

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.04.007

基于节点-场所-活力模型的城市轨道交通站域类型及其情景差异研究

王曲顺, 马壮林, 张翠华, 张生瑞

(长安大学运输工程学院, 西安 710064)

摘要: 针对传统节点-场所模型难以充分刻画轨道交通车站实际客流活力及其出行情景差异的问题, 引入活力维度构建节点-场所-活力模型, 用于识别城市轨道交通站域类型及其情景差异。以西安市 211 座轨道交通车站为研究对象, 综合轨道交通网络拓扑结构、车站设施供给、接驳交通、建成环境、人口活动、兴趣点(point of interest, POI)功能设施及小时级起讫点(origin-destination, OD)客流等多源数据, 构建涵盖节点、场所和活力三维度的评价指标体系, 采用组合赋权方法确定指标权重, 并利用高斯混合模型识别工作日和国庆长假情景下的站域类型, 分析不同情景下站域类型的转换特征。结果表明: 西安市轨道交通车站节点、场所和活力得分总体呈现“中心城区高、外围线路低”的空间格局, 国庆长假情景下部分车站活力集聚程度明显增强; 站域可划分为枢纽综合型、站城协调型、活力响应型、场所承载型和基础培育型 5 类, 其空间分布呈现“中心集聚—外围分异”的圈层特征; 工作日与国庆长假情景下站域类型整体保持稳定, 211 座车站中有 192 个站域类型不变, 占比 91.00%, 19 座车站发生转换, 占比 9.00%, 站域类型转换主要发生在场所承载型与基础培育型之间, 并主要分布于二环以外区域。研究结果可为轨道交通站域功能优化、外围车站培育、公共交通导向开发(transit-oriented development, TOD)模式下的差异化建设和精细化运营管理提供科学依据。

关键词: 城市轨道交通; 节点-场所-活力模型; 站域类型; 情景差异; 高斯混合模型

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)04-0059-14

Urban Rail Transit Station-area Types and Scenario Differences Based on the Node-Place-Vitality Model

Wang Qushun, Ma Zhuanglin, Zhang Cuihua, Zhang Shengrui

(School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064)

Abstract: To address the limitation of the traditional Node-Place model in capturing actual passenger-flow vitality and its variation across travel scenarios, this study introduces a vitality dimension and develops a Node-lace-vitality model to identify urban rail transit station-area types and examine their differences across travel scenarios. Taking 211 urban rail transit stations in Xi'an as the sample, this study integrates multi-source data, including rail transit network topology, station facilities, feeder transport services, built environment characteristics, population activities, point of interest (POI) functional facilities, and hourly origin-destination (OD) ridership. An evaluation indicator system covering the three dimensions of node, place, and vitality is established. A combined weighting method is used to determine indicator weights, and a Gaussian mixture model is applied to identify station-area types under workday and National Day holiday scenarios. The transition characteristics of station-area

收稿日期: 2026-05-14 修回日期: 2026-06-25

第一作者: 王曲顺, 男, 博士研究生, 从事城市轨道交通站域空间结构与客流特征研究, 2022034006@chd.edu.cn

通信作者: 马壮林, 男, 博士, 教授, 从事交通规划, 出行行为与城市轨道交通研究, zhuanglinma@chd.edu.cn

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金(25YJAZH122); 长安大学研究生科研创新实践(300103267091)

引用格式: 王曲顺, 马壮林, 张翠华, 等. 基于节点-场所-活力模型的城市轨道交通站域类型及其情景差异研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(4): 59-72.

types across different scenarios are then analyzed. The results show that the node, place, and vitality scores of Xi'an rail transit stations generally exhibit a spatial pattern of "high values in the central urban area and low values along peripheral lines". Under the National Day holiday scenario, some stations show a significant increase in passenger flow vitality. The station areas can be classified into five types: hub-integrated stations, station-city coordinated stations, vitality-responsive stations, place-supporting stations, and basic-cultivation stations. Their spatial distribution presents a clear concentric pattern characterized by "central agglomeration and peripheral differentiation". Station-area types remain generally stable between workday and holiday scenarios. Among the 211 stations, 192 stations retain the same type, accounting for 91.00%, while 19 stations experience type transitions, accounting for 9.00%. These transitions mainly occur between place-supporting stations and basic-cultivation stations, and are primarily distributed outside the Second Ring Road. The findings provide a scientific basis for station-area functional optimization, peripheral station cultivation, differentiated development under the Transit-Oriented Development (TOD) framework, and refined rail transit operations management.

Keywords: urban rail transit; node-place-vitality model; station-area types; scenario-based differences; Gaussian mixture model

城市轨道交通系统是支撑城市空间结构优化、公共交通出行组织和站域功能集聚的重要基础设施^[1]。随着我国城市轨道交通网络不断完善,轨道交通车站已不再只是单一的交通换乘节点,而是逐渐演化为承载城市功能组织、人口活动集聚和公共服务配置的重要空间单元^[2]。受网络区位、土地利用结构、开发强度及居民活动节律等因素影响,不同站域在交通功能、空间功能与活动活力方面呈现出显著差异,并进一步表现出明显的时间变化特征^[3-5]。因此,如何准确识别城市轨道交通站域类型,揭示不同类型站域的情景差异及其形成机制,已成为城市交通规划、公共交通导向开发(transit-oriented development, TOD)和站域精细化治理中的重要问题。

城市轨道交通站域类型的形成,不仅取决于车站自身的交通衔接能力,也受到周边土地利用、功能配置和活动强度的共同影响。节点-场所(node-place, NP)模型从交通节点功能和城市空间场所功能两个维度刻画城市轨道交通站域特征,已成为城市轨道交通站域评价、功能分类及协调发展分析中的重要分析框架。Bertolini 最早提出 NP 模型时,节点维度主要从列车可达性、公共交通可达性、小汽车可达性和自行车可达性等方面表征车站的交通连接能力,场所维度则主要通过居住人口、就业岗位和土地利用混合度等指标反映站域的城市功能承载水平^[3]。

随着城市轨道交通网络结构日益复杂、站域空间功能持续复合,后续研究不断拓展和细化 NP 模型的指标体系。在节点维度,相关研究逐步引入线路数量^[6-7]、换乘条件^[7-8]、列车服务水平^[4,8]、基础设施供给^[4,9]和公交接驳条件^[7,10]等指标,刻画站域交通服务水平和多方式衔接能力。此外,部分研究从复杂网络视角出

发,采用度中心性、介数中心性、紧密度中心性等指标衡量车站在网络中的结构地位、可达水平和中介连接能力^[7,11-12]。然而,现有节点维度研究多关注车站在整体网络中的中心性水平,对轨道交通网络内部的社团结构、功能分区及车站在不同社团之间的连接作用关注不足,难以揭示车站在网络分区组织、跨组团联系和结构耦合中的差异。在场所维度,研究指标进一步拓展至开发强度^[13-14]、兴趣点(point of interest, POI)设施密度^[15-16]和道路网络条件^[11]等,反映站域空间开发、功能集聚、土地利用复合和空间承载特征。此外,部分研究由早期采用居住人口数量等规模型指标,逐渐转向居住人口密度等强度型指标^[9,13],以增强不同站域之间的可比性。但总体来看,既有研究对就业人口密度等反映日间活动集聚和就业岗位承载能力的指标考虑仍显不足,难以充分刻画站域功能组织对通勤活动、日间活动强度和客流活力的支撑作用。

在指标体系不断拓展的基础上,已有研究进一步突破传统 NP 模型的二维框架,通过引入新的评价维度提升模型对城市轨道交通站域复杂属性和多维发展状态的解释能力。相关研究在节点和场所维度之外,引入设计品质^[15]、步行环境^[4]、空间品质^[17]、系统支撑^[18]、功能组合^[9]和空间联系^[19]等因素,形成“节点-场所-扩展”模型。然而,这些研究多侧重建成环境、空间品质、功能组织和外部联系等相对静态的空间条件,对车站实际使用状态、活动强度及其时间变化特征关注不足。为弥补这一不足,部分学者开始将客流表现纳入 NP 模型,采用进出站量、客流规模或客流强度等指标反映车站实际使用水平^[7,20]。但既有研究对客流的刻画仍多停留在总量或平均规模统计层面,较少关注客流在不同时段和不同出行情景下的相对使

