

超大城市TOD发展效益及公平性评估 ——以成都市为例

张娜, 蒋源, 唐婕, 周垠, 于儒海
(成都市规划设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 科学合理评估轨道交通TOD发展效益及公平性, 有利于促进绿色低碳出行和优化城市资源配置。结合站域空间客观要素价值与主观感知价值, 提出节点-场所-感知三维效益评估模型, 并构建了包含6类29个指标的TOD发展效益评估体系, 将轨道交通车站划分为开发满载、开发适中、开发不足、开发失衡4类。基于群体不同社会属性, 包括收入水平、年龄和受教育程度的差异, 构建了一套公平性评估准则, 并结合地理加权回归模型探讨TOD发展效益与群体分布的异质性以及TOD对弱势群体的公平性问题。以超大城市成都市为例, 从交通-土地-人视角深入解读轨道交通站域空间协同发展情况, 评估结果表明成都市轨道交通站域空间土地开发建设较为均衡, 感官舒适性和公平性较好。最后, 针对不同特征的车站给出优化策略指引, 支撑TOD的详细规划编制, 推进轨道交通可持续高质量发展。

关键词: 城市轨道交通; TOD; 发展效益; 公平性; 评估指标; 节点-场所-感知模型; 成都市
Evaluation of the Development Benefits and Fairness of TOD in Megacities: A Case Study of Chengdu

ZHANG Na, JIANG Yuan, TANG Jie, ZHOU Yin, YU Ruhai
(Chengdu Institute of Planning & Design, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: Scientifically and reasonably evaluating the benefits and fairness of the TOD development in rail transit is conducive to promoting green and low-carbon travel and optimizing urban resource allocation. Combining the objective element value and subjective perceptive value of station space, a three-dimensional Node-Place-Perception benefit evaluation model is developed, and a TOD development benefits evaluation system with 6 categories and 29 indicators is constructed. Rail transit stations are divided into four categories, namely fully developed, moderately developed, underdeveloped, and unbalanced development. Based on the different social attributes of groups, including the difference in income level, age, and education level, this paper establishes a set of fairness assessment criteria, and discusses the heterogeneity of TOD development benefits and group distribution and the fairness of TOD to vulnerable groups by combining with the geographically weighted regression model. Taking the megacity of Chengdu as an example, the paper discusses the coordinated development of rail transit station space from the perspective of transportation, land, and people. The evaluation results show that the land development and construction of rail transit station space in Chengdu is relatively balanced, with preferable sensory comfort and fairness. Finally, optimization strategy guidance is given for stations with different characteristics to support the detailed planning of TOD and promote the sustainable and high-quality development of rail transit.

Keywords: urban rail transit; TOD; development benefits; fairness; evaluation indicators; Node-Place-Perception model; Chengdu

收稿日期: 2024-06-30

作者简介: 张娜(1996—), 女, 四川巴中人, 硕士, 工程师, 研究方向为大数据与智慧城市, 电子邮箱 2458064093@qq.com。

通信作者: 蒋源(1994—), 男, 四川内江人, 硕士, 工程师, 研究方向为数字规划与城市交通, 电子邮箱 nojiangpai@163.com。

0 引言

城市轨道交通是承载城市高效、可持续

发展的重要载体。围绕城市轨道交通车站及其站域范围进行综合开发已成为城市规划建设的普遍共识, 是当前以公共交通为导向的

发展模式 (Transit-Oriented Development, TOD) 的代表性做法。中国超大城市的 TOD 综合开发项目已落地并运营较长时间, 其对城市发展、群体需求等的支撑效益有待评估。同时, TOD 产生的效益是否相对公平地被不同群体共享也是值得关注的重点民生话题, 广泛出现的绅士化^①现象使得 TOD 模式的初衷难以被实现。因此, 针对 TOD 发展效益及其公平性开展研究十分必要, 为未来城市轨道交通 TOD 模式提供优化策略和参考。

既有文献为 TOD 发展效益及公平性研究奠定了坚实基础, 其主要研究方向和内容包括两大类。1) TOD 发展效益评估体系及评估分析。包括构建评估体系和评估模型研究, 前者如“强度—结构—价值”三维体系^[1]、“成本—效益—土地规划—基础信息”四维体系^[2]、“密度—多样性—设计—效益”四维体系^[3]等, 虽然评估体系构建成果有区别, 但共性原则是围绕核心目的和研究视角来确定具体维度和内容; 后者如节点—场所模型(Node-Place, NP)^[4-5]、TOPSIS 模型^[2]、主成分分析法^[3]等, 其核心是围绕评估体系和数据情况选择适宜的分析模型。2) 轨道交通资源的公平性分析。例如, 利用基尼系数^[6]、潜能模型^[6]、空间公平指数^[7]、区位熵^[7]等, 评估轨道交通车站^[6,8]、线路^[8-10]、可达性^[8-9]等资源条件对老年群体^[6]、幼年群体^[6,8]、低收入群体^[9-10]的覆盖情况和分布匹配度等。既有针对公平性的研究多聚焦在车站布局、线路走向、可达性覆盖等方面, 针对 TOD 发展效益与公平性相关关系的研究

鲜有提及。

作为国家经济社会发展的动力源和增长极, 超大城市在国家发展全局中具有重要地位和作用, 关注超大城市轨道交通网络的空间效率对促进区域一体化发展、发挥区域引领和辐射带动作用有重要意义。成都市地区常住人口达 1 334 万人, 成为第 7 个超大城市。同时, 作为新一线城市和公园城市示范区, 成都市正以城市轨道交通 TOD 建设为引领探索超大城市现代化治理新路径。以成都市作为超大城市典型代表, 本文结合既有文献研究成果、成都市实际情况等构建 TOD 发展效益评估体系、评估方法并进行综合评估, 结合不同群体空间分布数据测算 TOD 公平性并提出优化策略。

1 研究概况

截至 2023 年 8 月, 成都市已开通运营前三期轨道交通线路 12 条(不含市域快线 2 号线), 包含轨道交通车站 282 个, 运营里程达 558 km, 覆盖成都市中心城区(12 个行政区与 2 个经济功能区)及东部新区; 日均客运量达到 427.53 万人次, 公共交通出行分担率超 60%; 车站 800 m 覆盖通勤人口比例达 34%, 位居全国第二。

1.1 研究区域和研究数据

在建设成渝地区双城经济圈与新发展理念的公园城市示范区驱动下, 成都市大力开展轨道交通与 TOD 建设, 提出以轨道交通引领城市发展, 按照站城一体、产业优先、功能复合、综合运营的理念, 围绕轨道交通车站打造商业中心、生活中心、产业中心、文化地标, 将成都市建设成为全球 TOD 典范城市。截至 2023 年 12 月, 成都市轨道交通 TOD 已开工 24 个项目(其中中心城区 23 个), 遍布成都市开通轨道交通线路的 14 个区。本文选取成都市中心城区作为研究范围, 区域总面积 4 062 km², 包含轨道交通前三期车站 279 个(见图 1)。

本文采用的数据集主要包含成都市轨道交通集团有限公司提供的轨道交通线路与车站数据、建成环境数据(包括地块数据、建筑数据、路网数据、POI 数据等)、出行数据(公共汽车站数据、共享单车订单数据等)、百度人口画像数据和百度地图街景数据等, 具体描述如表 1 所示。

