

北京南站公共交通可达性计算与评价

周雨阳^{1,2}, 李芮智¹, 潘利肖¹, 陈艳艳^{1,2}

(1. 北京工业大学北京市交通工程重点实验室, 北京 100124;

2. 北京工业大学交通运输部城市公共交通智能化行业重点实验室, 北京 100124)

摘要:北京南站作为北京市重要的客运枢纽站,承担着铁路、地铁及地面公交上大量旅客的集散、换乘任务,为提高铁路进京旅客出行至市区的便利性,需要对其出行可达性进行计算及评价分析.选取旅客从北京南站出发,通过站内公共交通疏散到市区的出行可达性为研究对象,构建多模式公共交通可达性模型.结合调查数据和应用程序接口(application programming interface, API)出行数据,计算旅客由北京南站至市内区域的地面公交、地铁和地铁换乘地面公交的出行时间,通过 ArcGIS 软件绘制不同时段下可达范围,结合城市地形结构与土地利用对出行可达性进行分析.选取公共交通出行时间、换乘次数为指标,对北京南站公共交通系统可达性进行评价.结果表明,北京南站公共交通可达性受到地铁线路网络的走向和站点分布的影响,可达性范围受地形、公园设施等土地利用的影响,不同时段的可达性与地面公交的交通状况相关.该方法可用于提升公共交通枢纽系统运行效率的运营优化指导,评价结果同时对于城市公共交通网络的优化具有指导意义.

关键词:综合交通; 客运枢纽站; 可达性; 多模式公共交通; 应用程序接口(API)出行数据; 效率评价; 北京南站
中图分类号: U 121 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-0037(2020)12-1365-12

doi: 10.11936/bjtxb2019040013

Public Transit Accessibility Calculation and Evaluation of the Beijing South Railway Station

ZHOU Yuyang^{1,2}, LI Ruizhi¹, PAN Lixiao¹, CHEN Yanyan^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Key Laboratory of Urban Public Transportation Intelligent Industry, Ministry of Transport, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: As an important transportation hub in Beijing, the Beijing South Railway Station (BSRS) undertakes the task of collecting, distributing and transferring a large number of passengers from the railway, the metro and the public transit system. It is necessary to compute and evaluate the transit accessibility to improve the convenience for railway passengers transfer to the capital. In this paper, an accessibility calculation model of multi-mode public transport was constructed by the travel time of the ground bus, the metro and the feeder bus from the BSRS to the urban area. The accessible range in different travel time periods was drawn by ArcGIS software based on the investigating data and application programming interface (API) travelling data. The transit accessibility was analyzed combined with the urban terrain structure and the land use. Both the travel time and the transfer times in the public transit system were selected as indicators to evaluate the transit accessibility of BSRS. Results show that the accessibility range of public transport is affected by the trend of metro line network and the distribution of stations. The accessible area is affected by land use such as topography, park facilities, etc. The

收稿日期: 2019-04-16

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(L181002); 北京市教育委员会科技计划面上项目(KM201810005017)

作者简介: 周雨阳(1984—), 女, 副教授, 主要从事大数据分析、交通网络优化方面的研究, E-mail: zyy@bjut.edu.cn

accessibility in different periods is related to the traffic condition of ground bus. The proposed method can lead to the operational efficiency improvement of the public transportation hub. Meanwhile, the evaluation results have guiding significance for the optimization of urban public transport network.

Key words: comprehensive transportation; transportation hub; accessibility; multi-mode public transport; application programming interface (API) travelling data; efficiency evaluation; Beijing South Railway Station

近年来随着高速铁路的快速建设,人们跨市出行频率呈逐年上升趋势,以高铁客运站为主的综合交通枢纽成为城市对内、对外交通功能集结的重要交通节点,担负着旅客出行、集散、中转、换乘的任务.短时间内大量聚集的铁路到达客流通过市内公共交通的换乘到达目的地,因此,枢纽站乘客换乘城市公共交通出行至市区的便捷程度至关重要.

可达性是指出行者选择某种交通方式从出发地到目的地的便利程度^[1-2],同时也是决策者衡量交通系统服务能力及出行者选择出行交通方式的一个重要指标.可达性具有时间和空间的特性:在时间层面上,可达性将时间成本作为出行阻抗因素;空间层面上,可达性反映了空间实体之间克服距离障碍进行交流的难易程度.对于客运枢纽站,良好的可达性保证了站点及时地疏散客流,满足大部分乘客的出行需求.处于可达性较高的枢纽站往往能吸引到更多出行客流,同时能够提升城市交通的发展水平.

在对客运枢纽的可达性研究中,主要是针对公共交通枢纽、机场和火车站的可达性出行研究.宗刚等^[3]对北京市36个公共交通枢纽不同时段的可到达性进行评价,并结合拥堵因素分析了可达性时空差异;Koster等^[4]以个体到达机场的出行时间可靠性为指标对可达性进行分析;汪淳等^[5]从市域和区域2个方面分析基于轨道交通的机场可达性;李晓伟等^[6]研究了可达性对航空、普通火车、高铁、大巴4种不同交通方式选择行为的影响.

在对公共交通可达性研究中,Lu等^[7]建立了基于乘客需求的随机效用模型,通过出行时间和票价计算公交站点间的可达性;Lacono等^[8]考虑乘客出行习惯,建立了基于乘客感知公共交通可达性模型;李蕴雄等^[9]运用网络分析方法,对比有无北京地铁13号线的条件下居民出行可达性范围的变化;陆化普等^[10]利用可达性的潜能模型和效用模型研究大连市中心城区早高峰公共交通可达性;David等^[11]使用等时线法对公共交通的可达性进行绘制;胡继华等^[12]将公交出行分为候车、乘车、停站和换

乘4个阶段进行公共交通可达性分析;周雨阳等^[13]基于IC卡提取个体公共交通出行链数据,以行程时间、站点覆盖度等指标对公交可靠性进行评价.

传统的公共交通可达性计算方法中,站间运行时间处理多为线路站间行程距离除以设定的车辆行驶速度,无法量化不同时段下实时道路拥堵情况所带来可达性的影响.随着城市公共交通的快速发展,公共交通数据的实时性决定了公共交通分析与决策的有效性.相对于传统的可达性出行时间计算方法,基于网络地图应用程序接口(application programming interface,API)计算的出行时间具有以下优点:公交路网数据更加精细,网络线路的更迭更迅速,在计算出行时间中,考虑了路径的复杂结构和特殊路况的影响,能够较好体现大规模下公交站点的换乘距离与换乘时间.对于地面公交车辆运行时间,则是考虑实时拥堵路况进行计算,能很好地反映不同时段的公交网络的可达性.