用强度、高峰集中程度、全天持续性及方向差异,难以揭示站域活力在不同出行情景下的差异特征。

在站域类型识别方面,相关方法也经历了由经验判断和规则划分向数据驱动建模的转变。早期 NP 模型主要依据节点值与场所值的相对大小,以及车站在二维或三维坐标系中的位置进行类型判断^[10, 16-17],能够直观识别站域的均衡或失衡状态,但分类边界往往依赖人为阈值设定,类型划分具有一定的主观性。为提高分类结果的客观性,相关研究开始引入 K-means 聚类^[9]和层次聚类^[21]等方法,对轨道交通站域进行更精细的类型识别。这些方法在一定程度上提高了分类的客观性,但无论是基于阈值或坐标系的硬划分,还是基于 K-means 等传统聚类的方法,通常假设类别边界相对清晰,难以刻画车站功能混合和发展状态连续过渡的现实特征。为解决这一局限,部分研究引入高斯混合模型(gaussian mixture model, GMM)等概率聚类方法开展车站类型划分^[22-23]。与传统硬聚类相比,概率聚类能够以类别隶属概率刻画站域类型边界的模糊性和连续过渡特征,为复杂站域类型识别提供了新的方法支撑。

综上,现有研究为城市轨道交通站域评价和类型识别提供了重要理论基础和方法支撑,但在以下 4 个方面仍存在进一步深化空间:①以往节点维度研究多从网络中心性角度刻画车站结构地位,对轨道交通网络内部社团结构及车站跨社团连接关系关注不足,难以识别车站在网络分区组织和组团间联系中的差异化作用;②虽然场所维度研究已关注居住人口密度等强度型指标,但对就业人口密度等能够反映日间活动集聚和就业岗位承载能力的指标考虑不足,难以充分揭示站域功能组织对通勤出行、职住联系的支撑作用;③现有的活动维度指标多侧重于反映车站客流总量或平均规模,对车站作为出发地和目的地的相对使用强度、高峰时段客流集中程度以及全天活力持续状态关注不足,难以有效区分不同车站在通勤、休闲、旅游等出行情景下的使用差异及其时间变化特征;④既有站域类型识别方法多采用坐标系划分、阈值判定或 K-means 等硬划分方法,通常假设站域类型边界清晰,难以反映车站功能属性的混合性、类型边界的模糊性以及不同情景下类型转换的概率特征。

基于此,本文以西安市轨道交通车站为研究对象,构建节点-场所-活力(node-place-vitality, NPV)模型,综合轨道交通网络拓扑结构与车站属性、车站设施供

给、接驳供给能力、开发强度、活动承载、功能设施集聚、空间联通性、客流规模强度、高峰集聚强度和空间持续性等多维度指标,分别刻画工作日和节假日情景下车站的节点、场所与活力特征,并采用 GMM 聚类方法识别不同出行情景下的站域类型,分析站域类型在工作日与节假日之间的转换规律。本文旨在揭示城市轨道交通站域类型差异及其在不同出行情景下的转换特征,为城市轨道交通站域功能优化、TOD 精细化开发和运营管理提供参考。

1 研究区域与数据处理

1.1 研究区域

西安市是陕西省省会,也是西北地区轨道交通网络建设较为完善的特大城市。随着城市空间结构不断拓展,西安市轨道交通逐渐形成了覆盖主城区、联系外围组团、支撑多中心发展的网络格局。截至 2024 年 10 月底,西安市轨道交通已开通运营线路 10 条,运营里程 346.04 km,共设车站 211 座,其中换乘站 20 座^[24],线路网络呈现出“棋盘+放射”相结合的空间形态。

西安市轨道交通车站数量较多、空间分布范围较广,车站周边用地功能和客流活动特征存在一定差异,能够较好反映特大城市轨道交通车站不同区位和功能条件下的分异特征。因此,选取西安市轨道交通车站作为研究对象,研究区域及轨道交通线路空间分布如图 1 所示。

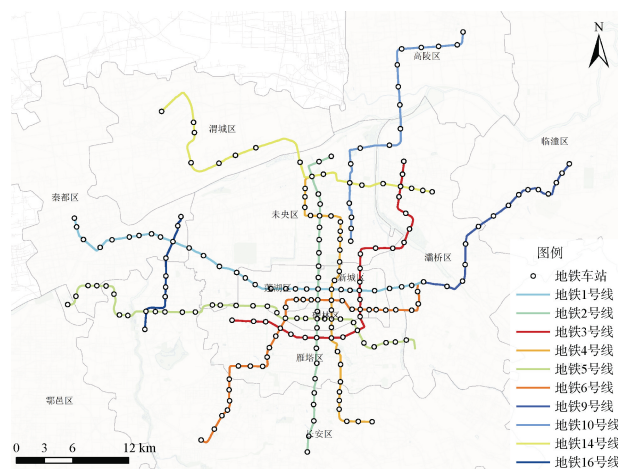


图 1 2024 年 10 月西安市轨道交通网络

Figure 1 Xi'an rail transit network in October 2024

1.2 数据收集与处理

为刻画城市轨道交通车站不同情景下的节点、场所与活力特征,本文以西安市轨道交通车站为研究

对象,并以车站周边800 m服务范围作为车站分析单元^[22,25]。在数据组织上,将城市轨道交通网络结构、车站设施供给、周边建成环境和客流时序变化统一到车站尺度,为后续NPV指标体系构建和站域类型识别提供数据基础。为保证不同来源数据之间的可比性,除客流数据按工作日和节假日分别统计外,其他静态空间环境数据均选取2024年可获取的数据。

1) 轨道交通客流起讫点(origin-destination, OD)数据。客流OD数据来源于西安市轨道交通集团有限公司,为刻画不同出行情景下车站客流活力差异,本文分别选取工作日和节假日两类客流样本。其中,工作日样本包括2024年9月26—27日、9月29—30日和10月8—12日共9个正常工作日;节假日样本包括2024年10月1—7日国庆假期共7 d,用于表征典型节假日旅游出行情景下的轨道交通客流特征。客流数据为小时级OD数据,观测时段为每日6:00~24:00,该数据能够反映不同情景下车站客流的变化过程,是本文识别车站活力的基础数据。

2) 轨道交通网络与车站属性数据。轨道交通线路、车站位置、站点连接关系和换乘站信息主要依据西安市轨道交通线网资料整理获得。本文将轨道交通车站抽象为网络节点,将相邻车站之间的区间连接抽象为网络边,构建城市轨道交通拓朴网络。同时,结合车站出入口数量、换乘属性、线路归属等信息,整理车站层面的基础属性数据,用于表征车站自身服务条件和网络联系特征。

3) 接驳交通与道路网络数据。公交站点、公交线路、道路网络和停车设施等数据主要通过高德地图开放平台接口获取^[26]。本文对获取的原始数据进行坐标转换、重复记录剔除和空间位置校正。该类数据主要用于反映车站周边公共交通接驳、小汽车停车供给和道路空间条件。

4) 土地利用与建筑环境数据。土地利用数据来源于北京大学团队构建的中国城市土地利用时间序列数据集^[27],建筑物数据来源于百度地图开发者平台。该类数据主要用于反映车站周边土地开发和空间建设状况。

5) 人口分布数据。人口数据基于中国联通手机信令数据估算获得,并根据驻留时段区分居住人口和就业人口。其中,夜间22:00至次日08:00的稳定驻留人口用于表征居住人口,日间09:00至17:00的稳定驻留人口用于表征就业人口;有效居住地或就业地的

判定标准为当月驻留天数不少于10 d^[28]。该数据主要用于反映车站服务范围内的人口活动基础。

6) POI功能设施数据。POI数据通过高德地图开放平台接口获取,原始数据涵盖23个大类、267个中类和869个小类,共计约57.2万条记录。结合车站功能识别需要,本文对原始POI数据进行去重、异常点剔除和类别整合,参照现有研究^[22],将其归并为居住生活、企业办公、购物餐饮、文化体育、旅游观光和公共设施等类型。该数据主要用于反映车站周边功能设施分布和城市活动承载条件。

2 研究方法

2.1 节点-场所模型

城市轨道交通车站具有交通节点和城市场所双重属性,标准的NP模型通过同时考察车站的节点价值与场所价值,揭示轨道交通供给与站域空间开发之间的匹配关系,其常见划分包含平衡型、压力型、从属型、失衡场所型和失衡节点型^[29],如图2所示。