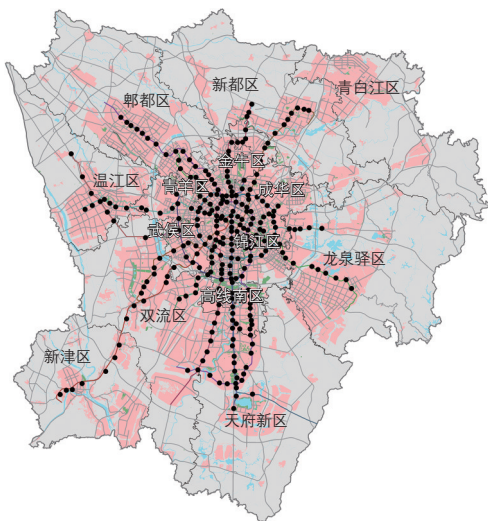


图 1 研究范围与轨道交通车站分布
Fig.1 Study area and the distribution of rail transit stations

1.2 研究内容

围绕TOD发展效益和公平性开展三方面研究，研究框架如图2所示。首先，构建一套城市轨道交通评估TOD发展效益的综合评估方法，该方法将站域空间价值划分为空间能级、功能布局和体验感知3个维度，并选取了29个指标进行测度，通过改进的节点-场所-感知模型，将TOD发展效益划分为开发满载、开发适中、开发不足、开发失衡4种类型。其次，基于群体不同社会属性，包括收入、年龄和受教育程度的差异，构建了一套公平性评估准则，并结合回归模型探讨TOD发展与群体分布的异质性和对弱势群体的公平性问题。最后，以成都市为例，应用评估方法和公平性评估准则，针对典型TOD车站给出优化提升建议，为TOD详细规划及公共服务均等化供给提供有效参考。

2 研究方法

2.1 节点-场所-感知模型

节点-场所模型于1996年由阿姆斯特丹大学教授贝托里尼(Bertolini)提出^[11]，用于分析交通枢纽地区发展动态以及复杂性。其中，节点代表交通枢纽在大型公共交通网络中的可达程度，而场所代表交通枢纽在城市物理空间中的土地利用效率，二者具有一定的耦合关系，对于解读交通与土地利用之间的协同关系以及评估站域空间发展效益具有重要参考价值。经典的节点-场所模型将交通枢纽地区分为4个类别：1)压力型(Stress)，即节点价值和场所价值都很强；2)均衡型(Balance)，位于纺锤形中间区域，节点价值与场所价值相互促进且平衡发展；3)依赖型(Dependence)，节点价值和场所价值均较低，互相依赖又相互缺失；4)失衡型(Unbalance)，位于纺锤形之外区域，又分为节点失衡型(Unbalanced Node，节点价值远高于场所价值)和场所失衡型(Unbalanced Place，场所价值远高于节点价值)。

节点-场所模型出现后，众多学者对模型应用方向进行了广泛探索，目前已成为TOD评估与分类的主流方法。利用传统的节点-场所模型，S. Zemp等^[12]和P. Chorus等^[13]分别对瑞士1700个轨道交通车站和东京都市圈1200个轨道交通车站进行分类，探讨并识别了客流量、与中央商务区的距离、劳

动力规模等不同因素对车站的影响力大小；近年来，部分学者意识到传统节点-场所模型在实际环境中的局限性，对模型进行了扩展和改进，引入了第三个维度，例如设计层面(紧凑度和可步行性)^[14-15]、导向层面(职住距离)^[16]、流量层面(客流量)^[17-18]等，丰富了节点-场所模型的语义可解释性，也增加了模型在不同区域特色中的泛化能力。

聚焦TOD综合效益，本文将轨道交通站域空间的发展效益划分成3个维度，分别是城市空间中的宏观区位能级——空间能级、用地和功能上的混合高效程度——功能布局、从人的感官视角出发的设计友好水平——体验感知，三者从不同角度描绘了站域空间在TOD模式下的潜在价值。结合节点-场所模型，构建TOD发展效益评估的三维纺锤模型——节点-场所-感知模型(见图3)。其分类与传统节点-场所模型类似：1)开发满载(压力型)，即空间能级、功能布局和体验感知都很强；2)开发适中(均衡型)，位于纺锤体中间区域，空间能级、功能布局和体验感知平衡发展，可相互促进；3)开发不足(依赖型)，空间能级、功能布局和体验感知均较弱，互相依赖又相互缺失；4)开发失

表1 数据集

Tab.1 Data set

数据类型	数据集名称	数据条数/条	数据字段
交通数据	轨道交通车站数据	282	车站名称，车站经纬度，车站所属线路
	轨道交通车站出入口数据	1 390	车站名称，出入口名称，出入口经纬度
	轨道交通线路数据	12	轨道交通线路名称，轨道交通线路长度，轨道交通线路起终点
	公共汽车站数据	12 627	车站名称，车站经纬度
建成环境数据	共享单车订单数据	18 983 258	订单编号，订单开始时间，订单开始经纬度，订单结束时间，订单结束经纬度
	地块数据	1 627 396	地块类型，地块经纬度，地块面积
	建筑数据	613 915	建筑类型，建筑经纬度，建筑面积
	路网数据	62 593	路段类型，路段长度
	绿道数据	4 025	绿道类型，绿道长度
人口数据	POI数据	1 212 500	设施类别，设施经纬度
	商圈数据	39	商圈级别，商圈经纬度，商圈面积
其他数据	人口画像数据	486 965	年龄，教育水平，工作类型，收入水平，消费水平
	街景数据	1 424 000	街景采集年份，街景经纬度

衡(失衡型), 位于纺锤形之外区域, 进一步分为3个类别, 分别为空间能级失衡(空间能级水平远低于其他两方面)、功能布局失衡(功能布局水平远低于其他两方面)和体验感

知失衡(体验感知水平远低于其他两方面)。

基于节点-场所-感知模型的3个维度, 本文构建了一套包含6类29个指标的TOD发展效益评估体系。指标选取的主要依据为: 1)通过轨道交通车站在轨道交通线网中的中心性和在城市物理空间中区位的重要性, 来衡量空间能级维度的效益水平; 2)通过轨道交通车站周边的建成环境与功能配套, 即用地开发类指标和设施密度类指标来衡量功能布局维度的效益水平; 3)通过轨道交通车站周边环境带给人的体验感受, 包括街景量化指标及接驳效率类指标, 来衡量体验感知维度的效益水平(见表2)。考虑到成都市轨道交通车站平均站间距为1.5 km, 本文设置站域空间范围阈值为1 km, 各个维度的指标通过熵值法^[19]进行加权汇总。

2.2 公平性研究

公平性研究一直是城市研究领域的重要视角。在新时代以人为本的发展导向下, 其研究视角逐渐从空间均衡过渡到人的公平, 除了强调空间上的均衡分配, 还要关注差异化群体间的利益平衡^[20-21]。随着TOD模式的推行, 土地价值得以释放, 从而促进了住宅价格提升和区域经济增长, 并进一步导致周边地区的城市功能格局、社会阶层以及出行方式发生根本性变化, 与此同时产生了许多不公平现象。研究发现TOD车站周边更容易引发绅士化现象^[22], 因为便捷的轨道交通使得周边住宅产生了溢价效应, 导致中低收入家庭被高收入家庭所取代, 然而富裕群体更倾向于使用私人小汽车而不是乘坐公共交通^[23]。许多城市已通过提供经济适用房和社会保障性住房, 将低收入居民吸引到TOD地区, 以保证公共交通服务的社会公平性^[24-25], 一些国家甚至制定了公平性交通导向开发(Equitable Transit-Oriented Development, ETOD)的政策^[26-27], 以确保那些最需要公共交通的市民能够获益, 包括有色人种、低收入家庭、老年人、残疾人以及汽车使用受限或无法使用汽车的家庭。

在国内外TOD公平性相关研究方法中, E. C. Delmelle等^[28]探索了哥伦比亚快速公共汽车交通系统(以下简称“快速公交系统”)与社区社会经济阶层相关的公平分配, 结果表明中等收入群体步行进入快速公交系统的机会最大, 而社会经济阶层最高和最低群体的相应机会最为有限; G. F.

