doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.01.004

基于时空数据的武汉市绿色交通出行模型研究

王　冠[1]，肖　昶[1*]，代　琦[2]
（1. 湖北省空间规划研究院，湖北 武汉 430064；2. 武汉市交通发展战略研究院，湖北 武汉 430017）

摘　要：针对如何表征城市公共交通、慢行交通等绿色交通系统与空间规划的耦合度，如何衡量设施供给能力与出行需求水平的动态匹配度，如何评估公交、慢行系统之间的衔接度等问题，以武汉市地面公交、轨道交通、公共自行车等为研究对象，汇集空间全市覆盖、时间动静结合的交通基础数据，建立车辆运行、客运出行、换乘接驳等功能模型，模拟地面公交出行链，仿真轨道交通换乘率，描绘出行时空可达性，评估线网功能融合度，为网络空间布局优化、出行结构绿色转型和安全高效出行引导等提供科学量化支撑。

关键词：时空数据；绿色交通；空间布局；智能模型；武汉市
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）01-0020-06

Research on Green Traffic Travel Model in Wuhan Based on Spatial-temporal Data

WANG Guan[1], XIAO Chang[1], DAI Qi[2]
(1. Hubei Spatial Planning Research Institute, Wuhan 430064, China;
2. Wuhan Transportation Development Strategy Research Institute, Wuhan 430017, China)

Abstract: Aiming at how to characterize the linkage of green traffic system with spatial planning, how to measure the relationship between facility supply capacity and travel demand level, and how to evaluate the connection between public traffic and slow traffic, we focused on Wuhan's bus, rail transit and shared-bikes, collected basic data, and established traffic models, such as vehicle operation model, passenger travel model and transfer model. These results can be applied to build bus travel chain, simulate rail transit transfer rate, depict travel accessibility, improve integration among various networks, and provide quantitative support for network optimization, travel structure transformation, and efficient travel guidance.

Key words: spatial-temporal data, green traffic, spatial layout, intelligent model, Wuhan City

近年来，国内城市发展模式由增量扩张向存量提升转变，空间结构趋于稳定，长距离机动化出行的原生动力正在减弱[1]。在此背景下，要素配置和布局直接影响城市空间结构和居民生活品质[2]。一方面，通勤和生活出行具有明显的距离边界，超过一定空间范围后出行量会锐减[3]；另一方面，短距离通勤具备良好的以公交、慢行为代表的绿色出行条件[4]，可通过改善公交运行环境降低小汽车出行量，进一步缓解交通拥堵、提高空间利用效率[5]。当前，国内各大城市空间布局普遍具有高密度、紧凑性特征，亟需强化交通出行与城市功能复合，重点发展绿色交通，促进出行结构转型。然而，城市轨道交通发展与城镇化的匹配性不高、与城市空间发展的协同性不足[6]，交通系统内部不同空间范围、不同方式要素之间的融合优化不充分等问题普遍存在[7]。中共中央、国务院针对全国综合交通发展做出重要战略部署，《国家综合立体交通网规划纲要》要求强化衔接联通，提升设施网络化和运输服务一体化水平[8]；《交通强国建设纲要》要求推进城市公共交通设施建设，强化城市轨道交通与其他交通方式的衔接[9]。

上述成果明确了交通空间可达与网络功能衔接的重要意义，而契合城市转型发展的绿色交通体系如何耦合空间布局，基础设施供给能力如何动态匹配需求水平，各类出行系统间的融合衔接如何评估等具体问题需要详细研究。本文收集了武汉市轨道交通、地面公交和部分公共自行车的动态出行以及静态网络等时空数据，建立了绿色出行模型，以支撑相关规划编制和问题研究。

1　背景概述

目前国内城市以轨道交通为代表的公交系统和以

收稿日期：2022-08-28。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（52172309）。
（*为通信作者）