百度地图中的路线规划服务接口则是基于监测的实时路况进行计算规划路线方案,返回的最佳路径以及最短时间在不同的时段是考虑拥挤度后计算的,这相对于速度赋值的方法更精确,弥补了以往可达性研究在时态变化上的不足.以往对百度地图获取出行时间数据准确性验证的研究中,将API获取出行时间数据与IC卡刷卡出行时间数据相比较,出行时间的拟合度具有很高的相关性,且拟合度较好^[14-15].

高速铁路枢纽承载着大规模客流疏散与聚集的功能,在高铁列车到达站点后,旅客可在枢纽内换乘公共交通到达目的地.为评价高铁枢纽站换乘公共交通效率以及出行可达性,选取北京南站为研究对象,以到达公交站点的出行时间作为时间成本,构建多模式公共交通可达性模型,结合百度地图API数据和调查数据,对高铁枢纽站换乘公共交通到达市区的可达性进行研究.通过模型计算到达站点的出行时间,并将各站点总出行时间划分不同行程时间段,利用ArcGIS软件生成出行等时线,结合地形结构和土地利用进行分析,分析和评价2个研

究时段内北京南站到达市域各站点的可达性. 以北京南站可达站点数量作为统计指标, 统计多模式公交路网的整体出行时间和换乘次数分布. 最后根据评价结果提出改善建议. 评价结果对提升交通枢纽系统运行效率具有运营优化指导意义. 同时, 本文对于可达性结果, 分析了公交路网的布设密度与城市位置的关系, 对于城市公共交通网络的优化也具有指导意义.

1 公共交通数据获取

本节通过调查获取相关数据以对北京南站公共交通可达性进行计算和分析, 数据分为四部分: 高铁列车到达时刻分布; 北京南站公交系统基础数据; 北京南站公交系统运行数据; 站内换乘公交系统步行数据.

1.1 高铁列车到达时刻分布

高铁枢纽站的公交出行客流大部分源自高铁列车到站旅客, 客流需求高峰时段与高铁列车到达时间的分布密切相关. 图1为某日北京南站高铁列车到达数量分布图, 北京南站高铁列车到达时刻均在6:00—24:00, 列车到达数量较多且分布不均匀, 14:00—17:00到达客流迎来小高峰; 20:00—23:00到达客流达到最大高峰. 研究表明, 高峰时段公共交通服务比平峰时段的公共交通服务更有价值^[16-17], 为更充分地了解北京南站的公共交通出行可达性, 本文重点考虑枢纽站到达客流高峰时段的公交可达性, 以判断是否满足多数乘客的出行需求. 本文研究的是由北京南站出发到达市区内站点的可达性, 出发客流与高铁列车运送到站乘客数量有关, 以每列列车设600个座位, 按80%上座率进行计算, 一列高铁列车到达480名旅客. 选取高铁列车到站列车数作为客流高峰判断依据. 同时北京南站出发的常规地面公交以及轨道交通多数于23:00前停止运营, 为避免线路停运对晚间时段可达性影响, 将日间客流小高峰时段14:00—17:00和晚间客流大高峰时段20:00—23:00作为研究时段.

1.2 北京南站公交系统基础数据

1.2.1 地面公交基础数据

起点站为北京南站的公共交通线路运营服务直接影响整个地面公交出行的可达性, 因此对北京南站地面公交基础数据, 包括公交线路、首末站以及首末班车运营时间进行调查. 如图2所示, 北京南站地面公交站点主要为南广场公交枢纽、北广场公交枢纽和北京南站公交站, 研究时段内共15条地

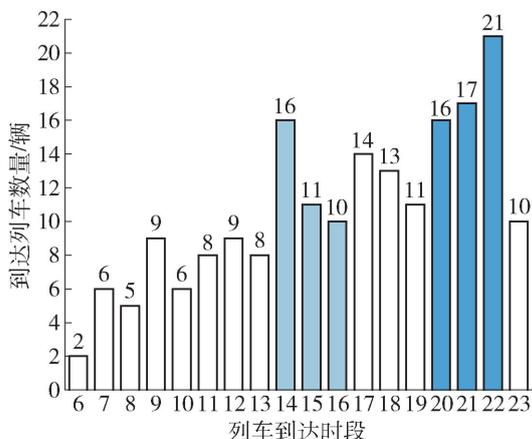


图1 北京南站到达高铁列车数量分布

Fig. 1 Distribution of trains arriving at the Beijing South Railway Station



图2 北京南站到达口和公交基础设施分布

Fig. 2 Distribution of arrival gate and public transport infrastructure around the Beijing South Railway Station

面公交线路处于运营状态, 其中, 13条常规公交线路, 2条机场大巴线路. 地面公交的运营服务时段如表1所示, 常规地面公交服务最早从4:50开始运营, 最晚于23:00之前停止运营.

1.2.2 地铁基础数据

对北京南站站内地铁出行调查主要包括: 直达线路的设施运营情况以及首末班车时间. 北京市地铁线路共17条, 在北京南站设有地铁4号线和地铁14号线东段2条线路, 北京南站4号线、14号线东段首班车时间分别为05:15和05:30; 末班车时间分别为23:28和22:40; 4号线、14号线早晚高峰发车间隔为2min, 其余时间为3min.

1.3 北京南站公交系统运行数据

1.3.1 到达站点运行时间

利用百度地图API接口获得乘客以北京南站为起点, 直达和换乘条件下地铁线路、公交线路各站

表1 北京南站地面公交运营服务时段

Table 1 Ground bus operation service time of the Beijing South Railway Station

上车位置	公交线路	起点站	终点站	运营时段
南广场公交枢纽	特17	北京南站南广场	北京西站南广场	05:00—23:00
	665	北京南站南广场	泰河园小区	05:30—23:00
	529	北京南站南广场	翠海明苑	05:30—23:00
	343	北京南站南广场	新宫地铁站	05:30—22:40
	652	北京南站南广场	开发区交通服务中心	06:30—10:30;16:30—20:30
北广场公交枢纽	102	北京南站	动物园枢纽站	04:50—23:00
	106	北京南站	东直门枢纽站	04:50—23:00
	20	北京南站	北京站东	05:00—23:00
	458	北京南站	南宫迎宾路南站	05:30—23:00
	133	北京南站	晓月苑小区	06:00—22:30
南站机场大巴	北京南站	首都机场 T3 航站楼	05:00—21:00	
北京南站公交站	381	永定门长途汽车站	欣旺大街站	05:30—22:00
	485	北京南站	团河北村站	06:30—23:00
	155	北京南站	西铁营	07:20—22:50
	南苑机场大巴	公主坟	南苑机场	07:00—19:00

点为终点,考虑出发时间,选定在 14:00—17:00、20:00—23:00 时间段某一时刻出发,得到各个地铁站点和公交站点的运行时间.其中,百度地图 Web 服务 API 提供了 http/https 接口,通过此接口发起检索请求,获取返回 json 格式的公交路线规划数据.出于乘客对出行路线选择因素的多样性,如部分乘客偏好少换乘,部分乘客偏向最短出行时间,针对不同的市内换乘策略采用最佳出行路线作为出行路径,返回的字段中整合所需的出行数据,得到起点站、终点站、路线的出行段(出行段包括站间换乘)、各出行段的交通方式类型及出行时间等字段信息.