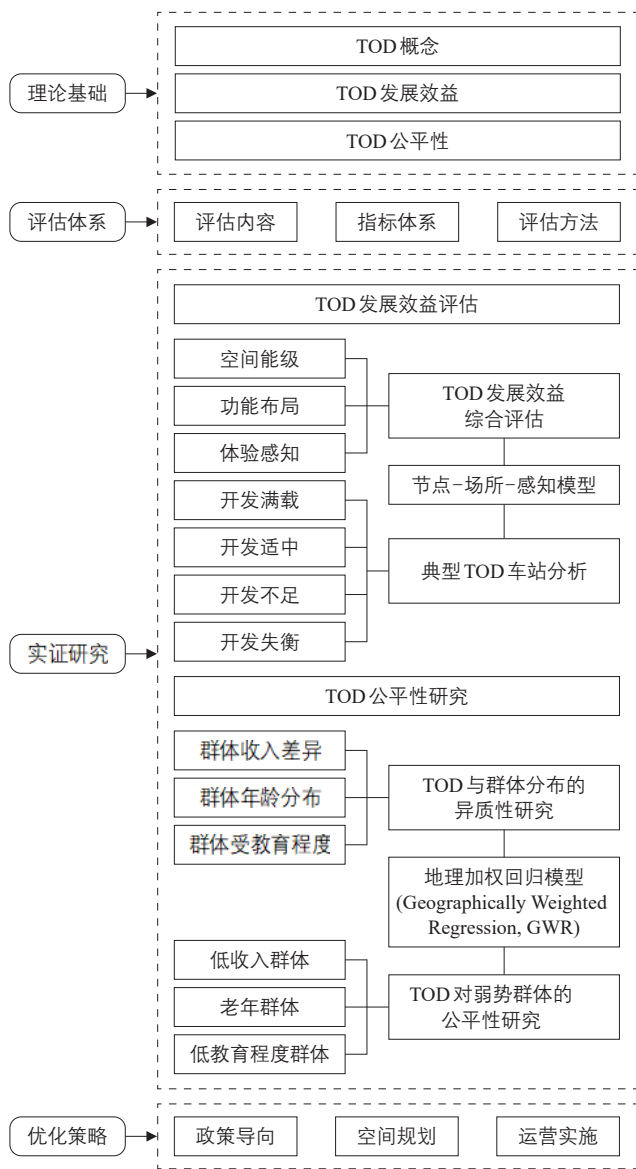


图2 研究框架

Fig.2 Research Framework

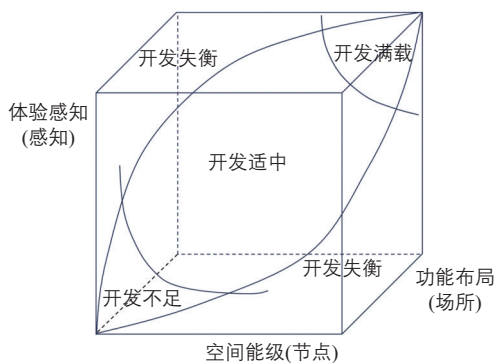


图3 节点-场所-感知模型

Fig.3 Node-Place-Perception model

Sandoval 等^[29]将洛杉矶的麦克阿瑟公园 TOD 与奥克兰的 Fruitvale 村 TOD 进行了比较,发现建立 TOD 社区可以充分整合文化、政治、金融和建筑等公共资源,从而增强低收入群体参与社区振兴的意愿;李彭^[30]通过使用多层级嵌套回归等方法对北京市 TOD 区域的绅士化现象进行量化,结合不同群体的覆盖情况对北京 TOD 的公平性进行了实证研究。徐晓燕^[31]通过信息熵模型测度住宅供应混合度以及设施的交通可达性,对南京的

TOD 公平程度进行了分析。总的来说,国内外针对 TOD 公平性的研究主要聚焦于住房公平性、交通可达性、设施供需匹配、就业提供以及弱势群体关怀等方面,通过相关指数和模型的定量分析或对政策实施进行定性研究,有针对性地提出优化措施和策略。

本文重点关注 TOD 对差异化群体的服务覆盖程度,包括不同收入水平、年龄以及受教育程度的群体,各群体的具体定义如表 3 所示。参考 TOD 车站类型与客流等级的对

表 2 TOD 发展效益评估体系

Tab.2 TOD development benefit evaluation system

维度	类别	指标	指标说明
空间能级(节点)	网络中心性	度中心性	反映车站与周边车站的邻接程度
		介数中心性	反映车站在线网拓扑中传递信息的能力
		接近中心性	反映车站在线网拓扑中的核心性
		特征向量中心性	综合反映车站在线网拓扑中的重要性
	30 min 可达车站数量	反映车站在轨道交通线网中的交通可达性	
	距城市(副)中心距离/km	各车站距城市(副)中心的最短距离	
	区位重要性	大型商圈数量/个	车站周边 1 km 范围内的大型商圈数量
		公园景点数量/个	车站周边 1 km 范围内的公园景点数量
		交通枢纽数量/个	车站周边 1 km 范围内的交通枢纽数量
		三甲医院数量/个	车站周边 1 km 范围内的三甲医院数量
高等院校数量/个		车站周边 1 km 范围内的高等院校数量	
功能布局(场所)	用地高效性	用地混合度	不同用地分类兴趣面(AOI)的混合熵
		功能混合度	不同功能分类兴趣点(POI)的混合熵
		容积率/%	车站周边 1 km 范围内建筑总面积占净用地面积的比例
		建筑覆盖率/%	车站周边 1 km 范围内建筑占地面积占总面积的比例
	功能多样性	用地比例/%	车站周边 1 km 范围内不同类型用地(商业、工业、居住、公共服务)的面积占总面积的比例
		公园绿地密度/(个·km ²)	车站周边 1 km 范围内公园绿地设施数量与总面积的比值
		公共服务设施密度/(个·km ²)	车站周边 1 km 范围内公共服务设施数量与总面积的比值
		就业岗位密度/(个·km ²)	车站周边 1 km 范围内就业岗位数量与总面积的比值
		商业商务设施密度/(个·km ²)	车站周边 1 km 范围内商业商务设施数量与总面积的比值
		居住密度/(个·km ²)	车站周边 1 km 范围内住宅设施数量与总面积的比值
观感友好性	步行友好度/%	车站周边 1 km 范围内街景图像中人行道像素点的比例	
	街道绿视率/%	车站周边 1 km 范围内街景图像中绿色植物像素点的比例	
	天空开敞度	车站周边 1 km 范围内街景图像中天空间面积与地面面积的比值	
体验感知(感知)	接驳便利性	车站出入口数量/个	轨道交通车站出入口设置的数量
		路网密度/(km·km ²)	车站周边 1 km 范围内的路网密度
	绿道密度/(km·km ²)	车站周边 1 km 范围内的绿道密度	
	公共汽车站密度/(个·km ²)	车站周边 1 km 范围内的公共汽车站密度	
	共享单车取还比	车站周边 1 km 范围内共享单车取用数量与还车数量的比值	

应关系梳理方法^[17]，建立弱势群体与TOD发展效益的对应关系表，辅助判断轨道交通车站建设的相对公平性，并结合回归分析模型探讨收入水平、年龄以及受教育程度与轨道交通车站的空间能级、功能布局 and 体验感知维度的相关性，为轨道交通TOD的科学规划以及实现公共利益和社会效益最大化提供参考。

根据ETOD理念，发展效益较好的TOD车站周边更应当配置保障性设施来容纳社会特殊群体，因此本文提出面向差异化群体的TOD公平性评估准则(见表4)，其中群体比例根据成都市现状情况总结得出。

表3 群体特征划分依据

Tab.3 Classification basis of group characteristics

差异化因子	差异化群体	具体定义
收入水平/ (元·月 ⁻¹)	低收入群体	<2 500
	中等收入群体	2 500~<30 000
	高收入群体	≥30 000
年龄/ 岁	未成年群体	<18
	成年群体	18~65
	老年群体	>65
受教育程度	低教育程度群体	高中及以下
	中等教育程度群体	专科
	高教育程度群体	本科及以上

