

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.03.003

数字化多制式轨道交通与社会公平的挑战与重构

侯彬彬^{1,2,3}, 夏海山^{3,4}

- (1. 苏州百年职业学院艺术与创意设计学院, 江苏苏州 215123; 2. 澳门城市大学城市与可持续发展研究院, 澳门 999078; 3. 河北省交通空间数智化设计及虚实映射技术重点实验室, 河北雄安 102500; 4. 北京交通大学建筑与设计学院, 北京 100044)

摘要:为促进多制式交通系统公平性,提升轨道网络覆盖面和惠及群体,从多制式轨道交通与社会公平内涵着手,分析其研究方法、关键问题和影响因素,探讨多制式出行未来研究趋势及优化策略。研究表明,多制式交通公平面临轨道网络空间活动覆盖不均和交通系统群体需求关注不足两大核心问题,城市低密度社区和城郊农村地区轨道站点与线路覆盖密度较低,老年人、残疾人、低收入、低教育水平等弱势群体易面临经济贫困、数字排斥、时空协同困难等出行问题。未来多制式社会公平研究应综合考虑建成环境、交通设施、时间因素、个体属性、经济政策、交通换乘和数字技术等影响因素,进一步推动多制式出行公平性方法创新、模型构建以及影响机制识别与指标量化研究。城市轨道交通作为基础性工程,研究其多制式交通与社会公平,对于构建公平包容的多制式交通系统、促进人口流动、提高就业机会、推动区域经济协调可持续发展具有重要意义。

关键词:多制式轨道交通;社会公平;数字鸿沟;能力可及性;出行便利性

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0019-11

Challenges and Reconfiguration of Social Equity in Digitalized Multimodal Rail Transit

HOU Binbin^{1,2,3}, XIA Haishan^{3,4}

- (1. School of Art and Creative Design, Suzhou Centennial College, Suzhou 215123; 2. Institute of Urban and Sustainable Development, City University of Macau, Macau 999078; 3. Hebei Key Laboratory of Transport Space Design and Digital Technology, Xiong'an 102500; 4. School of Architecture and Design, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To promote equity and expand the spatial and social reach of multimodal rail systems, this paper examines the intersection of multimodal transit and social equity. It analyzes key research approaches, critical challenges, and influencing factors, and proposes future research directions and policy strategies. Findings suggest that two fundamental issues underpin the inequity of multimodal rail systems, namely spatial disparities in network coverage and insufficient attention to the diverse needs of users. Rail station and line densities tend to be lower in low-density urban neighborhoods and peri-urban or rural areas, making access more difficult. Vulnerable groups, including the elderly, people with disabilities, low-income populations, and individuals with lower educational attainment, are particularly affected by economic constraints, digital exclusion, and

收稿日期: 2025-06-17 修回日期: 2025-09-28

第一作者: 侯彬彬, 女, 博士, 讲师, 主要从事数字交通公平与城市空间设计, u23092120209@cityu.edu.mo

通信作者: 夏海山, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事轨道交通与城市空间规划设计, hshxia@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52578054)

引用格式: 侯彬彬, 夏海山. 数字化多制式轨道交通与社会公平的挑战与重构[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(3): 19–29.

Hou Binbin, Xia Haishan. Challenges and reconfiguration of social equity in digitalized multimodal rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 19–29.

time-space coordination challenges in their daily mobility. Future research on social equity in multimodal transit systems should adopt a holistic perspective that integrates built environment characteristics, transport infrastructure provision, temporal factors, individual attributes, economic policies, intermodal connectivity, and digital literacy. Advancing equity in this context requires innovation in methodological frameworks, model development, as well as the identification and quantification of influencing mechanisms. As a capital-intensive foundational infrastructure, urban rail transit plays a critical role in shaping inclusive and equitable transport systems. Addressing social equity in multimodal transit is vital for enhancing population mobility, increasing employment opportunities, and promoting balanced and sustainable regional development.

Keywords: multimodal rail transit; social equity; digital divide; accessibility-as-capability; ease of travel

在城市发展、经济转型背景下,“十四五”要求“加快建设交通强国,完善综合运输立体化,加快城市群和都市圈交通基础设施网络化”,“十五五”将迈向“由外延式增长的增量扩张模式进入内涵式增长的高质量发展阶段”^[1]。经过60多年发展,我国城市轨道交通建设规模已位列世界第一,拥有地铁、轻轨、市域快轨等多制式交通^[2],多制式一体化轨道网络逐渐成为经济发展、资源流动、科创集成的重要支撑^[3]。同时,数字技术进步推动人工智能、大数据等手段与交通系统深度融合,轨道交通正从独立运营、信息共享、互联互通阶段逐步迈向智能联动阶段^[4]。随着按需移动(mobility on demand, MoD)、共享移动(shared mobility, SM)、移动即服务(mobility as a service, MaaS)等新型移动理念的发展,以及交通新质生产力的不断提升^[5],未来多制式网络将进一步实现更快速、更高效、更便捷的综合移动服务。然而,多制式城市轨道交通为不同社会群体提供的交通资源、活动机会、感知体验存在差异,日趋复杂的建成环境、轨道系统、制式选择、智能服务促进了部分城市区域与社会群体发展,也对边缘空间和弱势群体构成挑战,引发公平性讨论。

交通公平对于解决和缓解城市内贫困、失业及其他机会不平等问题的至关重要。交通公平包括横向公平和纵向公平,横向公平(空间公平)指改善区域总体可达性环境以实现空间可达性平等分布;纵向公平(群体公平)指兼顾不同社会群体之间的能力差异,通过合理资源分配解决或减少弱势群体社会差距。在城市轨道交通快速发展的背景下,交通系统不仅是出行载体,更成为影响社会资源分配与机会获取的重要媒介。谢波等从交通资源配置、交通服务质量、交通可达性等角度讨论交通公平指标体系与技术方法^[6]。周青峰等利用基尼系数和核密度估计,实证发现轨道交通在不同区位的发展差异导致社会群体活动机会存在差异^[7]。陈越等应用考虑末端出行的两步移动搜索法,结合洛伦兹曲线和基尼系数,发现北京市六环内轨道交通就业可达性由中心城区向外围沿圈层递减,且低房价站

点存在明显的可达性劣势^[8]。梁金鹏等针对客流的随机性和动态性特点,构建多目标客流控制优化模型,研究如何提高高峰时段客流出行效率和公平性^[9]。孙世超等利用手机信令数据,通过DBSCAN方法和高德地图API构建轨道交通乘客可达性指标,从时空双维度评估交通公平,发现步行是轨道交通的主要接驳方式,轨道站点服务范围内的乘客可达性水平对交通公平具有显著影响^[10]。

