V_{in} - V_{jn} = \sum_{k=1}^d \alpha_{ik} x_{ik} = V_i \quad (2)$$

其中, V_i 表示 i 类接驳方式相对于 j 类接驳方式的效用; x_{ik} 为 i 类接驳方式的解释变量, 包括月收入、时间及费用等; d 为解释变量的数量; α_{ik} 为出行方式 i 相应第 k 个解释变量的系数; 接驳方式 j 一般作为参照方式. 则 $P_n(i)$ 为

$$P_n(i) = \begin{cases} \frac{e^{V_i}}{e^{V_1} + e^{V_2} + \cdots + e^{V_i} + \cdots + e^{V_d} + e^0}, & i \neq j \\ \frac{e^0}{e^{V_1} + e^{V_2} + \cdots + e^{V_i} + \cdots + e^{V_d} + e^0}, & i = j \end{cases} \quad (3)$$

对不同接驳方式辐射范围的研究, 实际上就是比较接驳方式在不同出行距离下的方式分担率^[10]. 将效用函数 V_i 中的其他解释变量视为定量, 通过不断改变出行距离得到分担率, 并绘制分担率转移曲线, 即可直观得到轨道站点不同接驳方式的辐射范围为

$$\frac{P_n(i)}{P_n(j)} = \frac{\sum_{i=1}^{A_n} e^{V_i}}{e^{\alpha_j x + C_j}} = \frac{e^{\alpha_i x + C_i}}{e^{\alpha_j x + C_j}} = e^{\alpha_i x + C_i - (\alpha_j x + C_j)} \quad (4)$$

其中, C_i 为接驳方式 i 效用函数中的常数项, 即将 V_i 中的其他解释变量视为定量后的值; C_j 对应于作为参考方式的 j 类接驳方式, 亦是常数项; x 为出行距离; α_i 、 α_j 为接驳方式 i 、 j 效用函数中 x 的系数. 当 $e^{\alpha_i x + C_i - (\alpha_j x + C_j)} > 1$, 即 $x > \frac{C_j - C_i}{\alpha_i - \alpha_j}$ 、 $\alpha_i > \alpha_j$ 或

$x < \frac{C_j - C_i}{\alpha_i - \alpha_j}$ 、 $\alpha_i < \alpha_j$ 时, 出行者更倾向于接驳方式 i 出行; 反之, 出行者则倾向于接驳方式 j 出行. 因此, $\frac{C_j - C_i}{\alpha_i - \alpha_j}$ 即为接驳方式 i 或 j 的辐射范围.

3 基于辐射范围的轨道站点可达性模型构建

3.1 模型构建思路

通过计算出行成本和站点辐射范围内的建成环境要素, 建立基于辐射范围的轨道站点可达性模型, 具体思路见图2.

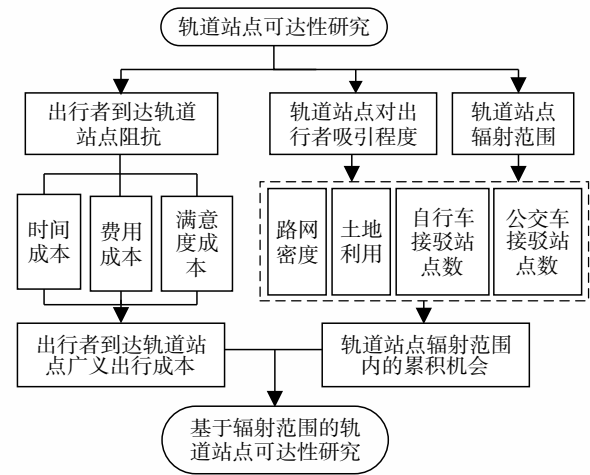


图2 轨道站点可达性模型构建

Fig. 2 The framework of accessibility of orbital station

3.2 相关指标的测算

3.2.1 轨道站点空间约束

由于轨道站点具有特定的辐射范围, 因此, 轨道站点对外出行具有一定的空间约束作用, 当出行距离小于轨道站点辐射阈值, 认为出行者将利用某种交通方式接驳轨道交通出行, 反之亦然. 用公式表示为

$$P(d_m^i) = \begin{cases} 1, & d_i - R_m^i < 0 \\ 0, & d_i - R_m^i \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $P(d_m^i)$ 表示出行者是否利用方式 m 接驳轨道交通出行, 是取1, 否取0; d_i 为出行者从出发地到轨道站点的实际距离; R_m^i 表示轨道站点 i 对接驳方式 m 的辐射阈值.