表4 面向差异化群体的TOD公平性评估对应关系

Tab.4 Correspondence of TOD fairness evaluation for different groups

差异化群体		开发满载	开发适中	开发不足	空间能级 失衡	功能布局 失衡	体验感知 失衡
低收入群体 (<2 500元·月 ⁻¹)	多 (>60%)	绿色	绿色	黄色	黄色	黄色	黄色
	适中 (45%~60%)	绿色	黄色	绿色	黄色	黄色	黄色
	少 (<45%)	黄色	橙色	绿色	黄色	黄色	黄色
低教育程度群体 (高中及以下)	多 (>60%)	绿色	绿色	黄色	黄色	黄色	黄色
	适中 (45%~60%)	绿色	黄色	绿色	黄色	黄色	黄色
	少 (<45%)	黄色	橙色	绿色	黄色	黄色	黄色
老年群体 (>65岁)	多 (>3%)	绿色	绿色	黄色	黄色	黄色	黄色
	适中 (1%~3%)	绿色	黄色	绿色	黄色	黄色	黄色
	少 (<1%)	黄色	橙色	绿色	黄色	黄色	黄色

注：绿色、黄色、橙色分别代表相对公平、相对适中、相对不公平。

本文选用地 理 加 权 回 归 模 型 (Geographically Weighted Regression, GWR) 对差异化影响因子(收入水平、年龄和受教育程度)与TOD发展效益之间的相关关系进行分析，相比于普通最小二乘法(Ordinary Least Squares, OLS)，该模型能够为每一个地理要素建立回归方程，通过回归系数矩阵反映相关关系在空间上的非平稳性^[32]。假设有 n 个地理实体、 m 个影响因子，GWR 模型的计算公式为

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^m \beta_j(u_i, v_i) X_{ij} + \epsilon_i,$$

式中： Y_i 为第 i 个地理实体的表征值(即TOD效益指数)， $i=1, 2, \dots, n$ ； X_{ij} 为第 i 个地理实体第 j 个影响因子， $j=1, 2, \dots, m$ ； (u, v) 为地理实体的空间坐标； β 为空间地理位置函数，一般常用高斯(Gaussian)核函数； ϵ_i 为第 i 个地理实体的回归残差。

3 成都市TOD发展效益评估

3.1 效益基本情况

基于TOD发展效益评估体系，得出成都市中心城区279个轨道交通车站的TOD发展效益指数：空间能级指数、功能布局指数与体验感知指数(见图4)。

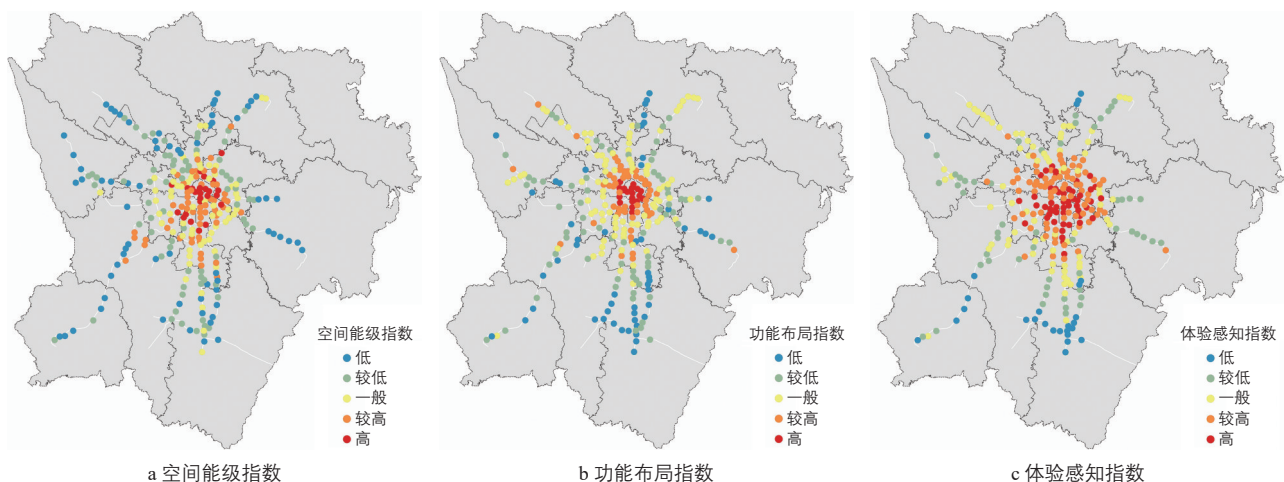


图4 成都市中心城区轨道交通车站TOD发展效益指数

Fig.4 TOD development benefit index of rail stations in Chengdu central area

成都市二环内的轨道交通车站3个维度的指数均较高，尤其是功能布局指数几乎都排在前列20%，这反映出车站周边的资源投放较为集中，且主要集中在核心主城区(即武侯区、青羊区、成华区、锦江区、金牛区和高新南区)，线路中后端车站的周边建成环境水平和土地开发效率随着与城市中心的距离增加而衰减。从空间能级指数来看，换乘车站在同线路车站中表现出较高的水平，这得益于它们拥有较高的网络度中心性和介数中心性，其交通供给水平和客流强度均超过一般车站。从体验感知指数来看，核心主城区的大部分轨道交通车站周边感官友好性和接驳便利性均较好，且有个别外围区域的車站，如世纪城站、簇桥站、龙泉驿站的感官价值高于周边车站，表明位于区域中心的轨道交通车站周边交通环境和街道空间品质具有显著优势。

3.2 轨道交通车站TOD分类

基于节点-场所-感知模型，得出成都市中心城区轨道交通TOD分类(见图5)。72%的轨道交通车站开发适中，仅有少部分开发满载或开发不足，这表明成都市轨道交通整体建设效果较好，轨道交通网络布局与城市建成环境基本匹配；开发失衡的车站以空间能级失衡为主，功能布局失衡和体验感知失衡的车站较少，说明成都市轨道交通车站的空间能级水平普遍低于功能布局水平与体验感知水平，即成都市的轨道交通网络建设水平普遍落后于其城市发展水平与资源投放效率，轨道交通网络仍有进一步加密调整的空间。

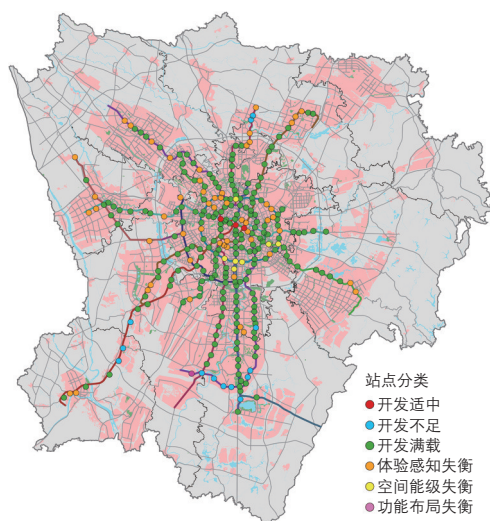


图5 成都市中心城区轨道交通车站TOD分类空间分布

Fig.5 Spatial distribution of TOD classification results of rail stations in Chengdu central area

从空间分布来看：1)开发满载车站位于老城区，分别为天府广场站、春熙路站与中医大省医院站，均为多线换乘车站，其度中心性分别为6，4，6，承担城市政治文化中心、商业中心与居住中心的职能，这些车站的空间能级水平、功能布局水平和体验感知水平均较高，其站域空间进一步开发的潜力较小。2)开发不足车站有15个，主要位于线路中后端，且其地理位置往往处于行政区域交界处，资源投放与建设相对不足，各方面可优化提升的潜力较大。3)功能布局失衡车站有8个，主要为核心主城区枢纽车站，包括火车南站、成都东客站、北站西二路站等，其空间能级水平均较高，相比之下功能布局 and 体验感知水平不足，需增加站域空间的配套设施资源供给，提高乘客的出行体

验。4)空间能级失衡车站较多,如龙泉驿站、黄田坝站、金融城站,均属于区域中心站,站域空间承担政治、文化、商贸等重要功能,但是交通便利性不足,近八成空间能级失衡型车站是非换乘车站,在未来的线网规划中可考虑增加新线换乘,提高互联互通水平。5)体验感知失衡车站仅有兰家沟站,说明成都市轨道交通车站周边的感官友好性较好,均能匹配车站所处区位,周边公共资源配置较为充分,街道品质与接驳便利性均达到合格水平。

