

# 客流均衡视角的TOD走廊识别、分类及布局模式\*

——以上海为例

Investigating the Identification, Classification, and Layout Patterns of TOD Corridors from the Perspective of Passenger Flow Equilibrium: A Case Study of Shanghai

刘冰 王志玮 王舸洋 朱俊宇 曹娟娟 徐雷

LIU Bing, WANG Zhiwei, WANG Geyang, ZHU Junyu, CAO Juanjuan, XU Lei

**关键词** TOD走廊; 客流均衡; 纵断均衡指数; 双向均衡指数; 走廊TOD模式; 上海

**Keyword:** TOD corridor; passenger flow equilibrium; profile equilibrium index; directional equilibrium index; spatial pattern of corridor-TOD; Shanghai

中图分类号 TU984 文献标志码 A  
DOI 10.16361/j.upf.202501014  
文章编号 1000-3363(2025)01-0102-09

## 作者简介

刘冰, 同济大学建筑与城市规划学院, 自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室, 上海市城市更新及其空间优化技术重点实验室, 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室(同济大学), 教授、博士生导师, liubing1239@tongji.edu.cn

王志玮, 同济大学建筑与城市规划学院博士研究生, 苏州规划设计研究院股份有限公司城市交通规划研究院规划总监、高级规划师

王舸洋, 上海同济城市规划设计研究院有限公司工程师, 通信作者, wgy\_8d183f@126.com

朱俊宇, 上海市城乡建设和交通发展研究院工程师

曹娟娟, 上海同济城市规划设计研究院有限公司副主任规划师、高级工程师

徐雷, 同济大学建筑与城市规划学院博士研究生, 上海同济城市规划设计研究院有限公司城市空间与交通规划设计所副总工程师、高级工程师

**提 要** TOD走廊的公交客流均衡水平直接影响其运营和服务绩效, 走廊各站点之间的联系从中起着决定作用。利用上海轨道交通OD数据, 采用社区发现算法识别站间关联紧密的站点社区, 依此界定各TOD走廊区间范围, 并划分为放射、纵横和弯绕等三类; 构建纵断均衡指数、双向均衡指数, 发现TOD走廊的两指标水平均存在显著差异, 可基于二维分类形成“双重均衡、方向均衡、断面均衡、双重不均衡”四类, 其中“双重均衡”走廊呈多心、混合用地特征, “双重不均衡”走廊呈外围连串居住用地布局; 从客流均衡视角提出以TOD走廊为单元的“5D原则”。这一走廊划分和客流均衡评价方法, 可为走廊层级TOD空间优化与站点协同提供整合性技术框架。

**Abstract:** The equilibrium of passenger flow between stations within Transit-Oriented Development (TOD) corridors is pivotal to their operational performance, and the connection between various stations in the corridor assumes a decisive role. With Origin-Destination data of rail transit of Shanghai City, community detection algorithm is applied to identify closely connected station communities, then delineating the spatial range of each TOD corridor. The corridors are divided into radial, orthogonal, and curved types. Profile Equilibrium Index and Directional Equilibrium Index are constructed to measure the equilibrium levels of passenger load distribution, which reveal significant differences among corridors. A two-dimensional categorization of TOD corridors is conducted, forming four types as dual-equilibrium, directional-equilibrium, profile-equilibrium, and dual-disequilibrium. It is found that dual-equilibrium corridors are characterized by polycentric and mixed land use, while dual-disequilibrium ones are characterized by a string of suburban residential areas. *5D principles* for TOD corridor as a spatial unit are proposed from the perspective of passenger flow equilibrium. With the method of corridor division and its passenger flow equilibrium evaluation, an integrated technical framework for Corridor-TOD with spatial optimization and Station-TOD synergies can be provided.

\* 项目资助: 国家自然科学基金面上项目: 基于客流均衡视角的轨道TOD走廊空间模式及其优化策略研究——以上海大都市区为例(项目批准号52178052); 上海同济城市规划设计研究院有限公司2024年教育部产学研合作协同育人项目: 基于数字化技术的公共交通规划编制项目案例(项目编号231100155192902); 上海市2022年度决策咨询研究新城规划建设专项课题: 高质量背景下上海新城绿色低碳交通建设与城市空间融合发展策略研究(编号2022-Z-W07-A)

## 1 研究背景

### 1.1 TOD理念兴起及实践开展

1993年,卡尔索普<sup>[1]</sup>在“新城市主义”理论上提出了实行“紧凑开发以支持公共交通”的TOD概念,它顺应了北美的“精明增长”运动,促进了对欧亚地区铁路沿线开发经验的再审视,也推动了大量结合公交系统建设的TOD实践。可以说TOD成为近30年以来规划界普遍关注的热点问题。由于TOD倡导步行友好、功能混合、住房多样化、公共中心塑造等原则,与抑制城市蔓延、改善空气质量、促进社会交往等多方面的可持续发展目标一致,各地陆续推出了城市、区域乃至国家层面的TOD政策。如美国丹佛<sup>[2]</sup>与奥斯汀<sup>[3]</sup>、印度德里<sup>[4]</sup>等城市的TOD手册或条例,美国马里兰州中部<sup>[5]</sup>、加州旧金山湾区<sup>[6]</sup>等地区的TOD战略及指南,马来西亚<sup>[7]</sup>的全国性TOD政策,某些国际机构如交通和发展政策研究所<sup>[8]</sup>、世界银行<sup>[9]</sup>也提供TOD相关的项目援助。

TOD理念在2000年前后被引入我国<sup>[10]</sup>。初期关注到TOD用地形态对于促进公交发展、解决机动化交通问题的作用<sup>[11]</sup>，“加快建立以公共交通为导向的城市发展模式”被明确纳入“‘公交都市’建设示范工程”<sup>[12]</sup>要求。随着轨道开通里程不断增加，“轨道+物业”模式反哺轨道建设和运营的TOD策略得到重视，国家发展和改革委员会于2016年召开了“城市轨道交通投融资机制创新研讨会”<sup>[13]</sup>，轨道交通溢价回收的研究<sup>[14-18]</sup>有所增加。地方层面的TOD实践方兴未艾，北京、天津、深圳、成都、杭州、南京、东莞、佛山、苏州等多个城市编制了TOD发展战略或专项规划。据不完全统计，目前已开通轨道交通的50多个城市中，有一半以上城市研究制定了轨道交通场站综合开发相关政策<sup>[19]</sup>，鼓励TOD方案的制定与实施。

### 1.2 走廊TOD发展日益受到重视

卡尔索普作为关注区域增长的新城市主义领袖人物，他强调TOD在本质上是一种“新城市主义的区域发展模式”，要“在区域的层面上整合公共交通与土地使用模式的关系，以形成更为紧凑的