共享单车为代表的慢行系统迅猛发展，但公众对出行体验反应各异，供需关系和衔接效率是关键一环[10]。

1）线网规模有序拓展，网络功能需要研究。武汉市交通基础设施建设稳步推进，轨道网络化进程战略性提速，出行需求急剧增长。截至2021年，武汉市运营轨道总里程为435 km，位居全国第五[11]，2024年将形成600 km的“强心强轴、环网放射”网络结构，构成“四网融合”的1小时通勤圈。地面公交运营线路610条，运营总里程约为9 000 km，正按照“衔接轨道、主城减复、副城补充、新城扩网”的规划定位逐步调整功能。然而，在大力发展基础设施建设、提高供给能力和水平的同时，尚未充分论证城市空间发展与公交线网规划实施的耦合关系、运营公交线网与城市综合交通体系的空间融合等，线网规划实施和优化调整之间缺乏必要的量化支撑和科学引导。

2）网络功能基本具备，规划效果需要评估。目前，武汉市轨道交通日均客流量约为390万人次，与地面公交基本持平，主城范围内公共自行车日均出行量超过100万人次。针对千万级别出行群体的多元化出行需求，更多表现在增强各自网络范围覆盖、实施独立票务政策等方面。然而，地面公交与轨道交通的协同规划、慢行交通与公共交通的衔接机制、线网之间的功能衔接效率等尚未由供需匹配度、公众满意度、规划实施进度等指标评估，规划与实施之间的效果比对以及规划全生命周期管理体制尚未形成。

3）初步助推城市更新，应用场景需要拓展。近年来，武汉市在以人为本、公交优先、公共空间品质提升等方面开展了一系列积极探索。以轨道交通6号线建设为契机，对沿线的百年商业老街中山大道开展综合改造，通过环境重塑促进城市更新。然而，社会公众尚未充分感知规划先行、数字化治理体系、TOD实践产生的巨大变革和便民服务。

基于上述分析，本文的具体研究内容为：①挖掘公交和慢行交通的OD分布、断面流量、兴趣点等规划实施信息，发挥评估效用；②畅通轨道网、公交网、慢行网之间的资源交互渠道，促进功能衔接；③建立健全城市绿色交通规划、实施、管理全链条机制，推动数字治理。

2　模型建立

新一代信息化应用模型的建设不是海量数据和硬件平台的程序化堆砌，而是以需求应用为导向的解决方案，其时效性、可更新性、算法精度是关注重点。

2.1　数据处理模型

建立专用数据库和网络接口，实时采集轨道列车、地面公交车、公共自行车的运行轨迹，准实时收集城市一卡通、移动支付、临时卡（票）等票务信息，定期汇集道路网、轨道网、公交网、慢行网等静态数据。由于各类基础数据来源不同、采集频率各异，因此建立模型处理数据的冗余歧义、结构异常、制式差异等问题，清洗约5%的无效信息，确保出行主体信息价值最大化。

1）对车辆轨迹数据的处理。约束车辆运行状态信息有效：对运行记录排序筛查，过滤邻近记录的漂移经纬度，过滤极大极小异常车速，识别地面公交车和公共自行车的路口等待和站台驻留记录等，日均存储约2 000万条出行轨迹记录。

2）对乘客票务数据的处理。确保出行主体多方式全口径信息完整：通过与不同票务管理部门协商，采集由城市一卡通系统记录的全市近70%的公共交通票务数据、由网络平台记录的智能终端电子票务数据、由运营部门记录的临时卡（票）等其他方式单程票务数据，日均存储各类出行需求记录约1 000万条。

3）对网络拓扑数据的处理。提高出行载体与出行行为的匹配精度：①双向标注路网和公交线网，隔离道路形成双向路段，提高车辆运行与路网的匹配精度；②构建路段索引，提高GPS点位与路段的检索效率；③划分地理空间范围，减少道路匹配时参与搜索的路径集合，优化模型运行时间。