然而,已有文献对轨道交通多制式出行公平性关注较少,多从单维度如可达性、费用、时间或客流分配等角度讨论。Brown指出单维度评估公平性并不合理,全面评估需要多维整合^[11];宇海龙等通过考虑不同制式交通方式的功能定位、技术特征、投资运营等因素,提出多层次轨道交通融合发展内涵^[3];李登辉等基于现有单制式轨道交通调度指挥模式,建立区域多制式轨道交通复合系统模式选择指标体系,指出混合调度指挥模式是现阶段的优选模式^[12];王菁菁等通过考虑乘客出行异质性,从乘客有限理性角度出发,引入效用-后悔理论,构建出行成本与出行时间效用最大化和换乘选择、滞留选择及列车选择后悔最小化混合选择模型,为多制式轨道交通客流分配提供了新的研究视角^[13]。上述研究表明:多制式公平性不仅受城市空间内土地利用和交通资源影响,而且与多制式组合出行服务系统相关。因此,多制式交通公平研究应从建成环境、交通系统、时间因素与个体属性等多维资源要素出发,系统分析其交互作用,并关注其对多制式出行能力形成与实现过程的影响。

本文从多制式轨道交通与社会公平融合视角出发,系统梳理多制式交通公平的核心内涵、研究方法与关键问题,进一步构建多制式轨道交通社会公平理论框架与出行便利性评估量表,探讨建成环境、交通设施、时间因素、个体属性、换乘寻路及数字技术等多维因素对多制式出行能力形成与实现过程的影响机制。本文突破了传统单制式轨道交通公平研究视角,强调多制式组合出行、数字化交通转型与能力可及性

的协同作用，为未来多制式轨道交通公平性评估、模型构建与指标量化研究提供理论参考。

1 多制式交通公平内涵及研究方法

1.1 内涵认知

多制式轨道交通是由不同层级、不同功能定位的轨道交通系统协同构成的综合交通体系，主要包括城市轨道交通、市域(郊)铁路、城际铁路等多层级轨道网络^[12](见图1)。其中，城市轨道交通主要服务城市内部高密度出行需求，强调通勤效率与站点覆盖；市域(郊)铁路主要承担中心城区与外围新城、郊区组团之间的快速联系；城际铁路则侧重城市群与都市圈范围

内跨城市交通联系。不同层级轨道交通在服务范围、运行速度、站点间距与客流组织等方面具有差异，通过多层级协同与功能互补，共同支撑城市群与都市圈人口流动、产业联系与区域协同发展。多制式轨道网络通过促进不同制式优势互补、多运营主体协同调度与多中心政策机制协同，推动轨道交通互联互通、智能联动与融合发展，逐步形成区域轨道交通“一张网”体系^[14]。未来，多制式轨道交通将进一步推进基础设施、运营管理、运输服务与政策保障一体化融合，逐步建立“一个平台、一个账户、一票通行”的综合票务系统，打造无缝换乘枢纽，提升跨制式衔接效率与一体化服务水平^[3]。

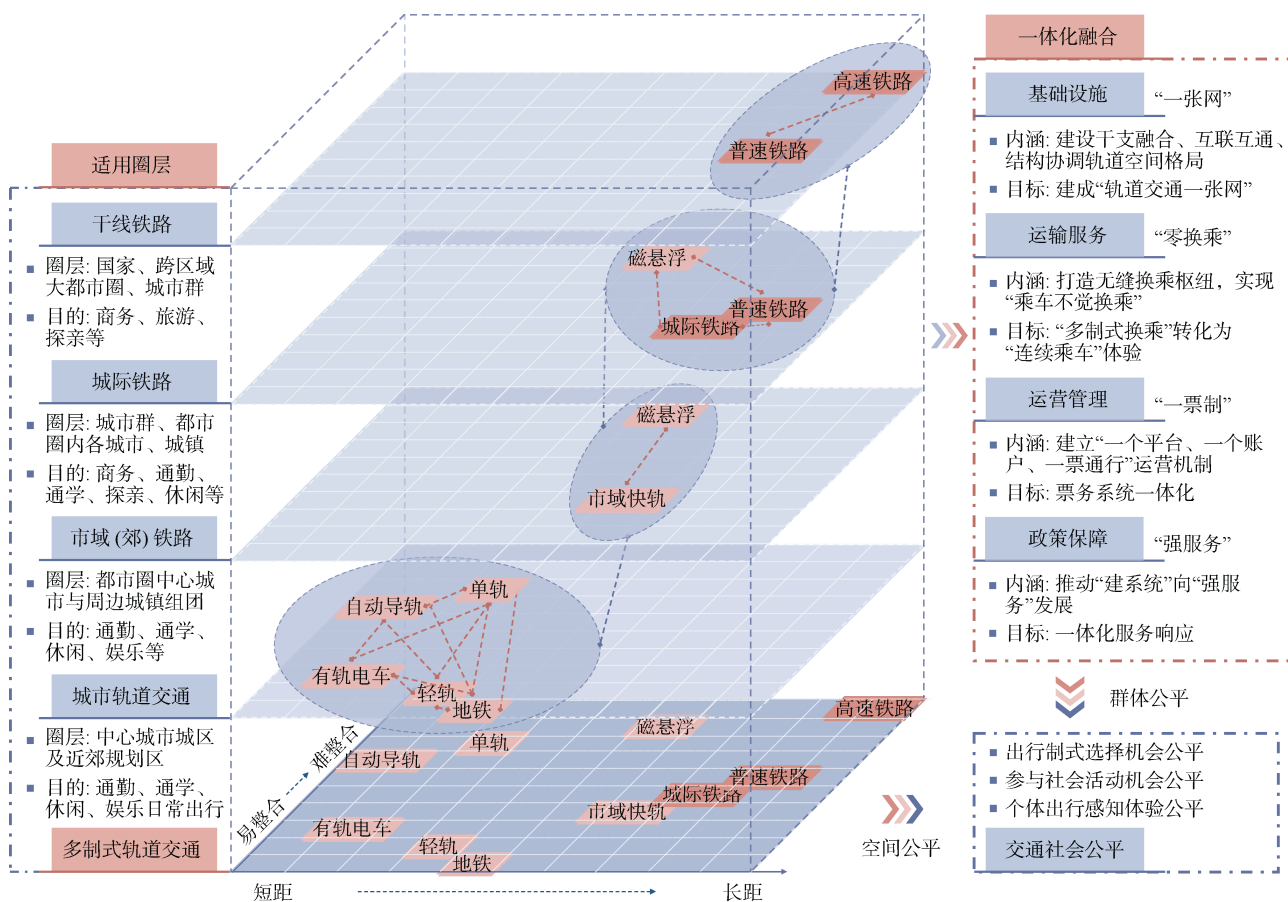


图1 多制式轨道交通社会公平内涵

Figure 1 Conceptual framework of social equity in multimodal rail transit

随着数字科技与智能交通技术的发展，多制式轨道系统一方面通过整合多种制式资源，优化出行条件与服务供给，提升客流移动效率，促进交通公平；另一方面，交通系统数字化转型、空间环境日益复杂化及轨道制式选择多元化，也对弱势群体日常出行构成新的挑战，影响交通公平。