3.2.2 站点周边建成环境属性

轨道站点辐射范围内的建成环境是影响轨道站点可达性程度的重要因素, 轨道站点周边的路网密

度越大、土地利用强度越高及接驳交通设施越完善, 越有利于出行者接驳轨道交通。

1) 道路网密度. 该指标体现轨道站点辐射范围内城市道路的供给水平, 表示为

$$\rho_i = \frac{1}{\pi R_i^2} \sum_{i=1}^n \varphi_i l_i \quad (6)$$

其中, ρ_i 为站点 i 辐射范围内的路网密度; φ_i 为不同类型道路的权重; l_i 为第 i 类道路长度; R_i 为站点 i 的辐射范围。

2) 土地利用强度. 该指标反映土地利用性质与土地开发强度的混合程度, 在一定程度上影响辐射范围内轨道交通对出行者的吸引强度。一般来说, 站点辐射范围内居住、商业及教育用地等高出行率用地所占比例越高, 轨道站点客流量越大, 出行群体广泛。土地利用强度 T_i 可表示为

$$T_i = \frac{1}{\pi R_i^2} \sum_{i=1}^n S_i \quad (7)$$

其中, S_i 为站点 i 辐射范围内不同类型土地的面积; n 为用地类型, 包括居住、商业、教育、行政及文娱等高吸引率用地类型。

3) 交通基础设施接驳数量. 该指标表示出行者接驳轨道站点所获得机会的大小, 反映出出行者接驳的便利性。轨道站点 i 影响范围内的交通基础设施接驳数量 M_i 为

$$M_i = \sum_{k=0}^m p_k + \sum_{l=0}^n s_l \quad (8)$$

其中, p_k 为第 k 类公交站点数量; s_l 为第 l 类公共自行车站点数量。

3.2.3 出行成本

出行成本为出行费用、出行时间成本和出行满意度成本之和。其中, 出行费用是出行者接驳轨道交通的出行成本; 出行时间成本是出行者接驳轨道交通所消耗的时间; 满意度成本将出行者出行满意度指标 (接驳方式的准时性、舒适性、方便性、安全性及经济性等) 进行量化。出行成本可表示为

$$C_{mi} = F_{mi} + T_{mi} + L_{mi} = \sum_n \beta_n t_m^i \left[1 + \left(1 - \frac{\sum_j d_{mj}^i \omega_{mj}}{5} \right) \right] + F_{mi} \quad (9)$$

$$C_i = \sum_m \sum_n \beta_m \beta_n t_m^i \left[1 + \left(1 - \frac{\sum_j d_{mj}^i \omega_{mj}}{5} \right) \right] + F_i \quad (10)$$

其中, C_{mi} 为利用方式 m 到达站点 i 的成本, 包括出

行费用 F_{mi} 、出行时间成本 T_{mi} 和出行满意度成本 L_{mi} ; C_i 为到达站点 i 的总成本, 作为站点 i 的出行阻抗, 包括到达站点 i 的总出行费用 F_i ; β_n 为出行者 n 的时间价值; t_m^i 为出行者利用方式 m 到达站点 i 的出行时间; d_{mj}^i 为出行者利用方式 m 到达站点 i , 对衡量指标 j 的满意度; ω_{mj} 为方式 m 满意度衡量指标 j 的权重; β_m 为出行者利用方式 m 到达站点 i 的比例。

3.3 基于辐射范围的轨道站点可达性模型

考虑站点辐射范围、出行成本及站点周边建成环境要素, 建立基于辐射范围的轨道站点各接驳方式可达性模型为

$$A_m^i = \frac{P(d_m^i)(\eta_1 \rho_m^i + \eta_2 T_m^i + \eta_3 M_m^i)}{\left\{ \sum_n \beta_n t_m^i \left[1 + \left(1 - \frac{\sum_j d_{mj}^i \omega_{mj}}{5} \right) \right] + F_{mi} \right\}} \quad (11)$$

其中, A_m^i 为利用方式 m 到达站点 i 的可达性; ρ_m^i 为站点 i 在方式 m 辐射范围内的道路网密度; T_m^i 为站点 i 在方式 m 辐射范围内的土地利用强度; M_m^i 为站点 i 对在方式 m 辐射范围内的交通基础设施接驳数量; η_1 、 η_2 及 η_3 为权重系数。

