

城市建成环境绿色交通系统优化方法研究综述*

Review on Optimization Methods of Green Transportation System in Urban Built Environment

王月涛 田昭源 薛滨夏 李洪晶 马涛 WANG Yuetao, TIAN Zhaoyuan, XUE Binxia, LI Hongjing, MA Tao

摘要 城市绿色交通系统包括轨道交通、公共汽车运输、共享单车和慢行步道等多层次复杂系统,具备实用性、便捷性、经济性、及可持续性等多重特性,对于当前城市建成环境的低碳节能具有十分重要的意义。目前国内外相关领域的学者从多个角度和侧面对绿色交通体系优化进行了研究,形成了针对某些具体问题的分析和优化方法。以供需关系为基本线索,将城市绿色交通系统优化归结为交通承载力、交通需求量、耦合分析、多目标优化4个主要方面,归纳有关的研究与实践取得的成果。从宏观和微观两个视角评价现有研究存在的问题,并指出未来研究发展趋势。最后综合各技术的特点与优势,提出基于供需关系的城市建成环境下绿色交通系统优化框架。

Abstract Urban green transportation system is a multi-level complex system including rail transportation, bus transportation, shared bicycles, and walkways. It has multiple characteristics such as practicality, convenience, economy and sustainability, which is of great significance to the current low-carbon and energy-saving built environment of the city. At present, scholars in related fields at home and abroad have studied the optimization of green transportation systems from multiple perspectives, and formed analysis and optimization methods for some specific problems. Taking the supply and demand relationship as the basic clue, the article attributes the optimization of urban green transportation systems to four main aspects, namely, traffic carrying capacity, traffic demand, coupling analysis, and multi-objective optimization, and summarizes the results achieved by the relevant research and practice. The article evaluates the problems of existing research from both macro and micro perspectives, and points out the development trend of future research. Finally, the article synthesizes the characteristics and advantages of each technique and proposes a framework for optimizing green transportation systems in urban built environment based on supply and demand.

关键词 城市绿色交通系统;城市建成环境;供需匹配;优化方法

Key words urban green transportation system; urban built environment; matching supply and demand; optimization method

文章编号 1673-8985 (2023) 06-0011-07 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20230601

作者简介

王月涛

山东建筑大学建筑城规学院

副教授,博士

田昭源

山东建筑大学建筑城规学院 硕士研究生

薛滨夏(通信作者)

哈尔滨工业大学建筑学院

副教授,博士,binxia68@126.com

李洪晶

山东建筑大学信息与电气工程学院 科员

马涛

哈尔滨工业大学经济与管理学院

教授,博士生导师

0 引言

能源的不合理使用产生了大量二氧化碳,是造成全球气候变暖的重要原因^[1-2]。交通运输领域的碳排放量占据全球工业碳排放总量的14%,且占用全球近20%的能源资源^[3]。特别值得注意的是,其中近一半的排放贡献来自乘用车^[4]。随着交通领域碳排放不断攀升,迫切需要采取有力措施来有效解决这一问题。

城市绿色交通系统为解决交通碳排放、减轻交通压力等问题提供了切实可行的解决方案^[5]。这一综合性城市交通方案旨在降低交通

拥堵和能源消耗,推动环境保护,同时节省建设成本^[6]。绿色交通具备低成本、低能耗和空间效率高等特点,从而确保便利、安全、高效、低污染、以人为本以及多样化的城市交通系统,这是实现城市可持续发展的关键一环^[7-8]。

1994年,Chris Bradshaw首次提出绿色交通等级体系,其优先级从高到低分别为步行、自行车、公共交通、共享汽车,最后是单人驾驶汽车^[9]。绿色交通系统作为一个新概念和实践目标,融入了人居环境的发展趋势,以公共交通为主导,与生态环境和城市发展相互

*基金项目:国家自然科学基金面上项目“水资源与能源约束下主体功能核算及实现机制研究”(编号71974046);哈尔滨工业大学2021年学生未来技术创新团队建设项目“城市能源系统‘双碳’管理与建模学生未来科技创新团队”(编号21650F);山东省自然科学基金面上项目“基于GIS空间分析技术的乡土聚落单元层进式保护研究”(编号ZR2020ME213)资助。

协调。绿色交通概念与可持续发展理念共同涌现,标志着由“以车为中心”向“以人中心”的过渡。建设绿色交通系统有多重益处,包括充分集约利用道路资源以减轻交通堵塞,降低能源消耗以实现节能,减少废气排放以改善空气质量,减少碳排放从而应对温室效应,同时构筑宜居城市环境,提高市民健康水平。与此同时,城市绿色交通的发展也是一项重要措施,有助于节约能源、减少碳排放和PM_{2.5}排放、改善环境质量^{[9]58}。

然而,目前对于如何在不断变化的城市发展背景下,动态优化城市绿色交通系统以适应交通需求变化的问题的认识不够系统和深入。城市化进程迅猛发展,城市人口不断增加,城市建成环境持续演变,这导致城市交通需求的分布不断变动。现有城市绿色交通系统难以充分适应当前不断变化的交通需求格局,致使供需匹配不平衡。为解决这一问题,本文旨在回顾国内外关于城市绿色交通系统优化的实证研究,以整个城市绿色交通系统为研究对象,侧重探讨在建成环境下,如何改善城市绿色交通系统的供需匹配和空间布局问题。