区域空间形态”<sup>[21]</sup>。区域TOD模式是由干支线路多个邻里尺度的站点TOD开发协同实现的<sup>[1]</sup>，而这种整体有序的网状走廊结构要求依托公交线网来协调城市结构<sup>[22]</sup>。受“3D原则”的影响<sup>[23]</sup>，早期TOD研究和实践聚焦在邻里尺度，强调站区建成环境改善对公交出行的促进<sup>[24-25]</sup>。然而，单一站点的TOD开发存在相互割裂的“孤岛”问题<sup>[26]</sup>。为了捕获TOD的整体网络效应，研究重点开始转向宏观尺度<sup>[27]</sup>，强调沿线站点TOD相互协同的走廊TOD(Corridor TOD,简称CTOD)规划日益受到重视，由此使TOD从邻里尺度的社区规划工具提升为区域尺度的城市重塑战略<sup>[28]</sup>。

美国早期发布的《站区规划：如何做TOD场所》手册将“混合功能走廊”作为TOD站区类型之一<sup>[29]</sup>；后来在《公交走廊和TOD：连接节点》报告中，不仅区分了站点、走廊、区域等3个空间层次，还将走廊TOD细分为目的地型、通勤型、地区循环型等3种<sup>[30]</sup>。我国《城市轨道交通沿线地区规划设计导则》也提出了城市、线路、站点等3个层面的TOD规划引导<sup>[31]</sup>，之后在住房和城乡建设部“TOD平台”建立了三级评价标准与指标体系。目前，TOD已被理解作为一种涉及多尺度的空间布局模式，强调将微观的邻里布局与宏大的公交战略结合起来，通过用地和交通整合规划来实现公交客运效率的最大化<sup>[32]</sup>。其中，走廊TOD处于城市和站点的中间层级，对协同站点TOD以形成不同规模、功能和形式的TOD等级网络具有重要作用<sup>[30]</sup>。

### 1.3 走廊TOD研究相对滞后

尽管人们认识到要通过走廊TOD获得更大的网络效应<sup>[33]</sup>，但面向走廊层级的TOD规划方法尚不成熟。在由“3D”到“5D”原则的TOD理论扩展中，仅“目的地可达性(destination accessibility)”体现了宏观尺度的城市结构和网络条件对公交发展的显著影响<sup>[24,34]</sup>，这一指标关注站点到活动中心等吸引点的便捷性，未形成指导走廊TOD空间规划的多维原则。Bertolini<sup>[35]</sup>提出了评价车站节点和场所价值匹配性的N-P模型，可用于走廊和区域的多站点分析，但仍属于以站点为单元的节点性方法。虽然近来有学者

将“D原则”、N-P模型结合起来进行TOD分类<sup>[36-37]</sup>，但未能突破站点单元的局限，仍难以揭示走廊TOD的整体开发特征及其与公交客流之间的关系。因此，将公交走廊作为TOD研究的单元十分必要<sup>[38-39]</sup>，这不仅能为沿线用地提供改善公交的规划机会，也能为评价站间TOD协同水平提供基础。有学者<sup>[33]</sup>总结认为，公交运营绩效优化是走廊TOD研究的主要方面之一。

当前，走廊TOD的研究缺陷可归结为3个方面。一是公交走廊的空间范围界定依据不一致，有的直接选定某条公交线路<sup>[40]</sup>，有的以走廊带上最高客流断面为起点分别向两端取3—5 km长度的区间<sup>[41]</sup>，有的根据出行域采用55—65 min行程、15—20英里(24—32 km)长的范围<sup>[28]</sup>，有的则根据社区发现算法<sup>[42]</sup>，降低了这些研究之间的可比性。二是对公交线路客流分布及其运营状况关注不足，大量研究支持通过站点周边高强度开发来促进公交出行，仅少数学者认识到高密度地区大断面客流的不良后果，如发现台北市的站区开发强度超过一定限度会影响公交运营及公共设施服务水平<sup>[43]</sup>。三是对走廊TOD的用地-交通关系测度不足，也缺乏针对走廊建成环境和公交客流特征的量化表征指标。目前，从客流均衡角度讨论TOD走廊布局的文献开始增加，如对波哥大的研究<sup>[44]</sup>发现沿线职住混合有利于平缓客运高峰，使断面客流更均衡，国内学者<sup>[45-46]</sup>也关注到轨道交通的钟摆现象和客流负载平衡问题，但对走廊TOD规划理论与方法的探讨十分有限。

本文旨在构建客流均衡视角的走廊层级TOD规划技术框架，从走廊的区间范围界定入手，通过测度不同走廊的客流均衡水平及其空间布局模式，为促进TOD走廊的站间开发协同和改善公交运行绩效提供有效支撑。

## 2 基于紧密关联区间的TOD走廊识别

### 2.1 TOD走廊识别方法

TOD走廊是一个内部联系较为紧密的线路区间，承担了沿线主要的公交出行活动。本文借鉴“出行域(travel

shed) ”概念<sup>[33]</sup>，根据公交走廊服务地区的乘客出行空间分布来界定TOD走廊的具体范围。利用上海市轨道交通站点之间的OD数据，采用“社区发现 (community detection) ”方法识别联系较为紧密的轨道站点社区，作为TOD走廊的划分依据。使用2022年7月某工作日全天轨道站间OD数据，先将各换乘站客流分配至具体线路的站点上 (如1号线人民广场站、2号线人民广场站)，再根据客流量建立加权无向图  $G = (V, E)$ ，其中顶点集  $V$  为对应具体线路的地铁站点，边集  $E$  为两站点间的客流联系，边  $e (v_1, v_2)$  权重为顶点  $v_1, v_2$  所对应两站点间的客流总量<sup>①</sup>。

具体选用基于模块度的“鲁汶社区发现算法” (Louvain community detection algorithms)<sup>②</sup>，将网络中的节点划分为“组内联系更密切、组间联系较稀疏”的组，以此计算得到网络中的TOD“走廊社区”。鉴于鲁汶算法识别的社区内部联系量接近，会出现高客流线路被划分为多个社区、低客流线路却未被分解的情况，故采用“总分—细分”两步方式：初设模块度为2，先将大客流线路划分为内部客流量接近的若干“较大社区”；再对各个“较大社区”单独进行社区发现，得到较小的细分社区，对于某个社区的站点夹杂在另一社区的不连续情况，将被夹杂的站点作为这些社区的重叠范围来处理，由此得到若干连续的TOD走廊<sup>③</sup>。