根据轨道站点各接驳方式的可达性, 综合得到轨道站点 i 的可达性 A_i 为

$$A_i = \sum_m \beta_m \frac{P(d_m^i)(\eta_1 \rho_m^i + \eta_2 T_m^i + \eta_3 M_m^i)}{\sum_n \beta_n t_m^i \left[1 + \left(1 - \frac{\sum_j d_{mj}^i \omega_{mj}}{5} \right) \right] + F_i} \quad (12)$$

其中, β_m 为站点接驳方式 m 的分担率。

4 实例验证

本研究以中国西安市已建轨道站点为例进行可达性测算, 涉及站点分布如图3。

4.1 不同类型轨道站点辐射范围的确定

确定辐射范围的关键是求解多项 logit 模型, 一般采用最大似然法或最小二乘法进行参数标定^[11], 本研究基于显示性偏好 (revealed preference, RP) 调查数据, 选取性别、年龄、出行距离及出行目的等 13 个影响因素作为解释变量, 以步行、自行车及公交车作为选择肢, 在对数据按要求进行整理的基础上, 借助 SPSS19.0 软件对 logit 模型进行参数标定。以换乘站为例, 接驳方式选择模型参数标定结果如表1。其中, B 为回归系数; Wald 统计量主要用于

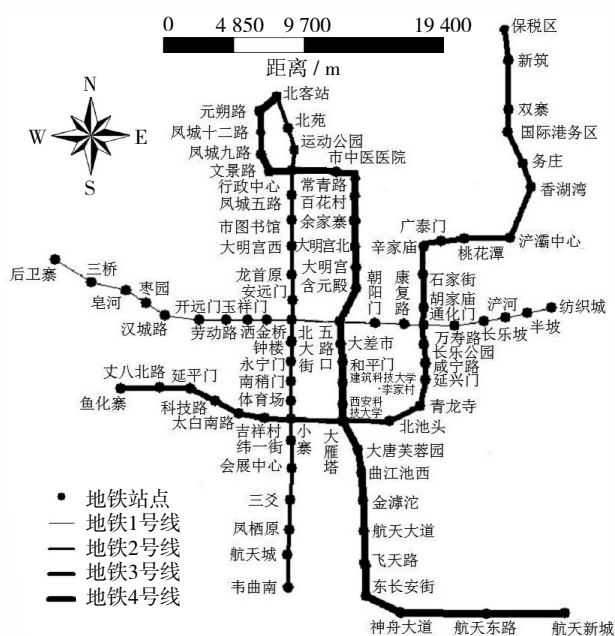


图3 西安市轨道站点分布

Fig. 3 Railway stations distribution of Xi'an city

回归系数的显著性检验, 是 B 除以其标准误差的平方值, 一定程度上能反映自变量的影响程度.

表1 换乘站接驳方式选择模型参数及标定结果

Table 1 Model parameters and calibration results of connection mode selection at transfer station

模型参数	B	标准误差	Wald	P	$\exp(B)$
截距	-2.989	4.412	136.579	0.000	
出行距离	-1.012	0.003	17.111	0.000	0.363
方便性	2.900	0.859	11.397	0.001	18.171
准时性	2.725	0.745	13.375	0.000	15.258
月收入	-1.996	1.103	3.276	0.040	0.136
出行费用	-50.996	1.833	774.164	0.000	7.12×10^{-23}
截距	26.100	2.372	381.078	0.000	
出行距离	-0.682	0.001	11.151	0.001	0.506
方便性	1.784	0.588	9.206	0.002	5.952
准时性	1.528	0.441	12.002	0.001	4.609
月收入	-1.816	0.866	10.57	0.001	0.163
出行费用	-44.449	0			4.97×10^{-20}

换乘站接驳方式的选择模型为

$$\ln \left(\frac{P_n(1)}{P_n(3)} \right) = -2.989 - 1.996X_4 - 50.996X_6 - 1.012X_8 + 2.725X_9 + 2.90X_{11} \quad (13)$$

$$\ln \left(\frac{P_n(2)}{P_n(3)} \right) = 26.100 - 2.816X_4 - 44.449X_6 - 0.682X_8 + 1.528X_9 + 1.784X_{11} \quad (14)$$

$$P_n(1) + P_n(2) + P_n(3) = 1 \quad (15)$$

其中, 1 表示步行; 2 表示自行车; 3 表示公交车; X_4 为月收入; X_6 为出行费用; X_8 为出行距离; X_9 为准时性; X_{11} 为方便性.

