

# 建成环境对轨道交通相邻站点叠合域客流分布的影响研究

张逸康<sup>1</sup>, 姚敏峰<sup>2</sup>, 王子豪<sup>3</sup>, 杨河冰<sup>4</sup>

**摘要:** 随着轨道交通与城市的不断融合发展, 以站点为中心的单核高密度建设会不断向外蔓延, 形成“点-轴”发展的趋势, 相邻站点的客流吸引范围出现叠合区域, 并成为客流的主要源头之一。本研究以平衡相邻站点叠合域中的客流进而缓解车站拥堵现象为目标, 使用 OLS 回归与随机森林回归建立了轨道交通多站叠合域内的客流分布影响模型, 分析各建成环境因素对客流分布的影响。研究表明, 土地利用混合度是影响客流分布的主要因素, 改变车站出入口数量可以有效控制相邻站点的客流分布, 公共交通的合理配置可以促进相邻站点间的客流平衡。

**关键词:** 轨道交通站城一体化; 轨道交通影响范围; 建成环境; 客流分布; 城市设计;

**Keywords:** Rail transit station-city integration; Influence of rail transit; Built environment; Passenger flow distribution; Urban design

**资助项目情况:** 国家自然科学基金: 以“站城一体融合发展”为目标的轨道交通站域城市功能多样性评价及提升策略研究 (52278061)

## 引言

当前, 我国城市开发建设的模式正在由粗放型外延式向集约型内涵式转变, 标志着城市建设进入了新的阶段[1]。轨道交通站域的高强度开发是实现城市集约发展的重要手段, 但由于我国轨道交通建设通常滞后于城市建设, 尤其是在高峰期, 车站周边空间无法承载围绕车站的高密度城市建设带来的大量客流, 造成了客流超饱和现象, 存在极大的安全隐患。

为解决轨道交通客流超饱和问题, 相关领域主要从解决交通运输能力的方面出发, 采用限流[2]、增加运力[3]等手段进行疏解, 然而, 城市轨道交通的客流超饱和的根本原因是建成环境与轨道交通运力的不匹配。相关研究表明, 城市的职住密度与通勤行为有着最直接的联系, 居住密度和就业密度的差异会加大通勤需求[4][5]。就业与居住的协调决定了通勤需求的多少[6], 当一个区域中就业和居住配置合理时, 可以减少日常通勤需求, 并且倡导居民使用慢行交通出行[7]。改善轨道交通站域的接驳环境有利于促进乘客选择轨道交通作为出行方式[8]。对于更加微观的城市设计层面, 站台周边路网密度和交叉口[9]、公交站台和线路密度及停车车位数[10][11]对轨道交通出行会有一定影响。

课题组前期研究发现, 轨道交通相邻站点的客流量有着很大程度的差异, 并且在城市建设密度较高的中心城区, 客流吸引范围存在着很大部分的重叠区域。由于相邻任意车站的出行时间成本差别不大, 因此, 距离并非是影响这部分客流分布的主要因素, 优化相邻站点叠合域内的客流

<sup>1</sup> 张逸康, 华侨大学建筑学院, 博士研究生

<sup>2</sup> 姚敏峰 (✉), 华侨大学建筑学院, 教授, flyboot@hqu.edu.cn

<sup>3</sup> 王子豪, 华侨大学建筑学院, 硕士研究生

<sup>4</sup> 杨河冰, 华侨大学建筑学院, 硕士研究生

分布可以缓解轨道交通站点的客流超饱和问题。综上，本研究主要聚焦于探究建成环境对相邻站点叠合域客流分布的影响，通过改变建成环境进而平衡相邻站点客流，为缓解客流超饱和问题提供新的思路。

## 1 轨道交通相邻站点叠合域对象解析

### 1.1 轨道交通站域城市发展

随着时间的推移，轨道交通站点影响域内的城市空间会被动或自发地适应站点所带来的客流，在这个过程中，轨道交通与城市不断融合，彼此逐渐适应，并产生新的空间结构关系。从最初的单一线路，到庞大的交通网络，轨道交通的发展历程与城市的发展紧密相连，大致可以分为线网建设初期、站城融合发展期以及站域轴线协同期三个时期（图 1）。