## 2.2 TOD走廊识别结果

依照上述方法，在上海市域共获得41条TOD走廊 (包括3条分支走廊)，多数地铁线被划分为2—3条TOD走廊 (图1)。按照走廊的形态，总体上可分为放射、纵横和弯绕等3类。其中，22条放射走廊平均长度约25.0 km，平均断面数14个；13条纵横走廊、6条弯绕走廊多位于中心城区及周边，二者均有12个断面且平均长度接近，分别为16.1 km和15.8 km，约是放射走廊的2/3，主要与它们的站距较小相关。

放射走廊以连接中心城至新城、郊

区乡镇、浦东机场等外围地区为主；纵横走廊主要构成了贯穿中心区尤其是浦西地区的密集轨道网；弯绕走廊则主要位于环线和方向转折线路的特定区间上，以浦西、浦东之间的联系为主。由于中心城区的轨道联系具有多点换乘、线路交织的网络化特点，纵横、弯绕走廊与其他走廊存在较多的交叠，即一个区间或站点可能对应多条TOD走廊，而非完全一对一的关系。这恰好表明了前述识别的一些“走廊社区”的局部穿插现象。见表1。

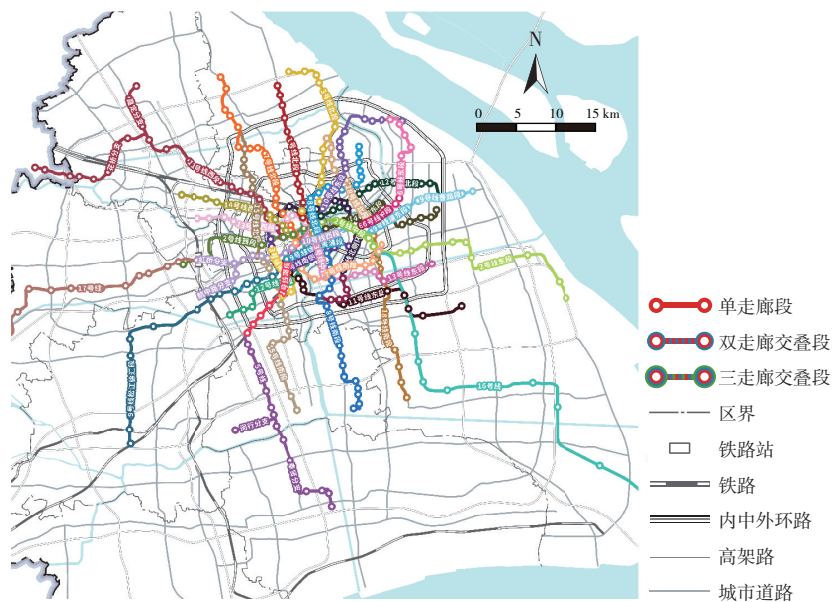


图1 上海市域TOD走廊划分结果  
Fig.1 TOD corridors in Shanghai

表1 TOD走廊识别及其形态分类

Tab.1 Identification and typological classification of TOD corridors

走廊形态		构成
放射走廊	北向	1号线北段 (富锦路—人民广场)、3号线北段 (江杨北路—上海火车站)、7号线北段 (美兰湖—静安寺)、10号线东段 (基隆路—豫园)、15号线北段 (顾村公园—红宝石路)
	南向	5号线闵行分支 (闵行开发区—莘庄)、5号线奉贤分支 (奉贤新城—莘庄)、8号线南段 (汇臻路—大世界)、15号线南段 (紫竹高新区—姚虹路)、16号线 (滴水湖—龙阳路)、18号线南段 (航头—杨高中路)
	西向	9号线松江徐汇段 (松江南站—宜山路)、11号线西段花桥分支 (花桥—江苏路)、11号线西段嘉定分支 (嘉定北—江苏路)、17号线 (东方绿舟—虹桥2号航站楼)
	东向	2号线东段 (浦东国际机场—上海科技馆)、6号线东段 (港城路—北洋泾路)、9号线浦东段 (民雷路—小南门)、9号线曹路段 (曹路—台儿庄路)、11号线东段 (迪士尼—交通大学)、13号线东段 (张江路—陈春路)
纵横走廊	横向	2号线西段 (徐泾东—人民广场)、2号线中段 (龙阳路—南京东路)、9号线徐汇黄浦段 (星中路—陆家浜路)、10号线西段航中路分支 (航中路—老西门)、10号线西段虹桥分支 (虹桥火车站—老西门)、12号线东段 (金海路—天潼路)、13号线西段 (金运路—自然博物馆)、14号线西段 (封浜—大世界)、14号线东段 (桂桥路—豫园)
	纵向	1号线南段 (莘庄—大会址·黄陂南路)、8号线北段 (市光路—人民广场)、12号线西段 (七莘路—曲阜路)、18号线北段 (长江南路—民生路)
弯绕走廊	3号线南段 (上海南站—中潭路)、4号线北侧环 (蓝村路—曹杨路)、4号线南侧环 (金沙江路—塘桥)、6号线西段 (云山路—东方体育中心)、6号线中段 (巨峰路—世纪大道)、7号线南段 (花木路—常熟路)、13号线中段 (北蔡—南京西路)	

### 3 TOD走廊客流均衡性分析

TOD走廊客流分布的空间均衡性体现在沿线断面均衡和双向均衡两个方面,相应构建客流均衡评价指标,并对各条走廊进行比较分析。

#### 3.1 TOD走廊客流的断面均衡水平评价

借鉴统计学的峰度概念,构建TOD走廊客流的断面均衡水平评价指标。可以认为,当各断面客流量相等即完全均布时,均衡水平最高。故以该曲线为基准提出“纵断均衡指数”(Profile Equilibrium Index,简称PEI)这一指标,即采用实际客流分布曲线的峰度与均布客流分布曲线的峰度之差来表征。

上行或下行方向<sup>④</sup>的纵断均衡指数的计算公式为:

$$PEI = kurt(X) - 1.8 = E\left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma}\right)^4\right] - 1.8$$

其中,PEI为走廊纵断均衡指数,kurt(X)为实际断面客流曲线X的峰度,1.8为客流均匀分布(uniform distribution)的峰度,E(x)为变量x的期望, $\mu$ 为分布X的均值, $\sigma$ 为分布X的标准差。

具体计算中,采用某方向上各断面载客量占走廊总断面载客量的比例,建立走廊沿线各断面客流量分布曲线并计算其纵断均衡指数。当值为0时,走廊客流分布最均匀;当值小于0时,呈现

客流两侧多、中部少的情况;当值大于0时,值越大客流越不均匀且向单侧集中,其中,当值接近0.6时客流沿断面呈直线增长,当值超过1时曲线存在一段客流很低的“尾部”,值越大“长尾”现象越突出。