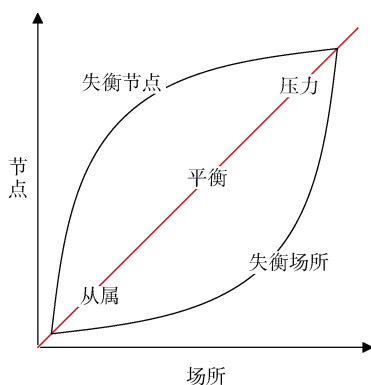


图2 节点-场所模型

Figure 2 Node-Place model

NP模型能够较好刻画轨道交通车站与周边土地利用之间的静态协调关系,但对车站实际客流活动及其时间变化考虑不足。对于同一车站而言,工作日和节假日可能具有不同的客流强度和活动节奏,仅依靠节点和场所两个维度难以充分解释这种差异。

2.2 节点-场所-活力模型构建

为进一步刻画轨道交通车站不同出行情景下的实际使用状态,本文在NP模型基础上引入活力维度,构建NPV模型。该模型将车站交通连接能力、站域空间承载基础和实际客流活动统一纳入分析框架,用于识别不同车站在静态条件和动态使用水平之间的组合特征。

与节点和场所维度相比,活力维度具有更强的情景依赖性和时间波动性。轨道交通网络结构、站域土地利用和建成环境特征在短期内相对稳定,因此节点值和场所值主要表征车站的静态属性;而客流活动受通勤出行、休闲娱乐活动、节假日出行需求等因素影响,通常会在工作日与节假日等不同出行情景之间发生显著变化。因此,本文将活力值作为动态属性进行刻画,揭示不同站域在实际使用状态上的情景差异。设出行情景包含工作日和节假日,则车站的节点-场所-活力状态可表示为

$$\mathbf{Z}_{i,s} = (F_i^N, F_i^P, F_{i,s}^V) \quad (1)$$

式中, s 表示不同出行情景,分为工作日和节假日; $\mathbf{Z}_{i,s}$ 为第 i 个车站在情景 s 下的聚类特征向量; F_i^N 、 F_i^P 和 $F_{i,s}^V$ 分别表示第 i 个车站的节点值、场所值和活力值。

2.3 指标体系构建

2.3.1 指标选取

本文基于 NPV 模型构建站域类型识别指标体系。其中,节点维度主要表征车站在轨道交通网络中的结构连接能力、换乘服务水平及多方式接驳条件;场所维度主要表征车站周边地区的空间开发强度、功能设施集聚水平和城市活动承载能力;活力维度主要表征车站客流活动的规模强度、高峰客流集中程度及时间分布特征。具体指标如表 1 所示。

表 1 NPV 模型指标体系

Table 1 Indicator system of the NPV model

维度	准则层	指标名称	编码	指标定义
节点	轨道交通网络拓扑结构与车站属性	度中心性	N1	基于无向无权轨道交通网络计算车站度中心性,反映车站与相邻车站的直接连接能力。
		介数中心性	N2	基于无向无权轨道交通网络计算车站介数中心性,反映车站在网络最短路径中的中介作用和客流转换潜力。
		紧密度中心性	N3	基于无向无权轨道交通网络计算车站紧密度中心性,反映车站到达网络中其他车站的整体便利程度。
		特征向量中心性	N4	基于无向无权轨道交通网络计算车站特征向量中心性,反映车站与高重要性车站相连接所形成的网络核心地位和结构影响力。
		社团内核心性	N5	基于轨道交通网络社团划分结果,计算车站与所属社团内部其他车站的相对连接水平,反映车站在所属组团内部的中心程度。
		跨社团连接性	N6	基于车站连接关系在不同社团之间的分布情况计算,反映车站连接不同组团的能力。
		换乘站标识	N7	换乘站赋值为 1,非换乘站赋值为 0,反映车站是否具备轨道交通换乘功能。
	车站设施供给	车站出入口个数	N8	反映车站与周边城市空间之间的衔接能力和进出站服务能力。
	接驳供给能力	接驳公交车站数量	N9	车站服务范围内公交车站数量,反映轨道交通与常规公交系统之间的空间接驳条件。
		接驳公交线路数	N10	车站服务范围内公交线路数量,反映轨道交通可衔接的公交网络覆盖水平。
		停车位数量	N11	车站服务范围内停车位数量,反映车站周边小汽车接驳和停车供给水平。
场所	开发强度	容积率	P1	车站服务范围内建筑总面积与净用地面积之比,反映站域土地开发强度和建设集聚水平。
		土地利用混合度	P2	土地利用混合熵,反映站域土地利用功能的多样化和混合程度。
	活动承载	居住人口密度	P3	车站服务范围内居住人口数量与服务范围面积之比,反映人口承载水平和潜在出行需求。
		就业人口密度	P4	车站服务范围内就业人口数量与服务范围面积之比,反映就业岗位集聚水平。
	功能设施集聚	居住生活类 POI 密度	P5	车站服务范围内居住生活类 POI 数量与服务范围面积之比,反映居住功能集聚水平。
		企业办公类 POI 密度	P6	车站服务范围内企业办公类 POI 数量与服务范围面积之比,反映办公就业集聚水平。
		购物餐饮类 POI 密度	P7	车站服务范围内购物餐饮类 POI 数量与服务范围面积之比,反映商业消费和日常服务功能集聚水平。
		文化体育类 POI 密度	P8	车站服务范围内文化体育类 POI 数量与服务范围面积之比,反映文化休闲与体育活动设施供给水平。
		旅游观光类 POI 密度	P9	车站服务范围内旅游观光类 POI 数量与服务范围面积之比,反映旅游休闲吸引能力。
		公共设施类 POI 密度	P10	车站服务范围内公共设施类 POI 数量与服务范围面积之比,反映公共服务设施供给水平。
	空间连通性	路网密度	P11	车站服务范围内道路总长度与服务范围面积之比,反映站域道路网络覆盖水平。
		道路交叉口密度	P12	车站服务范围内道路交叉口数量与服务范围面积之比,反映站域街道网络细密程度。
活力	客流规模强度	日均进站强度	V1	车站日均进站客流与线网日均进站客流之比,反映车站作为出发地的客流使用强度。
		日均出站强度	V2	车站日均出站客流与线网日均出站客流之比,反映车站作为目的地的客流使用强度。

续表

维度	准则层	指标名称	编码	指标定义
活力	高峰客流集中程度	进站客流高峰小时系数	V3	车站高峰小时进站客流与车站全日进站客流之比,反映车站进站客流在高峰小时内的集中程度。
		出站客流高峰小时系数	V4	车站高峰小时出站客流与车站全日出站客流之比,反映车站出站客流在高峰小时内的集中程度。
	时间持续性	高峰持续时间	V5	车站小时客流持续高于设定阈值的时间长度,反映车站客流高强度状态的持续程度。
		客流均衡度	V6	基于基尼系数计算小时客流分布的均衡性,反映车站全天客流分布的均衡性和活力持续性。
		夜间客流占比	V7	夜间时段客流量占全天总客流量的比例,反映车站夜间活动水平和延时活力特征。

为明确指标的计算方法,本文在上述指标体系的基础上,对部分计算过程相对复杂、具有综合性或需要进一步界定的指标进一步说明。

社团内核心性指标借鉴复杂网络社团角色识别中的社团内度标准化思想构建^[30],用于反映车站在其所属社团内部的相对核心程度,计算公式为

$$C_i^{\text{in}} = \frac{d_{i,r_i} - \bar{d}_{r_i}}{\sigma_{d,r_i}} \quad (2)$$

式中, C_i^{in} 为车站 i 的社团内核心性值, C_i^{in} 越大表明该车站在其组团内部核心地位越突出; d_{i,r_i} 为车站 i 与所属社团 r_i 内其他车站的连接数; $\bar{d}_{r_i}$ 为社团 r_i 内所有车站的社团内连接数平均值; σ_{d,r_i} 为社团 r_i 内车站社团内连接数的标准差。

跨社团连接性指标借鉴复杂网络节点角色识别中的参与系数思想构建的指标^[30],用于反映车站连接不同社团的能力,计算公式为

$$C_i^{\text{out}} = 1 - \sum_{r=1}^R \left(\frac{d_{i,r}}{d_i} \right)^2 \quad (3)$$

式中, C_i^{out} 为车站 i 的跨社团连接性值, C_i^{out} 越大表明该车站的跨组团联系能力越强; R 为城市轨道交通网络划分得到的社团总数; d_i 为车站 i 的总连接数; $d_{i,r}$ 为车站 i 与第 r 个社团内车站的连接数。