中间站和始末站接驳方式选择模型参数标定结果如表2和表3.

表2 中间站接驳方式选择模型参数及标定结果

Table 2 Model parameters and calibration results of connection mode selection at intermediate station

模型参数	B	标准误差	Wald	P	$\exp(B)$
截距	-1.803	3.316	6.837	0.009	
出行距离	-1.083	0.001	236.273	0.000	0.339
准时性	2.232	0.297	56.486	0.000	9.321
经济性	1.599	0.427	14.023	0.000	4.949
出行费用	-5.519	2.500	4.875	0.027	0.004
月收入	-1.605	0.316	25.724	0.000	0.201
年龄	0.281	0.276	1.033	0.031	1.324
截距	5.426	2.174	10.579	0.001	
出行距离	-0.721	0	121.713	0.000	0.486
准时性	1.851	0.173	114.756	0.000	6.367
经济性	0.122	0.147	0.691	0.041	1.130
出行费用	-5.526	1.893	8.523	0.004	0.004
月收入	-0.887	0.197	20.335	0.000	0.412
年龄	-0.332	0.154	4.674	0.031	0.717

表3 始末站接驳方式选择模型参数及标定结果

Table 3 Model parameters and calibration results of connection mode selection at terminal station

模型参数	B	标准误差	Wald	P	$\exp(B)$
截距	5.940	3.000	173.282	0.000	
出行费用	-74.992	0.737	4266.059	0.000	2.70×10^{-33}
出行距离	-1.093	0	54.333	0.000	0.335
准时性	3.414	0.654	27.209	0.000	30.373
方便性	0.747	0.465	2.583	0.018	2.111
截距	2.852	2.371	301.635	0.000	
出行费用	-8.916	0			1.34×10^{-4}
出行距离	-0.632	0	19.387	0.000	0.532
准时性	2.269	0.536	17.902	0.041	9.667
方便性	0.033	0.377	0.008	0.004	1.034

出行距离、出行费用及准时性是出行者接驳方式选择时需考虑的重要因素, 出行者在换乘站选用步行或自行车接驳时, 还考虑了方便性. 假设其他因素不变, 改变出行者的接驳距离, 得到不同距离下轨道站点各接驳方式的分担率如图4, 由此得出各类型站点接驳方式的辐射范围, 如图5.