4 成都市TOD公平性评估

4.1 基于差异化群体特征的公平性、异质性

基于2022年百度人口画像数据,结合表4的定义,本文得出如图6所示的差异化群体分布规律。差异化群体在中心城区的分布不均衡,总体比较分散,但也有部分聚集效应,且大部分聚集区靠近地铁车站,群体分布与轨道交通的关联性较高。

从收入水平来看,低收入群体主要聚集

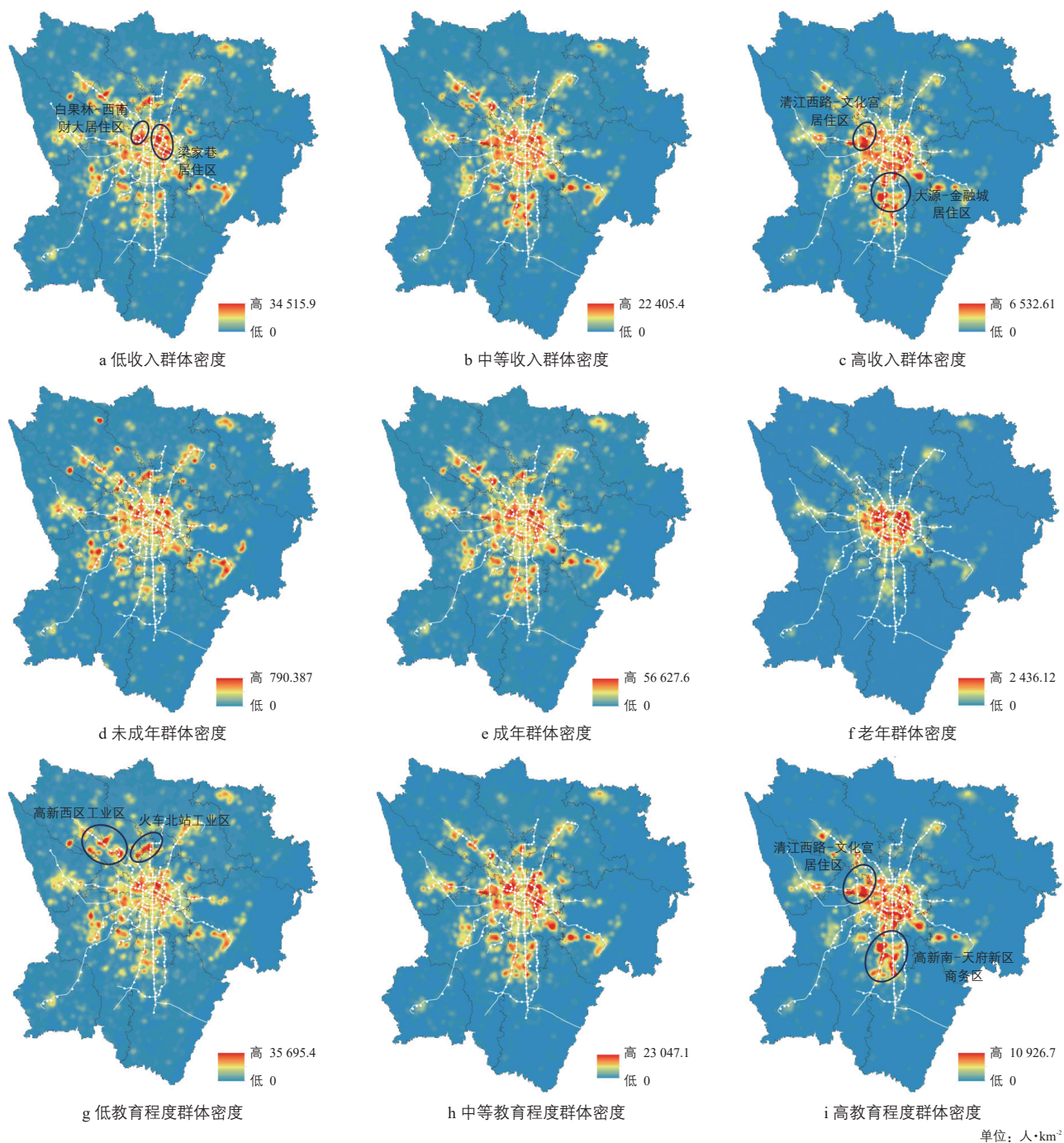


图6 差异化群体分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of differentiated social groups

在以青羊区地铁白果林站与西南财大站附近的二环内老小区，以及金牛区梁家巷站附近的一环路街区，以中低端服务业从业者为主(见图6a)；而高收入群体主要聚集在以青羊区地铁清江西路站与文化宫站附近，以及高新南区大源商圈和金融城商圈附近的街区，以中高端服务业从业者为主(见图6c)。从年龄来看，未成年和成年群体的分布无明显规律，但老年群体主要集中在二环内老街区(见图6f)，因该区域具备便利的生活基础设施。从受教育程度来看，低教育程度群体主要集中在工业发达的片区，典型区域如高新西区各工厂附近街区、火车北站附近区域(见图6g)；高教育程度群体分布规律与高收入群体基本吻合，但更集中在高新区与天府新区(见图6i)。

结合表4和群体分布情况，得出成都市中心城区TOD公平性评估结果(见图7)。成都市中心城区轨道交通车站对弱势群体覆盖的公平性情况较好，相对公平和相对适中的车站数量占87%，仅个别车站存在不公平现象。结合轨道交通车站TOD分类，发现开发满载车站(天府广场站、春熙路站和中医大省医院站)均为相对公平的车站，车站周边1 km范围内低教育程度群体和低收入群体比例均超过50%，老年群体比例超过3%，说明成都市土地资源开发最为集中的3个车站也同时实现了公共利益的均等化，能够为各阶层的群体提供便利的生活服务设施和交通出行服务；开发不足车站和功能布局失衡车站大部分为相对公平和相对适中的车站，车站周边弱势群体比例较低，没有出现资源匮乏与贫困集中的恶性循环问题；同样地，开发适中车站大多属于相对适中的车站，更加印证了成都市轨道交通建设在社会公平方面发挥的积极作用。

此外，相对不公平的车站主要分布在轨道交通线路末端以及高新南区，且处于不公平的两个极端。线路末端的车站大多属于空间能级失衡车站，位于各区域老城，相比成都市绕城高速公路以内区域，其资源开发与交通便利性均不足，聚集了大量低收入和低教育程度的群体(比例超过65%)，他们难以获取城市中心区丰富的公共服务，对城市发展建设的参与度与贡献值较低；高新南区的车站主要属于开发适中车站，且资源开发较为高效，包含交子商圈、大源商圈和天府三街商圈，车站周边住房溢价过高，对弱势群

体的包容性不足，低收入群体和低教育程度群体比例均低于45%，出现了一定的绅士化现象。

4.2 TOD服务弱势群体的公平性

将轨道交通车站1 km范围内弱势群体归一化比例与TOD发展效益指数进行相关性分析(见图8)，低收入群体比例和低教育程度群体比例与TOD发展效益指数呈负相关关系，而老年人比例与TOD发展效益指数呈正相关关系，这说明TOD的发展对具备劳动力但受教育程度较低的群体有轻微程度的居住排斥，而对已退休的老年群体存在一定程度的居住吸引，说明成都市TOD在对弱势群体的公平性保障方面仍有优化提升空间。

从TOD发展效益评估维度来看，体验感知维度的效益指数与弱势群体的相关性最强，功能布局维度的相关性次之，空间能级维度的效益指数与弱势群体的相关性最弱，这从侧面反映出以人的视角出发的微观层面设计与优化对于TOD公平性的促进效果最显著，例如增加骑行绿道和公共汽车接驳等措施，打造“最后一公里”高品质出行空间，可以有效提升周边低收入群体乘坐轨道交通的意愿；而宏观层面的战略性开发建设对于TOD公平性的促进作用较为微弱，因为轨道交通车站能级和功能的改善往往带动周边房价水平和消费水平的快速提升，弱势群体的参与能力随之被弱化。