对于地面公交出行,由于受到路面交通拥堵状况的影响,乘客在不同时段乘坐地面公交出发时所需在车时间不同.在 14:00—17:00 和 20:00—23:00 时间段内出发到达同一站点运行时间不同,14:00—17:00 的运行时间大于 20:00—23:00 的运行时间,途径站点越多在车时间的差距越明显.地铁不受地面交通拥堵影响,运行时间较为稳定,在车时间不受出发时段的影响.

1.3.2 地铁内部换乘及接驳地面公交可行性

在进行地铁线路间换乘时,乘客有可能会遇到长期等待换乘首班车或错过末班车而无线路可换乘的情况.此时需考虑地铁换乘站周围的可接驳公

交,让乘客提前做好出行计划,确定是否继续选择公共交通出行或更换其他交通方式来完成此次出行.考虑北京南站出发的地铁线路及换乘下的地铁线路进行研究,如图 3 所示.

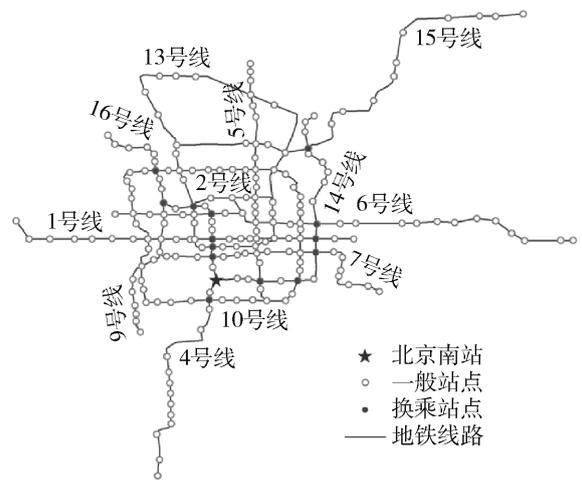


图3 北京南站直达和换乘下地铁线路分布

Fig. 3 Distribution of metro lines under transfer from the Beijing South Railway Station

对于地铁 4 号线,共有角门西、菜市口、宣武门、西单、平安里、西直门、国家图书馆、海淀黄庄、西苑 9 个换乘站,分别可换乘地铁 10 号线、7 号线、2 号线、1 号线、6 号线、13 号线、9 号线、16 号线.对于

地铁14号线东段,共有大望路、蒲黄榆、金台路、九龙山、十里河、望京6个换乘站,分别可换乘地铁1号线、5号线、6号线、7号线、10号线和15号线。

对于地铁4号线,首班车时刻下存在乘客需在换乘站等待较长时间才能换乘地铁的情况。乘客乘坐4号线在05:20到达菜市口站,需等待23 min才能坐到7号线(焦化厂—北京西站)05:43的首班车;乘客乘坐4号线在05:19到达国家图书馆站,需等待40 min才能坐到9号线(国家图书馆—郭公庄)05:59的首班车;乘客乘坐4号线在05:13到达

海淀黄庄站后,需等待65 min才能坐到10号线外环06:18的首班车;乘客乘坐4号线在05:04到达西苑站,需等待56 min才能坐到16号线06:00的首班车。末班车时刻下,如表2所示,在与9条线路的换乘中,均出现换乘不可实现的情况。错过2号线(全程)、6号线(海淀五路居方向)、10号线(外环)末班车,与7号线、13号线和16号的换乘不可实现。2号线、9号线和16号线的公交接驳仅有一条线路,而10号线的换乘站角门西站则没有可接驳公交。

表2 末班车下4号线换乘及接驳公交

Table 2 Metro and bus transfer of line 4 in last train condition

换乘线路	换乘站点	换乘情况	可接驳公交
1	西单	4号线安河桥北—天宫院方向错过1号线末班车	夜1/夜4/夜10
2	宣武门	错过2号线全程线末班车,半程线换乘时间紧张	夜5
6	平安里	4号线天宫院—安河桥北方向错过6号线海淀五路居—潞城方向末班车	105/107/111/118/特3/夜13/夜21
7	菜市口	错过7号线的末班车,不可换乘	夜4/夜7/夜10
9	国家图书馆	错过9号线天宫院—安河桥北方向和安河桥北—天宫院方向的末班车	夜8
10	角门西	错过10号线外环方向的末班车	无
10	海淀黄庄	仅可换乘10号线外环方向的末班车	320/夜8/夜9
13	西直门	错过13号线末班车,不可换乘	夜8/夜20外/夜21
16	西苑	4号线(天宫院—安河桥北)错过16号线末班车	夜8

对于地铁14号线东段,首班车时刻下也存在较长时间等待换乘地铁情况,如14号线在05:24到达金台路站,需等待33 min才能坐到6号线05:57的首班车。末班车时刻下,如表3所示,地铁14号线在与6条地铁线路的末车换乘中,与1号线

和10号线的换乘时间充裕;与5号线和6号线换乘时间紧张,乘客极有可能会错过末班车;与7号线和15号线的换乘不可实现,会错过末班车。在公交接驳方面,14号线和15号线在望京换乘站无地面公交可供接驳。

表3 末班车下14号线换乘及接驳公交

Table 3 Metro transfer and bus connection of line 14 in last train condition

换乘线路	换乘站点	换乘情况	可接驳公交
1	大望路	可实现换乘且换乘时间充裕	11/626/667/669/811/812/夜1/夜25/夜27
5	蒲黄榆	可实现换乘但换乘时间紧张,有错过末班车风险	夜24
6	金台路	可实现换乘但换乘时间紧张,有错过末班车风险	夜6/夜25
7	九龙山	错过7号线焦化厂—北京西站方向的末班车	23/夜7/夜25
10	十里河	错过9号线天宫院—安河桥可实现换乘且换乘时间充裕	专72/夜30
15	望京	错过15号线俸伯—清华东路西口方向末班车	无