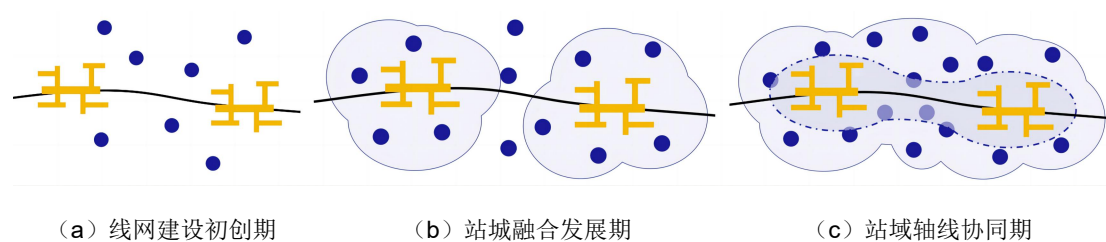


图 1 轨道交通站域城市发展的三个时期（来源：作者自绘）

线网建设初期，单条线路横贯城市，以车站发展为主，周边城市建设同步或辅助进行。此时轨道交通以独立单线为主，线路间缺乏联系，交通系统与城市系统相对独立，限制了客流吸引和发展。随后，在站城融合发展期，随着轨道线路成网，城市各区域联通，客流增加导致节点失衡，城市空间功能逐渐外延，除了换乘站的联系之外，被线网所覆盖的站域城市空间也会在功能、空间等诸多层面发生变化。最终，在站域轴线协同期，线网框架为相邻站点间的城市发展提供基础，站域结构由站点为核心的同心圆向外移，形成“点-轴”连带和叠合域，城市立体化开发使得这部分区域的地价、人口密度不断上升，推动了相邻站点协同发展的新格局。

### 1.2 相邻站点叠合域概念

作为轨道交通融入城市空间形成的重要节点，站点周边一定范围内的城市空间区域具有深远的理论和实践研究价值，出现了吸引范围、客流辐射区域等概念及其定义方法在内的一系列研究[12][13]。因此，连接轨道站点的可步行区域被认为是研究轨道交通通勤行为的关键。在此，将站点影响范围定义为受轨道交通站点客流影响的城市空间范围，既包括站点的进站客流吸引范围，也包括站点出站客流对城市空间的影响范围。

通常市区内轨道交通站间距在 500-1500m 左右，此时，不论是步行还是骑行，多个相邻车站的站点影响范围都会出现大面积的重叠（图 2）。理想的城市应该是各种活动的有机混合，片面强调城市构成要素的层次划分、忽略城市构成要素之间错综复杂的有机联系，会导致城市在不同层面上发展的分裂，过于分离的独立站点 TOD 开发也势必会造成城市空间的割裂，不利于活力空间的打造。在以单一轨道站点为中心构建的公共空间体系已经白热化的背景下，建立两个以上站点的联系，可以实现轨道交通车站由点到轴的扩展，牵引更大区域的协同发展[14]。