1 城市建成环境与绿色交通系统的关系

1.1 建成环境解析

建成环境涵盖了人类生产和生活活动的多个方面,包括社会、经济、交通及环境等多个维度。建成环境的特征在不同的空间地理位置下呈现出差异,这些特征的变化性质受到地理位置的影响。在地理学领域,这种变化性质被称为空间异质性,用来描述地理现象在空间上的变化和差异^{[10]4}。从统计学的角度来看,这种性质被称为空间非平稳性,指的是由于地理位置的变化导致变量之间关系或结构发生变化^{[10]7}。

对交通领域而言,城市建成环境在很大程度上塑造了城市内功能的分布、人口的聚集程度及发展水平,进而决定了不同地理位置的交通需求情况。建立适宜的城市绿色交通系统,首要前提是准确获取各地交通需求量的空间分布情况。

1.2 城市绿色交通系统解析

城市绿色交通系统是一个包括轨道交通、公共汽车运输、共享单车和慢行步道的多层次复杂系统,具备实用性、便捷性、可持续性 & 经济性等多重特征,涉及政府、用户、企业和其他相关主体^{[9]60}。该系统旨在充分发挥轨道交通、公共汽车、共享单车和慢行步道等交通方式的作用,根据交通类型合理分配出行需求,满足不同人群的交通需求,并有机地连接成一个有序的出行系统^{[9]60}。

现有城市绿色交通系统的布局决定了各地理位置的绿色交通承载能力。为了对城市绿色交通系统进行优化,还需要整合各层次的交通数据,通过软件模拟,分析现有城市绿色交通系统的综合承载能力在空间上的分布情况。

1.3 供需关系分析

城市建成环境与绿色交通系统之间存在着密切关系,它们共同影响着交通承载力的供需关系。具体而言,建成环境塑造了交通需求量在时间和空间上的分布,而城市绿色交通系统则决定了交通承载力在时间和空间上的分布。

供需平衡是城市绿色交通系统设计、评价与优化的重要标准^{[11]88}。交通供给不足便会压抑市民的出行需求,增加居民私家车出行的概率,进而增加碳排放;交通供给过剩则会带来城市资源的极大浪费,增加建设和运营阶段的能耗和碳排放。

供需指数 ε 是评价交通承载力供需平衡的指标,常用于判别交通的供需平衡情况^{[11]90},是交通承载力 C_{\max} 与交通需求量 V_{\max} 的比值,计算公式如下。

$$\varepsilon = C_{\max} / V_{\max} \quad (1)$$

当 $0.8 < \varepsilon < 1.1$ 时,表示交通需求与承载力适度匹配,无需进一步调整。在 $\varepsilon \geq 1.1$ 的情况下,绿色交通系统的最大承载能力显著超出区域的交通需求,因此系统存在一定程度的冗余,需要考虑减少班次、站点和规模。而当 $\varepsilon \leq 0.8$ 时,表明绿色交通系统的最大承载能力远低于该地区的交通需求,因此需要采取措施增加班

次、站点和规模,以满足日益增长的出行需求。

1.4 供需匹配优化

城市绿色交通系统作为一个包含多种交通方式且涉及多个主体的复杂系统,其调整完善需要在优化供需匹配关系的基础上,综合考虑实用性、碳排放、能源消耗、经济性等多种因素,以追求全局最优的解决方案,满足不同主体的需求。

2 基于供需匹配的绿色交通系统优化方法研究进展

基于供需关系对已建成城市绿色交通系统的优化方法包含多个方面,可以按照优化步骤划分为交通需求量计算、交通承载力计算、耦合协调分析和多目标优化等4个方面。其中,交通承载力和交通需求量是评估系统可持续发展能力的基础^[12]。耦合协调分析用于验证系统的供需匹配关系是否合理。多目标优化则需要综合考虑多个因素,以选取最佳的优化方案。

2.1 交通需求量相关研究

宏观研究内容上,随着交通方式的多样化发展,建成环境下的交通需求测量方法正逐步从单一、抽样、静态的方式,转向更为多元、综合和动态的方向^[13]。在此背景下,Wang等^[14]对城市交通流的时空特征与建筑环境的相关性进行研究,提出一种改进的重力模型,用以估算特定范围内的城市交通流量。该重力模型是基于局部引力和引力范围的测量方法。然而,由于此方法的模型构建依赖于假设,与实际交通需求之间存在显著误差。为解决这一问题,可以借助实际交通需求的调查实现有效校准。

微观调查方法上,Belokurov、Evtiukov等^[15-16]将问卷调查、现有道路拥堵调查和网络数据测量相结合的方法应用于道路交通安全研究领域。然而,这些方法需要大量的人力和财力,对大城市而言,需要2 000—5 000名参与者,费用在140—200元之间,因此在综合客运调查方面并不适用^[17]。同时,基于GPS和IC数据的调查方法也存在局限性。虽然GPS数据

可以显著降低交通需求测算的成本,但道路上只有少数车辆(主要是出租车)贡献了大部分乘客数量。通过GPS数据来准确确定乘客数量也是相对困难的^[18]。另一方面,IC数据虽然能够提供更准确的乘客数据,但同样存在不完整的问题,因为乘客只能在已有的线路和站点上选择出行,无法反映线路以外的交通情况。