交通公平是指不同社会群体在交通资源分配、使用和机会获取方面的平等性和正义性^[15]。个体由于不可控因素，不能通过合理的交通资源参与正常的社会活动，有可能面临社会排斥现象^[16]。促进社会包容，则是通过消除或改善社会弱势群体参与社会活动的障碍，让其能够积极参与社会活动。Luz 等通过理论辨

析交通公平与社会排斥,发现交通资源不足会导致交通可达性贫困和可及性劣势,形成交通相关社会排斥^[16]。可达性贫困是指个人的可达性水平不足以提供其所需的关键社会活动机会,如医疗、就业、教育和社会支持网络等;可及性劣势是指在需要时难以获得相应社会活动机会。参与社会活动困难可能是交通问题,也可能与个人特征及土地使用模式有关。从流动性视角分析,个体由于获得机会、服务和社会网络的支持减少,不能正常参与其所需的经济、政治和社会活动,则有可能面临交通相关社会排斥(transport-related social exclusion, TRSE)^[17]。

多制式轨道交通系统通过整合多种交通资源,合理利用不同制式优势,有效连接中小城市与核心大城市,构建区域多中心发展格局,对促进人口流动、提高就业机会、推动区域经济可持续发展具有重要作用。一方面,多制式轨道网络对于提升区域内个体活动机会具有重要作用。周青峰等通过对深圳轨道交通不同时期居民活动机会公平性进行测度分析,发现深圳不同区位轨道交通经历了先加剧机会不平等又促进社会公平的动态发展过程^[7]。Shaver等使用基尼系数和基于收入、种族、年龄的可达性比率评估魁北克市-温莎(Québec City-Windsor)走廊沿线7个加拿大城市城际火车站的交通可达性,发现低收入者、少数族裔和老年人面临更显著的可达性不平等^[18]。另一方面,多制式智能交通系统要求个体掌握数字化出行技能。随着数字技术在交通出行领域的发展,数字设备获取不足或数字使用能力较弱的群体,更容易在智能出行过程中处于劣势^[19],并逐渐形成交通数字鸿沟^[20]。Durand等通过研究发现,由于对数字技术不信任、无法拥有智能手机或数字服务设计不合理等原因,老年人、受教育水平低、收入低、有移民背景、生活在农村以及有学习交流障碍等群体更容易受到公共交通数字化负面影响^[21]。Dodel等基于对居住在乌拉圭(Uruguay)首都蒙得维的亚(Montevideo)的成年人代表样本的出行调查与数字不平等研究,发现移动应用程序的使用在2010年之后有所增加,且更有利于受教育程度较高和更容易获得数字技术的群体,形成了流动性分层,加剧交通不平等现象^[22]。因此,多制式城市轨道网络分布不均和智能出行系统数字化能力差异,可能进一步加剧弱势群体的交通社会排斥,影响多制式出行的公平性。综合已有研究发现,多制式与数字化的影响机制既存在并行关系,也存在交叉效应。区

域间数字系统建设差异显著影响不同层级轨道的衔接与运营,制约多制式网络整体效能;个体数字技能差异则影响其多制式出行服务的选择与实现。未来轨道网络空间分布不均与数字化技能差异并行交织,可能进一步叠加放大交通不平等效应,制约轨道交通社会公平与可持续发展。

1.2 研究方法

城市群、都市圈经济社会可持续发展要求建设公平、高效、稳定的多制式轨道网络^[23]。已有研究从理论综述角度讨论多制式轨道交通发展方向^[24],通过国外经验分析多制式轨道交通融合发展问题^[25],并利用数据分析研究多制式轨道交通网络模型、交通韧性、客流分配、出行选择、活动参与与机会可达性等相关问题^[26]。总体来看,现有研究主要聚焦于轨道交通系统运行效率、网络组织与运输服务优化,对多制式轨道交通与社会公平之间的关联机制研究不足。因此,本文从交通公平视角出发,探讨多制式轨道交通系统对居民出行能力、活动参与及交通福祉的影响机制。

交通社会公平方面,根据罗尔斯平等主义理论(Rawls' Egalitarianism),交通系统应保障交通资源机会平等且有利于社会中处境最不利的成员^[27]。Sen在罗尔斯平等理论基础上提出能力方法(capability approach, CA),认为人所能获得的自由和机会是个人能力与政治、社会和经济环境综合作用的结果^[27],是评估交通相关社会公平最公平的方法^[28]。相较于平等主义理论,CA为研究多制式社会公平提供了更全面的视角。然而量化个人能力并非易事,出行福祉多方面影响无法用可达性概念完全描述^[29]。现有轨道交通公平性研究主要通过多源数据,如建成环境、交通智能卡、社会经济等大数据研究出行可达性相关问题。然而,使用物理空间的客观可达性量化交通公平受到质疑,大多数根据空间数据计算的可达性没有考虑影响个体到达目的地难易程度的个人因素。Vecchio等通过理论辨析提出个人能力可及性(accessibility as a human capability),认为能力可及性(accessibility-as-capability)是个人自有移动资源、可获得的公共移动资源和活动机会耦合转换的结果,对个体能够参与的社会活动和交通幸福感具有重要影响^[30]。Azmoodeh等基于CA理论提出能力作为可达性(capability-as-accessibility)理论框架,并在此基础上使用结构方程模型(structural equation model, SEM)实证分析个人特征、生活环境以及交通

和流动性选择对居民能力的影响^[28]。研究结果表明出行能力是个人特征与环境(土地和交通)相互作用的结果,并在此基础上开发了能力指数(capability index, CI)模型以量化个体在空间内自由移动并参与所需社会活动的机会^[31]。尽管能力方法是表达社会公平复杂概念最合适的方法,能够解释个人的广泛多样性及其在交通和土地等资源作用下获得教育、就业和健康等社会关键机会的程度^[16]。但是,量化能力可及性需要综合建成环境、交通系统、个人属性等多维数据,除了能力指数(CI)模型^[31],现有基于CA理论研究多以定性方法讨论个体出行能力^[32]。

多制式轨道系统通过基础设施、运营管理、运输服务、运输保障协同一体化提供多种制式组合出行服务,其交通公平受土地、交通、政策、管理以及个体属性等多维因素影响。在能力方法理论基础上,结合多制式轨道交通特征,本文进一步拓展形成多制式轨道交通社会公平分析框架。个体能力可及性可以分解为资源集(resources)、转换因素(conversion factors)、能力集(capabilities)、功能集(functionings)和福祉(well-being)^[16],如图2所示。