土地利用混合度用于衡量车站服务范围内不同用地功能的复合程度。参考既有研究^[22],采用土地利用混合熵进行计算,计算公式为

$$U_i = - \frac{\sum_{q=1}^Q \theta_{i,q} \ln \theta_{i,q}}{\ln Q} \quad (4)$$

式中, U_i 为车站 i 的土地利用混合度; Q 为用地类型总数; $\theta_{i,q}$ 为车站 i 服务范围内第 q 类用地面积占总面积的比例。

时间持续性指标用于刻画车站客流活力在全天运

营时段内的延续状态,主要包括高峰持续时间、客流均衡度和夜间客流占比。

高峰持续时间为本文基于小时级客流序列构建的时间持续性指标,用于衡量车站客流维持在较高水平状态的时间长度,计算公式为

$$D_{i,s} = \sum_{t=1}^T I(v_{i,t,s} \geq v_{i,s}^*) \quad (5)$$

式中, $D_{i,s}$ 为车站 i 在情景 s 下的高峰持续时间; T 为城市轨道交通车站全天运营小时数; $v_{i,t,s}$ 为车站 i 在情景 s 下第 t 个小时的客流量; $v_{i,s}^*$ 为车站 i 在情景 s 下的高峰客流判定阈值,参考既有研究^[31],本文取各车站在对应情景下小时客流序列的 80% 分位数作为高峰阈值; $I(\cdot)$ 为示性函数,当括号内条件成立时取值为 1,否则取值为 0。

客流均衡度为本文基于小时级客流序列并借鉴基尼系数思想构建的活力时间分布指标^[32],用于衡量车站客流在全天不同时段内分布的均衡程度,计算公式为

$$E_{i,s} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^T |v_{i,t,s} - v_{i,u,s}|}{2T^2 \bar{v}_{i,s}} \quad (6)$$

式中, $E_{i,s}$ 为车站 i 在情景 s 下的客流均衡度; $\bar{v}_{i,s}$ 为车站 i 在情景 s 下的小时平均客流量。

夜间客流占比为本文结合城市夜间活动特征和轨道交通运营时段构建的活力延时性指标,用于反映车站夜间时段的活动水平,计算公式为

$$L_{i,s} = \frac{\sum_{t \in T_n} v_{i,t,s}}{\sum_{t=1}^T v_{i,t,s}} \quad (7)$$

式中, $L_{i,s}$ 为车站 i 在情景 s 下的夜间客流占比; T_n 为城市轨道交通车站夜间运营时段,参考既有研究^[33],本文将 21:00 至城市轨道交通车站运营结束界定为夜间运营时段。

2.3.2 指标无量纲化处理

本文构建的各指标在量纲、数量级和取值范围上存在明显差异,为提高指标间的可比性,采用极差标准化方法对原始指标进行无量纲化处理,本文构建的指标均为正向指标,其标准化公式为

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (8)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个车站第 j 个指标的原始值; X'_{ij} 为无量纲化处理后的指标值; $\max(X_j)$ 和 $\min(X_j)$ 分别为第 j 个指标在所有车站中的最大值和最小值。

2.3.3 指标权重确定

为合理刻画 NPV 模型中不同指标对车站综合发展水平的相对影响,并兼顾专家经验判断与样本数据信息差异,本文采用直觉模糊层次分析法(intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process, IFAHP)与熵权法相结合的方式确定指标权重^[34-35],进一步引入博弈论组合赋权模型得到最终综合权重,即

$$w = \alpha_1 w^{(1)} + \alpha_2 w^{(2)} \quad (9)$$

式中, w 为综合权重向量; $w^{(1)}$ 为 IFAHP 得到的主观权重向量; $w^{(2)}$ 为熵权法得到的客观权重向量; α_1 和 α_2 分别为两类权重的组合系数,其值均大于等于 0,且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

博弈论组合赋权的基本思想是使综合权重与各单一赋权结果之间的偏差最小,表示为

$$\min \sum_{g=1}^2 \|w - w^{(g)}\|^2 \quad (10)$$

式中, g 表示赋权方法编号, $g=1$ 代表 IFAHP 主观赋权结果, $g=2$ 代表熵权法客观赋权结果。

最终得到的综合权重用于计算节点值、场所值和活力值,表示为

$$F_i = \sum_{j=1}^n w_j X'_{ij} \quad (11)$$

式中, F_i 表示第 i 个车站在相应维度下的综合得分; w_j 为第 j 个指标的综合权重。

2.4 站域类型划分

为进一步识别不同站域在节点、场所和活力维度上的组合特征,本文采用 GMM 对站域类型进行聚类识别^[36]。与传统 K-means 聚类方法相比, GMM 能够刻画不同类别在特征空间中的概率分布,并以类别隶属概率反映车站归属于不同站域类型的可能性。

本文以前文计算得到的节点值、场所值和活力值

作为聚类变量,构建站域类型识别的三维特征空间。GMM 假设样本总体由若干个潜在类别构成,每一类样本服从一个高斯分布,整体样本分布则由多个高斯分布加权混合而成,其概率密度函数为

$$p(Z_{i,s}) = \sum_{k=1}^K \rho_k N(Z_{i,s} | \mu_k, \Sigma_k) \quad (12)$$

式中, K 为聚类类别数; ρ_k 为第 k 类的混合系数,表示该类别在总体样本中的占比,各类别混合系数均为非负,且所有类别混合系数之和为 1; μ_k 和 Σ_k 分别为第 k 类的均值向量和协方差矩阵; $N(\cdot)$ 表示多元高斯分布。

为避免人为设定聚类类别数,本文采用贝叶斯信息准则(bayesian information criterion, BIC)确定最优聚类数^[37],表示为

$$B(K) = -2 \ln L_K + q_K \ln M \quad (13)$$

式中, $B(K)$ 为聚类数为 K 时模型的 BIC 准则值; $\ln L_K$ 为类别数为 K 时模型的对数似然值; q_K 为模型待估参数数量; M 为车站样本数量。

BIC 值越小,表明模型在拟合效果与复杂度之间取得了更优平衡。

3 基于 NPV 模型的站域类型识别与情景差异分析

3.1 指标权重结果

为避免不同维度因指标数量、数据离散程度差异导致评价权重失衡,并保障三维度均衡可比,本文在一级维度层面采用等权设定,并基于 IFAHP、熵权法和博弈论组合赋权模型,得到节点、场所和活力维度约束下各指标的综合权重,结果如表 2 所示。

表 2 指标权重与统计描述

Table 2 Indicator weights and descriptive statistics

维度	准则层	指标	最小值	最大值
节点 (1/3)	轨道交通网络拓扑结构与车站属性(0.784)	N1(0.048)	0.005	0.024
		N2(0.093)	0.000	0.435
		N3(0.045)	0.034	0.093
		N4(0.046)	0.055	0.548
		N5(0.039)	-2.450	3.363
		N6(0.303)	0.000	0.625
		N7(0.425)	0.000	1.000
	车站设施供给(0.043)	N8(1.000)	1.000	22.000
	接驳供给能力(0.173)	N9(0.242)	0.000	46.000
		N10(0.318)	0.000	139.000
		N11(0.439)	0.000	268.000
场所 (1/3)	开发强度(0.077)	P1(0.590)	0.072	1.734
		P2(0.410)	0.000	0.997
	活动承载(0.168)	P3(0.480)	0.000	37.730

续表

维度	准则层	指标	最小值	最大值
场所 (1/3)	活动承载(0.168)	P4(0.520)	0.000	51.350
		P5(0.131)	0.000	2029.558
	功能设施集聚(0.668)	P6(0.105)	0.000	487.350
		P7(0.134)	1.009	2157.180
		P8(0.126)	0.000	352.423
		P9(0.255)	0.000	78.917
		P10(0.249)	0.000	342.737
		P11(0.281)	0.895	22.193
活力 (1/3)	空间连通性(0.087)	P12(0.719)	0.000	53.516
		V1(0.495)	0.000	0.052
	客流规模强度(0.430)	V2(0.505)	0.000	0.047
		V3(0.511)	0.071	0.295
	高峰客流集中程度 (0.271)	V4(0.489)	0.068	0.525
		V5(0.556)	1.000	14.000
		V6(0.249)	0.456	0.897
	时间持续性(0.299)	V7(0.196)	0.027	0.267