通过使用人口热图测量交通需求,可以有效避免上述问题。人口热图是一种利用移动通信数据从不同位置获取信息,并将其转化为热图以显示每个位置的人口密度的方法,直观地反映了人口在时空上的分布情况。作为一种新兴的研究来源,人口热图在应用上具有显著优势,包括随机性、时效性和空间性^[19]。其工作原理基于GIS平台上的格网计算器,通过在固定的时间间隔内计算地图上相邻位置之间的人口密度差异,从而记录每个位置的人口密度变化情况。进而,可以将人口密度变化作为衡量每个位置交通需求的指标。

目前,人口热图已逐渐在交通领域得到应用,主要原因是我们能够通过捕捉人口热图的变化,消除对特定交通运输类型的限制,更准确地反映不同地区的人口变化情况,从而使其适用于计算和分析各种交通运输方式的综合承载能力。举例来说,张海林^[20]运用人口热图方法来提取人口活动,并验证了其有效性,结果显示该方法具有测量成本低、数据量大、覆盖面广、时效性强、动态性强等优点。

2.2 绿色交通系统承载力相关研究

在宏观研究对象上,对已建成的交通承载力的计算主要集中在单层交通网络,而综合考虑多种交通方式以衡量混合承载能力的方法仍不够完善。在微观技术上,早期的宏观模型将交通描述为一个统一的流量,并使用流量、速度和密度等指标来定义交通流的特征^[21-22]。Ali、Chowdhury等^[23-24]运用深度神经网络来预测每条道路的交通流量。尽管如此,这些方法无法区分不同层次的交通网络,更不用说进一步将承载能力分解为各种网络的承载能力以进行分析和优化。将城市

绿色交通系统的每一层视为一个拓扑复杂网络,有助于分析和优化其结构。复杂网络分析方法是一种用于分析复杂系统网络拓扑特征的方法,已逐渐应用于交通网络的研究。例如,Dang等^[25]分析了中美航空空流的复杂网络,证明其边权重分布和节点权重分布遵循幂律分布特征。Feng等^[26]以列车和客流为权重对北京轨道交通网络进行建模,证明该网络具有幂律分布和显著的无标度特性。Levinson、Strano等^[27-28]解释了城市网络的增长及其对效率和舒适度的影响。然而,这些研究没有区分不同层次的交通网络,也没有通过研究耦合关系来获得宏观和整体的网络特征。此外,由于缺乏全面的分析方法和准确表达时空交通承载力分布的手段,这些方法无法用于指导具体城市绿色交通系统的优化设计。

为了解决这些问题,多层网络分析方法应运而生^[29-31]。Criador、Aleta、Wu等^[32-34]详细总结了不同领域多层网络的各种模型、动力学和统计属性计算方法。Buldyrev、Ding等^[35-36]研究了铁路、城市街道和公共交通之间的相互作用。这些研究将复杂网络映射为单层加权网络,并考虑了交通网络之间的耦合关系,有助于将各层绿色交通视为统一的整体,为分析城市绿色交通系统的承载力奠定了基础。

2.3 耦合协调分析相关研究

耦合协调分析是分析交通承载力时空布局合理性的有效方法。谢奔一等^[37]运用系统科学理论和剪刀差分析了交通运输与经济之间的耦合关系。韩瑞玲等^[38]应用耦合协调度模型和剪刀差法,分析了石家庄市经济、交通和环境3个系统的相互作用、演化方向和演化速率。陈果等^[39]运用熵权法、耦合度法和耦合协调度模型,分析了交通运输与经济之间的耦合关系和协调发展程度。然而,这些研究主要集中在交通与其他系统之间的耦合关系,忽略了对交通系统内部凝聚力的分析,同时也忽视了交通承载力的叠加效应。

地图叠加法可以灵活地分析相似或不同类型网络之间的耦合作用。McHarg^[40]最早运用叠加了不同层次、颜色和透明度的地图,以评估景观价值并揭示景观元素的相互作用模式,形成“千层饼模型”。保罗·奥利弗随后利用地图的耦合和叠加方法,研究各种自然和文化现象。近年来,荆欣欣等^[41]将地图叠加法运用在社区空间研究上,对社区空间变化进行叠加,进而确定社区重要的可视域群。借助GIS技术的发展,结合地图叠加方法和格网计算器,可以量化地图叠加效果。不同的地图图层可以进行加减乘除操作,从而实现多层复合交通承载能力和需求水平的耦合分析。通过将各地理位置的交通承载力除以对应的交通需求量,可以得到各地理位置的匹配指数,进而将交通承载力供需匹配状况空间可视化,并引导生成多个备选方案。

2.4 多目标优化相关研究

在宏观优化目标选取上,需要根据城市绿色交通系统的组成、特点和影响,综合考虑乘客需求、能源消耗、碳排放和经济等因素。陈皓等^[42]研究指出,影响公交线网优化的主要因素包括乘客数量、乘客分布和线路需求分布。公交线路的优化原则是方便、经济和可持续。当前城市绿色交通系统优化所面临的主要问题包括线网布局不合理、密度低、重复率高和公交盲区。Aleta等^[43-46]认为不同流量层的合作强度对网络耦合关系有影响。中国交通低碳转型发展战略与路径研究课题组^[516]认为,中国各级交通网络高度系统化,但不同类型的交通工具之间需要更有吸引力的联系。程东祥^[47]指出,目前的交通方式对中国的环境和资源构成了巨大威胁,交通行业的碳减排迫在眉睫。总之,在优化城市绿色交通系统时,需要综合考虑实用性、供需匹配性、有效衔接性、可持续性、经济性等多方面的约束条件。以上性质分别可用有效服务人数、连接度、能耗、碳排放和利润等数据来代替。