1.4 站内换乘公交系统步行数据

北京南站的列车到达后的出站口为“到达口”，北京南站地下一层东西两侧共有8个到达口，奇数到达口1、3、5和7在南站地下一层东侧，由北向南依次分列；偶数到达口2、4、6和8在南站地下一层西侧，由北向南依次分列。乘客出到达口之后将分散，根据自己的目的地选择换乘地铁、公交等出行方式(见图2)。

通过调查多组不同到达口到不同地铁/公交线路候车点的步行换乘时间，并将线路按所在站点分类。考虑到到达高铁枢纽站的乘客对于换乘路径不熟悉，枢纽站引导标识众多容易造成乘客停滞和绕路等现象，对调查换乘时间与乘客人数进行分析，并将多数乘客的换乘时间区间作为模型计算的步行换乘时间。北广场公交枢纽和南广场公交枢纽的换乘时间分析如图4所示。

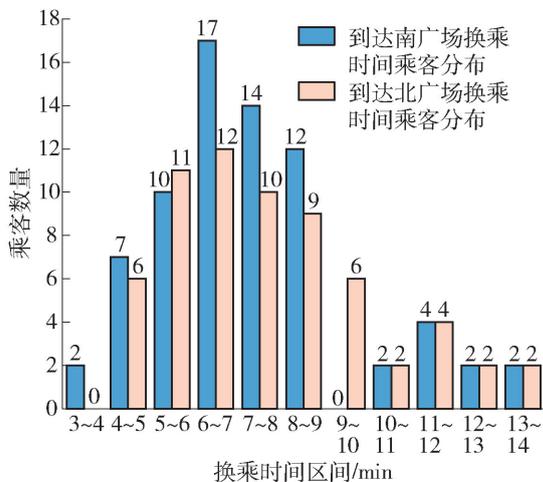


图4 换乘时间区间内换乘至公交枢纽站的乘客数量分布

Fig. 4 Distribution of transfer passengers within the transfer time range

对于北广场公交枢纽，取5~8 min内平均值384 s作为换乘步行时间。对于南广场公交枢纽，取6~9 min内的平均值445 s作为换乘步行时间。地铁站台的换乘时间则绝大多数集中于4~7 min，取该区间内平均值358 s作为换乘步行时间。各公交候车站点的换乘时间如表4所示。

2 多模式公共交通可达性计算模型

多模式公共交通系统是由地面公交、地铁和地铁换乘公交所组成的公共交通系统。公共交通可达性即乘客通过公交系统完成一次出行的便利程度，出行过程花费的时间越长，可达性越低；出行

表4 北京南站站内步行换乘至各公交候车点时间

Table 4 Transfer time from arrival exit to metro/bus station in the Beijing South Railway Station

候车站点	最短时间	最长时间	选取时间 ^s
地铁站台	269	528	358
北广场公交枢纽	199	822	384
南广场公交枢纽	206	535	445

时间越短，则可达性越高。模型建立将以出行时间为指标，并选择最短出行时间进行可达性分析。按照交通出行方式分为单一公交出行模式、单一轨道交通出行模式以及混合交通出行模式。不同的出行模式都有不同的出行阶段以及不同换乘关系。按照换乘条件将多模式公共交通的出行模式划分为公交之间的换乘、地铁之间的换乘以及地铁换乘公交3种，如表5所示。

表5 按换乘条件划分的公共交通出行模式

Table 5 Public transport travel modes according to transfer conditions

换乘条件	出行模式	出行阶段	换乘次数	表达式
无换乘	公交	1	0	B
	地铁	1	0	R
有换乘	公交-公交	2	1	B-B
	地铁-公交	2	1	R-B
	地铁-地铁	2	1	R-R
	公交-公交-公交	3	2	B-B-B
	地铁-地铁-公交	3	2	R-R-B
	地铁-地铁-地铁	3	2	R-R-R

本模型考虑出行时间和换乘条件将多模式公交可达性计算分为两部分：直达条件下可达性计算和换乘条件下可达性计算。

以北京南站为例，乘客从出发点选择公共交通出行到达其目的地需要经过3个阶段：1)从高铁站到达口至公交候车点的换乘步行时间；2)公交站台候车时间；3)乘客乘坐公交到达目的站点的运行时间。北京南站公共交通出行可达性可表示为

$$A_j = \theta_h + \theta_w + \theta_j \quad (1)$$

式中： A_j 为北京南站公共交通出行到点 j 的可达性； θ_h 为从高铁站到达口至公交候车点的换乘步行

时间; θ_w 为公交站台候车时间; θ_j 为乘客乘坐公交到达目的站点的运行时间.

换乘步行时间 θ_h 取值见表 4, 以高峰时段 14:00—17:00 和 21:00—23:00 作为研究对象, 本文设定候车时间取值 5 min. 运行时间 θ_j 则按照无换乘、1 次换乘和 2 次换乘的条件分别进行计算.

2.1 无换乘条件下可达性模型

无换乘可达性即乘客在出行过程中没有发生换乘, 出行阶段只有 1 个, 起讫点均为公交站或均为地铁站, 则 θ_j 为

$$\theta_j = \sum_{k=1}^n t_k \tag{2}$$

式中: n 为该出行阶段途径站点个数; k 为该出行阶段经过的第 k 个站点; t_k 为线路的第 k 个站间的运行时间.

2.2 有换乘条件下可达性模型

有换乘条件下可达性即乘客在出行过程中需进行线路换乘才能到达目的地的可达性. 根据北京市实际路网情况以及考虑到乘客所能接受的最大换乘次数, 仅考虑最大换乘次数为 2 以下的可达性计算.

2.2.1 一次换乘下可达性模型

$$\theta_j = \sum_{x=1}^n t_x + t_h + t_w + \sum_{y=1}^m t_y \tag{3}$$

式中: t_x 为出行阶段 1 第 x 个站点的运行时间; t_y 为出行阶段 2 第 y 个站点的运行时间; n 为出行阶段 1

的途径站点个数; m 为出行阶段 2 的途径站点个数; t_h 为换乘时间; t_w 为候车时间.

2.2.2 两次换乘下可达性模型

$$\theta_j = \sum_{x=1}^n t_x + (t_h^1 + t_w^1) + \sum_{y=1}^m t_y + (t_h^2 + t_w^2) + \sum_{z=1}^q t_z \tag{4}$$

式中: t_h^i 为第 i ($i=1, 2$) 换乘站的换乘步行时间; t_w^i 为第 i ($i=1, 2$) 换乘站的换乘等待时间; q 为出行阶段 3 的途径站点个数; t_z 为出行阶段 3 第 z 个站点的运行时间.