注：维度、准则层和指标后括号内数值分别表示其对应层级权重。

3.2 NPV 模型评价结果分析

基于 NPV 模型计算各车站得分，各维度结果如图 3 所示。

由图 3 可知：节点、场所及活力得分总体呈现出“中心城区集聚、外围线路递减”的空间格局，表明中心城区在轨道交通网络连接、站域空间承载和客流活动集聚方面具有综合优势；不同维度的高值集聚范围、空间延展方向及典型车站分布仍存在明显差异，表明站域类型并不是由单一维度决定，而是受到交通区位、周边功能和实际使用强度的共同影响。

由图 3(a)可知：节点维度得分介于 0.018 至 0.841 之间，整体差异较大。高值车站主要集中在中心城区线网交会区域，其中北大街、钟楼等车站表现较为突出。这类车站通常位于多条线路交汇处或核心客流走廊衔接位置，具有较强的换乘组织能力、网络可达性和跨区域联系能力，因此在轨道交通网络中表现出

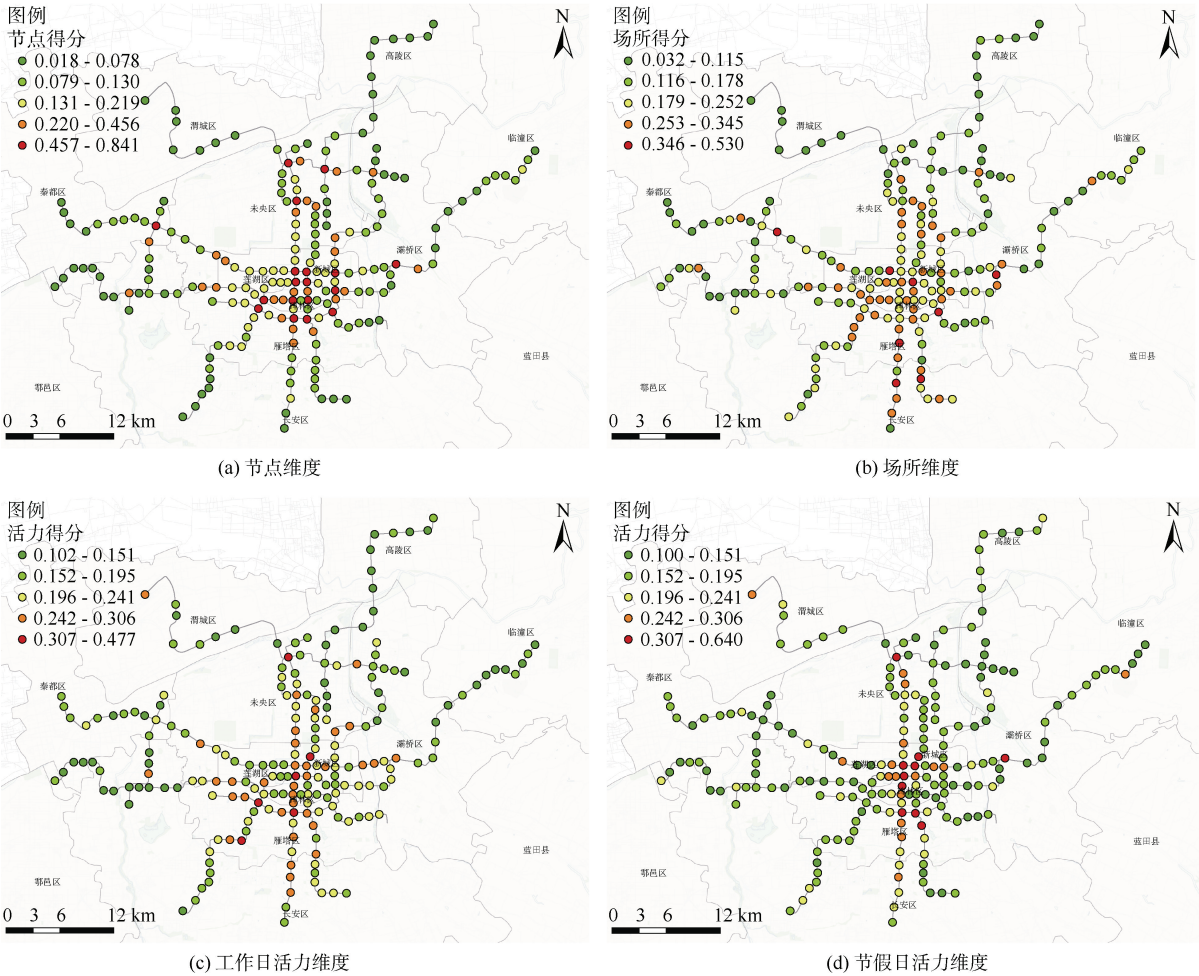


图 3 城市轨道交通车站 NPV 模型分维度得分空间分布
Figure 3 Spatial distribution of dimension-specific scores in the NPV model of urban rail transit stations

较高节点价值。相比之下, 外围线路末端及单一线路车站由于线路连接数量有限, 更多表现为低节点值。

由图 3(b)可知: 场所维度得分介于 0.032 至 0.530 之间, 其空间分布同样呈现中心城区相对集聚特征。与节点维度相比, 场所高值车站并不完全依附于换乘节点或线网核心位置, 部分外围组团中心或非核心换乘站也表现出较高的场所价值, 如航天城、市图书馆等。这类车站周边通常具有较高的开发强度和较完善的功能配置, 居住生活、商业服务和公共设施要素相对集聚, 因此具备较强的城市活动承载能力和场所价值。

由图 3(c)和图 3(d)可知: 工作日活力得分介于 0.102 至 0.477 之间, 节假日活力得分介于 0.100 至 0.640 之间。两类情景下活力低值较为接近, 但节假日活力得分上限明显高于工作日, 表明部分车站在节假日受到休闲、旅游和消费活力影响, 形成了更强的客流集聚效应。从空间分布来看, 高活力车站主要集中于中心城区、综合交通枢纽及商业服务和公共活动高度集聚区域, 西安北站、小寨等车站活力在工作日和节假日均保持较高活力水平, 表明其不仅具有稳定的日常通勤和换乘需求, 也具备较强的跨情景客流吸引能力。

3.3 站域类型识别与情景差异分析

3.3.1 聚类类别数确定

在 NPV 模型各维度得分基础上, 采用 GMM 对站域节点、场所和活力组合特征进行识别。为保证不同

情景下站域类型具有可比性, 将工作日与节假日样本纳入统一聚类框架, 并分别识别各车站在两类情景下的站域类型归属。本文采用 BIC 确定 GMM 最优聚类数量, BIC 曲线如图 4 所示。

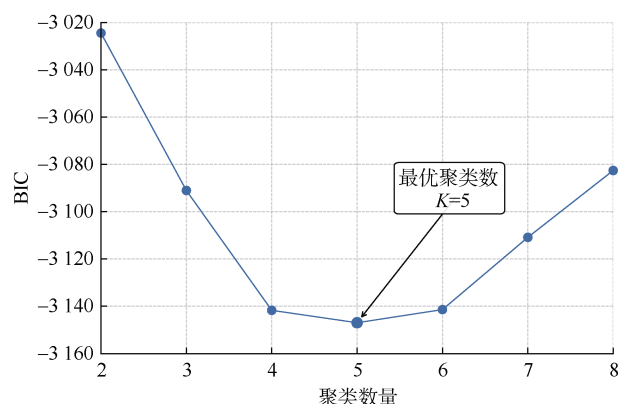


图 4 GMM 聚类数选择结果

Figure 4 GMM cluster-number selection results

由图 4 可知: 随着聚类数增加, BIC 值呈现先下降后上升的变化趋势, 当聚类数为 $K=5$ 时, BIC 值达到最小。因此, 本文最终选取 $K=5$ 作为最优聚类数量, 并依据节点、场所和活力维度的聚类中心识别站域类型, 结果如表 3 所示。

3.3.2 不同情景下站域类型空间分布特征分析

为进一步揭示不同站域类型的空间特征, 本文分别绘制工作日和节假日情景下的站域类型空间分布图, 结果如图 5 所示。

表 3 聚类特征描述

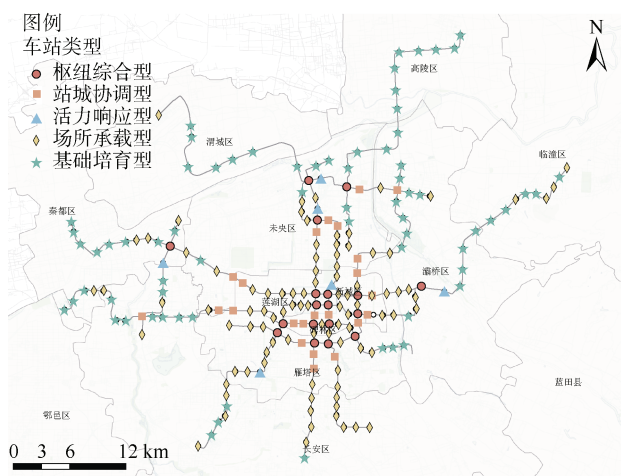
Table 3 Description of cluster characteristics