为进一步探索TOD公平性与TOD发展

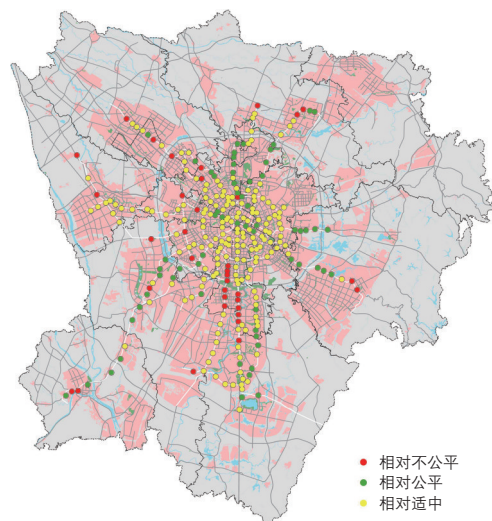


图7 成都市中心城区面向差异化群体的TOD公平性评估结果
Fig.7 Evaluation results of TOD fairness for different groups in Chengdu central area

效益之间关联关系的空间异质性，本文利用地理加权回归模型对轨道交通车站1 km范围内弱势群体比例与TOD发展效益之间的相关关系进行定量分析。模型采用高斯核函数和赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)，模型全局 $R^2=0.73$ ， $MSE=0.21$ ，各类群体的相关系数如图9所示。

从图9中可以发现，各类群体与TOD发展效益之间的相关关系在空间上的分布极不均衡，尤其是在个别站低收入群体与TOD发展效益呈现正相关关系。例如换乘车站神仙树站在TOD发展效益评估的3个维度上的相关性均大于0，而换乘车站武青南路站在TOD发展效益评估的3个维度上的相关性均小于0，这间接体现出低收入群体聚集在神仙树站比武青南路站对中心城区TOD整体效益的影响更小。为促进TOD的公平性，可适当增加保障性设施以引导低收入群体聚集在GWR系数大于0的轨道交通车站附近。低教育程度群体在不同车站与TOD发展效益评估的3个维度基本呈现负相关关

系，而老年群体在不同车站与TOD发展效益评估的3个维度均呈现正相关关系，这说明成都市在轨道交通TOD建设中考虑了老龄友好性，但对受教育程度不高的群体包容度不足。

5 优化策略

结合成都市轨道交通车站的TOD发展效益以及公平性评估结果，本文针对不同特征的典型车站提出优化策略。

1) 开发满载车站。

开发满载车站如天府广场站、春熙路站与中医大省医院站分布于城市中心区域，周边有文化象征性建筑和城市级商圈，且对弱势群体的包容度高，属于相对公平车站。根据地铁刷卡记录，3个车站2022年单日进站客流量分别达8万人次、12万人次和7万人次，出行需求量大。建议立足成都市历史文脉特征，以城市设计手段对站域空间进行微更新，调整交通设施容量以能够满足地区高

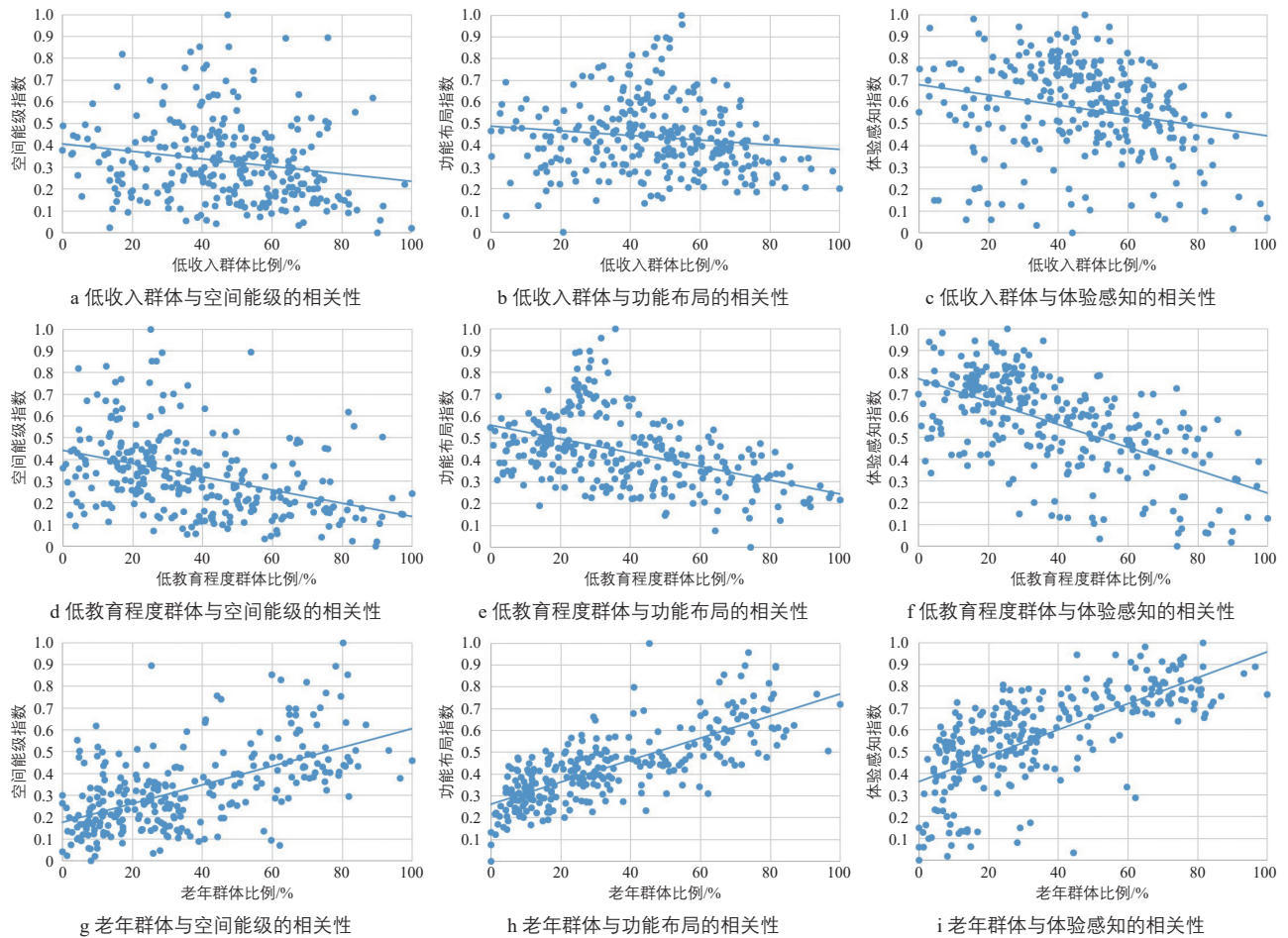


图8 轨道交通车站1 km范围内弱势群体比例与TOD发展效益指数相关性分析

Fig.8 Correlation analysis between the proportion of vulnerable groups and TOD development benefit index within 1 km of rail transit station

峰时段交通集散需求为宜，避免大规模的建设行为，维持现有开发水平和保障性设施，避免过度吸引客流造成进一步拥挤，同时，通过优化非机动车交接，提高城市非机动车系统与交通网络的微循环效率。

2) 开发适中车站。

开发适中车站数量较多，占比超七成，主要位于功能发展成熟、交通组织水平较高的城市中心与区域中心，所处空间涵盖城市

商圈、居住区、科研教学区及旅游景点等，交通运营能力与土地开发水平相匹配。以地铁1号线的天府三街站和天府五街站为例，其现状用地开发强度较高，紧邻大源商圈、天府软件园与银泰城、港汇天地等商圈，但车站周边公共基础设施和保障性住房欠缺，导致弱势群体比例过低，轨道交通对弱势群体覆盖的公平性不足。根据2022年单日进站刷卡记录，两个站日均进站客流量较高，