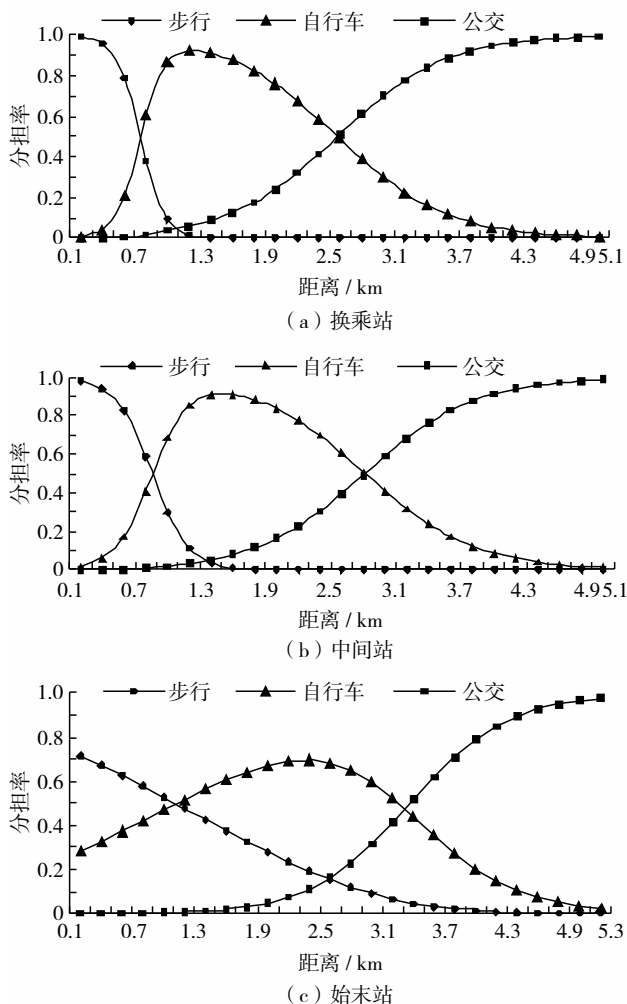


图4 轨道站点接驳方式转移曲线

Fig. 4 Transfer curves of railway station connection modes

由图4和图5可见, 3种类型站点的步行、自行车及公交接驳距离呈现出类似规律, 均为公交 > 自行车 > 步行, 但换乘站各类接驳方式的辐射范围最小、始末站最大; 始末站短距离接驳中自行车接驳不容忽视, 公交接驳多出现在接驳距离为2.5 km以上.

4.2 轨道站点可达性的测算

利用 ArcGIS 软件建立轨道站点辐射面层, 将该面层要素与道路网、交通设施及土地性质属性层要素数据相交, 求得各站点不同接驳方式辐射范围内交通基础设施建设指标, 测算不同交通方式接驳

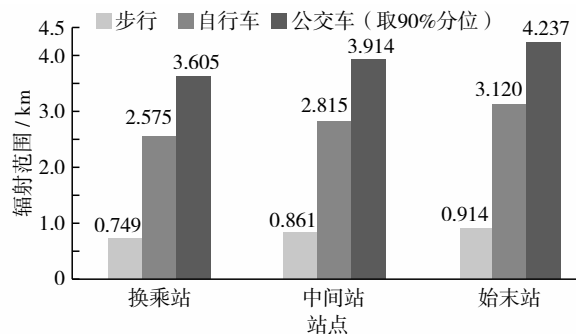


图5 轨道站点接驳方式辐射范围

Fig. 5 Radiation range of rail station connection modes

轨道交通的出行成本, 结果见表4. 利用式(11)和式(12)计算站点各接驳方式的可达性和站点可达性(仅列出排名前10及后10的站点), 结果见表5.

由表5可见, 可达性排名前10的站点包括6个换乘站与4个中间站(钟楼站、大差市站、南稍门站及永宁门站), 且中间站均位于城市中心区域, 距离换乘站较近. 10个站点中7个站点为西安市最早开通的地铁2号线站点, 站点辐射范围内土地利用强度较高, 路网密度高, 自行车和公交接驳设施完善, 站点各接驳方式的可达性也相对较高. 排名后10位的站点主要集中在地铁3、4号线上, 包括3个首末站, 7个中间站, 且都处于城市外围区域, 是轨道线路末端站点, 这些站点辐射范围内交通基础设施建设程度较低(路网密度低、公交站点及自行车站点少), 各交通方式尤其是公交和自行车接驳的出行阻抗高, 导致无法很好地满足出行者的接驳需求, 站点各接驳方式的可达性相对较低. 可达性空间分布如图6.

4.3 讨论

西安市轨道站点的可达性在空间上呈现出从中心位置到外围沿线路走向“圈层”式递减的形态. 换乘站可达性整体较高, 可为辐射范围内的出行者提供方便的接驳机会. 北客站即是换乘站也是首站, 但因其位置偏远, 周边交通基础设施尚不完善, 作为换乘站的可达性优势不明显; 始末站各接驳方式的可达性及站点可达性均处于较低水平, 原因在于这些站点多处于城市外围, 周边建成环境及交通基础设施建设不够完善, 接驳成本高且网络效益不明显; 由于中间站点所处位置不同存在差异, 中间站可达性的测算结果表现出越接近始末站可达性越低(如航天东路站、新筑站及航天城站), 越接近换乘站与市中心可达性越高(如钟楼站和南稍门站)的特点.