类别	聚类中心值			维度组合特征	站域类型	样本分布		典型车站
	节点	场所	活力			工作日	节假日	
I	0.691	0.257	0.287	节点优势突出, 场所和活力相对较高	枢纽综合型	18.000	18.000	北大街、钟楼等
II	0.336	0.262	0.205	节点和场所具有一定支撑, 活力转化适中	站城协调型	23.000	23.000	万寿路、纬一街等
III	0.222	0.110	0.236	活力表现相对突出, 场所基础偏弱	活力响应型	6.000	5.000	复兴大道北、香王等
IV	0.118	0.229	0.198	场所表现相对较好, 节点水平较低	场所承载型	94.000	89.000	万寿南路、三义等
V	0.070	0.114	0.153	节点、场所和活力均处于较低水平	基础培育型	70.000	76.000	东马坊、军庄等

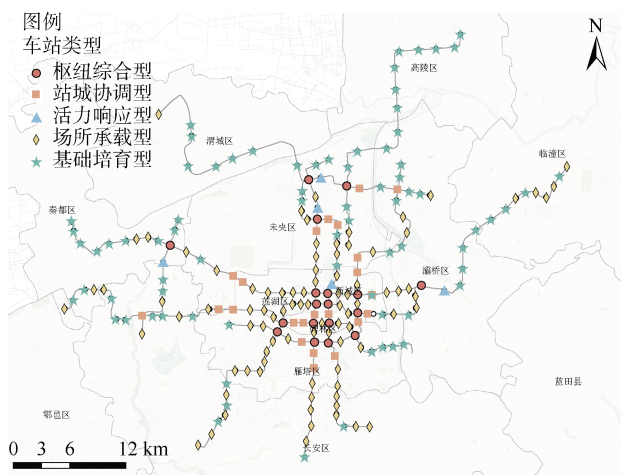
由图 5(a)可知: 工作日情景下, 站域类型分布呈现明显的“中心集聚-外围分异”的圈层特征。具体特征为: ①枢纽综合型车站主要集中在中心城区及多线路交会区域, 北大街、钟楼等核心换乘站表现较为典型。该类车站数量较少, 但空间集聚性较强, 具有较高的节点价值和综合服务能力。②站城协调型车站多分布在中心城区外围及骨干线路沿线, 如万寿路、纬

一街等车站。该类车站表现出较好的交通联系能力和站域开发基础, 表明其节点功能与场所功能之间具有相对协调的发展关系。③活力响应型车站数量较少, 整体呈零散点状分布, 如复兴大道北、香王等站。该类车站周边开发强度和功能集聚水平相对有限, 但仍表现出一定的客流活动响应能力, 反映出部分车站实际使用水平与静态空间条件之间存在不完全一致性。

④场所承载型车站数量最多,广泛分布于中心城区及其周边建成区,并主要沿2号线、4号线和6号线向外延伸。该类车站节点水平相对不突出,但其周边空间开发、功能设施配置和城市活力承载已具有一定基础。⑤基础培育型车站主要分布于外围线路、线路末端及城市拓展区域,以1号线三期、5号线西段、9号线、10号线和14号线为典型。该类车站的节点、场所和活力值均较低,反映出城市外围车站在交通连接、功能开发和活力集聚方面仍处于培育阶段。



(a) 工作日



(b) 节假日

图5 站域类型空间分布

Figure 5 Spatial distribution of station-area types

由图5(b)可知:节假日情景下,站域类型在分布上仍呈现明显的“中心集聚-外围分异”的圈层特征。具体特征为:①枢纽综合型车站主要集中在中心城区及多线路换乘节点,钟楼、小寨、大雁塔等车站表现较为典型。该类车站在节假日期间仍保持较高的节点价值和客流活力,是节假日轨道交通系统中的核心服

务节点。②站城协调型车站多分布在中心城区外围及骨干线路沿线,如延兴门、边家村等车站。该类车站既具有较好的交通可达性,又依托周边较成熟的城市功能形成较稳定的客流支撑,表明其节点功能、场所功能与节假日客流活动之间具有较好的协调关系。③活力响应型车站数量仍然较少,整体呈零散点状分布,如复兴大道北、香王等车站。该类车站周边开发强度和功能集聚水平相对有限,但在节假日情景下仍表现出一定的客流响应能力,表明部分车站可能受休闲游憩、跨区出行或特定活动需求影响形成阶段性活力提升。④场所承载型车站广泛分布于中心城区及其周边建成区,并沿1号线、2号线、4号线和6号线等骨干线路向外延伸。该类车站节点水平相对不突出,但其周边空间开发、功能设施配置和城市活力承载已具有一定基础,是连接中心城区与外围地区的重要过渡类型。⑤基础培育型车站主要分布于外围线路、线路末端及城市拓展区域,以1号线三期、5号线西段、9号线、10号线、14号线以及保税区、常宁宫等末端站点为典型。该类车站的节点、场所和活力值均较低,反映出节假日情景下城市外围车站在交通连接、功能开发和活力集聚方面仍处于培育阶段。

综合图5(a)和图5(b)可知:工作日与节假日情景下的站域类型总体延续了相近的空间组织格局,均表现出“中心城区类型集聚、外围线路分化明显和过渡型车站分布较多”的特征,表明节点条件和场所基础作为相对稳定的空间属性,对站域类型形成具有较强的约束作用;与工作日相比,节假日情景下部分车站的活力属性明显增强,尤其是位于商业休闲、旅游游憩、综合交通枢纽及跨区出行联系较强区域的车站,更容易出现类型转换。这表明情景差异不能根本改变站域类型的总体空间组织格局,但会通过改变客流活动强度、出行目的和高峰时段分布,进一步影响部分车站的类型归属及其转换概率。

3.3.3 工作日-节假日站域类型转换特征分析

为进一步揭示不同出行情景下站域类型的动态变化特征,对工作日和节假日情景下各车站的类型归属进行逐一匹配,并构建站域类型转换图,结果如图6所示。

由图6可知:工作日与节假日情景下站域类型整体以稳定保持为主,表明短期出行情景变化不能显著改变大多数车站的类型归属。在211座车站中,192座车站在两类情景下保持原有类型,占比为91.00%;仅19座车站发生类型转换,占比为9.00%。其中,枢纽

综合型和站城协调型车站在两类情景下均保持稳定,分别为 18 座和 23 座,表明节点优势突出或站城协调基础较好的车站具有较强的类型稳定性,受工作日-节假日短期出行情景变化的影响较小。活力响应型车站整体也较为稳定,其中 5 座车站保持原类型,仅 1 座车站在节假日情景下转为场所承载型。类型转换主要集中在场所承载型和基础培育型之间。其中,工作日情景下的 12 座场所承载型车站在节假日情景下转为基础培育型,工作日情景下的 6 座基础培育型车站在节假日情景下转为场所承载型。这表明不同出行情景对站域类型的影响具有明显差异,节点价值和场所基础较强的站域类型较为稳定,而节点、场所和活力综合水平相近的车站对客流活动变化更为敏感,更容易随工作日-节假日情景变化而发生类型调整。

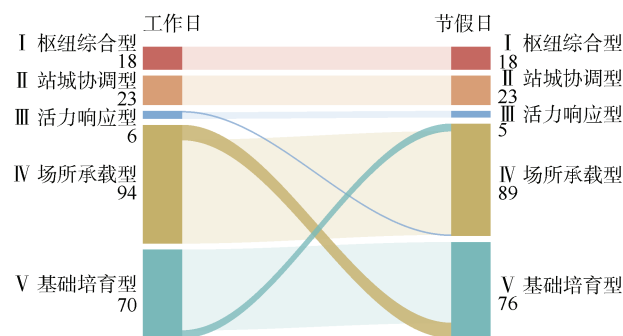


图 6 工作日-节假日站域类型转换

Figure 6 Station-area type transition diagram between workdays and National Day holidays