计算得到早高峰各走廊的客流纵断均衡指数[图2(a)],发现放射走廊的断面客流均衡水平最低,其上行、下行平均断面峰度分别达到0.67和0.95,远高于横纵走廊的0.39和0.48以及弯绕走廊的0.49和0.28。尽管多数走廊上行方向的纵断均衡指数较小,但其客流长尾特征问题依然突出,加之早高峰上行方向客流量更大,其对轨道交通运营服务的影响不容忽视。在中心城—新城的放射走廊中,除了11号线西段嘉定分支外,5号线奉贤分支、9号线松江徐汇段、11号西段花桥分支、16号线、17号线的上行方向峰度基本在1左右。

对照而言,纵断均衡指数小于0.3的客流均衡走廊主要位于中心城区内,例如经过中央活动区的2、6、9、13号线中段,以及可换乘多条线路的4号环线等走廊。从中心城区周边进入中央活动区的一些走廊,其上行方向的纵断均衡指数集中在0.3至0.5左右,总体客流均衡水平居中。这种“中心客流平稳、外围落差明显”的走廊断面客流分布,与市域空间单极化和中心城区多中心格局的空间特征有密切关系。

#### 3.2 TOD走廊客流的双向均衡水平评价

受向心潮汐交通联系的影响,早高峰放射走廊上下行的断面客流量之比即双向不均匀系数较大,部分断面可达到4左右。由于该系数的值域不封闭,且走廊各断面的双向不均匀系数加和后还会出现大小抵消的情况,不能全面反映走廊整体的双向客流均衡水平。为此,构建基于断面双向流量差的“双向均衡指数”(Directional Equilibrium Index,简称DEI),具体计算采用各断面的双向载客量差占双向载客量和之比的均方根,以评价走廊的双向客流均衡程度,也可反映走廊客流的潮汐性。该指标的值在0—1,双向客流分布越不均衡,数值越大。其中:当上、下行断面客流量完全相等时,值为0;当某一方向的断面无客流量时,值为1。

双向均衡指数DEI的计算公式为:

$$DEI = \sqrt{\frac{\sum (u_i - d_i)^2}{n}}$$

其中,DEI为双向均衡指数; $u_i$ 、 $d_i$ 分别为该走廊第i个断面的上行与下行客流量; $f_i$ 为第i个断面的客流总量,为 $u_i$ 、 $d_i$ 之和; $n$ 为断面总数。

计算各走廊的早高峰双向均衡指数,结果显示其值主要处于0.1到0.7的范围图[2(b)]。当指数大于0.7时,为极端不均衡情况,这时双向客流之比达到6:1;当指数为0.5时,不均衡情况也较突出,

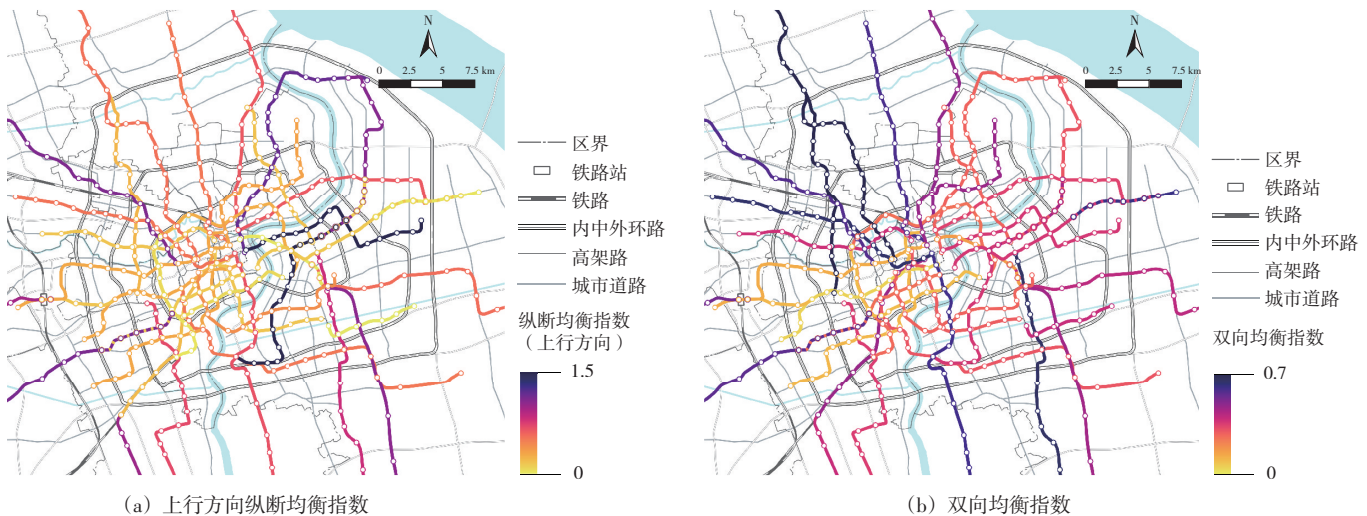


图2 基于客流均衡水平的上海TOD走廊分布  
Fig.2 TOD corridors based on passenger flow equilibrium in Shanghai

这时双向客流之比达到3:1;当指数为0.2时,均衡性较好,双向客流之比处于3:2的水平。

总体上,放射走廊的双向客流不均衡问题最为突出[图2(b)],一些沿线连续布局居住用地的走廊,它们自外围起始断面就存在明显的潮汐客流,如7号线北段、15号线北段、18号线南段等。中心城与新城之间的多条走廊也达到了0.55以上的不均衡水平,如9号线西段(中心城—松江新城)、11号线西段(中心城—嘉定新城)、17号线(中心城—青浦新城)等,但由于这些走廊存在一段双向客流均很低的尾部,其指数值不是最高。

位于中心城区内的走廊其双向客流相对较均衡,而且浦西地区走廊的均衡水平更高。典型的客流均衡走廊包括2号线西段和中段、9号线徐汇黄浦段、10号线西段、12号线南段以及4号环线的西南圈,形成“三横一纵半环”的格局。它们的双向均衡指数约为0.2,在空间上具有穿过中央活动区、串联多个公共中心的特点。

### 3.3 TOD走廊客流均衡的二维分析

为综合分析TOD走廊在沿线断面、上下方向的客流均衡水平,分别计算各

TOD走廊的纵断均衡指数、双向均衡指数在全部走廊中的分位数,并绘制以走廊分位数所对应的点为圆心、以早高峰小时走廊平均断面载客量为半径的客流均衡二维分类图。见图3。