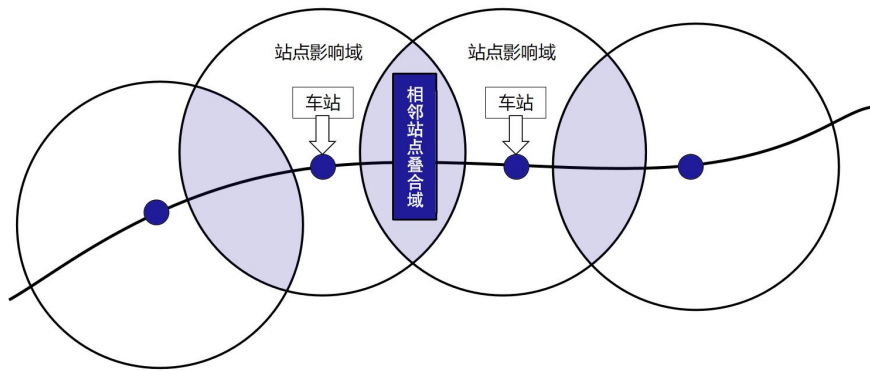


图 2 相邻站点叠合域范围示意图（来源：作者自绘）

由此，轨道交通相邻站点叠合域是指：当两个或多个相邻轨道交通站点间距较近时，站点影响范围会在空间上出现相互交叠的区域，在此条件下，任意两个（或多个）相邻站点会在功能布局、空间形态、综合交通可达等诸多方面对叠合区域施加共同影响，改变原先以单一站点为中心的单核圈层辐射模式，并在该区域内形成“1+1>2”的“正向偏差”现象，从而重构城市空间结构、重塑土地价值潜力（图 3）。

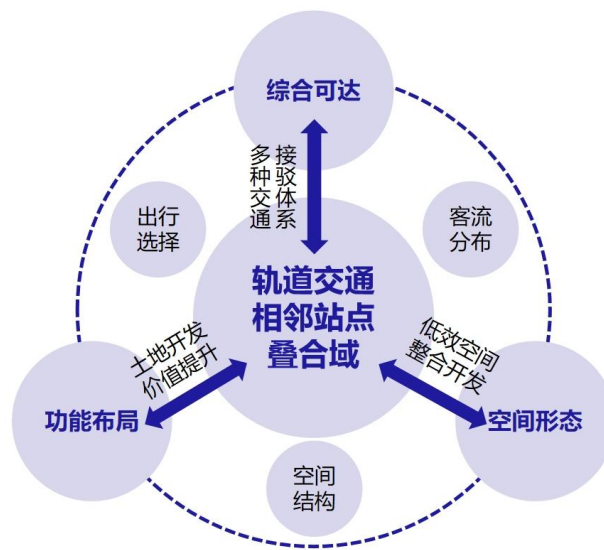


图 3 轨道交通相邻站点叠合域概念界定（来源：作者自绘）

## 2 研究方法 with 模型构建

### 2.1 OLS 回归与随机森林

最小二乘法 (Ordinary least squares) 作为线性回归模型，其基本原理是通过形成最优拟合直线使得各点与直线之间的距离和达到最小解决回归问题。在实际应用中，OLS 回归模型的优点在于其简单性和有效性，通过最小化误差的平方和，能够得到一个相对稳定的参数估计值。然而，该模型也存在一些限制和假设，例如，OLS 假设误差项是相互独立的，且服从正态分布。如果这些假设不成立，那么模型的参数估计值可能会受到一定程度的影响。因此，在应用 OLS 回归模型时需要对这些假设进行检验。OLS 模型可以表示如下[15]：

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^m \beta_{ik} x_{ik} + \varepsilon_i$$

式中， $y_i$  表示样本  $i$  的客流量； $x_{ik}$  表示第  $i$  个解释变量在第  $i$  个样本点的取值； $\beta_0$  为第  $i$  个样本点的截距； $\varepsilon_i$  表示样本  $i$  对应的残差； $m$  表示解释变量个数； $\beta_{ik}$  为第  $k$  个解释变量在第  $i$  个样本点的拟合系数。

随机森林 (Random Forest, RF) 是机器学习算法的一种, 最早由 Breiman 提出[16], 近年来受到了相当大的关注。随机森林是 Bagging 集成方法中最具有代表性的算法, 随机森林算法能够估计变量重要性、均方预测误差和邻近度量等重要属性, 被广泛用于预测和特征选择[17]。与传统的基于回归的技术不同, 随机森林对数据的分布没有假设要求, 可以更灵活地处理复杂的数据结构, 无需对数据进行线性化处理或特征变换。此外, 随机森林是由多棵决策树组成的集成模型, 每棵决策树通过递归地对特征进行分割来形成决策, 捕捉不同特征之间的交互关系, 从而能够自动学习特征之间的复杂非线性关系。因此相较于线性回归, 随机森林在处理非线性因素时具有明显优势。具体算法流程可以大致分为以下四步 (图 4) :