模型以时间成本为指标, 以完成一次指定起讫点的出行时间作为乘客的出行时间, 并选择最短出行时间作为时间成本进行可达性分析. 本模型考虑出行时间和换乘条件将公交可达性计算分为两部分:直达条件下可达性计算和换乘条件下可达性计算, 本模型换乘条件设为 2 次及以内. 最后, 通过模型的计算得到北京南站公共交通站点间的出行时间.

3 多模式公共交通可达性评价

对于不同出行模式下由北京南站出发通过公共交通到达各站点的出行数据, 根据直达和换乘条件对站点出行数据进行分类, 并根据可达性模型, 利用 MS Excel 软件对出行时间、换乘次数等指标进行计算, 经计算后的多模式公共交通的出行数据示例如表 6 所示.

表 6 北京南站出发的公共交通出行数据示例

Table 6 Travel time sample of public transport from the Beijing South Railway Station

出行模式	起点站	换乘站	终点站	阶段数	出行线路	换乘时间	出行时间
B	北京南站	无	西单路口南	1	102	无	31
R	北京南站	无	西直门	1	R4	无	20
B-B	北京南站	菜市口北	大屯东	2	20-特 11	9	97
R-B	北京南站	动物园	东冉村	2	R4-360	3	65
R-R	北京南站	西单	天安门西	2	R4-R1	5	17
B-B-B	北京南站	崇文门西—孝宝庄	温泉	3	103-85-384	10	103
R-R-B	北京南站	宣武门—积水潭	沙河	3	R4-R2-345	9	90
R-R-R	北京南站	蒲黄榆—大屯路东	奥林匹克公园	3	R14-R5-R15	7	49

由于百度 API 数据中出行时间处理过程的“黑盒性”, 需要对其数据准确度进行验证, 以保证后续分析的正确性. 通过 Oracle 提取和分析了一周内的公共交通 IC 卡和 AFC 构成的出行链数据, 将起

点设为北京南站的公共交通站点, 在研究时段内提取其至各站点的出行时间, 在出行时间异常的错误数据筛选后, 并按照站点进行聚类, 计算其平均出行时间. 将相匹配的刷卡数据与 API 数据出行时间

进行相关性分析,结果如图5、6所示.可以看出,二者的 R^2 均在0.89水平上,拟合程度较高,具有较高的可信度.

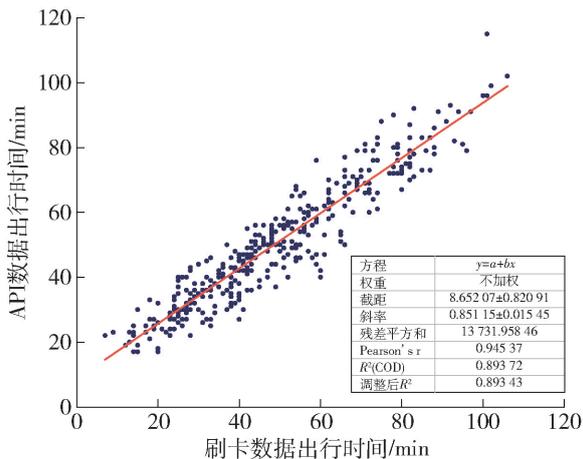


图5 14:00—17:00 刷卡数据与API数据出行时间相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of travel time between smart card data and API data during 14:00—17:00

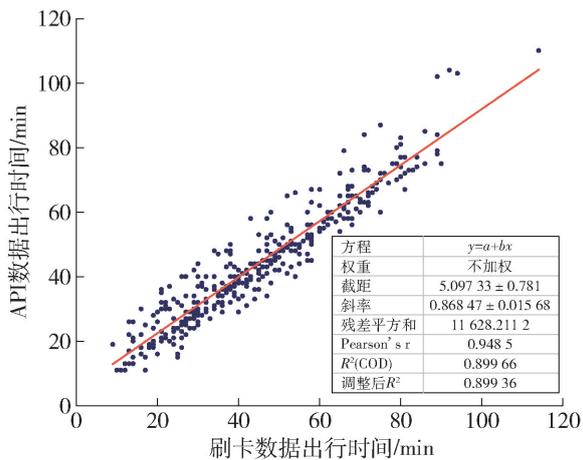


图6 20:00—23:00 刷卡数据与API数据出行时间相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of travel time between smart card data and API data during 20:00—23:00

对于验算后的不同站点计算的出行时间,利用ArcGIS软件的空间分析模块处理并可视化一天不同出发时段下出行时间在30、60、90、120 min内的公共交通可达范围,结合土地利用、路网形状对公共交通可达性进行分析,并使用出行时间、换乘特性2个指标对北京南站公共交通可达性进行效率评价.

根据北京南站列车到达时刻分布,选取研究时段为高铁客流到达的2个高峰时段,即14:00—17:00和20:00—23:00.研究区域为北京市六环内

所有公交和地铁站点覆盖的区域,如图7所示.

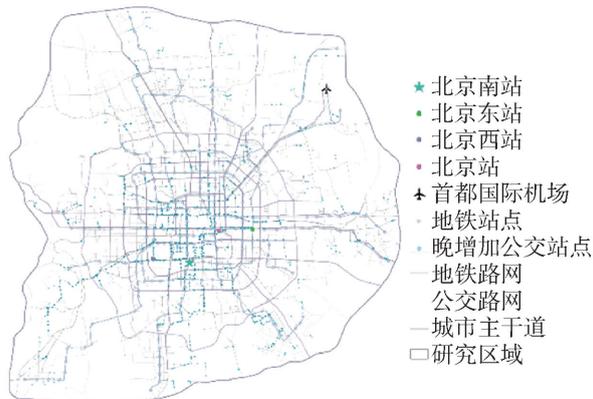


图7 由北京南站出发的多模式公共交通可达性研究区域

Fig. 7 Area of interest for multi-mode public transport accessibility from the Beijing South Railway Station

3.1 14:00—17:00 时段公交出行可达范围

处于14:00—17:00出发时段内由北京南站出发的公共交通可达性范围如图8所示.公共交通可达性以北京南站为中心向外逐渐衰减,不同出行时间的可达范围在发散式城市主干道和地铁线路的影响下,呈现波动式突起和凹陷.