按两个指标的50%分位数为界,可将TOD走廊分为4个部分。自右上角顺时针分别对应“双重不均衡(双向不均衡—有长尾)”“仅断面均衡(双向不均衡—无长尾)”“双重均衡(双向均衡—无长尾)”“仅双向均衡(双向均衡—有长尾)”等4类走廊。其中,客流双重均衡的走廊有13个,双重不均衡的走廊有14个,二者占走廊数量的66%,表明断面和方向的均衡性有一定的关联。

上述4类走廊在空间分布上具有明显特征。双重均衡的走廊大多位于黄浦江以西、苏州河以南这一区域,该区域与上海中央活动区(简称CAZ)高度重合,走廊沿线以高密度混合功能地区为主。仅双向均衡的走廊多数位于黄浦江以东,其断面不均衡现象反映了浦东地区开发强度随着远离滨江CAZ地带而快速下降的特征;双重不均衡走廊多数为由CAZ向外延伸至远郊区而形成的放射走廊,其末端一般位于上海的新城(松江新城、奉贤新城等)或具有与新城类似性质的区域(浦江镇、吴淞地区等),

与中心城区之间为连续的居住区,靠近末端的区间往往客流少、长尾特征明显,经过大型居住区的站点客流增长迅速且方向潮汐性强;仅断面较均衡的走廊,则是由CAZ向外延伸但延伸距离相对有限的放射走廊,它们没有客流较低的尾部,因而纵断均衡指标较好,但潮汐现象仍较明显,如8号线北段、15号线北段。

## 4 客流均衡视角的TOD走廊空间模式分析

### 4.1 TOD走廊的站点类型分布

TOD走廊用地布局可体现在沿线站点地区的用地功能上。根据工作日、休息日各站点对应客流的时辰分布曲线形状的相似程度,对站点功能类型进行划分,可分为综合活动中心、办公主导中心、办公为主混合、多元混合、居住主导、居住支配等6类,6种类型站点周边办公功能依序递减、居住功能依序递增。就空间分布来看,呈现综合活动中心、办公主导中心类型的站点主要聚集在CAZ,办公为主混合、多元混合类型的站点多位于中心城区,而居住主导、居住支配类型的站点主要在中心城区以外沿着放射走廊分布的特点。

比较而言:双重不均衡走廊以放射走廊为主,它们连接新城等远郊地区的居住功能和中心城区的办公、商务等服务功能,是长距离、职住分离式的通勤走廊;而双重均衡走廊主要为串联CAZ的纵横走廊以及环线区间的弯绕走廊,是联系多中心、客流规模较大的目的地走廊;其他两类走廊的沿线用地也各有特点,双向均衡而纵断不均衡的走廊其末端大多是以非居住功能为主的混合型站点,职住相对平衡能吸引一定的反向客流,但由于外围开发强度低,与中心城区的断面客流量差别较大;纵断均衡而双向不均衡的走廊,则是末端为靠近中心城区的居住支配型站点,周边居住用地多,断面客流总体处于饱和状态,而其他用地少,致使职住分离现象也十分显著。

### 4.2 典型走廊分析

9号线松江徐汇段是客流较大的双重

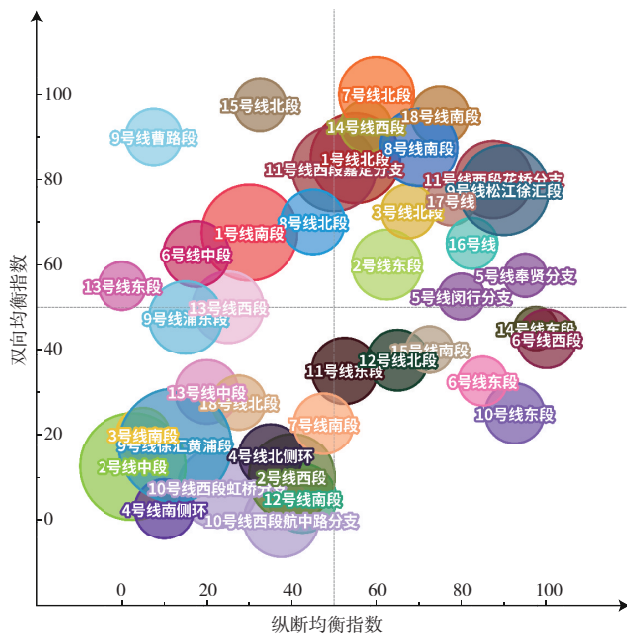


图3 各走廊的纵断均衡指数、双向均衡指数百分位数

Fig.3 Percentile rank of profile and directional equilibrium indices for corridors

不均衡走廊。考察其沿线站点类型和断面客流分布 [图(4a)], 发现松江一段为连续居住型站点, 加之佘山和泗泾等2个居住支配型站点, 与漕河泾活动中心一带的连续办公类站点完全分离布置, 造成客流的严重不均衡。从双向对比 [图(4b)] 来看, 上行断面客流在佘山站开始猛增, 至漕河泾一带开始下降, 但下行方向客流在漕河泾站后即下降到很低水平, 导致该走廊松江南站一星中路段的上行断面载客量显著高于下行, 形成双向不均衡。在上行方向上, 由于松江新城内的客流总体偏少, 而佘山、洞泾、九亭等3个站点的小时进站客流均在5000人以上, 客流分布在松江新城段形成了明显的“长尾”; 在下行方向上, 由于漕河泾开发区就业中心的下客流量集中, 合川路以下断面客流降到了很低水平, 也引发“长尾”现象。

10号线西段虹桥分支则是双重均衡的典型走廊。走廊沿线居住类站点较少, 以综合中心、办公主导中心、多元混合类型的站点为主 [图(4c)]. 在上行方向, 除了陕西南路、宋园路站点的下客流量较集中, 其他站点上下客量相差不大, 使

沿线的断面客流均衡程度较高。并且由于走廊外围一端是虹桥枢纽, 不仅上行方向的起点上客流量大, 下行方向乘坐至终点的乘客也较多, 这一结构特征使得这一走廊的双向客流均衡程度较高, 两个方向均不存在低客流的长尾 [图(4d)].