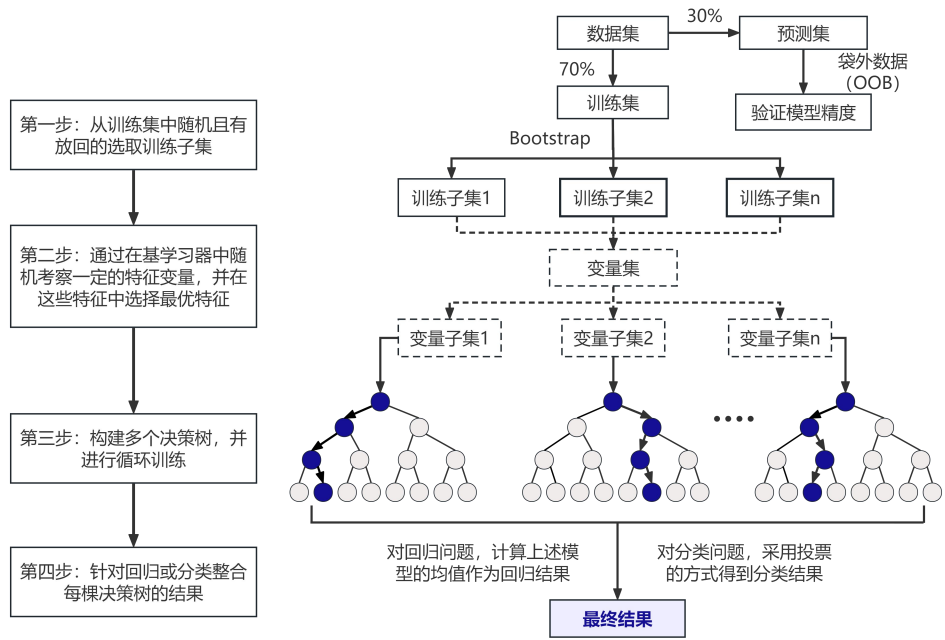


图 4 随机森林流程图 (来源: 作者自绘)

在机器学习领域, 梯度提升树 (GBDT) 和极端梯度上升 (XGBoost) 是主流算法。它们通过 Boosting 优化一般损失函数, 以 CART 回归树为基学习器。XGBoost 是梯度提升树的高效实现, 具有较高的拓展性和运算速度。因此, 本研究选择 XGBoost 进行回归训练。

本研究的具体技术路线为 (图 5): 首先, 通过梳理既有研究, 基于 TOD 的 5D 原则, 归纳出全面反映轨道交通相邻站点叠合域建成环境的指标, 并建立指标集。然后, 结合百度热力图数据、地理信息和实地调研, 收集并用 Z-score 标准化方法处理数据。其次, 使用 Arcgis 的核密度分析对轨道交通客流吸引范围进行栅格化处理, 划分距离圈层, 结合热力数据测算各圈层的热力值。通过 OLS 回归模型分析各圈层热力值与客流量的关系, 得出拟合系数, 计算出每个叠合域的客流贡献系数。最后, 分析建成环境对相邻站点叠合域客流分布的影响。将客流贡献系数带入公式, 计算出叠合域客流差。以客流差为因变量, 建成环境差为自变量, 采用 XGBoost 算法进行回归分