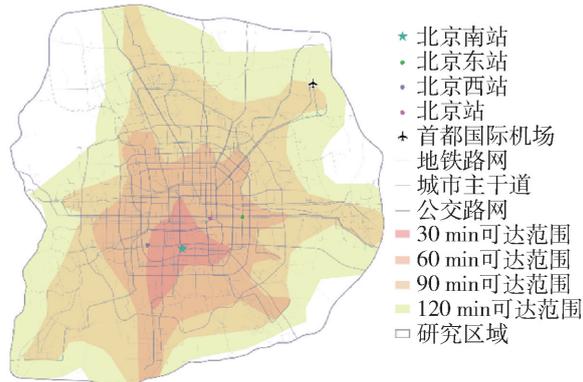


图8 14:00—17:00 由北京南站出发的公共交通可达性
Fig. 8 Public transport accessibility of the Beijing South Railway Station during 14:00—17:00

30 min 可达范围包括了北京二环路以内大部分地区.4号线和14号线东段在南部、北部、东部形成突起,西部地区受地铁14号中段未开通的原因没有形成突起趋势.东北侧存在小幅度凹陷是由于天坛公园、龙潭湖公园、陶然亭公园等城市公共空间布局对可达性带来的影响.

60 min 可达范围包括了北京市四环路段内大部分区域,主要原因是该区域内地铁站点密集,乘客通过地铁之间的换乘可减少大量的出行时间.南部

有较大的突起,是受地铁 4 号线的延伸,一些站点可通过地铁和公交直达,或者是地铁换乘公交到达,减少了乘客的出行时间.北部突起部分为地铁 4 号线和地铁 16 号线 2 条地铁交汇区域,同时,突起地区的公交站点密度较大,相对南部地区形成突出部分.

90 min 可达范围包括了五环的绝大部分地区,基本涵盖了大部分地铁站点,南部地区突起的部分为地铁 4 号线和房山线的延伸;西部地区的突起为地铁 1 号线的延伸;北部的突起部分为昌平线和 16 号线的延伸,同时该地区的公交站点密度很大.90 min 可达范围有沿着地铁一号线和八通线向东西 2 个方向延伸的趋势,东侧八通线的土桥方向表现得更为明显.东北部由于受到香山和颐和园等的影响,可达范围向内凹陷,公交可达性较差.

120 min 可达范围南部相对北部地区到达更远的地区,大部分地区接近于六环或超出六环外.东部突起是受 1 号线的延伸;西南部突起则是因为房山线、4 号线和亦庄线的延伸;而西北部部分位于上庄地区,受到上庄水库、湿地公园等用地类型的影响,以及交通站点较少,到达需要多次换乘,可达范围向内凹陷,可达性较差.

对于北京南站到达其他客运枢纽站的可达性,由于地铁 4 号线的作用,乘客可直接通过地铁 4 号线换乘 7 号线到达北京西站,换乘 2 号线到达北京站,地铁 14 号线换乘公交到达北京东站,因此北京站、北京东站、北京西站均在北京南站出行 60 min 可达范围内.地铁机场线的设置也使得乘客通过地铁的换乘即可在 90 min 内到达首都国际机场.

整体来看,以北京南站为中心,东北部分可达时间相对较长;东部由于八通线和 6 号线的延伸可达性较好;西部设有水库、森林公园、香山公园、植物园等公共用地,地铁线路和公交线路需要绕行布设,可达性相较于东部较差.北部的昌平线和 15 号线均穿过六环外,相较于东西两侧具有更高的可达性.南部地区受 9 号线、房山线、大兴线和亦庄线线路延伸的影响,90 min 内便能到达大部分地区.五环以外,东部地区依赖于密集的地铁站点和公交接驳线路相对于西部地区具有较高的可达性.14:00—17:00 时段从北京南站出发乘坐公共交通在 2 h 内可到达北京市六环以内大部分地区.

3.2 20:00—23:00 时段公交出行可达范围

20:00—23:00 出发时段下由北京南站出发的公共交通出行可达范围如图 9 所示.可以看出,相

较于 14:00—17:00 时段可达性,20:00—23:00 时段的各出行时间段内表现出更高的可达性.

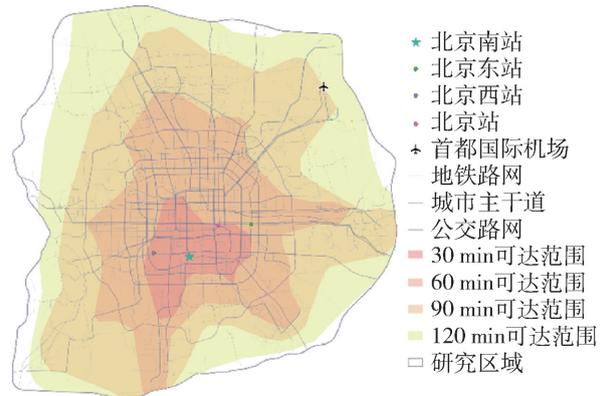


图 9 20:00—23:00 由北京南站出发的公共交通可达性

Fig. 9 Public transport accessibility of the Beijing South Railway Station during 20:00—23:00

30 min 可达范围覆盖了二环的大部分区域,包含了地铁 2 号线大部分范围,由于地铁 4 号线可方便的换乘到 7 号线、2 号线、1 号线等较近线路,乘客使用地铁可节省大量的出行时间.受 4 号线向南部延伸的影响,可达范围在南部有较大的突出,范围接近于五环区域.

60 min 可达范围覆盖了五环大部分区域,地铁 1 号线的作用更加明显,其东部有沿地铁 1 号线和八通线方向延伸的趋势,西部也由于地铁 1 号线苹果园方向线路有小幅度的突起.北部突起部分是由于该地区为回龙观、清华东路西口、西二旗,居住人口较大,公交站点分布密集,出行方便.南部地区由于 4 号线和亦庄线的延伸,在新宫地区形成突起,中间凹陷地区虽设有 341 路、526 路和 926 路 3 条公交线路,但走向相同,乘客只能利用公交完成出行,因此需要花费更多的时间,相较于两侧,可达性较差.东南部的突起是地铁 7 号线的延伸所致.

90 min 可达范围南部地区大部分接近 6 环线,主要是因为南部有 4 号线、亦庄线和房山线 3 条向南延伸的地铁线路,覆盖面积大,表现出良好的可达性.东部由于 6 号线、八通线的延伸使可达范围线直接穿过 6 环线,同时该地区经过 312 路、316 路、317 路、322 路、626 路和 591 路等多条公交线路,交通方便,相较于西部具有更高的可达性,东北部受到机场、高尔夫球场、薰衣草庄园、公园等地物以及河流影响,可达范围向内凹陷,可达性较差.西北地区普遍受到上庄水库、香山、公园、河流

等的影响,可达范围边界较为平滑.