## 5 结论和启示

### 5.1 主要结论

总体上, 本文的研究填补了TOD走廊在客流均衡视角的知识盲点, 有利于今后对走廊层级TOD实施整体性的空间管控与优化, 提升走廊TOD综合开发绩效。

其一, 基于客流关联的TOD走廊识别方法能够明确界定走廊的具体区间, 为划分走廊TOD的空间单元提供基本依据。

基于上海市轨道交通的站点OD数据, 运用社区发现算法得出了TOD走廊的划分结果。其中, 放射型走廊的长度为25—30 km, 平均站距1.83 km; 中心城区及周边地区的走廊长度16—20 km, 站距1.30 km。这两种走廊的长度之比、

站距之比均接近3:2, 反映了不同走廊地区的活动尺度有一定差异。TOD走廊的包含站数与实际乘坐站数(平均约12站)基本相当, 说明“社区发现”的方法适用于TOD走廊识别, 由此界定的走廊范围与公交出行空间特征相符合, 并能增强TOD走廊研究的可比性。

其二, 构建纵断、双向两个维度的客流均衡评价指标, 能够全面考察TOD走廊的运营服务绩效, 并发现其空间分布规律。

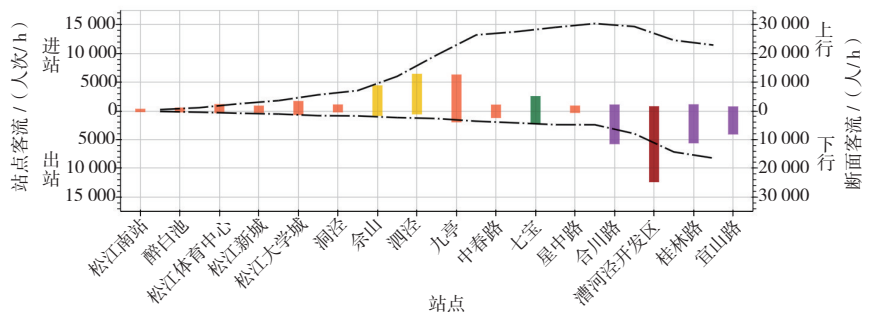
对不同走廊分别计算其纵断均衡指数、双向均衡指数并进行综合分析, 可以看出不同走廊的客流均衡特征差别显著, 尤其是放射型走廊的两个指数值均明显高于其他两类走廊(表2)。在TOD走廊的二维分类中, “双重不均衡”走廊大多是联系中心城与外围地区的放射走廊, 而典型的“双重均衡”走廊主要是横纵走廊和弯绕走廊。

其三, TOD走廊的客流均衡特征与沿线用地布局密切相关, 目的地型走廊的客流相对均衡, 通勤型走廊的客流潮汐和长尾现象均更突出。

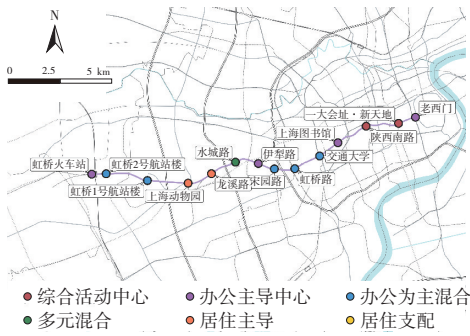
目的地型走廊在空间分布上与中央



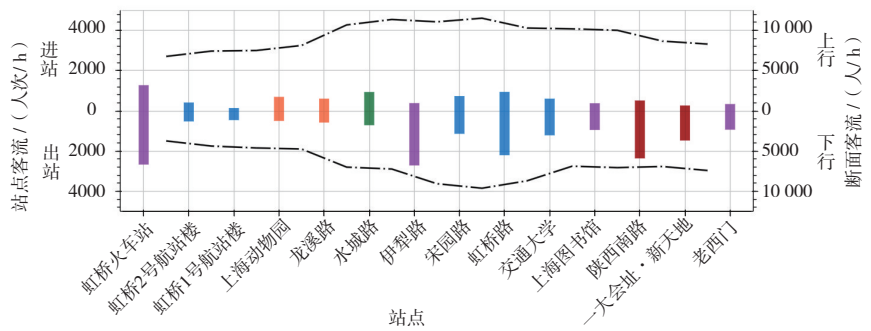
(a) 9号线站点分布



(b) 9号线站点上下客量及断面客流分布



(c) 10号线站点分布



(d) 10号线站点上下客量及断面客流分布

图4 9号线松江徐汇段与10号线西段虹桥分支沿线的各站点上下客量及断面客流分布

Fig.4 Station boarding-and-alighting volumes and passenger flow profile along Songjiang-Xuhui section of Line 9 and Hongqiao branch of the west section of Line 10

表2 TOD走廊的纵断、双向客流均衡水平比较

Tab.2 Comparison of profile and directional passenger flow equilibrium levels in TOD corridors

走廊类型	总数 / 个	上行方向纵断均衡指数		下行方向纵断均衡指数		双向均衡指数		走廊长度 / km		断面数 / 个		
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	合计
放射	22	0.67	0.42	0.95	0.90	0.52	0.12	24.99	11.65	13.64	3.87	300
横纵	13	0.39	0.45	0.48	0.45	0.35	0.15	16.14	3.33	12.23	2.59	159
弯绕	6	0.49	0.73	0.28	0.36	0.32	0.08	15.84	1.81	12.50	1.87	75

活动区高度重合，沿线站点类型多样，具有多心、混合的用地特征，且走廊两端都有主要的活动吸引点，保证了走廊在断面及方向上的“双重均衡”。中心放射布局的通勤型走廊，以外围连串居住用地和中心城区办公主导的职住分离为特点，其客流的不均衡分布大大降低了公交运营效率和服务品质。

### 5.2 规划启示

TOD走廊识别及其布局模式分析方法对于深化多尺度的TOD理论、科学指导TOD走廊规划具有重要意义。本文所提出的基于站点紧密关联的TOD走廊划分及其客流均衡评价新方法，能为走廊层级TOD规划和站点TOD协同提供一个整合性技术框架。

其一，TOD走廊是整合公交运营和站点开发、落实公交导向发展目标的重要载体。改善公交运营、提高服务水平是增强公交吸引力的重要条件。只有通过区域尺度的用地、交通整合规划，才能实现公交客运效率最大化，这与TOD概念本源中的区域观相一致，即TOD是由公交线网串联的站点TOD共同支撑下的公交导向型区域发展模式。站点层级TOD难以回应公交线路运营改善的目标要求，对于客流饱和或不足情况下TOD开发对公交运营的不同影响缺乏考虑，常常忽视大断面客流与公交运能的矛盾。在走廊上整合孤岛式的站点TOD，可以改善公交断面客流分布的均衡性，使之与促进客流增长的公交战略目标更有效地连接起来。

其二，制定以TOD走廊为单元的规划原则和管控策略，优化走廊空间布局模式。根据公交出行空间分布，可划分中心城—外围地区、中心城区内部的不同TOD走廊。与站点TOD相比，走廊TOD的原则应注重区域尺度的规划设计