为进一步识别类型转换车站的空间分布特征,本文绘制了发生类型更替车站的空间分布图,如图7所示。

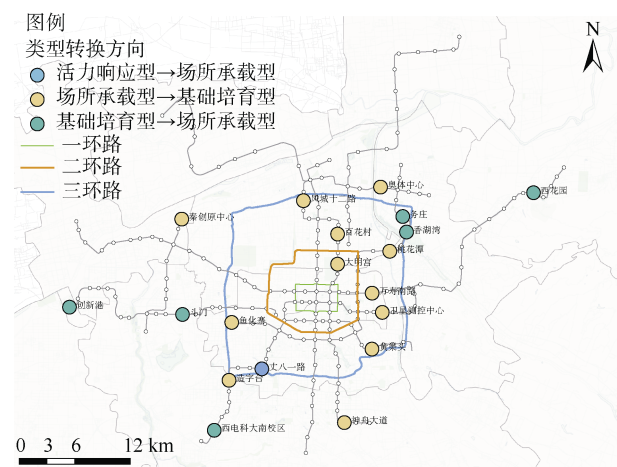


图7 工作日-节假日站域类型转换空间分布

Figure 7 Spatial distribution of station-area type transitions between workdays and National Day holidays

由图 7 可知：发生类型转换的车站在空间上呈现出明显的环路圈层分布特征，主要集中在二环以外区域。从空间视角看，除大明宫站外，其他发生类型转换的车站都分布在二环以外，表明二环以内核心区站域类型整体较为稳定，受节假日情景变化影响较小。可能的原因是二环以内核心区车站通常具有较高的网络可达性、成熟的功能设施配置和持续的客流吸引能力，在工作日和节假日均能维持相对稳定的出行需求与场所活动支撑，因此站域类型不易发生明显变化。从转换类型看，场所承载型车站向基础培育型车站的转换数量最多，主要包括凤城十二路、百花村、万寿南路、卫星测控中心等站。这类车站主要分布在三环边缘及二环和三环之间区域，周边具有一定的道路条件和功能基础。基础培育型车站向场所承载型车站的转换则主要分布于三环边缘及三环以外区域，典型车站有创新港、西电科大南校区、务庄、香湖湾等，表现出更强的场所承载特征。此外，丈八一路站为唯一的由活力响应型转为场所承载型的车站，可能的原因是其工作日活力主要受高新区商务办公通勤驱动，而节假日期间通勤需求减弱，周边餐饮商业、会展设施及公园休闲等场所功能对站域活力的支撑作用相对增强，进而推动其类型向场所承载型转变。从转换机制看，发生转换的车站多属于线路尾端，节点联系、功能复合和客流活力整体处于中低水平，类型边界相对接近，因此更容易受到出行情景变化影响。场所承载型向基础培育型转换的车站，通常在工作日依托通勤、办公或日常生活服务需求形成一定场所承载特征，但节假日期间通勤与办公出行减弱，客流活力支撑下降，导致其综合表现向基础培育型转变；基础培育型向场所承载型转换的车站，则可能受高校园区、休闲游憩、文旅景点或特定目的地活动影响，在节假日期间形成额外客流吸引，从而表现出更强的场所承载特征。

总体来看,工作日与节假日情景下站域类型转换呈现出“整体稳定、局部调整、外围敏感”的特征。节点条件和场所基础较强的车站共同构成了相对稳定的类型骨架,而情景差异主要作用于二环以外、三环边缘及线路延伸段的外围车站,并集中表现为场所承载型与基础培育型之间的双向转换。

4 结论

本文以西安市轨道交通车站为研究对象,在传统 NP 模型基础上引入活力维度,构建 NPV 模型,并结合多源数据和 GMM,识别工作日与节假日不同出行情

景下轨道交通站域类型及其转换特征。主要结论如下:

1) NPV 模型能够较好地刻画轨道交通站域的静态空间基础与动态使用状态。与传统 NP 模型相比,活力维度的引入能够进一步反映车站客流活动在不同出行情景下的变化特征,有助于揭示交通连接条件、站域空间功能和实际使用水平之间的匹配关系。

2) 西安市轨道交通站域的节点、场所和活力得分整体呈现由中心城区向外围线路递减的空间格局。中心城区及多线路交会区域车站节点价值较高,部分功能集聚区车站表现出较强场所承载能力;高活力车站主要集中在中心城区、综合交通枢纽和功能复合程度较高的区域。与工作日相比,节假日情景下部分车站活力得分明显提高,表明休闲游憩、文旅消费和综合服务功能对站域客流活力具有显著带动作用。

3) 基于 GMM 的聚类结果,西安市轨道交通站域类型可分为枢纽综合型、站城协调型、活力响应型、场所承载型和基础培育型 5 类,并呈现出“中心集聚-外围分异”的圈层特征。其中,场所承载型和基础培育型车站数量较多,表明部分车站虽具备一定空间开发基础,但节点支撑、功能复合程度或客流活力转化能力仍相对不足;枢纽综合型和站城协调型车站主要分布在中心城区及骨干线路沿线,表现出较好的站城协同水平。

4) 工作日与节假日情景下,二环以内车站类型总体保持稳定,而二环以外及线路延伸段车站存在一定类型转换。枢纽综合型和站城协调型车站受出行情景变化影响较小,类型稳定性较强;类型转换主要发生在场所承载型与基础培育型车站之间,表明综合条件处于中低水平的站域对节假日出行活动更为敏感。后续规划中,应针对外围车站加强接驳交通组织、公共服务供给和功能复合配置,提升轨道交通对站域活力和城市功能集聚的带动作用。

尽管本文取得了一些成果,但仍存在一定不足。活力维度主要基于短期客流数据进行刻画,其中节假日情景以西安市国庆假期为样本,属于典型长假旅游出行情景,其客流结构可能与清明、端午等一般法定节假日存在差异。此外,本文对长期季节变化、重大活动和特殊事件等因素的影响考虑不足。后续研究可进一步引入更长时间尺度的客流、多类型节假日的客流、消费活动、手机信令等数据,完善站域活力动态监测与类型演化识别方法,为轨道交通站域精细化更新、TOD 差异化开发和运营管理优化提供更加稳定的决策依据。

参考文献

- [1] 秦国栋,郑猛,许焱,等.新阶段我国轨道交通高质量发展的思考与对策:中国城市交通发展论坛第40次研讨会[J].城市交通,2025,23(6):114-123.
Qin Guodong, Zheng Meng, Xu Yan, et al. Reflections and countermeasures for the high-quality development of China's rail transit in the new stage: debrief of the 40th urban transportation development forum in China[J]. Urban Transport of China, 2025, 23(6): 114-123.
- [2] 王晶,路美乔,陆化普.城市轨道交通车站 TOD 发展水平与城市活力协同性评价:以北京市轨道微中心为例[J].城市交通,2024,22(6):40-50.
Wang Jing, Lu Xianqiao, Lu Huapu. Evaluation of the coordination between TOD development level and urban vitality at urban rail transit stations: a case study of rail transit micro-centers in Beijing[J]. Urban Transport of China, 2024, 22(6): 40-50.
- [3] Bertolini L. Nodes and places: complexities of railway station redevelopment[J]. European Planning Studies, 1996, 4(3): 331-345.
- [4] Vale D S, Viana C M, Pereira M. The extended node-place model at the local scale: Evaluating the integration of land use and transport for Lisbon's subway network[J]. Journal of Transport Geography, 2018, 69: 282-293.
- [5] Yu B J, Cui X, Li H, et al. TOD and vibrancy: The spatio-temporal impacts of the built environment on vibrancy[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1009094.
- [6] 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 and Land Use, 2011, 4(1): 45-58.
- [7] 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.
- [8] 任利剑,运迎霞,权海源.基于“节点-场所模型”的城市轨道站点类型及其特征研究:新加坡的实证分析与经验启示[J].国际城市规划,2016,31(1):109-116.
Ren Lijian, Yun Yingxia, Quan Haiyuan. Study on classification and characteristics of urban rail transit station based on node-place model: empirical analysis and experience enlightenment of Singapore[J]. Urban Planning International, 2016, 31(1): 109-116.
- [9] 安睿,全照民,王梓蒙,等.武汉市轨道交通 TOD 绩效评估与类型划分:“节点-场所-功能”模型的实证应用[J].地理研究,2024,43(10):2684-2701.