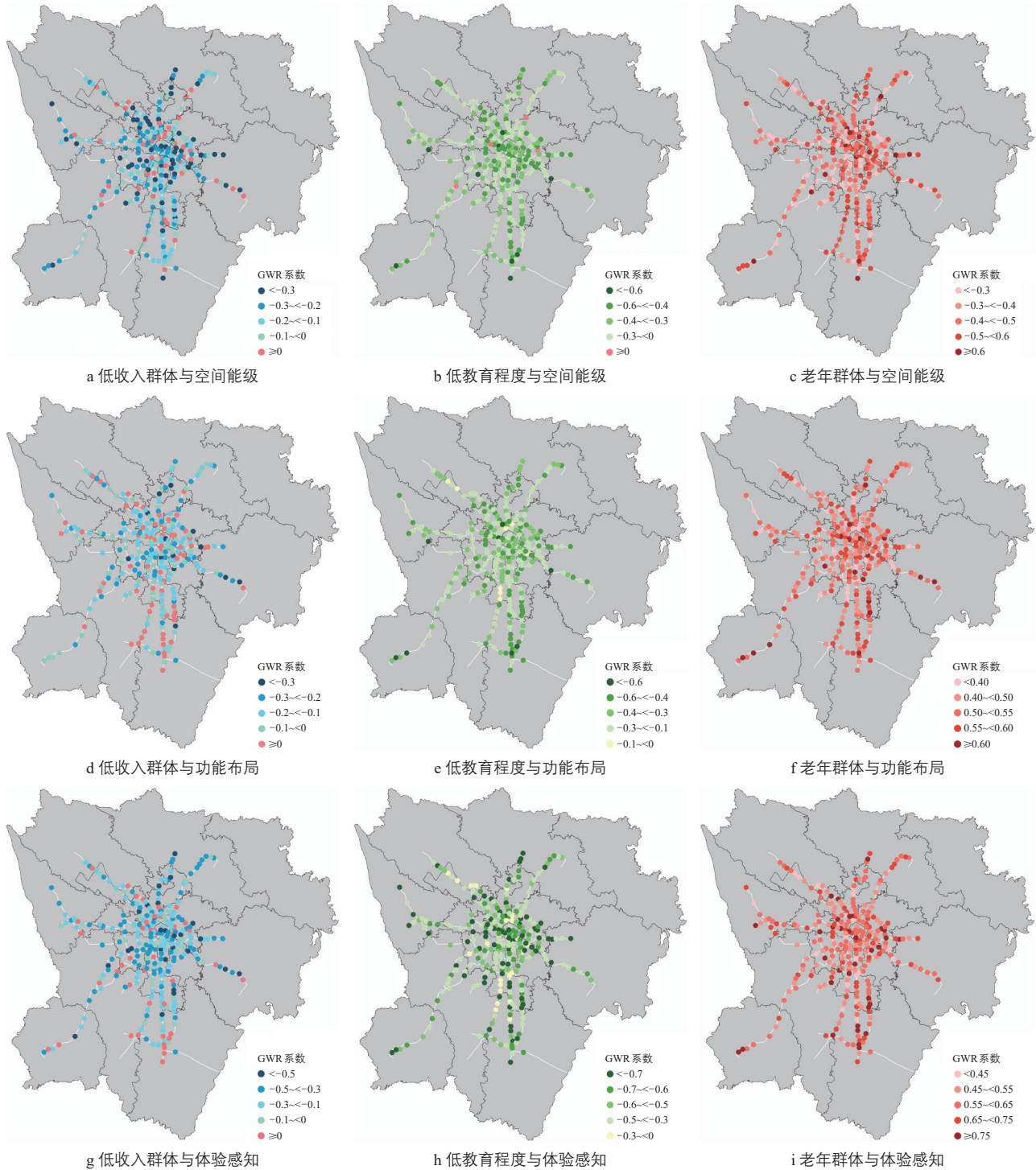


图9 GWR模型分析结果

Fig.9 Analysis results of GWR model

分别为9万人次和6万人次，但车站出入口数量不足(均只有4个)，且未与商务写字楼或商场地下直连。建议加快TOD站城一体化建设并促进新线开发，立足中央活力区的定位增补步行和骑行友好场所以及多样化住宅选择，提升区域整体的体验舒适性。

3) 开发不足车站。

开发不足站包括廖家湾站、新津站、兴隆湖站、三岔站等，这些车站大部分位于行政区边界，且只经过1条轨道交通线路，受轨道交通建设时序和城市建设滞后的影响，周边开发刚起步，客流活力不足，弱势群体比例也较少，TOD公平性适中；可利用当前轨道交通的可达性带动商业经济发展，并结合TOD功能定位合理设置开发目标(例如，龙灯山站将打造成为成都市新经济活力区，秦皇寺站紧临西部国际博览城，将打造天府新中心都市级商圈)，完善轨道交通车站周边商业配套设施建设以聚集人口，并与邻近车站联动开发，打造区域中心以提升站域经济价值。

4) 开发失衡车站。

开发失衡车站中1/3为相对不公平车站，其优化策略主要为加强互动协调，促进站域空间可持续发展。①空间能级失衡车站以龙泉驿站和黄田坝站为代表，分别位于地铁2号线与9号线末端，属于相对不公平车站，弱势群体比例过多，优化提升方向在于提高交通设施便捷性；在未来线路规划中考虑增加新线，或通过增加其他交通方式的接驳扩大轨道交通车站的覆盖范围，提升该区域的互联互通水平，同时增加商业配套和品质化住宅，提高高收入群体比例。②功能布局失衡车站以火车南站和成都东客站为代表，同属于成都市的两大铁路客运枢纽，且为两线换乘车站，公平性相对适中。根据地铁刷卡记录，两个车站日均进站客流量达8万人次与5万人次，通勤时段站内拥挤严重。火车南站紧邻凯德商圈和桐梓林片区，周边用地开发效率较高，优化策略以增加公共汽车、非机动车交通接驳为主，疏解人流压力，并可进一步增加公共服务设施配套，构建“15分钟生活圈”，促进职住平衡，在提高生活便捷性的同时减小交通压力。成都东客站周边商业用地与居住用地比例相对较低，站域空间的土地价值未能发挥相匹配的作用，亟待加强周边地区影响力，吸引业态向心聚集。③体验感知失衡车站仅有兰家沟

站，位于双流区地铁6号线末端，周边城市建设还在进行中，街道空间品质较差，低教育程度群体比例超70%。建议该区域在未来的规划建设中将商业、住宅开发与城市设计相结合，注重街区一体化设计，提高场所价值的同时增加体验舒适性；另外，可考虑整合车站周边旅游资源，开通至永安湖城市森林公园与毛家湾森林公园的快速公交接驳线路，从而有效提高车站客流吸引力和经济发展潜力。

6 结束语

随着超大城市治理难题的出现，交通与土地以及人之间的矛盾越来越显著，轨道交通TOD的建设成为城市更新与发展的重要路径。为综合评估轨道交通车站TOD发展效益以及对差异化群体服务的公平性，本文提出节点-场所-感知模型以及公平性评估准则，实现对站域空间客观要素价值与主观感知价值的融合统一；基于评估模型，将轨道交通车站划分为开发满载、开发适中、开发不足、开发失衡，分类探讨了其在公平性上的影响，针对性地制定了优化策略。

对成都市中心城区轨道交通车站进行案例分析，结果发现超七成车站为开发适中车站，且超八成车站TOD公平性评估结果较好，说明成都市轨道交通站域空间土地开发建设效率较高，整体体验舒适性也较高；优化提升的核心在于根据车站TOD分类挖掘站区发展潜力，提倡站域空间的微更新，丰富公共配套资源的供给，提升站域空间对各类群体的吸引力。