要求。基于上海TOD走廊的经验，尝试从客流均衡角度梳理出走廊TOD的“5D原则”，包括：多样性（diversity），除站点地区功能混合，主张在走廊上将不同功能类型的站点交错布局，尤其是穿插设置中心类站点；目的地可达性（destination），在走廊沿线分别布置商办、休闲等不同功能主导的活动中心，增强走廊内部多个站点地区的吸引力，促进站点客流的进出平衡；逆单极化（depolarization），提高新城等主要节点的功能，强化外围公共中心能级，消减放射走廊的单向极化效应；就近工作机会（distance to workplace），在走廊两端区间均应安排职住用地，加强职住平衡，尤其要避免外围连续居住类站点的单一功能布局；密度杠杆（density leverage），考虑走廊不同区间的客流规模和均衡程度，适当提高外围非居住功能的开发强度，同时合理控制大客流断面沿线地区的功能配置和开发强度，使之与公交运力相适应。

其三，以提高客流均衡水平为目标，加强TOD走廊布局和政策的多情景模拟分析。走廊的客流均衡不仅有利于提高公交运营效率，也能通过减少车内拥挤、提高乘坐舒适性，最终有利于促进公交出行增长的TOD核心目标。客流均衡状况是走廊沿线乃至区域用地-交通整合作用的结果，受到不同空间布局及相关政策的影响，即使同一条线路其不同区间的客流均衡水平也会有所不同。为了提高TOD走廊规划决策的科学性，亟待加强对TOD走廊多情景规划方案的客流均衡模拟分析，通过比较、优选“站点TOD协同”的空间模式和策略，为加强TOD走廊的功能集聚、发挥走廊空间效应提供量化支撑。

中提出了宝贵的意见指导，缪思静、鹿明在文献搜集方面做了许多基础工作，在此特别致谢。

### 注释

- ① 对于有V个节点与V条边的图G，当图G的边数E接近V<sup>2</sup>时，认为图G是稠密图（dense graph）；反之，当边数E接近V时，认为图G是稀疏图（sparse graph）。由于不同轨道交通站点间几乎都存在客流，即两点间几乎都存在一条边，故基于站点间客流联系建立的图为稠密图。由于模块度是以边权重即客流量为依据计算的，当图为加权稠密图时，社区发现算法产生的社区内部边权重和是接近的，即各社区内部的客流量之和数值接近。
- ② 鲁汶社区发现方法是一种基于模块度（modularity）最大化原则的启发式算法，模块度大，表明网络内各社区内部的联系多、社区之间的联系少。
- ③ 观察社区发现算法结果，发现得到的间断的某些社区并不能直接界定为TOD走廊，故需要对社区发现算法得到的社区进行进一步处理以得到连续的交通走廊。规定对于属于社区a的站点s，若在其对应的轨道线路不为环线，且该站沿此轨道线向两端方向均存在属于社区b的站点s'与s''，则该站点s同时属于TOD走廊A与TOD走廊B。依据此规则得到的TOD走廊为连续的，但一个站点可能属于多个不同的TOD走廊，如6号线的北洋泾路站同时属于6号线东段、中段和西段。
- ④ 规定走廊上的两个端点中更远离上海市中心（上海2000坐标系的原点，其对应物理实体为人民公园北侧南京西路国际饭店楼顶中心旗杆）的为起点s<sub>0</sub>，更接近上海市中心的为终点s<sub>1</sub>。由起点s<sub>0</sub>（远离上海市中心的一端）向终点s<sub>1</sub>行进（靠近上海市中心的一端）为上行，反之为下行。上海地铁部分线路（如11号线）存在支线，由于支线均分布于远离市中心的区域，故此规定该走廊存在两个起点s<sub>0</sub>与s<sub>0'</sub>，起点