表 4 西安市轨道站点主要指标

Table 4 The main indices of Xi'an railway stations

排 名	站 点 序 号	步行				自行车				公交车					
		路 网 密 度	土 地 利 用 程 度	吸 引 程 度	出 行 阻 抗	自 行 车 数	路 网 密 度	土 地 利 用 程 度	吸 引 程 度	出 行 阻 抗	公 交 数	路 网 密 度	土 地 利 用 程 度	吸 引 程 度	出 行 阻 抗
前 10 位	9	0.022	0.696	16	4.345	129	0.027	0.767	16	6.934	176	0.015	0.737	16	9.401
	33	0.020	0.765	16	4.345	179	0.011	0.803	14	6.934	174	0.012	0.725	16	9.401
	57	0.012	0.751	16	4.345	172	0.011	0.756	13	6.934	155	0.011	0.706	16	9.401
	29	0.024	0.714	19	4.666	180	0.028	0.637	17	8.539	208	0.028	0.649	19	10.597
	75	0.025	0.720	19	4.666	178	0.028	0.657	17	8.539	208	0.029	0.635	19	10.597
	10	0.019	0.709	15	4.345	134	0.017	0.667	14	6.934	178	0.014	0.742	16	9.401
	31	0.016	0.742	18	4.666	213	0.024	0.718	19	8.539	229	0.025	0.593	18	10.597
	30	0.021	0.656	18	4.666	200	0.026	0.679	18	8.539	221	0.026	0.616	18	10.597
	6	0.013	0.673	15	4.345	144	0.012	0.755	13	6.934	150	0.012	0.684	14	9.401
	23	0.012	0.732	16	4.345	55	0.010	0.799	11	6.934	79	0.009	0.766	11	9.401
后 10 位	40	0.002	0.042	4	5.393	0	0.002	0.180	4	8.260	16	0.002	0.134	4	11.055
	86	0.003	0.000	4	4.666	0	0.001	0.299	4	8.539	21	0.002	0.032	4	10.597
	87	0.003	0.000	5	5.393	0	0.002	0.296	4	8.260	36	0.001	0.273	4	11.055
	41	0.002	0.267	5	4.666	0	0.002	0.254	4	8.539	15	0.003	0.253	4	10.597
	44	0.010	0.140	5	4.666	5	0.005	0.078	4	8.539	16	0.005	0.077	4	10.597
	85	0.007	0.194	5	4.666	0	0.002	0.334	4	8.539	36	0.004	0.321	4	10.597
	45	0.007	0.009	5	4.666	4	0.006	0.024	4	8.539	17	0.006	0.069	4	10.597
	20	0.009	0.160	5	5.393	5	0.007	0.280	4	8.260	36	0.005	0.653	7	11.055
	46	0.011	0.198	6	4.666	6	0.012	0.082	5	8.539	51	0.012	0.140	5	10.597
	43	0.004	0.702	7	4.666	2	0.005	0.295	4	8.539	11	0.005	0.183	4	10.597

表 5 西安市轨道站点可达性计算结果

Table 5 The calculation results of accessibility of Xi'an railway station

排名	站点序号	站点名称	站点可达性	步行可达性	自行车可达性	公交可达性	站点类型	线路名称
前 10 位	9	五路口	2.878 60	3.682 10	2.307 63	1.701 87	换乘站	1—4
	33	小寨	2.818 03	3.682 10	2.019 17	1.701 87	换乘站	2—3
	57	大雁塔	2.787 74	3.682 10	1.874 95	1.701 87	换乘站	3—4
	29	钟楼	2.752 18	4.072 33	1.990 80	1.792 94	中间站	2
	75	大差市	2.752 18	4.072 33	1.990 80	1.792 94	中间站	4
	10	北大街	2.696 06	3.451 97	2.019 17	1.701 87	换乘站	1—2
	31	南稍门	2.688 69	3.858 00	2.225 01	1.698 57	中间站	2
	30	永宁门	2.660 58	3.858 00	2.107 90	1.698 57	中间站	2
	6	通化门	2.610 46	3.451 97	1.874 95	1.489 13	换乘站	1—3
	23	行政中心	2.588 89	3.682 10	1.586 49	1.170 03	换乘站	2—4
后 10 位	40	保税区	0.528 47	0.741 72	0.484 29	0.361 81	首末站	3
	86	航天东路	0.591 24	0.857 33	0.468 42	0.377 46	中间站	4
	87	航天新城	0.602 64	0.927 15	0.484 29	0.361 81	首末站	4
	41	新筑	0.676 97	1.071 67	0.468 42	0.377 46	中间站	3
	44	务庄	0.676 97	1.071 67	0.468 42	0.377 46	中间站	3
	85	神舟大道	0.676 97	1.071 67	0.468 42	0.377 46	中间站	4
	45	香湖湾	0.676 97	1.071 67	0.468 42	0.377 46	中间站	3
	20	北客站	0.732 90	0.927 15	0.484 29	0.633 17	首末站、换乘站	2—4
	46	浐灞中心	0.824 78	1.286 00	0.585 53	0.471 83	中间站	3
	43	国际港务区	0.848 44	1.500 33	0.468 42	0.377 46	中间站	3