- An Rui, Tong Zhaomin, Wang Zimeng, et al. Evaluation and classification of TOD performance for Wuhan rail transit: Empirical application of the “Node-Place-Function” model[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(10): 2684-2701.
- [10] 檀鹏晶, 张亚男, 席洋, 等. 节点-场所耦合视角下北京轨道交通站域协同发展评估[J]. *都市快轨交通*, 2026, 39(1): 60-68.
Tan Pengjing, Zhang Yanan, Xi Yang, et al. Evaluation of coordinated development of Beijing rail transit station-city integration from the perspective of node-place coupling[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2026, 39(1): 60-68.
- [11] Su S L, Zhang H, Wang M, et al. Transit-oriented development (TOD) typologies around metro station areas in urban China: a comparative analysis of five typical megacities for planning implications[J]. *Journal of Transport Geography*, 2021, 90: 102939.
- [12] Rodríguez D A, Kang C D. A typology of the built environment around rail stops in the global transit-oriented city of Seoul, Korea[J]. *Cities*, 2020, 100: 102663.
- [13] 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.
- [14] 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 Kehui, Xi Guangliang, Zhang Zhenlong. 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.
- [15] Zhang Y R, Marshall S, Manley E. Network criticality and the node-place-design model: Classifying metro station areas in Greater London[J]. *Journal of Transport Geography*, 2019, 79: 102485.
- [16] 贺鹏, 陈珍, 黄靖茹, 等. 面向轨道交通与土地利用一体化的节点-场所模型研究综述[J]. *都市快轨交通*, 2023, 36(6): 1-6.
He Peng, Chen Zhen, Huang Jingru, et al. A review of node-place model for integration of urban rail and land use[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2023, 36(6): 1-6.
- [17] 郭源园, 郭淳锐, 王贞欢, 等. 天津市存量地区轨道交通站域更新潜力研究: “节点-场所-品质”三维魔方状态模型分析[J]. *都市快轨交通*, 2025, 38(1): 37-43.
Guo Yuanyuan, Guo Chunrui, Wang Zhenhuan, et al. Renewal potentials of rail transit station area Tianjin’s inventory areas: an analysis using the node-place-quality rubik’s cube state model[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2025, 38(1): 37-43.
- [18] Ma J X, Shen Z W, Xie Y, et al. Node-place model extended by system support: Evaluation and classification of metro station areas in Tianfu new area of Chengdu[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 990416.
- [19] 滕丽, 钟楚捷, 蔡砥. 广州市地铁 TOD 站域的空间类型分异: 基于“节点-场所-联系”耦合度模型的研究[J]. *经济地理*, 2022, 42(4): 103-111.
Teng Li, Zhong Chujie, Cai Di. Study on the spatial type differentiation of Guangzhou metro TOD zones: based on “node-place-linkage” coupling model[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(4): 103-111.
- [20] Wu H, Lee J B, Levinson D. The node-place model, accessibility, and station level transit ridership[J]. *Journal of Transport Geography*, 2023, 113: 103739.
- [21] Reusser D E, Loukopoulou P, Stauffacher M, et al. Classifying railway stations for sustainable transitions—balancing node and place functions[J]. *Journal of Transport Geography*, 2008, 16(3): 191-202.
- [22] Wang Q, Ma Z L, Yang X, et al. Exploring spatiotemporal dynamic of metro ridership and the influence of built environment factors at the station level: a case study of Nanjing, China[J]. *Journal of Transport Geography*, 2025, 129: 104440.
- [23] 马壮林, 杨兴, 谭晓伟, 等. 基于客流时间序列的城市轨道交通车站分类[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(6): 113-126.
Ma Zhuanglin, Yang Xing, Tan Xiaowei, et al. Classification of urban rail transit stations based on passenger flow time series[J]. *Journal of Chang’an University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(6): 113-126.
- [24] 西安市人民政府. 西安地铁 2024 年“两线两段”总体情况[EB/OL]. (2024-10-30)[2026-05-11]. <https://www.xa.gov.cn/hd/zxft/1849657791887253505.html>.
- [25] 马壮林, 杨兴, 胡大伟, 等. 城市轨道交通车站客流特征影响程度分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(9): 1428-1439.
Ma Zhuanglin, Yang Xing, Hu Dawei, et al. Influence degree analysis of ridership characteristics at urban rail transit stations[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(9): 1428-1439.
- [26] 高德开放平台. Web 服务 API 开发文档[EB/OL]. (2023-08-03)[2026-05-13]. <https://lbs.amap.com/api/webservice/summary>.
- [27] Xiong S P, Zhang X Y, Wang H Y, et al. 40-year (1984–2024) mapping of urban land use dynamics in China[J]. *Science Bulletin*, 2026, 71(6): 1474-1485.

- [28] 王蓓, 王良, 刘艳华, 等. 基于手机信令数据的北京市职住空间分布格局及匹配特征[J]. 地理科学进展, 2020, 39(12): 2028-2042.
Wang Bei, Wang Liang, Liu Yanhua, et al. Characteristics of jobs-housing spatial distribution in Beijing based on mobile phone signaling data[J]. Progress in Geography, 2020, 39(12): 2028-2042.
- [29] 王成芳, 陈华馨, 吴子超. 基于节点-场所模型的城市轨道交通廊道发展潜能评价: 以广州3条典型地铁线路为例[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(5): 15-22.
Wang Chengfang, Chen Huaxin, Wu Zichao. Evaluation of the development potential of urban rail corridors based on the node-place model: a case study of three typical Guangzhou metro lines[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(5): 15-22.
- [30] Guimerà R, Nunes Amaral L A. Functional cartography of complex metabolic networks[J]. Nature, 2005, 433(7028): 895-900.
- [31] 朱广宇, 孙歆霓, 杨荣正, 等. 变时间尺度城轨客流的本征模量分解及组合深度学习预测[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(12): 4421-4430.
Zhu Guangyu, Sun Xinni, Yang Rongzheng, et al. Intrinsic mode decomposition and combined deep learning prediction of urban rail transit passenger flow at variable time scales[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(12): 4421-4430.
- [32] Dorfman R. A formula for the gini coefficient[J]. The Review of Economics and Statistics, 1979, 61(1): 146-149.
- [33] Gan Z X, Yang M, Feng T, et al. Examining the relationship between built environment and metro ridership at station-to-station level[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 82: 102332.
- [34] Xu Z S, Liao H C. Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(4): 749-761.
- [35] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.
Zhang Sui, Zhang Mei, Chi Guotai. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical research during the 10th five-year of China[J]. Chinese Journal of Management, 2010, 7(1): 34-42.
- [36] Wang Q S, Zhang C H, Ma Z L, et al. Uncovering travel rhythms: a spatiotemporal and data-driven typology of urban rail transit stations[J]. Urban Rail Transit, 2026, 12(1): 120-144.
- [37] Tao Z B, Feng X S, Li K M, et al. Impacts of urban rail transit on city growth: evidence from China[J]. Urban Rail Transit, 2022, 8(2): 121-133.

(编辑: 王艳菊)

(上接第8页)

- [14] Zacharias J, Zhang Tianxin, Nakajima N. Tokyo Station City: The railway station as urban place[J]. Urban Design International, 2011, 16(4): 242-251.
- [15] 覃晴. 站城一体化开发理念在深圳前海枢纽的应用[J]. 都市轨道交通, 2015, 28(4): 51-56.
Qin Qing. Exploration on the idea of integrated design of station and city in Shenzhen Qianhai transport hub[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2015, 28(4): 51-56.
- [16] 丁树奎. 面向可持续发展的既有线改造理论与方法研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 8-13.
Ding Shukui. Theoretical innovation in urban rail transit reconstruction: a framework for network integration and equipment upgradability[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(2): 8-13.
- [17] 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.
- Liu Xiang, Chen Xiaohong, PAN Haixiao. From “station-city integration” to “corridor integration”: TOD framework and model optimization from the perspective of space of flows[J]. Urban Planning Forum, 2024(4): 34-40.
- [18] 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.
Dong Wei, Lin Xiongbin. Localization of TOD strategies and practice in China: the perspective of policy tools[J]. Urban Planning Forum, 2024(2): 49-57.
- [19] 郭少锋, 芦晓昀, 刘义钰. 从 TOD 到 TOR: 存量语境下轨道交通引领城市更新策略研究[J]. 规划师, 2022, 38(3): 76-81.
Guo Shaofeng, Lu Xiaoyun, Liu Yiyu. From TOD to TOR: transit oriented renewal in built-up area redevelopment[J]. Planners, 2022, 38(3): 76-81.

(编辑: 傅依萱)