4）对非结构化数据的处理。通过人工辅助调查，查验公交车内部和轨道换乘通道监控视频、出行调查访谈等非结构化数据，获取真实样本信息，用于模型校核与参数标定。

2.2　出行分析模型

1）公交车辆运行模型。公交车辆运行是供给能力分析的基础，以地面公交车实时运行轨迹，轨道列车到离站时刻表为基础，建立车辆运行模型。应用模型可获取不同时段的站间运行时间和平均车速，用于站点候车时间发布和准点率等信息统计；也可获取站点时空可达测度，包括公交和轨道的独立模式以及二者之间的换乘模式，用于衡量大型基础设施或重点区域的公交服务能力；还可动态形成车辆实际运行线网拓扑，排除因客观因素造成的真实运行轨迹与规划线网不符的情况。

2）地面公交出行模型。武汉市地面公交采取“一票制”，增加了出行OD获取难度。基于票务数

据、车辆运行轨迹、人工调查等，建立基于时空匹配的上车站点识别模型和基于通勤匹配的下车站点模拟模型。技术路线是累积出行记录，训练形成个体常发出行表。如图1所示，针对闭合通勤出行链，一定时空阈值内的下次出行起点可视为本次出行终点，将通勤规则记录到常发出行表中；针对闭合非通勤出行链，根据常发出行表，判断是否存在通勤出行，若存在则可根据常发出行表推断本次的起止位置；针对非闭合非通勤出行链，若不存在通勤行为，则可根据一定时空阈值内站点发生吸引总量基本平衡的原理，计算该线路后续站点上客强度并模拟下车站点。对于刚性通勤出行群体，模型精度可达80%。应用模型可获取公交客流走廊分布情况以及不同时空粒度的区间、线路、站点客流特征等。

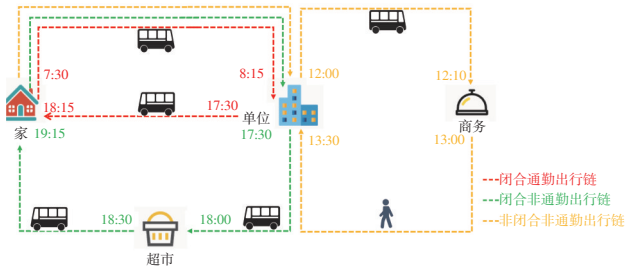


图1　地面公交出行链模拟示意图

3）轨道交通出行模型。轨道交通方面，虽可通过闸机票务数据获取站点OD，但复杂的内部换乘方案，增加了断面客流统计和运力匹配分析难度。技术路线是基于轨道票务数据和车辆到离站时刻表，关注出行时长、舒适度感受、换乘复杂度等方面，以广义出行成本为统一标尺度量换乘方案的选择概率，建立关注整体特征的全天路径选择模型和关注断面高峰期特征的分时路径选择模型。对于全天路径选择模型，其广义出行成本由列车运行时间、列车站点驻留时间、乘客换乘行走时间和换乘候车时间构成（式（1）~（3））；对于分时路径选择模型，进一步考虑车厢拥挤度对换乘路径选择的影响，如式（4）所示，α、β、γ、δ、ε分别代表上述因素对广义出行成本的贡献度。结合人工调查标定模型参数，模型精度可达90%。应用模型可获取轨道客流基本特征，包括不同时间粒度的断面和区间客流分布以及线路、站点的转换乘客流集散特征等。

$$T_{day}=T_{in}+T_{out} \tag{1}$$

$$T_{in}=\alpha\times T_{run}+\beta\times T_{dwell} \tag{2}$$

$$T_{out}=\gamma\times T_{walk}+\delta\times T_{wait} \tag{3}$$

$$T_{hour}=T_{in}+T_{out}+\varepsilon\times F_{in} \tag{4}$$

4）公共自行车出行模型。与地面公交和轨道交通相比，公共自行车轨迹点位稀疏，骑行规律不强，易产生定位信息重复、乒乓效应等问题，增加了公交接驳点位和POI精准获取的难度。技术路线是通过对车辆活动时空序列的逻辑处理，形成有效骑行轨迹，并训练数据获取出行时空阈值，再依此切分出行（图2）。结合抽样调查验证，模型精度可达80%。应用模型可获取基于工作日通勤出行的城市慢行职住组团；还可获取基于节假日通勤出行的POI分布以及与其他交通方式的接驳能力等。