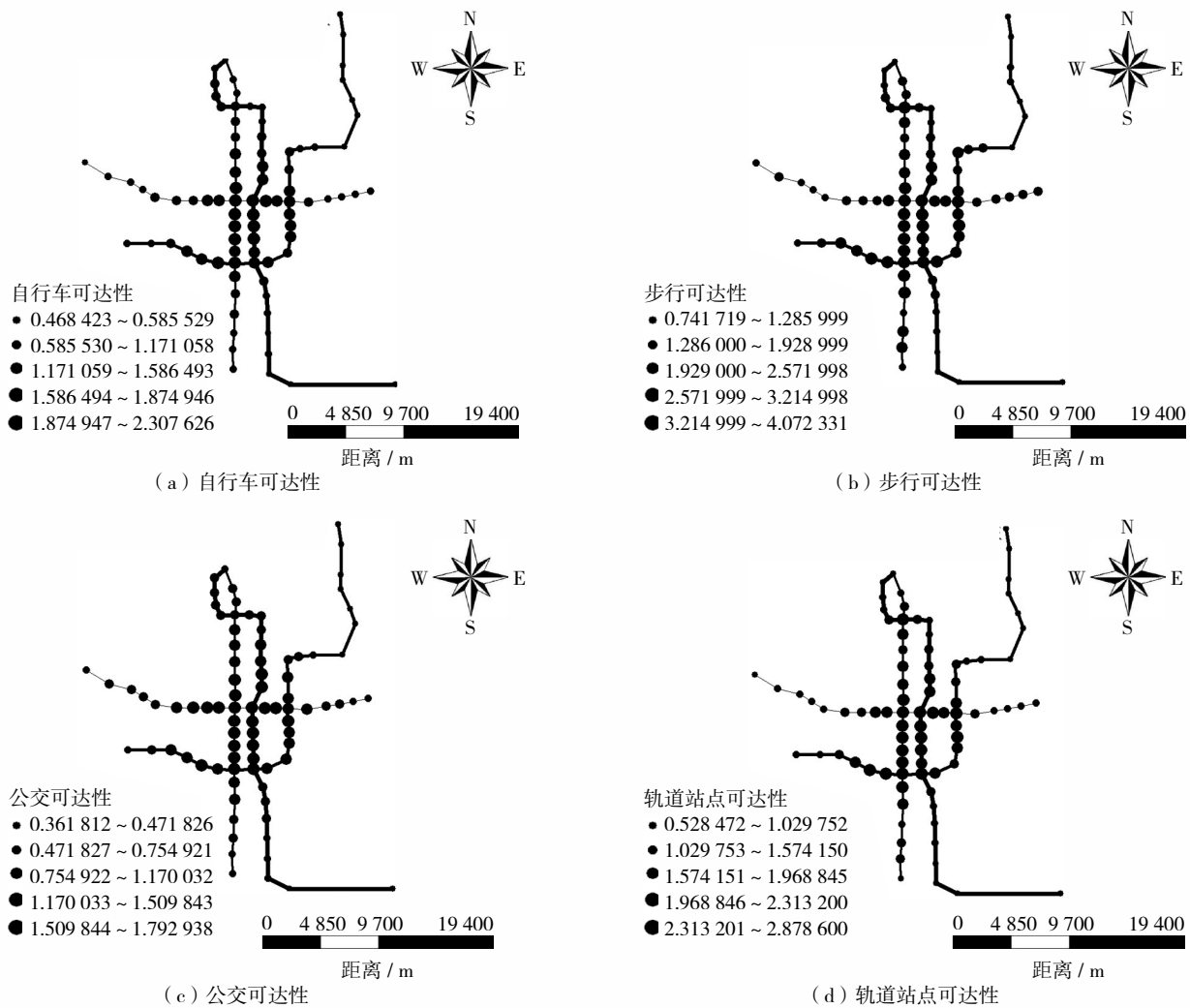


图6 西安市轨道站点及接驳方式可达性空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of accessibilities of rail stations and connection modes in Xi'an