在微观优化方法的选择上,由于优化方法的局限性,现有研究难以同时超越3个不可或缺的设计优化目标。Lin等^[48]使用遗传算法优化货运碳排放。M. Che Polak等人^[49]和Dennis Dreier等人运用控制变量研究设备、路线、人员等因素对运输碳排放和成本的影响。然而,这些研究的优化目标较少,不适用于多约束条件下的城市绿色交通系统优化。Ahmed^[49]使用加权方法优化交叉口的安全性、机动性和可持续性。Wang等^[50]采用模拟退火算法和蚁群算法优化网络、频率、时间和公交线路。Ma等^[51]利用蚁群和遗传算法综合多个指标规划城市路径。这些方法可以同时优化多个运输系统目标,但它们都基于假设函数进行计算优化,导致优化方案与实际情况存在较大差距。分层序列法可以有效解决这些问题。该方法基于仿真指标逐层选择优化方案,最终结果更接近实际需求。分层序列法由Bracken等人提出,也被称为优先方法,用于解决多目标问题^[52]。多个目标根据优先级划分为不同的级别,总是在前一个目标最优解的集合中寻找下一个目标最优解,直到找到全局最优解^[53]。

3 城市建成环境绿色交通系统优化方法的现状分析

本文在深入分析和解读相关文献的基础上,全面总结了国内外城市绿色交通系统优化方法的研究现状。通过对交通承载力量化、交通需求量量化、耦合协调分析方法和多目标优化方法等关键技术进行详细探讨,揭示了这些方法在学术界的关注点、技术特点、科学价值及实际应用意义。基于上述相关研究工作的分析,总结当前研究存在问题如下。

3.1 宏观问题

(1) 综合性方法不足:尽管已经有一些方法应用于城市绿色交通系统优化,但仍缺乏能够综合解决多层次、多因素复杂性的方法。现有方法往往是针对特定问题或特定层次的,缺乏整体性的综合方法。

(2) 现实情况假设简化:部分现有方法对现实情况进行了过于简化的假设,导致优化方案与实际应用之间存在一定的差距。这可能会限制优化方案的实际效果和可行性。

(3) 未来发展因素考虑不充分:许多研究没有充分考虑未来城市发展的变化因素,如人口增长、技术创新等^[54]。这可能导致优化方案在未来情境下的适用性不足。

3.2 微观问题

(1) 关于交通需求量的量化研究尚未完善,尚未形成公认的理论方法体系。目前,交通需求量主要通过车流量统计、公交刷卡数据、出租车GPS数据等方法进行量化,但这些方法存在数据采集成本高、数据量有限、数据类型单一等问题,无法完整地测量城市地理位置的综合交通需求量。基于人口密度变化量的方法用于计算各地理位置的总交通需求量,能够对上述方法进行补充。

(2) 交通承载力存在多种测量标准和方法,使得承载力的量化不够精确。现有的交通承载力测量方法关注于车流量、速度和密度,但忽略了车辆的实际承载人数。现有的基于轨道频率和承载人数的方法仅适用于单一数据类型,无法综合考虑多种交通方式,也不能准确计算城市绿色交通系统的综合承载力。

(3) 关于耦合协调分析的量化研究,目前主要集中在将交通与经济、人口、建筑密度等非交通要素进行耦合分析。然而,针对交通承载力的供需关系的耦合协调方法尚不够系统,且现有的耦合分析尺度较为宏观,虽能分析整体交通发展状况,但对于各地理位置交通协调度的准确评价较为有限。

(4) 关于多目标优化的方法,目前仍存在局限性,现有的优化目标通常局限于3个以内,无法充分适应城市绿色交通系统的多层次特性,以及涉及多个主体的特点。同时,目前所使用的技术手段较为滞后,较少使用智能和前沿的先进科学方法,因此需要引入其他学科的方法,以增加优化的目标数量和效率。

综上所述,尽管在城市绿色交通系统优化方面取得了一些成绩,但仍需要解决上述问题,进一步完善方法与研究,以推动城市绿色交通系统的可持续发展。

4 新方法建构

本文在对现有相关研究进行归纳、分析与评价的基础上,综合各先进技术特点与优势,建构了基于供需平衡的城市建成环境下绿色交通系统多目标优化框架(见图1)。该框架包括交通需求测算、交通承载力测算、耦合协调分析、多目标优化4个步骤。