5）换乘出行模型。对于公交系统内部的换乘行为，通过调查数据样本的统计训练，获取换乘模型的时空评判标准，主要包括两种情况：①在时空标准内发生多种出行且均属同一票务方式，可直接判断属于换乘行为；②在时空标准内发生多种出行但属不同票务方式，需结合其他数据关联个体全出行链行为判断（如下班途中发生POI驻留）。对于公交交通与慢行交通之间的换乘情况，主要围绕公交站点范围内公共自行车的集散特征模拟换乘行为，尤其以公交站点为起止节点的通勤骑行研究可支撑出行“最后一公里”专题规划。

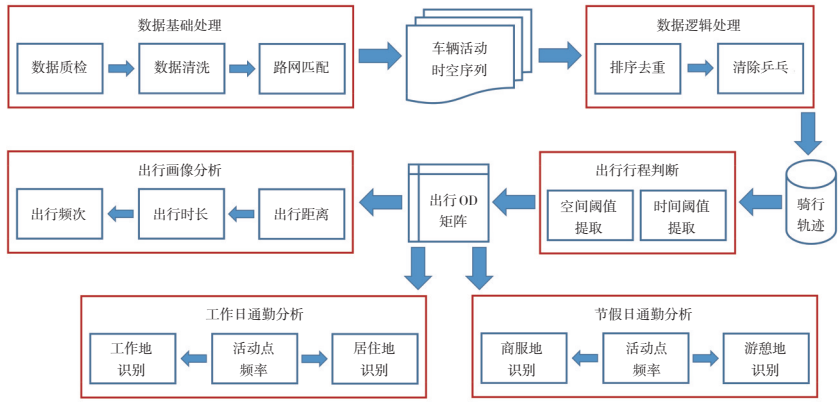


图2　公共自行车轨迹行程切分模型示意图

3　综合应用

本文应用上述模型规划公共交通、慢行交通，支撑线网结构锚固和城市重点功能区高质量发展；反映真实供给关系，引导基础以及配套设施的规模确定和功能布局；提供实时动态信息，服务运营方案优化和公众信息发布。

3.1　提升功能，优化公交线网布局

以时空可达性和功能提升为目标，推进多轮“主辅结合、功能融合”的线网优化调整，达到网络服务范围持续优化、品效协同的效果。

1）以时空可达性为目标的轨道交通规划。利用公交车辆运行模型，获取公共交通站点的时空可达性指标，进而形成单元出行成本。通过促进干线铁路、城际铁路、市域（郊）铁路、城市轨道交通“四网融合”，强化节点衔接和网络融合，规划构建武汉都市圈1小时通勤圈，在交通枢纽实现多线换乘和多种轨道交通直通运转等方式。对于前者，规划两条以上轨道快线和1~2条轨道普线衔接国家级客运枢纽，规划至少一条轨道线路、3~5条地面公交线路衔接区域级、城市级客运枢纽，实现市级中心和副城中心至邻近综合客运枢纽30 min可达、主要综合客运枢纽之间互通时间不超过45 min、换乘次数不超过1次的轨道衔接目标（图3）；对于后者，推动互联互通、资源共享，统筹协调系统制式，在副城中心、新城中心重点规划一体化换乘，形成区域换乘中心，支持市域铁路与穿城轨道快线的直通运转，实现都市圈重点城市至武汉副城中心通勤出行小于1 h的网络融合目标。