结 语

重新定义轨道站点的辐射范围,通过建立轨道站点接驳方式选择模型,深入研究不同功能站点的步行、自行车及公交车辐射范围.考虑轨道站点周边的建成环境和出行成本,构建基于辐射范围的轨道站点可达性模型,为轨道交通可达性研究提供一种新方法.以西安市轨道交通网络为例进行模型验证,结果表明,西安市轨道站点的可达性在空间上呈现出从中心位置到外围“圈层”式递减的形态.换乘站的可达性较高,始末站较低,越接近始末站的中间站其可达性越低,越接近换乘站和市中心的中间站其可达性越高.轨道站点接驳方式可达性表现出步行>自行车>公交车.本研究提出方法能够客观准确地对轨道交通站点可达性进行评价.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1601300);陕西省自然科学基金资助项目(2020JM-246);中央高校基本科研业务费资助项目(300102210214)

作者简介: 马书红(1975—),长安大学教授、博士生导师.研究方向:交通经济、交通规划及交通行为研究.
E-mail: msh@chd.edu.cn

引 文: 马书红,唐大川,李道,等.基于辐射范围的城市轨道站点可达性研究[J].深圳大学学报理工版,2022,39(3):296-304.

参考文献 / References:

- [1] LATORA V, MARCHIORI M. Is the Boston subway a small world network? [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2002, 314(1/2/3/4): 109-113.
- [2] 余伟,马健霄,张永辉.地铁对城市公交网可达性的改善研究[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(1):121-125.

- YU Wei, MA Jianxiao, Zhang Yonghui. Research on accessibility improvement of urban public transport network based on metro [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(1): 121-125. (in Chinese)
- [3] 谭杉. 城市轨道交通可达性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- TAN Shan. Study on accessibility of urban rail transit [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [4] 郭谦, 吴殿廷, 李瑞, 等. 城市轨道交通网络可达性评价方法研究——以北京轨道交通网络为例[J]. *城市发展研究*, 2014, 21(4): 59-65.
- GUO Qian, WU Dianting, LI Rui, et al. Evaluation of urban rail network accessibility: a case study of Beijing subway [J]. *Urban Development Studies*, 2014, 21(4): 59-65. (in Chinese)
- [5] 李旭东, 刘建国. 轨道交通网络的可达性及其网络结构分析[J]. *上海理工大学学报*, 2015, 37(3): 279-283.
- LI Xudong, LIU Jianguo. Accessibility of the subway transportation network and its network structure and analysis [J]. *Journal of University of Shanghai Science and Technology*, 2015, 37(3): 279-283. (in Chinese)
- [6] 陈少沛, 李勇, 庄大昌, 等. 地铁网络可达性时空演化及空间形态分析[J]. *测绘科学*, 2018, 43(3): 123-130, 147.
- CHEN Shaopei, LI Yong, ZHUANG Dachang, et al. Spatio-temporal evolution and spatial pattern analysis of metro network accessibility [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(3): 123-130, 147. (in Chinese)
- [7] 程昌秀, 张文尝, 陈洁, 等. 基于空间句法的地铁可达性评价分析——以 2008 年北京地体规划图为例[J]. *地球信息科学*, 2007, 9(6): 31-35.
- CHEN Changxiu, ZHANG Wenchang, CHEN Jie, et al. Evaluating the accessibility about Beijing's subways in 2008 based on spatial syntax [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2007, 9(6): 31-35. (in Chinese)
- [8] 魏攀一, 黄建玲, 陈艳艳, 等. 城市轨道交通可达性计算方法[J]. *重庆交通大学学报自然科学版*, 2019, 38(10): 1-6.
- WEI Panyi, HUANG Jianling, CHEN Yanyan, et al. Calculation method of urban rail transit accessibility [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University Natural Science*, 2019, 38(10): 1-6. (in Chinese)
- [9] 吴韬, 严建伟. 城市轨道交通站点可达性度量及评价——以天津市为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(1): 75-81.
- WU Tao, YAN Jianwei. Accessibility measurement and evaluation of urban rail transit stations: an application in Tianjin [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(1): 75-81. (in Chinese)
- [10] 唐大川. 基于内外联系的城市轨道站点综合可达性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- TANG Dachuan. Research on comprehensive accessibility of urban track sites based on internal and external relations [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [11] 王元庆, 马书红. 交通规划[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- WANG Yuanqing, MA Shuhong. Transportation planning [M]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】