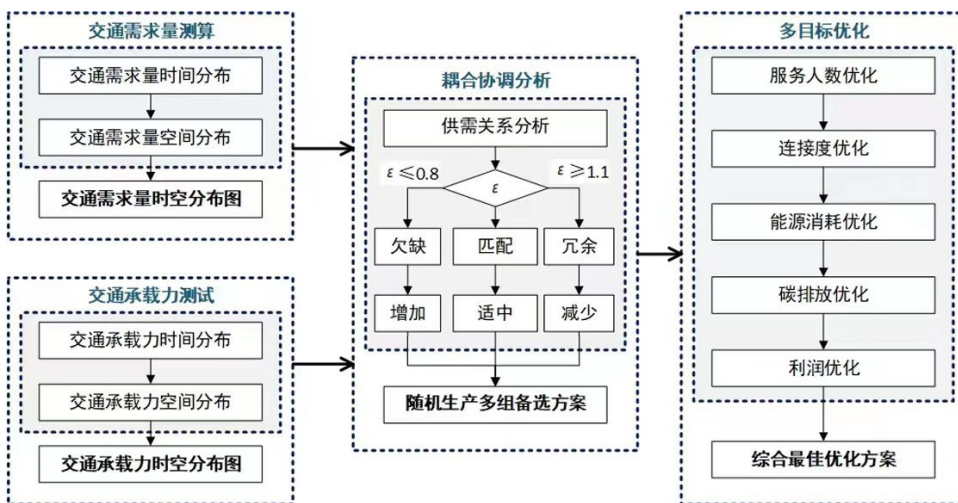


图1 基于供需关系的城市建成环境下绿色交通系统多目标优化研究框架

Fig.1 Research framework of multi-objective optimization of green transportation system in urban built environment based on supply and demand relationship

资料来源:笔者自绘。

4.1 案例概况

本文以深圳市坪山区为例检验了方法的有效性。坪山区位于广东省深圳市东北部,总面积166 km²,常住人口56.65万人。

选取坪山区作为案例研究,是基于以下3方面原因:(1) 深圳市坪山区作为中国一线城市地区,其绿色交通系统的建设对其他城市具有示范作用。城市政府重视该地区的城市绿色交通系统建设,且具有优化的可行性。(2) 该地区快速发展,导致城市绿色交通系统供需关系不断变化,具有较大的优化潜力。(3) 该地区城市绿色交通系统齐全,具有城市绿色交通系统优化的基础。

4.2 方法流程与应用

首先,每隔一段时间记录一次人口热力图,通过GIS中的栅格计算器计算人口密度在不同时段各地理位置的差值,估算各地理位置的交通需求,得到交通需求时空分布图(见图2)。

其次,将路线、班次、载客量等数据导入GIS平台,运用核密度分析方法分别计算各层交通网络的承载能力。在GIS平台中运用栅格计算器,将各层交通的承载能力按照空间位置叠加,计算城市绿色交通系统综合承载力时空

分布图(见图3)。

然后,运用GIS平台栅格计算器,将交通需求时空分布图除以交通承载力时空分布图,得到各地理位置的承载力供需指数,并根据供需关系调整现有城市绿色交通系统的站点分布、班次和线路(见图4)。

最后,研究运用层次序列法,分别对备选优化方案的服务人数、连接度、能源消耗、碳排放量、利润指标进行筛选和优化,生成最佳优化方案。

优化结果表明:坪山区城市绿色交通系统高峰期服务人数从28 865人增加到31 956人,公交车附近共享单车站点数从81个增加到345个,能耗减少2 179 kg,碳排放减少131 kg,利润增加6 875元。

4.3 方法优势

该框架相比现有的优化方法具有以下优势:(1) 利用人口热力图的变化量实时直观地反映各站点的实际交通需求,减少了交通需求调查所需的人力物力成本,提高了调查的准确性。(2) 将城市绿色交通系统视为一个统一的整体,利用核密度分析与栅格计算器,计算了城市绿色交通系统综合承载力

时空分布。(3) 采用栅格计算器耦合分析承载力的供需关系,便于准确识别和量化各地理位置交通承载能力的冗余或缺乏环节。(4) 利用层次序列方法对城市绿色交通系统进行多目标优化,综合考虑服务人数、衔接性、能耗、碳排放、经济性等5个因素,选出全局最优解集,有效增加了城市绿色交通系

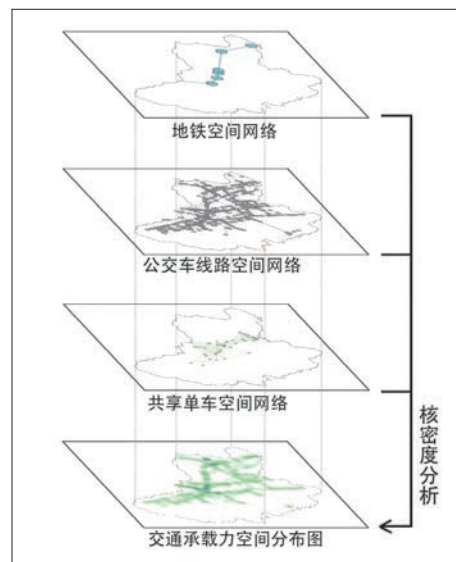


图3 基于核密度分析的交通承载力计算方法
Fig.3 Calculation method of traffic carrying capacity based on kernel density analysis