2）以供需平衡为基础的地面公交规划。利用地面公交和轨道交通出行模型，识别解放大道、武珞路、汉阳大道等地面公交大客流走廊以及楚河汉街、王家湾、江汉路等大客流集散站点，量化分析常发性出行拥堵点段或特定事件引起的人群聚集形成与消散规律，突出供需矛盾点段。围绕轨道交通线网布局，通过改线、并线等优化手段，配合换乘优惠政策，规划构建“快、干、支、微”4级地面公交功能网络。首先，依据与轨道并线的地面公交站点数量，适当调配公交线路，加强对次支路网的服务覆盖，2015—2021年武汉市地面公交线网道路覆盖里程由1 750 km增长至4 040 km，而重复系数由4.65降至2.83；其次，在地面公交可达性较弱的武昌沿江、四新、南湖等区域（图4）和日均集散量超过10万人次的光谷广场站、楚河汉街站、王家湾站等大型轨道客站周边规划功能型线路。

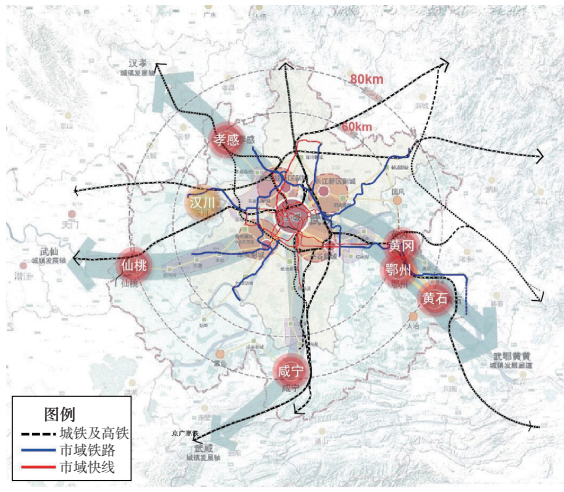


图3　基于时空可达性的武汉都市圈轨道交通规划

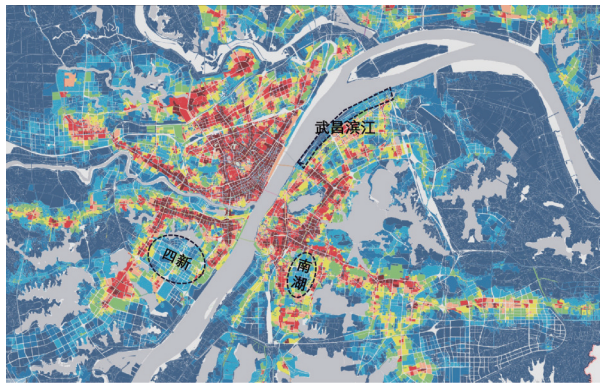


图4　武汉市地面公交线网时间可达性情况

3.2　注重衔接，促进出行结构转型

以提升网络换乘衔接效率为目标，规划轨道交通、地面公交、慢行交通“三网合一”，推进公共交通占比40%、慢行交通占比40%、机动化交通占比20%的绿色出行结构转型。

1）支撑多模式一体化的出行衔接评估。换乘出行模型精细描绘了轨道交通对刚性出行的显著吸引力。在轨道交通2号线南延线与11号线相继开通后，光谷大道（珞瑜路—三环线）沿线地面公交站与轨道交通光谷广场站的换乘出行量骤降45%；同时，轨道沿线的地面公交光谷大道金融港站、光谷大道当代国际花园站、光谷一路流芳园南路站等客流同步下降（图5），建议及时优化地面公交配置和线路走向。然而，光谷大道西面的民族大道、关山大道沿线的换乘需求依然旺盛，该区域出行仍依靠“轨道+公交”的模式，建议加强微循环型地面交通供给能力，服务末端3~5 km出行。