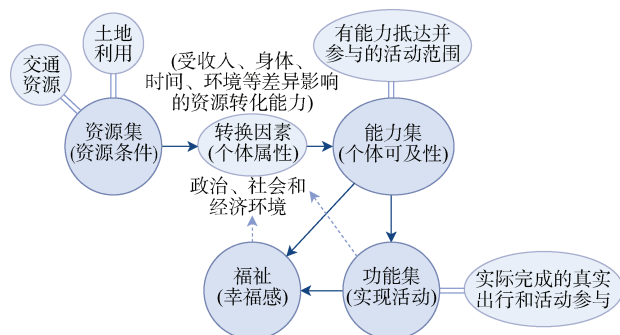


图2 能力可及性

Figure 2 Accessibility as capability

多制式轨道系统中的交通资源和土地利用特征共同构成客观空间资源集;个体通过自身属性与转换因素,将交通资源转化为个人所具备的可及能力集,即个体有能力抵达并参与的活动范围;个体在此基础上实际完成的真实出行行为和实际活动参与情况组成功能集;最终个体实际完成的功能集和拥有的能力集共同决定了个人福祉(幸福感)。多制式交通系统资源集包括交通网络物理空间资源和智能移动平台虚拟服务资源;转换因素包括个人属性(如收入、身体、时间、态度等)、政治、社会及经济环境背景;能力集指个体使用多制式系统能够到达和参与的社会活动(如通勤、

休闲、访友等)集合;功能集指个体通过多种制式组合能够实际完成的出行行为和参与的社会活动集合;交通福祉由能力集和功能集共同决定。多制式轨道交通能力可及性是指交通系统经由转换机制作用,个体实现出行能力、活动参与与交通福祉的综合能力水平;多制式交通公平性是指不同群体通过多种制式组合实现出行与活动参与的公平程度。

2 多制式交通公平基本问题及影响因素

2.1 基本问题

多制式轨道交通与社会公平主要有两大基本问题:轨道网络空间活动覆盖不均与交通系统群体需求关注不足。其中,提高出行选择与出行质量是探讨多制式空间公平的主要方面;提升居民出行动机与出行技能是讨论多制式群体公平的主要方面。

2.1.1 多制式轨道网络空间活动覆盖不均

尽管多制式整合为交通出行提供了更多选择,增强了轨道出行能力与区域发展潜力,但是其交通网络服务选择自由度和活动参与覆盖面仍存在空间差异。首先,多制式轨道交通布局与功能发展定位需进一步探究讨论,部分线路在区域网络中承担的功能不合理或缺乏后续发展潜力,线路制式选择与实际出行需求存在异质性。其次,多制式枢纽节点与城市融合发展模式仍需探索优化,部分新建站点距离城市中心较远,站城融合程度较低,换乘不便,制式衔接不足。再次,现有多制式轨道网络多以通勤、商务等出行目的构建,对通学、休闲、购物、医疗等日常社会活动关注较少。最后,政策规划与管理调度机制协调统筹不足,京津冀、长三角、粤港澳、成渝等政策融合度高、轨道覆盖面广、协同机制完善区域,能够获得更好的发展机遇与人口经济收益。因此,多制式轨道交通网络需提升基础设施“一张网”建设科学性,优化轨道前后一公里交通接驳,提升区域政策规划与运营管理协同能力,在提供通勤供给基础上关注多元活动需求,推进“零换乘”枢纽建设,构建结构协调、活动均衡的多制式交通服务网络。

2.1.2 多制式交通系统群体需求关注不足

随着数字技术进步和MaaS理念发展,多制式交通出行系统逐步迈向多元一体融合发展阶段。然而,由于个体属性与出行技能差异,社会弱势群体在多制式交通系统中面临新的挑战。首先,人口经济属性方面,老年人、儿童、低收入、低教育水平及身体残障

等弱势群体由于自身客观出行能力与主观感知等原因，在多制式系统中易面临出行困境。其次，居住活动区域方面，生活在靠近交通枢纽和经济中心的群体享有更好的多制式出行条件，而远离城市中心区和枢纽站点的居民则多制式选择不足。同时，在低密度社区和城市郊区等公共交通服务盲区，票价敏感性高和换乘不便问题更为突出，弱势群体更易陷入交通劣势。再次，社会活动方面，家庭照料者、多工作者和自由职业者活动出行时空需求相较单通勤客流更复杂，为满足乘客多元出行需求，多制式系统在运营时段、发车频次、换乘效率及枢纽服务等方面仍有优化空间。最后，数字技能与出行体验方面，数字弱势和能力弱势群体对多制式出行易产生消极态度，不同制式之间信息共享不足和换乘重复安检对出行体验和效率产生影响。因此，老年人、低收入和低教育水平等群体，在应对交通系统数字化转型、换乘空间寻路以及多种制式组合协调方面处于劣势。多制式轨道交通应综合考虑弱势群体出行需求，建设轨道票务系统和需求响应一体化平台，“一票制”优化出行服务，推进轨道交通“强服务”发展目标，协同发挥多制式优势，构建高效、便捷、普惠的城市轨道交通服务体系。

2.2 影响因素

结合既有交通公平研究，多制式轨道交通与社会公平影响因素(见表 1)主要包括建成环境、交通设施、时间因素、人口属性、出行感知以及经济与社会文化因素。同时，随着空间环境与交通系统日趋复杂，换乘寻路与数字技术使用逐渐成为关键因素，对多制式组合出行的实现与体验产生重要影响。

表 1 多制式轨道交通与社会公平主要影响因素
Table 1 Main factors influencing social equity in multimodal rail transit

类别	影响因素	内涵说明
建成环境	用地复合	多功能、混合用地影响轨道站点吸引力与多样化出行需求响应能力
	区域辐射	城市空间资源影响轨道站点选址与线路分布
	环境保障	事故率、治安水平、基础设施耐久性等影响乘客使用意愿和服务可持续性
交通设施	高效通达	多制式间的物理衔接与运行连通性影响出行效率和换乘便捷性
	换乘便捷	跨制式无缝衔接、换乘便利、路径设计影响整体网络协同性
	服务可及	不同社会群体轨道服务可及性影响多制式系统惠及面