120 min 可达范围大部分接近或超过 6 环线. 包围了 6 环内大部分地区. 该出发时段下在 2 h 内可到达北京大部分地区.

在北京南站与其他枢纽站的可达性上,北京西站和北京站在北京南站出行 30 min 范围内;北京东站则在 60 min 出行范围内,首都国际机场是在 90 min 出行范围内,与 14:00—17:00 范围基本一致.

整体来看,南部地区由于地铁 4 号线和 9 号线延伸使得该覆盖区域可达性较高. 由于 7 号线、八通线、6 号线的延伸使得东部地区可达性高于西部. 120 min 可达范围可覆盖到整个六环,相较于 14:00—17:00 时段可达性更高. 因为 20:00—23:00 时段地面车流量较少,地面公交的可达性变高.

3.3 不同时段下多模式公交出行可达性对比

对比 14:00—17:00 和 20:00—23:00 两个出发时段的多模式公共交通可达范围,两时段下公共交通出行均表现出了良好的可达性. 14:00—17:00 时段可达范围与地铁网络的延伸具有很强的一致性,而 20:00—23:00 时段可达范围结构中地铁主导作用没有很明显. 结合不同出发时段下的道路交通情况进行分析,14:00—17:00 时段通过地铁出行不受地面交通状况的限制,乘客地铁列车到达时间较短,地铁对出行可达性起到主导作用,而地面公交仅作为地铁的补充. 在 20:00—23:00 时段内,由于晚间地面交通车流较少,减少了地面公交的拥堵时间,增加了地面公交的可达性,此时地面公交能有效发挥覆盖范围广的优势,可达性相对于 14:00—17:00 时段在相同出行时间范围内能覆盖更大的区域.

3.4 可达性指标评价

3.4.1 出行时间指标

在可达性建模中选取出行时间作为可达性的计算结果,出行时间依赖于出行过程中各个出行阶段所耗时间的之和,包括北京南站到公共交通站点的站内步行时间、候车时间、在车时间以及换乘时间. 对由百度 API 数据获取后经处理的北京南站出发的公共交通出行数据,按照北京南站到达各站点的出行时间以及换乘次数进行统计,得到北京南站公共交通出行时间累计曲线,如图 10 所示,换乘次数的比例分布如图 11 所示. 出行时间分布中,在 40 ~ 60 min 的出行时间人数比例最高,占 36%;出行时间大部分在 20 ~ 80 min,其出行比例占到了 83%;

出行的平均时间为 56 min. 由此可以发现,在 1 h 内北京南站出行能到达大部分地区,显示出北京南站良好的公共交通出行可达性.

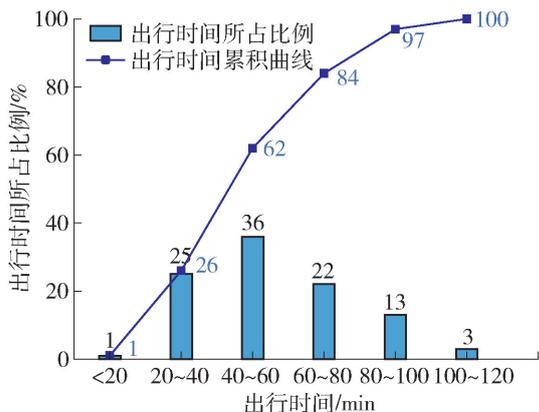


图 10 北京南站公共交通出行时间累计曲线

Fig. 10 Cumulative curve for travel time of public transport in the Beijing South Railway Station

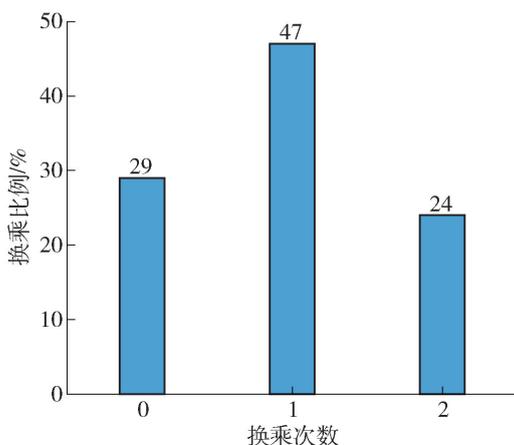


图 11 北京南站公共交通换乘次数比例分布

Fig. 11 Transfer times ratio distribution of public transport in the Beijing South Railway Station

3.4.2 换乘线路指标

由于北京市拥有高密度的公交和地铁网络,乘客在选择公共交通出行时基于最短出行时间的考虑,不可避免地需要进行换乘. 因此在出行可达性指标中还需要考虑到出行的换乘特性,包括换乘次数和换乘系数. 换乘包括地铁之间的换乘、公交之间的换乘以及地铁接驳地面公交. 公共交通出行过程中平均换乘为 1.15 次,其中换乘次数最多的为 1 次,比例为 47%; 0 ~ 1 次换乘的出行比例为 76%.

乘客平均换乘系数是衡量乘客出行直达性的指标之一,反映乘客换乘的方便程度,换乘系数越高表明乘客出行的直达程度越高,平均换乘系数可表

示为

$$\text{平均换乘系数} = \frac{\text{出行阶段数} + \text{换乘次数}}{\text{出行阶段数}} \quad (5)$$

计算的结果表明,北京南站公共交通的平均换乘系数为1.25。根据《城市道路交通运输规划设计规范》对平均换乘系数的要求,大城市平均换乘系数不应大于1.50,北京南站公共交通出行的平均换乘系数低于标准值,公共交通出行的直达性较好。

通过不同高峰客流时段由北京南站出发的公共交通可达性分析,可以发现:北京南站以北地区由于地铁4号线的8个换乘站,与7号线、2号线、1号线、6号线以及10号线均换乘方便,使得北部相对南部表现出更高的可达性。

4 结论

1) 公共交通可达性范围受到地铁线路网络的影响,地铁线路走向对于北京南站多模式公共交通可达性的提高具有重要作用。例如地铁4号线在南北部的延伸对地铁沿线及周边均带来了很高的可达性,地铁1号线在东部的延伸使东部具有较高的可达性。

2) 北京南站公共交通可达性受到地形、公园设施等土地利用的影响,例如北京市西北部分布着森岭公园、山脉以及河流等,地铁及公交线路的设置需要绕行设置,导致在不同出行时段内的最大可达范围明显与边界外的土地利用相关,呈凹陷或平滑延伸的趋势。