利用公共自行车出行模型获取骑行轨迹，雕刻城市慢行空间和POI分布，在主城区形成若干“骑行部

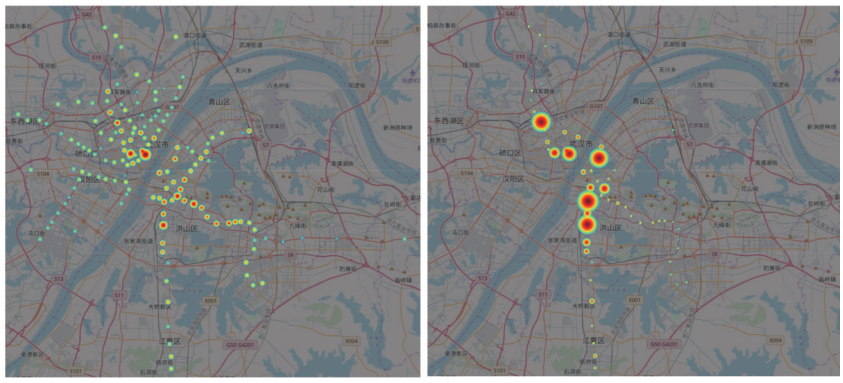


a 开通前　　b 开通后

图5 轨道交通2号线南延线与11号线开通前后地面公交换乘情况对比

落”，支撑城市组团式规划布局。对于轨道交通站点周边的骑行聚集区，建议作为常规公交微循环型线路的重点发展区域。对于识别出的商业、公服类POI，其中48%可由现状轨道交通站点800 m范围覆盖，建议建立健全自行车管理制度，优化次支路网慢行环境，构建“轨道+慢行”的优良出行条件。

2）支撑交通功能与城市空间的耦合评估。利用轨道出行模型评估线网功能规划效力。轨道交通7号线开通后，其武昌段成为南湖片区与中心城区的重要客流走廊，换乘站螃蟹岬和武昌火车站的日均客运量（进出量+换乘量）增幅分别达到52.7%和43.2%，螃蟹岬站已在高峰期出现换乘通道拥挤的情况，建议加大安全事故防范力度。对比以螃蟹岬站为起止节点和换乘节点的出行空间发现（图6），使用其换乘功能的出行范围更集中，联系南湖大型居住组团与汉口主城区的枢纽功能凸显，建议辅助规划贯通两地的干线型地面公交，以缓解轨道客运压力并增强空间联系。



a 起止节点　　b 换乘节点

图6 以螃蟹岬站为起止节点和换乘节点的轨道出行范围

3.3 服务公众，引导安全高效出行

研究展示交通流的潮汐分布、向心聚集和波动扩散等特征，关注实时运行状态，引导公众安全高效出行。根据轨道交通出行模型，线网供需关系呈现一定程度的时空分布不均衡（表1），在断面客流空间分布上，高峰期1号线三阳路—宗关区间、2号线中山公

表1 武汉市轨道交通高峰期客流方向不均衡情况统计

序号	所在线路	断面起止站点	所在区间特征	上行断面流量	下行断面流量	不均衡系数
1	7号线	园博园北—园博园	7号线末端	2 718	662	4.11
2	7号线	瑞安街—武昌火车站	服务枢纽组团	25 577	6 612	3.87
3	11号线	左岭—未来三路	11号线末端	814	245	3.32
4	2号线	佛祖岭—藏龙东街	2号线末端	3 143	985	3.19
5	2号线	常青花园—长港路	服务居住组团	20 885	6 864	3.04
6	2号线	盘龙城—宏图大道	服务就业组团	13 919	5 009	2.78
7	6号线	马鹦路—钟家村	服务就业组团	13 850	4 968	2.73
8	1号线	徐州新村—二七路	服务居住组团	15 791	5 941	2.69
9	3号线	兴业路—二七小路	服务居住组团	19 795	8 471	2.34
10	4号线	铁机路—岳家嘴	服务就业组团	22 466	9 750	2.31