资料来源:笔者自绘。

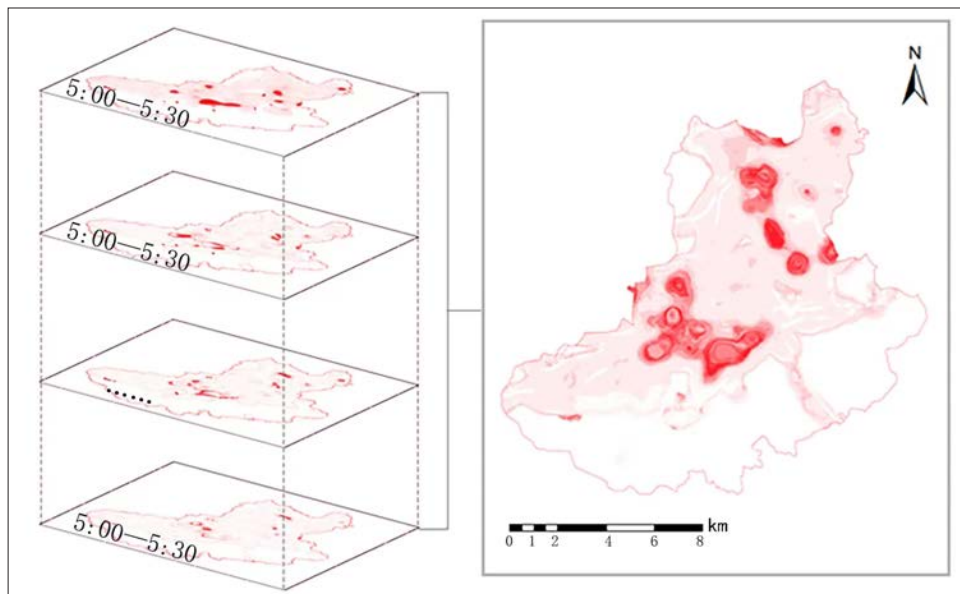


图2 基于人口密度的交通需求量计算方法
Fig.2 Calculation method of traffic demand based on population density

资料来源:笔者自绘。

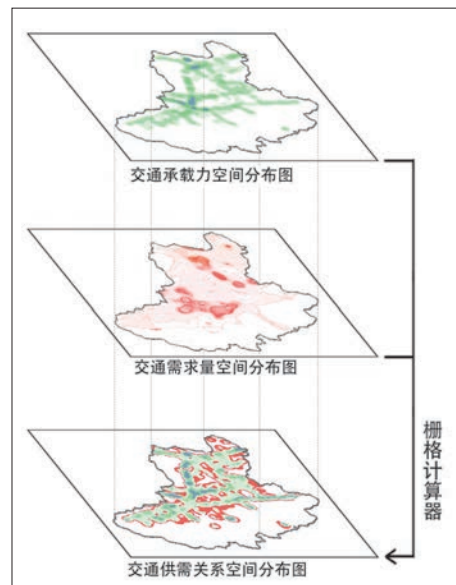


图4 基于栅格计算器的供需耦合分析方法
Fig.4 Coupling analysis method of supply and demand based on grid calculator

资料来源:笔者自绘。

统的目标数量。总之,该框架降低了数据测量成本,增加了分析的准确性与优化目标的数量。

5 总结与展望

本文在分析城市建成环境与绿色交通系统的相互作用关系的基础上,以供求平衡为线索,梳理了现有城市绿色交通系统优化方法的进展、现状与问题,在前人的研究基础上建立了基于供需平衡的城市绿色交通系统的优化方法,并结合实践案例验证了方法的有效性。本文从系统的视角对城市绿色交通系统优化方法进行梳理、分析与优化,有利于决策者科学决策,促进城市道路交通资源的优化配置,加强城市生态环境的保护和建设,有助于城市可持续化和低碳化发展。

根据研究进展和现状分析,并依据城市绿色交通可持续发展的原则,得出未来研究趋势有以下5方面:(1) 拓展交通需求量计算方法:在考虑交通需求量时,需将时空变化纳入考虑,将各地理位置的交通需求量定位到空间中。整合不同交通类型的需求量数据,如轨道交通、车辆交通、慢行交通等,以减少调研成本,提高估算效率与准确性。(2) 完善交通承载力计算方法:将城市绿色交通系统视为整体,考虑其时空变化,提高交通承载力的量化精度。通过将不同交通网络层次的承载能力定位到空间上,结合发车频率变化对交通承载力的影响,计算整体交通承载力。(3) 优化供需关系耦合分析方法:加强交通承载力的供需耦合分析精度,考虑不同时间段和地点的承载力供需关系。选取交通需求量最高的时间段,验证城市绿色交通系统承载力的空间布局合理性。(4) 扩展多目标优化方法:引入其他学科领域的多目标优化方法,扩大优化目标范围,考虑政府、企业、使用者等多方需求,制定满足节能、经济、适用性等要求的优化方案。(5) 构建基于供需平衡的绿色交通系统优化体系:基于理论与应用研究成果,开发基于GIS平台的仿真软件,实时提供交通系统承载力的供需关系,并给出相应的优化建议。