续表

类别	影响因素	内涵说明
时间因素	服务时间	轨道服务时间影响乘客出行选择与服务可用性
	换乘时间	制式换乘时间影响出行效率与行程总时间
	个人时间	个人有效时间影响出行制式选择与行程规划
人口属性	区域分异	人口与经济集中区域享有更多交通资源配置易引发空间分异
	人口演替	老龄化、少子化及国际流动趋势影响出行需求结构与制式布局逻辑
	数字鸿沟	数字技能差异影响多制式数字出行系统使用选择
出行感知	能力差异	年龄、身体、经验、受教育程度、经济水平等自身属性影响个体出行能力
	安全感知	儿童、老年人等对寻路指引和空间安全需求影响出行环境设计和交通移动管理
	系统包容	多制式设计应考虑低收入、低教育、低数字能力，以及多活动、多行李和携带婴童等群体
经济政策	枢纽区位	区域在城市网络中的战略地位影响轨道建设优先级和资源供给配置
	产交融合	多制式轨道系统向产业集聚区倾斜，促进产业链高效运转和空间集约
	政策导向	区域规划发展战略、财政补贴、制度设计等影响多制式融合建设
社会文化	跨域通勤	异地工作、周末通勤、远程办公等新型职住模式影响出行频率和时空结构
	绿色低碳	节能减排、绿色环保、低碳出行等可持续文化影响交通出行选择
	舆情引导	社交媒体、在线社群、智能大数据推荐等影响乘客出行偏好和路线选择
换乘寻路	空间布局	优化换乘空间布局、提升出行动线设计，提高多制式换乘感知与效率
	视觉导向	结合动态地图、实时信息共享等手段，提供可视化、交互化换乘指引支持
	认知理解	兼顾老年人、儿童、低认知群体需求，设计易识别、易理解、高适配寻路系统
数字技术	数字信息	多源设备获取分析轨道空间人流、环境等数据，提升动态管理与应急响应
	智能系统	交通 App、出行服务等数字化集成平台，优化出行信息共享反馈
	数字包容	兼顾弱势群体智能设备使用、App 操作、隐私信任等方面的能力劣势，缓解交通数字鸿沟

2.2.1 城市建成环境与交通基础设施

多制式轨道交通公平性与城市建成环境和交通基础设施建设密切相关。一是城市建成环境为多制式轨道系统发展提供基础支撑。多功能混合用地模式影响轨道站点吸引力与多样化出行需求响应能力；城市空间资源分布格局影响轨道站点选址与布局结构；区域交通安全水平、治安状况及基础设施质量等影响乘客使用意愿与轨道服务系统可持续发展。二是交通基础设施资源对多制式轨道系统设计具有重要影响。不同

轨道制式之间的物理衔接条件与运行连通性影响乘客出行效率与换乘便捷程度；跨制式之间的无缝衔接能力与路径优化水平影响整体网络系统协同性；轨道交通服务可达性差异影响不同社会群体多制式系统受益程度。同时，轨道服务时间覆盖范围影响乘客出行选择与服务可用性，多制式换乘等待时间影响行程效率与出行总时间。因此，多制式轨道公平性受到土地利用混合程度、区域服务辐射范围、交通环境保障水平、轨道系统连通程度、网络系统协同效率、出行服务可达性与惠及面综合影响。

2.2.2 人口社会活动与政策经济文化

多制式轨道交通公平性与社会人口经济属性、个体活动感知、区域经济政策以及社会文化环境显著相关。一是个体社会经济属性，如年龄、性别、收入、身体、家庭以及可支配时间等客观属性影响多制式出行选择动机和程度；出行活动感知，如安全、自信、包容等主观体验和完成所需社会活动(如通勤、旅游、休闲等)便捷程度影响多制式出行满意度和交通幸福感。二是区域经济政策，如规划发展战略、城市网络定位、产城空间布局等影响轨道制式选择与资源供给配置；社会文化环境，如跨区域通勤、低碳出行、社交媒体引导等影响多制式出行偏好与路径选择。因此，多制式交通公平性受区域发展、人口属性、能力感知、系统包容、政策区位、职住模式、低碳文化以及大数据推荐引导等因素综合影响。未来多制式系统设计应综合考虑多元客流群体需求，提升多制式出行方式选择、活动参与体验和组合出行满意度。

2.2.3 制式换乘寻路与数字信息技术

在站城融合发展与交通出行数字化背景下，多制式交通公平与乘客跨制式换乘寻路能力和数字出行技术水平密切相关。一是制式换乘寻路设计，如空间布局、视觉导向、认知理解等因素影响客流枢纽换乘效率与出行体验。二是数字信息技术系统，如多维数字信息整合、智能系统集成、数字智能设备使用等因素影响个体多制式出行信心与能力。因此，提升多制式轨道交通换乘空间寻路环境和智能出行系统平台设计，提升个体多种制式组合换乘能力，是实现多制式轨道交通社会公平的重要方面。

3 多制式交通公平未来研究方向

3.1 理论框架与研究路径

城市轨道交通建设在促进居民日常流动，满足人

们正常社会活动需求方面发挥着重要作用。轨道交通网络带动城市与区域内人口、物流、经济、知识、科技与创新等资源快速流动，并逐渐产生经济社会影响。同时，轨道出行服务通过为个体提供完成所需社会活动的机会，提升其融入社会的能力，促进社会包容。Luz 等通过理论辨析，揭示个人能力可及性与 TRSE 多维因素的关联机制，分析交通资源对个体出行和获得所需生活机会的影响^[16]。本研究在此基础上，引入出行便利性(Ease of Travel, EoT)概念(个体出行便利程度)和 EoT 评估模型^[29]，综合 TRSE、个人能力可及性和 EoT 理论，构建多制式轨道交通出行公平性分析框架，如图 3 所示。

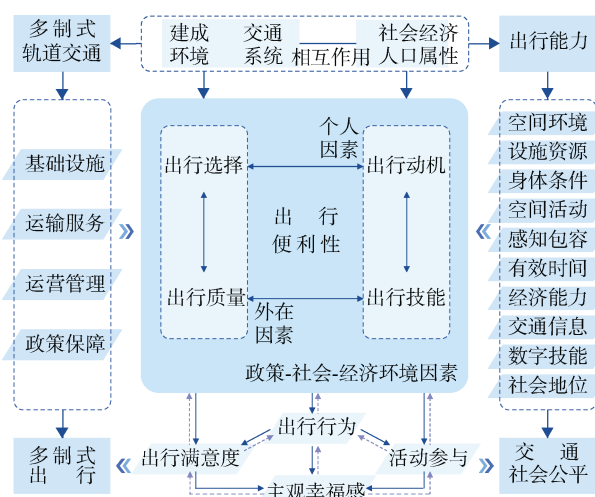


图3 多制式轨道交通与社会公平理论框架
Figure 3 Framework of equity in multimodal rail transit

多制式轨道交通建成环境、交通系统和社会经济属性共同构建了个体出行能力。多制式出行既受基础设施、运输服务、运营管理和政策保障等外部条件影响，也受个人身体条件、经济能力、感知包容及数字技能等内在因素制约。随着交通系统数字化转型，一方面轨道制式运营发展依赖数字基础设施；另一方面个人完成多制式组合出行需要具备相应数字使用能力，包括路线查询、线上购票、刷码检票以及实名认证等。数字不平等主要有3个评估维度，包括动机态度、材料获取和数字技术^[20-22]。若个体使用数字化动机不足、获取数字设备困难或不能使用数字技术，均可能在多制式出行中遭遇交通排斥与数字鸿沟。