园—街道口区间、4号线东亭—复兴路区间等拥挤明显；在区间客流方向分布上，潮汐特性主要发生在线网末端的向心运行以及功能单一组团的刚性出行，建议面向公众加强实时交通运行状态宣传，提供错峰出行和多方案备选服务。在地面公交方面，分析线路高峰时段载客量与运力之间的负荷发现，局部呈现一定程度的供需错位，建议形成动态监管机制，对高峰期服务强度过高的线路提高发车频率，而对平峰期服务强度过低的线路延长发车间隔。

4　结　语

本文汇集了武汉市轨道交通、地面公交、部分慢行交通的出行和设施相关数据，构建了绿色交通资源池，提供了时空可达性、网络重复性、节点衔接性、出行可靠性等应用，支撑网络功能优化与空间布局协同，实现了以“网络优化、出行变化、服务强化”为驱动的供需关系良性发展。下一步将按照国土空间规划城市体检评估相关要求[12]，实现线网规划有规可循、线网调整有据可依、线网评估有数可用。

参考文献

[1] 卓健,吴卓烨,翟端强,等. 更新背景下减少短距离机动化出行的规划策略:基于上海多源数据的实证研究[J]. 城市规划,2021,45(3):99-108

[2] Schweitzer F, Nanumyan V. A Conceptual Approach to Model Co-evolution of Urban Structures[J]. International Journal of Space Structures,2016,31(1):43-51

[3] 由效铭,张宁,宗传苓,等. 都市圈轨道交通一体化融合发展研究[J]. 城市交通,2022,20(2):66-74

[4] 郭亮,彭雨晴,黄建中,等. 影响绿色出行的短距离通勤空间要素识别与优化:以武汉市为例[J]. 城市规划学刊,2022(3):37-43

[5] 王雅娟,屈信,张尚武. 规划研究视角的特大城市通勤空间紧凑性评价方法:以济南市为例[J]. 城市规划学刊,2018(6):61-68

[6] 茹祥辉,杨志刚,郑猛,等. 超大城市轨道交通与空间协同发展策略:以北京市为例[J]. 城市交通,2022,20(2):21-27

[7] 白同舟,刘雪杰,林旭,等. “十四五”时期城市交通转型发展的若干问题[J]. 城市交通,2022,20(1):11-18

[8] 中华人民共和国中央人民政府. 国家综合立体交通网规划纲要[EB/OL]. (2021-02-24)[2022-07-25]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm

[9] 中华人民共和国中央人民政府. 交通强国建设纲要[EB/OL]. (2019-09-19) [2022-07-25]. http: //www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432. htm

[10] 黄萌. 北京市轨道交通与其他交通方式衔接现状[J]. 地理空间信息,2018,16(2):98-100

[11] 武汉市交通发展战略研究院. 2021年武汉市交通发展年度报告[R]. 2021-08-05

[12] 龚磊,王明省,张鹏程,等. 城市体检评估关键技术研究与应用[J]. 地理空间信息,2022,20(1):10-12

第一作者简介：王冠（1984—），博士，高级工程师，主要从事智慧城市、大数据分析等工作。

本刊声明

为适应我国信息化建设，扩大本刊及作者知识信息交流渠道，本刊数据已被《中国核心期刊（遴选）数据库》《CNKI 中国期刊全文数据库》和《中文科技期刊数据库（全文版）》等收录。在《地理空间信息》发表的论文均默认将其在著作权保护期内的复制权、发行权、汇编权、翻译权以及网络传播权授权给《地理空间信息》编辑部，编辑部可将上述权利转授给第三方使用。作者不再许可他人以任何形式使用该篇论文，但可以在其后续作品中引用（或翻译）该论文中部分内容或将其汇编在作者的非期刊类文集中。如不同意，请事先声明，本刊另作处理。其文章的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付（已在收取发表费时折减和换算为杂志赠阅）。

（本刊编辑部）