本文提出的TOD发展效益和公平性评估模型仍有可以优化的方向，未来考虑纳入更加细化的指标，例如土地开发成本、土地出让价值、住宅出售价格以及租赁价格等经济运行要素。同时，本文提出的评估方法具有普适性，未来可探究不同区域乃至不同城市间的轨道交通车站发展特征，为促进实现轨道交通与城市融合的高质量发展目标提供理论支撑。

注释：

Notes:

①指一个旧区从原本聚集低收入人群，到新后地价及租金上升，引来较高收入人群迁入，并取代原有低收入者。

参考文献:

References:

- [1] 刘玉亭, 王浚洋, 魏宗财. TOD导向下的城市轨道交通站点区用地绩效评价: 以广州若干地铁站区为例[J]. 规划师, 2024, 40(5): 51-57.
LIU Y T, WANG J F, WEI Z C. Land use performance evaluation of urban rail transit station zone under TOD guidance: a case study of several metro station zones in Guangzhou [J]. Planners, 2024, 40(5): 51-57.
- [2] 周敏, 王海明, 杨振珑, 等. 基于熵权-TOPSIS的成都市地铁TOD站点评价排序研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(4): 150-156.
ZHOU M, WANG H M, YANG Z L, et al. Evaluation ranking of Chengdu metro TOD stations based on entropy weight-TOPSIS[J]. Railway transport and economy, 2023, 45(4): 150-156.
- [3] 李继珍, 彭震宇, 王英. 山地城市轨道交通站点TOD效能评价: 以重庆市中心城区为例[J]. 城乡规划, 2023(5): 77-85.
LI J Z, PENG Z Y, WANG Y. TOD performance evaluation of rail transit stations in mountainous cities: a case study of Chongqing's downtown area[J]. Urban & rural planning, 2023(5): 77-85.
- [4] 周珂慧, 席广亮, 张振龙. 苏州历史城区轨道交通站域空间协同发展策略: 基于“节点-场所”模型实证[J]. 城市交通, 2023, 21(4): 32-41.
ZHOU K H, XI G L, ZHANG Z L. Coordinated development strategies of rail transit station domain space in Suzhou historic district: empirical research based on “node-place” model[J]. Urban transport of China, 2023, 21(4): 32-41.
- [5] 李佩叶, 葛幼松. 基于节点-场所模型的高铁站区域可持续发展评价: 以京沪高铁沿线车站为例[J]. 城市交通, 2022, 20(1): 59-66.
LI P Y, GE Y S. Evaluating sustainable development of high-speed railway station areas via node-place model: a case study of Beijing-Shanghai high-speed railway stations[J]. Urban transport of China, 2022, 20(1): 59-66.
- [6] 柴蕾, 陈澄静, 高枫, 等. 广州市老幼群体公共交通资源配置公平性研究[J]. 城市交通, 2024, 22(1): 42-52.
CHAI L, CHEN C J, GAO F, et al. Equity of public transportation resource allocation for the elderly and young groups in Guangzhou [J]. Urban transport of China, 2024, 22(1): 42-52.
- [7] 张莉杰, 董俊武, 王艳慧. 公共交通资源配置空间公平性评价及其影响机理分析: 以武汉市主城区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(4): 63-71.
ZHANG L J, DONG J W, WANG Y H. Spatial equity evaluation and influence mechanism analysis of public transportation resource allocation: a case study of the main urban area of Wuhan[J]. Geography and geo-information science, 2023, 39(4): 63-71.
- [8] 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 S C, ZHENG Y, CHENG L J, et al. Rail transit passenger fairness based on accessibility calculation of station connection[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(3): 1-10.
- [9] 罗旭, 万传风, 李欣, 等. 城市轨道交通公平性模型及应用[J]. 中国公路, 2022(15): 114-117.
- [10] 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 Q F, WANG Y W, DAI D H. An analysis of the impact of rail transit development on residents' activity opportunity in Shenzhen[J]. Modern urban research, 2021(4): 18-22.
- [11] BERTOLINI L. Nodes and places: complexities of railway station redevelopment[J]. European planning studies, 1996, 4(3): 331-345.
- [12] ZEMP S, STAUFFACHER M, LANG D J, et al. Classifying railway stations for strategic transport and land use planning: context matters[J]. Journal of transport geography, 2011, 19(4): 670-679.
- [13] CHORUS P, BERTOLINI L. An application of the node-place model to explore the spatial development dynamics of station areas in Tokyo[J]. Journal of transport & land use, 2011, 4(1): 45-58.
- [14] LI Z K, HAN Z X, XIN J L, et al. Transit oriented development among metro station ar-

- reas in Shanghai, China: variations, typology, optimization and implications for land use planning[J]. *Land use policy*, 2019, 82: 269–282.
- [15] YANG Y X, ZHONG C, GAO Q L. An extended node- place model for comparative studies of transit- oriented development[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2022, 113: 103514.
- [16] LYU G W, BERTOLINI L , PFEFFER K. Developing a TOD typology for Beijing metro station areas[J]. *Journal of transport geography*, 2016, 55: 40–50.
- [17] CAO Z J, ASAKURA Y, TAN Z B. Coordination between node, place, and ridership: comparing three transit operators in Tokyo [J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2020, 87: 102518.
- [18] 张志健, 高顺祥, 陈越, 等. 基于改进节点-场所模型的城市轨道交通TOD评估[J]. *交通运输研究*, 2022, 8(3): 143–153.
- ZHANG Z J, GAO S X, CHEN Y, et al. Evaluation of urban rail transit TOD based on enhanced node-place model[J]. *Transport research*, 2022, 8(3): 143–153.
- [19] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(7): 1225–1228.
- CHENG Q Y. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index [J]. *Systems engineering-theory & practice*, 2010, 30(7): 1225–1228.
- [20] MCDANIEL P R, REPETTI J R. Horizontal and vertical equity: the Musgrave Kaplow Exchange[J]. *Florida tax review*, 2023, 1: 607–622.
- [21] MOONEY G. And now for vertical equity? Some concerns arising from aboriginal health in Australia[J]. *Health economics*, 1996, 5(2): 99–103.
- [22] LIN J. Gentrification and transit in Northwest Chicago[J]. *Transportation quarterly*, 2002, 56(4): 175–191.
- [23] MCINTOSH J, TRUBKA R, NEWMAN P. Can value capture work in a car dependent city? Willingness to pay for transit access in Perth, Western Australia[J]. *Transportation research part A: policy and practice*, 2014, 67: 320–339.
- [24] The Center for Transit-Oriented Development. Mixed income housing near transit: increasing affordability with location efficiency[R]. Washington DC: The Center for Transit-Oriented Development, 2009.
- [25] CHAVA J, NEWMAN P. Stakeholder deliberation on developing affordable housing strategies: towards inclusive and sustainable Transit-Oriented Developments[J]. *Sustainability*, 2016, 8(10): 1024.
- [26] HERSEY J K, SPOTS M A. Promoting opportunity through equitable Transit-Oriented Development (eTOD): barriers and best practices for implementation[R]. Denver: Enterprise Community Partners, 2015.
- [27] United States Environmental Protection Agency. Creating equitable, healthy, and sustainable communities: strategies for advancing smart growth, environmental justice, and equitable development[R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2013.
- [28] DELMELLE E C, CASAS I. Evaluating the spatial equity of bus rapid transit-based accessibility patterns in a developing country: the case of Cali, Colombia[J]. *Transport policy*, 2012, 20: 36–46.
- [29] SANDOVAL G F. Making Transit-Oriented Development work in low- income Latino neighborhoods: a comparative case study of Boyle Heights, Los Angeles and Logan Heights, San Diego[R/OL]. (2016– 12– 01) [2024– 06– 10]. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/32147>.
- [30] 李彭. 基于公平性视角的城市轨道交通TOD模式研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LI P. Research on TOD mode of urban rail transit based on the perspective of fairness [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [31] 徐晓燕. 基于多源大数据的TOD绩效评价及其公平性研究: 以南京市为例[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- XU X Y. Measuring Transit-Oriented Development performance and social equality based on multi-source big data: taking Nanjing as an example[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [32] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships[M]. New York: Wiley, 2002.