然而，不同轨道制式对数字系统的依赖程度并不相同，数字鸿沟的影响呈现差异化特征。从轨道出行供给角度，干线铁路、城际铁路和市域(郊)铁路高度

依赖跨区域协同运营与数字化购票、实名验证等环节，对乘客的出行动机、智能设备和数字技能有更高要求，数字弱势群体更易陷入交通劣势；地铁、轻轨、有轨电车等城市轨道制式在区域内连通性较好，且通常保留人工售票与线下服务，可随到随乘，相较铁路等轨道制式对数字弱势群体影响较小。同时，在跨制式衔接过程中，由于票务系统、出行信息平台与数据接口尚未完全兼容，数字弱势群体在多制式出行时可能面临额外的理解与操作负担，从而放大并叠加数字鸿沟效应。因此，多制式出行中的数字鸿沟既源于不同制式数字化依赖差异，又在跨制式衔接过程中被进一步放大与强化，呈现“差异生成—衔接放大”的复合作用特征。

在特定政策、社会与经济环境因素共同作用下，轨道交通系统与出行能力相关要素通过影响个体多制式出行动机、出行技能、出行选择与出行质量，进一步作用于出行行为、活动参与和出行满意度，并最终影响交通出行主观幸福感。同时，本文借鉴 De Vos 的 EoT 量表^[29]，构建多制式 EoT 评估量表(见表 2)。该量表从个体出行能力与感知体验出发，补充多制式轨道交通与社会公平研究的微观分析方法与评估策略，为提升轨道系统服务居民日常出行提供理论依据与实践支撑。

表 2 多制式出行便利性评估

Table 2 EoT measurement for multimodal rail transit

维度	描述
出行动机	多制式组合出行会增加时间成本； 多制式组合出行的主要效用是到达目的地； 多制式组合出行受到青睐
出行技能	多制式组合出行时具备较强的信心； 能够识别并完成不同轨道制式之间的换乘路径； 多制式组合出行时需要较高的认知与体力投入
出行选择	具备多种轨道制式组合出行的选择条件； 能够随时选择多制式组合出行； 能够灵活组合多种轨道制式到达目的地
出行质量	能够选择个人偏好的轨道制式完成日常活动； 多制式组合出行的实际时间成本高于预期； 多制式组合出行的实际经济成本高于预期

城市群和都市圈跨区域通勤是构建多制式轨道网络的重要情境。城际铁路、市域快轨与地铁等各层级轨道相互贯通，连接各城市、城镇及中心城区，为居民跨区域获取就业机会与社会资源提供出行条件。为了提升多制式轨道交通在服务居民日常活动中的出行

效能，结合都市圈通勤可达性视角，讨论多制式出行公平性研究方法体系创新、模型构建及影响机制识别与指标量化。

3.2 方法体系创新与模型构建

多制式交通社会公平研究方法创新与计算模型构建，可以融合多源数据，在传统关注横向公平基础上，兼顾纵向公平，逐步开发契合都市圈通勤特征的评估方法与量化模型。

首先，从宏观层面综合运用多源大数据和小数据，系统探讨都市圈多制式轨道交通网络结构、服务层级、系统效能等对促进交通社会公平的影响，量化其对提升居民出行选择与出行质量方面的作用；从微观层面应分析多制式轨道建设对个体出行能力、感知体验及活动参与的影响，量化其与居民出行动机和出行技能的耦合关系。通过宏微观结合，评估都市圈轨道通勤便利性，探讨轨道网络对居民出行行为、活动参与、出行满意度以及主观幸福感的影响。其次，随着 MaaS 系统发展，通过数字化智能出行平台，一方面乘客将能更便捷地整合多制式出行路径；另一方面 MaaS 多元服务集成平台可以进一步优化都市圈不同轨道制式在物理空间与虚拟系统换乘衔接关系，提高换乘枢纽站点多元服务供给(如购物、休闲、医疗、网购取货、冷柜取菜等生活服务)，增强居民在轨道通勤过程中完成其他相关社会活动的的能力。最后，传统基于时间、费用、距离等客观指标的公平性评估方法在都市圈轨道通勤中具有局限性。交通信息查询、制式换乘体验、全域系统可靠性以及个体其他活动需求对多制式通勤公平性具有显著影响。

未来都市圈轨道交通公平性研究应在深入分析多种制式组合出行客观环境特征基础上，融入个体主观感知与差异化需求。从活动出行视角^[33]，结合多制式轨道交通社会公平理论框架(见图 3)，推动轨道交通公平性理论与方法创新，构建契合都市圈多制式通勤公平性的评估方法与计算模型。

3.3 影响机制识别与指标量化

多制式轨道交通社会公平影响机制识别与指标量化，可以融合 EoT 理论框架与 EoT 评估量表，结合建成环境、交通设施、时间因素、个体属性、换乘寻路及数字技术等主要影响因素(见表 1)，细化都市圈通勤公平性要素关联分析，构建多维度、多层次指标体系。

首先，城市空间环境(如土地多样性、空间资源分

布、吸引力、环境污染、事故率等)和交通基础设施(如公共交通服务、道路网络覆盖、系统整合程度、资源可用性、步行与骑行友好等)为都市圈多制式轨道网络发展创造了基础条件。然而,不同区域空间基础存在显著差异,未来应进一步关注轨道网络在都市圈空间分布的公平性,提升轨道通勤服务均衡性。其次,轨道系统的服务层级、关键枢纽节点、换乘路径选择以及时间可靠性等因素,对居民移动效率与出行体验具有重要影响。在都市圈跨区域通勤情境下,未来应进一步细化多制式轨道网络拓扑结构分析、网络效能影响因素识别、网络连通性评估等指标量化,提升系统整体运行协同性与服务效能。再次,多制式轨道交通为不同社会群体日常活动出行提供基础条件,个体完成强制性出行(如通勤、通学、返家)与选择性出行(如购物、健身、聚会)对其交通社会包容感知具有重要影响^[34]。未来应量化都市圈轨道资源在时空维度为不同社会群体提供的出行条件和活动参与机会,开发基于活动出行的多制式公平性评估指标体系。如,关注对于低收入、低教育水平群体而言,数字化出行工具的使用门槛、票价负担以及跨制式换乘的不确定性,对其获得潜在就业机会和通勤可达性的影响。最后,深化识别不同群体在都市圈通勤中的实际需求及影响机制。多制式轨道系统对个体在复杂空间环境中调度与整合虚实移动资源能力提出了更高要求。