3) 不同出发时段的可达性受地面交通状况的影响。在14:00—17:00时间段内,由于地面交通流量较高,地铁线路可达性为整体可达性的主导因素,可达范围与地铁网络的延伸具有很强的一致性。而20:00—23:00时间段内,地面交通流量较小,减少了地面公交的拥堵时间,增加了地面公交的可达性,此时地面公交能有效发挥覆盖范围广的优势,可达性相对于14:00—17:00时段在相同出行时间范围内能覆盖更大的区域。

4) 北京南站与其他客运枢纽的公共交通可达性良好。北京站、北京西站、北京东站在客流高峰期通过公共交通的出行时间均在60 min内,首都国际机场在90 min出行可达范围内。

5) 由北京南站出发的地铁加地面公交的网络和站点分布对不同地域的可达性影响较大。在经济商贸区和居民居住区等区域具有密集的地铁站点和公交站点,线网重复率高;而偏远位置站点到达需

要线路绕行或换乘才能到达,增加了出行时间。可对可达性薄弱区域增加局部微循环公交线路,从而减少出行阻抗,扩大公交服务范围。

6) 通过出行时间和换乘特征指标对北京南站公共交通出行可达性的进行定量的分析,出行时间分布中,有36%的比例在40~60 min;出行时间大部分在20~80 min,其出行比例占到了83%;出行平均时间为56 min。平均换乘为1.15次,其中换乘次数为1次的所占人数最多,出行比例为47%;0~1次换乘的出行比例为76%。

7) 针对客运枢纽站点,建立多模式公共交通可达性模型,对提升公共交通枢纽系统运行效率具有运营优化指导意义。本文对于可达性结果,分析了公交路网的布设密度与城市位置的关系,对于城市公共交通网络的优化也具有指导意义。

8) 出于对比日间和晚间的高峰时段可达性的原因,以连续3 h作为一个研究时段划分。在后续的研究中,将进一步细分研究时段对可达性进行评价,以研究枢纽站点的实时可达性。在数据源上,可对枢纽站点开设的定制公交及夜班公交进行进一步可达性分析与评价。

参考文献:

- [1] DALVI M Q, MARTIN K M. The measurement of accessibility: some preliminary results [J]. *Transportation*, 1976, 5(1): 17-42.
- [2] GEERTMAN S C M, RITSEMA V E J R. GIS and models of accessibility potential: an application in planning [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(1): 67-80.
- [3] 宗刚, 吴彤. 公共交通枢纽可达性测度及应用 [J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2016, 33(5): 544-550.
ZONG G, WU T. Measurement of accessibility of public transportation hub and its application [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2016, 33(5): 544-550. (in Chinese)
- [4] KOSTER P R, KROES E P, VERHOEF E T. Travel time variability and airport accessibility [J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2011, 45(10): 1545-1559.
- [5] 汪淳, 雷曾翔, 段征宇. 基于轨道交通的区域枢纽机场可达性研究——以杭州萧山机场为例 [J]. *综合运输*, 2016, 38(4): 84-88, 92.
WANG C, LEI Z X, DUAN Z Y. Research on accessibility of regional hub airport based on rail transportation: a case study of Hangzhou international

- airport[J]. *China Transportation Review*, 2016, 38(4): 84-88, 92. (in Chinese)
- [6] 李晓伟, 王伟, 杨敏, 等. 交通枢纽可达性对多模式综合交通客运方式竞争的影响[J]. *公路交通科技*, 2016(12): 106-112.
LI X W, WANG W, YANG M, et al. Impact of transport hub accessibility on competition of multimodal passenger transport [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016(12): 106-112. (in Chinese)
- [7] LU F Q, CHEN X W. Assessing performance of public transit network using network-based accessibility measures [C]// *Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management*. Reston, V. A.: ASCE, 2009: 1021-1026.
- [8] LACONO M, KRIZE K J, EL G A. Measuring non-motorized accessibility: issues, alternatives, and execution [J]. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(1): 133-140.
- [9] 李蕴雄, 戴特奇, 张玉韩, 等. 北京地铁13号线对旅客时间可达性影响的研究[J]. *铁道运输与经济*, 2013, 35(10): 42-47.
LI Y X, DAI T Q, ZHANG Y H, et al. Study on influence of Beijing metro line 13 on passenger time accessibility [J]. *Railway Transport and Economy*, 2013, 35(10): 42-47. (in Chinese)
- [10] 陆化普, 王继峰, 张永波. 城市交通规划中交通可达性模型及其应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, 49(6): 781-785.
LU H P, WANG J F, ZHANG Y B. Models and application of transport accessibility in urban transport planning [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2009, 49(6): 781-785. (in Chinese)
- [11] DAVID O S, ALASTAIR M, JOHN S. Using desktop GIS for the investigation of accessibility by public transport: an isochrones approach [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2000, 14(1): 20.
- [12] 胡继华, 黄泽, 程智锋, 等. 基于蒙特卡罗的城市公交时空可达性模拟研究[J]. *交通信息与安全*, 2014, (3): 6-11, 41.
HU J H, HUANG Z, CHENG Z F, et al. Bus accessibility analysis based on monte carlo simulation [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2014, (3): 6-11, 41. (in Chinese)
- [13] 周雨阳, 姚琳, 赵晋, 等. 基于IC卡数据的多模式公交相对可靠性评价[J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(8): 1227-1233.
ZHOU Y Y, YAO L, ZHAO J, et al. Evaluation on relative reliability of multi-mode public transport based on IC card [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(8): 1227-1233. (in Chinese)
- [14] 张龙深, 葛星, 刘迪. 基于互联网开放数据的城市实时交通圈提取及分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2017, 34(4): 96-100.
ZHANG L S, GE X, LIU D. Analysis and extraction of urban real-time traffic circle based on internet open data [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2017, 34(4): 96-100. (in Chinese)
- [15] 王振, 张志敏, 王伟, 等. 基于百度API开源数据的居民出行研究[J]. *交通运输研究*, 2018(3): 18-24.
WANG Z, ZHANG Z M, WANG W, et al. Resident trip analysis based on open source data of baidu API [J]. *Transport Research*, 2018(3): 18-24. (in Chinese)
- [16] STEVEN E P, RAM M P, SACHIN N, et al. Development of time-of-day-based transit accessibility analysis tool [C] // *Transportation Research Record*. Thousand Oaks, C. A.: SAGE, 2002: 35-41.
- [17] JOHN C H, LINA F, LAURA L T. A case study in spatial-temporal accessibility for a transit system [J]. *Journal of Transport Geography*, 2019(75): 25-36.

(责任编辑 杨开英)