参考文献 References

- [1] VALDES J. Participation, equity and access in global energy security provision: towards a comprehensive perspective[J]. *Energy Research & Social Science*, 2021, 78: 102090.
- [2] NORDHAUS W D. The spirit of green the economics of collisions and contagions in a crowded world[M]. Princeton: Princeton University Press, 2021.
- [3] International Energy Agency. A tale of renewed cities: a policy guide on how to transform cities by improving energy efficiency in urban transport systems[R]. 2013.
- [4] European Environment Agency. Greenhouse gas emissions from transport in Europe[R]. 2019.
- [5] 中国交通低碳转型发展策略与路径研究课题组. 碳达峰碳中和目标下中国交通低碳转型发展策略与路径研究[M]. 北京:人民交通出版社, 2021.
Research Group on Low Carbon Transition Development Strategies and Pathways for China's Transportation. China's transportation low-carbon transformation development strategy and pathway under the target of emission peak and carbon neutrality[M]. Beijing: China's Communications Press, 2021.
- [6] 张陶新. 绿色低碳交通[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
ZHANG Taoxin. Green low-carbon transport[M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2016.
- [7] 曹国华, 夏胜国. 绿色交通规划关键问题研究——以中新生态科技岛为例[J]. *上海城市规划*, 2011 (5): 103-108.
CAO Guohua, XIA Shengguo. Study on the key issues of green transportation planning: the case of Sino-Singapore Eco-Technology Island[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2011(5): 103-108.
- [8] 张润朋, 周春山, 明立波. 紧凑城市与绿色交通体系构建[J]. *规划师*, 2010, 26 (9): 5.
ZHANG Runpeng, ZHOU Chunshan, MING Libo. Compact cities and green transportation system construction[J]. *Planners*, 2010, 26(9): 5.
- [9] 殷广涛, 黎晴. 绿色交通系统规划实践——以中新天津生态城为例[J]. *城市交通*, 2009, 7 (4): 58-65.
YIN Guangtao, LI Qing. Green transportation system planning practice: a case study of Sino-Singapore Tianjin Eco-City[J]. *Urban Transport of China*, 2009, 7(4): 58-65.
- [10] ANSELIN L. What is special about spatial data[R]. 1989.
- [11] 李旭宏, 田锋, 顾政华. 城市道路网供求分析技术[J]. *交通运输工程学报*, 2002 (2): 88-90.
LI Xuhong, TIAN Feng, GU Zhenghua. Analysis technology of supply and demand of urban road network[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2002(2): 88-90.
- [12] 李小静, 王花兰, 范媛媛, 等. 城市道路交通承载力研究综述[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22 (6): 15-25.
LI Xiaojing, WANG Hualan, FAN Yuanyuan, et al. Urban road traffic capacity review[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22(6): 15-25.
- [13] LI D, TANG Y, CHEN Q. Multi-mode traffic demand analysis based on multi-source transportation data[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 65005-65019.
- [14] WANG Shiguang, YU Dexin, MA Xiaogang, et al. Analyzing urban traffic demand distribution and the correlation between traffic flow and the built environment based on detector data and POIs[J]. *European Transport Research Review*, 2018, 10: 50.
- [15] BELOKUROV V, BELOKUROV S V, KORABLEV R, et al. Models of expert assessments and their study in problems of choice and decision-making in management of motor transport processes[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1015(3): 032132.
- [16] EVTIUKOV S, GOLOV E, GINZBURG G. Finite element method for reconstruction of road traffic accidents[J]. *Transportation Research Procedia*, 2018, 36: 157-165.
- [17] BELOKUROV V, SPODAREV R, BELOKUROV S. Determining passenger traffic as important factor in urban public transport system[J]. *Transportation Research Procedia*, 2020, 50: 52-58.
- [18] ZHENG Y, CAPRA L, WOLFSON O, et al. Urban computing: concepts, methodologies, and applications[J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2014, 5(3): 1-55.
- [19] WANG J, ZHANG M. Identifying the service areas and travel demand of the commuter customized bus based on mobile phone signaling data[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021(s): 6934998.
- [20] 张海林. 基于百度热力图的人口活动数量提取与规划应用[J]. *城市交通*, 2021, 19 (3): 103-111.
ZHANG Hailin. Extracting active population data based on Baidu Heat Maps for transportation planning applications[J]. *Urban Transport of China*, 2021, 19(3): 103-111.
- [21] FIEREK S, ZAK J. Planning of an integrated urban transportation system based on macro-simulation and MCDM/A methods[J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012, 54: 567-579.
- [22] MENEGUETTE R I, DE GRANDE R E, LOUREIRO A A F. Intelligent transport system in smart cities: aspects and challenges of vehicular networks and cloud[M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.