未来都市圈轨道公平性研究可以结合交通相关社会排斥和能力可及性理论,推进多制式 EoT 研究与测度,量化都市圈通勤选择机会、有效出行时间、个体感知体验、数字使用能力、轨道系统稳定性以及枢纽站点前后一公里交通接驳,优化都市圈多制式通勤全过程出行链结构与实证分析路径。

4 结论

多制式轨道交通社会公平研究对优化空间资源配置、保障人民群众公共出行权益、构建未来交通可持续发展体系具有重要意义。

本研究聚焦多制式轨道交通建设对社会公平的影响,针对多制式网络空间活动覆盖不均与交通系统群体需求关注不足两大核心问题,系统分析多制式轨道交通公平性的关键影响因素及其作用机制。研究通过综合交通相关社会排斥(TRSE)、能力可及性(accessibility-as-capability)、出行便利性(EoT)理论与模型,构建多制式轨道交通社会公平理论框架与多制式 EoT 评估量

表。在此基础上,探讨推动多制式公平性研究的理论模型构建路径与影响机制量化方法。相较于既有研究,本文创新性主要体现在以下 3 个方面。

1) 突破单一制式交通公平研究范式,构建多制式轨道交通社会公平分析体系。现有研究多侧重单一轨道制式,难以刻画多种制式协同条件下交通公平的系统性特征。本文从多制式轨道交通整体出发,将地铁、轻轨、市域铁路与城际铁路等不同制式纳入统一分析框架,围绕基础设施、运输服务、运营管理与政策保障 4 个维度,系统揭示多制式协同对居民出行机会与社会参与能力的影响,推动轨道交通公平研究由单一制式分析向系统综合分析拓展。

2) 超越传统可达性公平研究范式,提出能力可及性交通公平研究视角,构建“TRSE—能力可及性—EoT”整合理论框架。传统研究以时间、距离、费用等客观可达性指标为主,难以刻画个体差异性与能力局限性。本文引入能力方法(CA),整合交通相关社会排斥(TRSE)、能力可及性与出行便利性(EoT)理论,构建“交通资源供给—能力转化—出行行为—活动参与—交通福祉”分析框架,系统揭示多制式交通系统影响个体活动参与机会与交通社会福祉的作用机制。该框架在刻画能力转化过程的基础上,引入 EoT 补充主观感知与体验维度,有效弥补了能力难以量化的问题,推动交通公平研究由“资源—结果导向”向“能力—过程导向”的转变。

3) 拓展交通公平量化研究路径,提出多制式出行便利性评估方法与量化工具。现有研究多依赖单一客观指标衡量交通公平,难以反映个体差异与主观体验。本文引入出行便利性(EoT)概念,构建涵盖出行动机、出行技能、出行选择与出行质量 4 个维度的多制式出行便利性评估模块,并据此设计多制式 EoT 评估量表。该方法从个体出行能力与感知体验出发,将传统客观可达性测度拓展至主观评价与能力表达层面,为多制式轨道交通公平性的微观实证研究与指标量化提供了可操作的分析工具与方法路径。

因此,本文从多制式轨道交通系统视角出发,整合能力导向的交通公平理论与出行便利性评估方法,构建了贯通交通系统结构、个体出行能力与社会参与机会的综合研究框架,从理论整合与方法拓展两个层面丰富了多制式轨道交通社会公平研究体系。

多制式轨道交通系统建设对落实国家、区域与城市各级综合交通体系发展战略,深化共享出行、自动

驾驶、城市空中交通等交通新质生产力与轨道交通合作互补,构建智能化、立体化、共享化、人性化的区域轨道出行网络具有重要意义。尽管文章结合 TRSE、能力可及性、EoT 等理论,从出行行为、活动参与、出行满意度等方面较为全面地探讨了多制式交通与社会公平,但是研究主要聚焦轨道出行机会可达性维度,对交通安全、环境可持续等公平维度讨论较少。同时,未对轨道系统区域发展规划、交通出行政策以及产业经济效益等政策与经济影响展开讨论。未来应从更高维度、更广角度、更高协同视域,深化多制式轨道交通与社会公平理论探讨与实证分析,持续提升轨道交通系统包容性,增强人民群众轨道出行安全感、获得感与幸福感。

参考文献

- [1] 陈小鸿, 陈科, 王进勇, 等. “十五五”综合交通可持续发展新挑战: 中国城市交通发展论坛第38次研讨会[J]. 城市交通, 2025, 23(1): 107-123.
Chen Xiaohong, Chen Ke, Wang Jinyong, et al. New challenges of comprehensive transportation sustainable development in the fifteenth Five-Year Plan: debrief of the 38th urban transportation development forum in China[J]. Urban transport of China, 2025, 23(1): 107-123.
- [2] 韩宝明, 金天凤, 方恒堃, 等. 中国城市轨道交通系统多制式发展综述[J]. 都市轨道交通, 2018, 31(1): 45-50.
Han Baoming, Jin Tianfeng, Fang Hengkun, et al. Review of the multi-standard development of urban rail transit in China[J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(1): 45-50.
- [3] 宇海龙, 郭春江. 我国多层次轨道交通融合发展实施路径研究[J]. 铁道经济研究, 2025(1): 18-25.
Yu Hailong, Guo Chunjiang. Implementation approach of integrated development of multi-level railway transportation system in China[J]. Railway economics research, 2025(1): 18-25.
- [4] 彭其渊, 罗洁, 文雯, 等. 区域多制式轨道交通运输组织协同模式研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(4): 1-10.
Peng Qiyuan, Luo Jie, Wen Wen, et al. Study on regional multi-standard rail transportation organization coordination modes[J]. Journal of transportation engineering and information, 2020, 18(4): 1-10.
- [5] 侯彬彬, 夏海山. 未来公共交通数字化出行影响因素及研究趋势[J]. 西部人居环境学刊, 2025, 40(3): 1-8.
Hou Binbin, Xia Haishan. Influencing factors and research trends of digital travel in future public transportation[J]. Journal of human settlements in West China, 2025, 40(3): 1-8.
- [6] 谢波, 李晗. 城市交通公平性的识别方法[J]. 科技导报, 2024, 42(3): 97-106.
Xie Bo, Li Han. Research on the identification method of urban transportation equity[J]. Science & technology review, 2024, 42(3): 97-106.
- [7] 周青峰, 王耀武, 戴冬晖. 深圳轨道交通发展对居民活动机会影响分析[J]. 现代城市研究, 2021(4): 18-22.
Zhou Qingfeng, Wang Yaowu, Dai Donghui. An analysis of the impact of rail transit development on residents' activity opportunity in Shenzhen[J]. Modern urban research, 2021(4): 18-22.
- [8] 陈越, 许奇, 贾顺平, 等. 考虑末端出行的城市轨道交通就业可达性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59(2): 310-318.
Chen Yue, Xu Qi, Jia Shunping, et al. Job accessibility of urban rail transit considering access and egress travel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2025, 59(2): 310-318.
- [9] 梁金鹏, 赵莲芳, 李利鸣, 等. 兼顾效率与公平的城市轨道交通客流控制优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 102-112.
Liang Jinpeng, Zhao Lianfang, Li Liming, et al. Urban rail transit passenger flow control considering efficiency and fairness[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2024, 24(6): 102-112.
- [10] 孙世超, 郑勇, 成璐菊, 等. 基于站点接驳可达性计算的轨道交通乘客公平性研究[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(3): 1-10.
Sun Shichao, Zheng Yong, Cheng Luju, et al. Rail transit passenger fairness based on accessibility calculation of station connection[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(3): 1-10.
- [11] Brown A. From aspiration to operation: ensuring equity in transportation[J]. Transport reviews, 2022, 42(4): 409-414.
- [12] 李登辉, 彭其渊, 文超. 区域多制式轨道交通复合系统调度指挥模式研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(11): 97-103.
Li Denghui, Peng Qiyuan, Wen Chao. A study on traffic control schemes of regional multi-mode rail transit system[J]. Railway transport and economy, 2020, 42(11): 97-103.
- [13] 王菁菁, 彭其渊. 考虑有限理性的多制式轨道交通客流分配研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(12): 216-226.
Wang Jingjing, Peng Qiyuan. Passenger flow assignment of