张涵双高级工程师在本文撰写过程

$s_0$ 与 $s_1$ 到终点 $s_i$ 的两条路径为同一TOD走廊的不同分支。同一走廊的不同分支分别计算客流均衡指标。

## 参考文献

- [1] CALTHORPE P. The next American metropolis: ecology, community, and the American dream[M]. New York: Princeton Architecture Press, 1993.
- [2] City of Denver. Denver TOD typology and strategic plan [EB/OL]. (2006-01-01) [2024-09-20]. <http://ctod.org/pdfs/2006TODStrategicPlanDenver.pdf>
- [3] City of Austin. History of transit oriented development in Austin[EB/OL]. (2023-08-30) [2024-09-20]. [https://www.austintexas.gov/sites/default/files/files/Planning/Urban\\_Design/History\\_of\\_TOD2.pdf](https://www.austintexas.gov/sites/default/files/files/Planning/Urban_Design/History_of_TOD2.pdf).
- [4] Delhi TOD Policy & Regulations Interpretation. transit oriented development manual [EB/OL]. (2014-10-14) [2024-09-20]. <https://www.wricitiesindia.org/sites/default/files/Delhi-TOD-Policy-Manual.pdf>.
- [5] Central Maryland Transportation Alliance. Central Maryland TOD strategy: a regional action plan for transit-centered communities [EB/OL]. (2009-07) [2024-09-20]. <http://ctod.org/pdfs/2009CentralMarylandTODStrategy.pdf>.
- [6] ARRINGTON G B, THORNE-LYMAN A, et al. Transit-oriented development guidelines[EB/OL]. (2017-05-01) [2024-09-20]. [https://www.bart.gov/sites/default/files/docs/BART\\_TOD-GuidelinesFinal2017\\_compressed\\_0.pdf](https://www.bart.gov/sites/default/files/docs/BART_TOD-GuidelinesFinal2017_compressed_0.pdf).
- [7] AHMAD S, RASHID M F, SURATMAN R. Readiness of transit oriented development (TOD) concept implementation in Perak's suburban areas[J]. Planning Malaysia: Journal of the Malaysian Institute of Planners, 2022, 20(1): 155-165.
- [8] ITDP (Institute for Transportation and Development Policy). TOD standard 3.0 [EB/OL]. (2017) [2024-09-20]. <https://www.itdp.org/publication/tod-standard/>.
- [9] OLLIVIER G P, GHATE A, BANKIM K, et al. Transit-oriented development implementation resources and tools[EB/OL]. 2nd ed. Washington, D. C. : World Bank Group, [2021-10-25] [2024-09-20]. <http://documents.worldbank.org/curated/en/472011635146925534/Transit-Oriented-Development-Implementation-Resources-and-Tools-Second-Edition>.
- [10] 马隆·博内特, 尼古拉斯·康平. TOD在圣迭戈: 一种规划理念实施的渐进过程[J]. 国外城市规划, 2000(4): 38-41.
- [11] 陈燕萍. 城市交通问题的治本之路: 公共交通社区与公共交通导向的城市土地利用形态[J]. 城市规划, 2000(3): 10-14.
- [12] 交通运输部. 关于开展国家公交都市建设示范工程有关事项的通知 [EB/OL]. (2011-11-09) [2024-09-20]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/ysfws/202006/t20200623\\_3315626.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/ysfws/202006/t20200623_3315626.html).
- [13] 国家发展和改革委员会. 国家发改委组织召开城市轨道交通投融资机制创新研讨会 [EB/OL]. (2016-09-09) [2024-09-20]. [https://www.gov.cn/xinwen/2016-09/09/content\\_5106798.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2016-09/09/content_5106798.htm).
- [14] 潘海啸, 钟宝华. 轨道交通建设对房地产价格的影响: 以上海市为案例[J]. 城市规划学刊, 2008(2): 62-69.
- [15] 郑思齐, 胡晓珂, 张博, 等. 城市轨道交通的溢价回收: 从理论到现实[J]. 城市发展研究, 2014, 21(2): 35-41.
- [16] 林雄斌, 杨家文, 丁川. 迈向更加可支付的机动性与住房: 公交导向开发及其公平效应的规划解析[J]. 城市规划, 2018, 42(9): 122-130.
- [17] 刘泉. 城市层面TOD规划的结构形态解读[J]. 上海城市规划, 2019(6): 72-79.
- [18] 李文菁, 杨家文. 深圳市公交引导发展(TOD)模式采用的策略与实践[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 5-12.
- [19] 董微, 林雄斌. 中国城市TOD的地方化政策与实践: 政策工具的视角[J]. 城市规划学刊, 2024(2): 49-57.
- [20] 黄建中, 曹哲静, 万舸. TOD理论的发展及新技术环境下的研究展望[J]. 城市规划学刊, 2023(2): 40-46.
- [21] 戴晓晖. 新城市主义的区域发展模式: Peter Calthorpe的《下一代美国大都市地区: 生态、社区和美国之梦》读后感[J]. 城市规划汇刊, 2000(5): 77-78.
- [22] HICKMAN R, HALL P. Moving the city east: explorations into contextual public transport-orientated development[J]. Planning Practice and Research, 2008, 23(3): 323-339.
- [23] BERNICK M, CERVERO R. Transit villages in the 21st century [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [24] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a synthesis[J]. Transportation Research Record, 2001, (1 780): 87-114.
- [25] HESS D B, ALMEIDA T M. Impact of proximity to light rail rapid transit on station-area property values in Buffalo, New York[J]. Urban Studies, 2007, 44(5-6): 1041-1068.
- [26] CERVERO R, MURAKAMI J. Rail and property development in Hong Kong: experiences and extensions[J]. Urban Studies, 2009, 46(10): 2019-2043.
- [27] RENNE J L, TOLFORD T, HAMIDI S, et al. The cost and affordability paradox of transit-oriented development: a comparison of housing and transportation costs across transit-oriented development, hybrid and transit-adjacent development station typologies[J]. Housing Policy Debate, 2016, 26(4-5): 819-834.
- [28] LIU L, ZHANG M, XU T. A conceptual framework and implementation tool for land use planning for corridor transit oriented development[J]. Cities, 2020, 107(2): 102939.
- [29] Reconnecting America. Station area planning: how to make great transit-oriented places [EB/OL]. (2003-04-08) [2024-09-20]. <http://reconnectingamerica.org/assets/Uploads/tod202.pdf>.
- [30] Center for Transit-Oriented Development. Transit corridors and TOD[EB/OL]. (2010-12-20) [2024-09-20]. <https://ctod.org/portal/node/2161>.
- [31] 住房和城乡建设部. 城市轨道交通沿线地区规划设计导则 [EB/OL]. (2015-12-10) [2024-09-20]. [https://www.planning.org.cn/news/uploads/2015/12/566a2efee7aad\\_1449799422.pdf](https://www.planning.org.cn/news/uploads/2015/12/566a2efee7aad_1449799422.pdf).
- [32] IBRAEVA A, CORREIA G H A, SILVA C, et al. Transit-oriented development: a review of research achievements and challenges[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 132: 110-130.
- [33] ZHANG M. Chapter eleven: corridor transit oriented development: concept, practice, and research needs[M] // CAO X J, DING C, YANG J. Advances in transport policy and planning. Academic Press, 2022: 277-299.
- [34] EWING R, CERVERO R. Travel and



- the built environment[J]. Journal of the American Planning Association, 2010, 76(3):265-294.
- [35] BERTOLINI L. Spatial development patterns and public transport: the application of an analytical model in the Netherlands[J]. Planning Practice & Research, 1999, 14(2): 199-210.
- [36] KAMRUZZAMAN M , BAKER D , WASHINGTON S , et al. Advance transit oriented development typology: case study in Brisbane, Australia[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 34(2):54-70.
- [37] HIGGINS C D, KANAROGLOU P S. A latent class method for classifying and evaluating the performance of station area transit-oriented development in the Toronto region[J]. Journal of Transport Geography, 2016, 52: 61-72.
- [38] CHORUS P , BERTOLINI L . Developing transit-oriented corridors: insights from Tokyo[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2016, 10(1-5): 141217133925009.
- [39] FERRELL M C. Measuring the impact of sub-urban transit-oriented developments on single-family home values[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013.
- [40] PAPAGIANNAKIS A, VITOPOULOU A, YIANNAKOU A. Transit-oriented development in the southern European city of Thessaloniki introducing urban railway: typology and implementation issues [J]. European Planning Studies, 2020, 29(1): 117-141.
- [41] 吴娇蓉, 刘梦瑶, 谢金宏. 城市轨道交通走廊带分级与出行特征相关性[J]. 城市交通, 2019, 17(5): 105-113.
- [42] 刘翔, 陈小鸿, 潘海啸. 从“站城一体”到“走廊融合”: 流动空间视角下的TOD发展理论框架与模式优化[J]. 城市规划学刊, 2024(4): 34-40.
- [43] LIN J J, GAU C C. A TOD planning model to review the regulation of allowable development densities around subway stations[J]. Land Use Policy, 2006, 23(3): 353-360.
- [44] GUZMAN L A , CARDONA S G . Density-oriented public transport corridors: decoding their influence on BRT ridership at station-level and time-slot in Bogotá [J]. Cities, 2021, 110(103071).
- [45] 崔叙, 梁朋朋, 喻冰洁, 等. TOD规划设计理论研究[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(5): 18-25.
- [46] 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.

修回: 2024-11