- [23] ALI A T, ZHU Y, CHEN Q, et al. Leveraging spatio-temporal patterns for predicting citywide traffic crowd flows using deep hybrid neural networks[C]//International Conference on Parallel and Distributed Systems 2019. Tianjin, China: 125-132.
- [24] CHOWDHURY M A, APON A, DEY K. Data analytics for intelligent transportation systems[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [25] DANG Y, LI W. Comparative analysis on weighted network structure of air passenger flow of China and US[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(3): 156-162.
- [26] FENG J, LI X, MAO B, et al. Weighted complex network analysis of the Beijing subway system: train and passenger flows[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 474: 213-223.
- [27] LEVINSON D, XIE F, ZHU S. The co-evolution of land use and road networks[R]. 2006.
- [28] STRANO E, NICOSIA V, LATORA V, et al. Elementary processes governing the evolution of road networks[J]. Nature Scientific Reports, 2012, 2(1): 296.
- [29] DE REGT R, VON FERBER C, HOLOVATCH Y, et al. Public transportation in Great Britain viewed as a complex network[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2018, 15(2): 722-748.
- [30] 裴玉龙, 张泉, 塔建. 城市多模式公交拓扑网络的构建及特征分析[J]. 交通科技与经济, 2019, 21(5): 1-5.
PEI Yulong, ZHANG Xiao, TA Jian. Construction and feature analysis of urban multi-mode bus topology network[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2019, 21(5): 1-5.
- [31] 裴玉龙, 金群群, 常铮. 城市多模式公交网络拓扑结构与布局均衡性研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 127-138.
PEI Yulong, JIN Yingqun, CHANG Zheng. Equilibrium of topology and layout of urban multimode public transit network[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 127-138.
- [32] CRIADO R, FLORES J, GARCÍA A, et al. A mathematical model for networks with structures in the mesoscale[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2012, 89(3): 291-309.
- [33] ALETA A, MORENO Y. Multilayer networks in a nutshell[J]. Annual Review of Condensed Matter Physics, 2019, 10(1): 45-62.
- [34] WU J, PU C, LI L, et al. Traffic dynamics on multilayer networks[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(1): 58-63.
- [35] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025-1028.
- [36] DING R, UJANG N, HAMID H B, et al. Heuristic urban transportation network design method, a multilayer coevolution approach[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 479: 71-83.
- [37] 谢奔一, 黄永棠. 交通运输与经济系统耦合协调的研究[J]. 铁道运输与经济, 2016, 38(6): 29-34.
XIE Benyi, HUANG Yongshen. Study on coupling and coordination between transportation and economic system[J]. Railway Transport and Economy, 2016, 38(6): 29-34.
- [38] 韩瑞玲, 杨光, 张晓燕, 等. 石家庄市经济—交通—环境系统耦合协调研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(12): 1541-1549.
HAN Ruiling, YANG Guang, ZHANG Xiaoyan, et al. Study on the coupling coordination of economic-transportation-environment system in Shijiazhuang City[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(12): 1541-1549.
- [39] 陈果, 陈志. 湖北省交通基础设施投资与经济发展的时空耦合协调研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(5): 51-57.
CHEN Guo, CHEN Zhi. Spatiotemporal coupling coordination between transportation infrastructure investment and economic development in Hubei Province[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(5): 51-57.
- [40] MCHARG I L. Design with nature[M]. New York: John Wiley, 1995.
- [41] 荆欣欣, 白洁, 郭裕. 基于地图叠加分析的老工业社区空间变化研究——以西安市纺织城四棉社区为例[J]. 当代建筑, 2021(11): 75-80.
JING Xinxin, BAI Jie, GUO Yu. Spatial change of old industrial community based on map overlay analysis: a case study of Simian Community in Xi'an Textile City[J]. Contemporary Architecture, 2021(11): 75-80.
- [42] 陈皓, 王文宪. 交通运输系统优化模型与算法设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
CHEN Hao, WANG Wenxian. Series of fine works on transportation technology optimization models and algorithm design for transportation systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [43] ALETA A, MELONI S, MORENO Y. A multilayer perspective for the analysis of urban transportation systems[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44359.
- [44] GALLOTTI R, BAZZANI A, RAMBALDI S, et al. How transportation hierarchy shapes human mobility[J]. Nature Communications, 2016, 7: 12600.
- [45] MORRIS R G, BARTHELEMY M. Transport on coupled spatial networks[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(12): 128703.
- [46] SOLÉ-RIBALTA A, GÓMEZ S, ARENAS A. Congestion induced by the structure of multiplex networks[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(10): 108701.
- [47] 程东祥. 城市交通低碳发展[M]. 南京: 东南大学出版社, 2021.
CHENG Dongxiang. Urban transportation and low carbon development[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2021.
- [48] LIN C, CHOY K L, HO G T S, et al. A genetic algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(7): 3284-3296.
- [49] AHMED H. Multi-objective optimization of single-lane roundabout geometric design: safety, mobility, and environmental sustainability[R]. 2018.
- [50] WANG C, YE Z, WANG W. A multi-objective optimization and hybrid heuristic approach for urban bus route network design[J]. IEEE Access, 2020, 8: 12154-12167.
- [51] MA Y, HOU W. Path planning method based on hierarchical hybrid algorithm[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, 2010.
- [52] CASTILLO E, MENÉNDEZ J M, SÁNCHEZ-CAMBRONERO S, et al. A hierarchical optimization problem: estimating traffic flow using Gamma random variables in a Bayesian context[J]. Computers & Operations Research, 2014, 41(1): 240-251.
- [53] 陆野, 何秀秀, 吕媛, 等. 基于分层序列法的配电网项目优选研究[J]. 山东电力技术, 2021, 48(11): 1-6.
LU Ye, HE Yongxiu, LYU Yuan, et al. Research on distribution network project optimization based on hierarchical sequence method[J]. Shandong Electric Power Technology, 2021, 48(11): 1-6.
- [54] 闫广聪, 陈冰轮, 韩永启. 城市绿色交通发展历程及趋势分析[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(1): 42-48.
YAN Guangcong, CHEN Binglun, HAN Yongqi. Development history and trend analysis of urban green transportation[J]. Transportation Energy Conservation and Environmental Protection, 2022, 18(1): 42-48.