- multi-system rail transit considering bounded rationality[J]. *Railway transport and economy*, 2024, 46(12): 216-226.
- [14] 刘榕彬, 孟令云. 面向城市群和都市圈的区域多制式轨道交通系统调度指挥模式研究[J]. *铁道运输与经济*, 2023, 45(2): 33-38.
- Liu Rongbin, Meng Lingyun. Research on dispatching command mode of regional multi-mode rail transit system in city clusters and metropolitan areas[J]. *Railway transport and economy*, 2023, 45(2): 33-38.
- [15] Chan H Y, Xu Yingying, Chen A, et al. Choice and equity: a critical analysis of multi-modal public transport services[J]. *Transport policy*, 2023, 140: 114-127.
- [16] Luz G, Portugal L. Understanding transport-related social exclusion through the lens of capabilities approach[J]. *Transport reviews*, 2022, 42(4): 503-525.
- [17] Kenyon S, Lyons G, Rafferty J. Transport and social exclusion: investigating the possibility of promoting inclusion through virtual mobility[J]. *Journal of transport geography*, 2002, 10(3): 207-219.
- [18] Shaver H, Kim J, Diab E, et al. Bridging the gap: a social equity analysis of intra-city transit access to inter-city rail in Canada[J]. *Cities*, 2025, 163: 106041.
- [19] Durand A, Zijlstra T, van Oort N, et al. Access denied? Digital inequality in transport services[J]. *Transport reviews*, 2022, 42(1): 32-57.
- [20] Groth S. Multimodal divide: Reproduction of transport poverty in smart mobility trends[J]. *Transportation research part A: policy and practice*, 2019, 125: 56-71.
- [21] Durand A, Zijlstra T, Hamersma M, et al. "Who can I ask for help?": Mechanisms behind digital inequality in public transport[J]. *Cities*, 2023, 137: 104335.
- [22] Dodel M, Hernandez D. Smarter but more unequal transport? How socioeconomic and digital inequalities hinder adoption of mobility apps in the Global South[J]. *Travel behaviour and society*, 2025, 38: 100911.
- [23] 朱金津, 夏海山, 刘晓彤, 等. 互联互通 2.0: 基于多层级网络效率的轨道交通与城市空间协同模式研究[J]. *都市轨道交通*, 2025, 38(1): 20-29.
- Zhu Jinjin, Xia Haishan, Liu Xiaotong, et al. Interconnection 2.0: research on synergy mode of rail transit and urban space based on multi-level network efficiency[J]. *Urban rapid rail transit*, 2025, 38(1): 20-29.
- [24] 赵小文. 我国中低运量城市轨道交通发展的几点思考[J]. *城市轨道交通研究*, 2019, 22(10): 1-5.
- Zhao Xiaowen. Research on the development of medium and low traffic volume rail transit in China[J]. *Urban mass transit*, 2019, 22(10): 1-5.
- [25] 郭春江, 宇海龙. 我国多层次轨道交通融合发展问题及国外经验借鉴[J]. *铁道经济研究*, 2024(6): 8-15.
- Guo Chunjiang, Yu Hailong. Integrated development of multi-level railway transportation in China and reference from foreign experiences[J]. *Railway economics research*, 2024(6): 8-15.
- [26] 吴京, 刘露, 李骏. 一种面向多制式路径规划的网络模型[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(5): 81-85.
- Wu Jing, Liu Lu, Li Jun. A network model for multimodal route planning[J]. *Journal of national university of defense technology*, 2009, 31(5): 81-85.
- [27] Pereira R H M, Schwanen T, Banister D. Distributive justice and equity in transportation[J]. *Transport reviews*, 2017, 37(2): 170-191.
- [28] Azmoodeh M, Haghighi F, Motieyan H. The capability approach and social equity in transport: Understanding factors affecting capabilities of urban residents, using structural equation modeling[J]. *Transport policy*, 2023, 142: 137-151.
- [29] De Vos J. The ease of travel: a person-based measure of people's ability to travel[J]. *Transportation research part A: policy and practice*, 2024, 187: 104174.
- [30] Vecchio G, Martens K. Accessibility and the Capabilities Approach: a review of the literature and proposal for conceptual advancements[J]. *Transport reviews*, 2021, 41(6): 833-854.
- [31] Azmoodeh M, Haghighi F, Motieyan H. Capability index: applying a fuzzy-based decision-making method to evaluate social inclusion in urban areas using the capability approach[J]. *Social indicators research*, 2023, 165(1): 77-105.
- [32] Xu Yingying, Chan H Y, Chen A, et al. Aged and wheeled mobility in transit-oriented development: The capabilities approach[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2024, 127: 104058.
- [33] Fu Xiao, Zhang Yi, de Dios Ortúzar J, et al. Activity-travel pattern inference based on multi-source big data[J]. *Transport reviews*, 2025, 45(1): 26-48.
- [34] Naqavi F, Sundberg M, Västberg O B, et al. Mobility constraints and accessibility to work: Application to Stockholm[J]. *Transportation research part A: policy and practice*, 2023, 175: 103790.

(编辑: 傅依萱)