析，得出特征变量的重要程度和建成环境对客流分布的非线性关系，探讨平衡相邻站点间客流的方法。

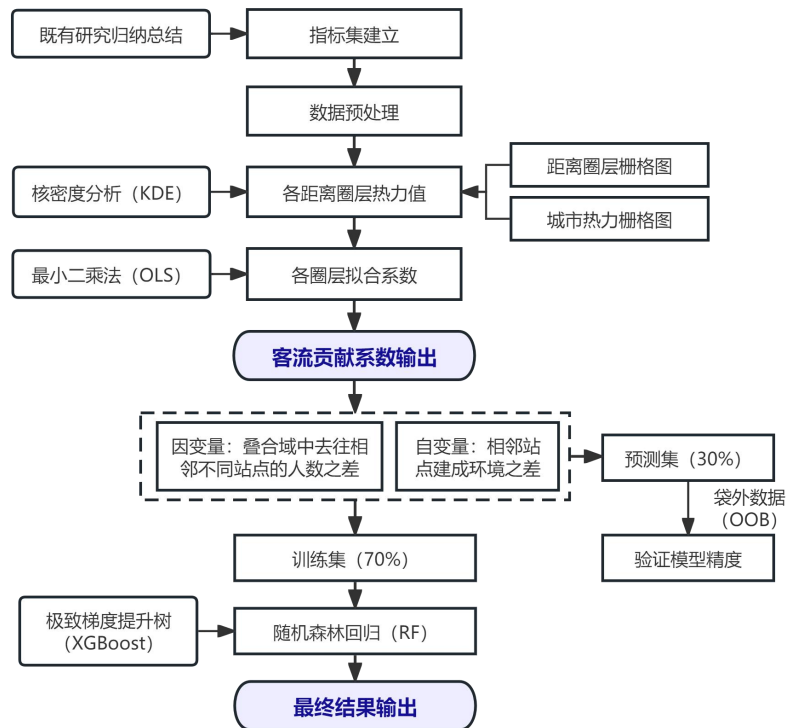


图 5 技术路线（来源：作者自绘）

## 2.2 建成环境测度指标

本研究不考虑具体乘客个体的差异，而是将相邻站点的客流分布差异完全看作是由相邻站点总的建成环境差异所导致，相邻站点叠合域内去往不同站点的客流分布差异同样也可全部视作由相邻站点建成环境差异所导致。以 5D 原则作为建成环境指标的选取依据，综合考虑各指标相关数据获取的可行性与实地调研的难易程度，最终总结归纳出 5 个准则，共 14 个特征变量，具体特征变量指标集如下所示（表 1）：

表 1 特征变量指标集

准则层	特征变量	数据来源
A 密度	A1 居住密度	通过八爪鱼数据爬取软件爬取百度热力
	A2 就业密度	
	A3 容积率	
B 多样性	B1 功能混合度	通过十方 DEEPUD 软件的容积率分析 功能获取
	B2 功能优势度	
C 设计	C1 路网密度	通过 Openstreetmap 获取
	C2 车站出入口密度	
	C3 站城衔接设施密度	
D 交通换乘距离	D1 公交站点密度	通过百度地图计数获取
	D2 自行车停车场密度	

准则层	特征变量	数据来源
E 目的地可达性	D3 汽车停车场密度	通过百度地图测距
	E1 到市中心距离	
	E2 到市次中心距离	
	E3 站域完形度	通过 Mapbox 的等时圈 API 接口划定

此外，客流量数据通过网络爬虫爬取 2023 年 3 月 22 日（周三工作日）与 2023 年 3 月 25 日（周六休息日）的厦门市轨道交通各站点单日的进站闸机刷卡数据，对这两项数据取平均值，得到日均进站客流量的数据。之后，通过厦门市轨道交通集团 2019 年公布的地铁年均客流数据进行对比（将年均客流平均到每日得到日均客流），验证数据的可靠性。

### 3 相邻站点叠合域客流分布实证研究

#### 3.1 相邻站点叠合域范围界定

等时圈是根据乘客到达站点或目的地所需的时间来划定的范围方法[18][19]，能够更加精确地确定轨道交通站点的影响范围[20]，考虑到出站口数量和位置对站点间距的影响，本研究以站台几何中心点作为站点间距判定原点，采用等时圈方法对站域范围进行划定。通过实际路网信息对等时圈进行偏差矫正，得到最终的叠合域。使用 Mapbox 的等时圈 API 接口（图 6），划定轨交站点步行 10 分钟范围。



(a) Mapbox 等时圈操作界面

(b) 步行 10min 等时圈界定示意

图 6 等时圈界定方法（来源：操作界面）

在网站界面下方的“Response”选项下，点击“Open in new tab”，便会生成一串包含经纬度、等时圈范围、交通方式等信息字符串的新标签页，随后右键将新标签页另存为 JSON 文件。打开 arcgis，在工具箱中找到 JSON 转要素，将刚才的 JSON 格式文件转为矢量数据 shp 格式文件，便可得到一个站点在 gis 里的等时圈。按上述步骤将全部站点的等时圈导入 gis 中，便可得到全部相邻站点叠合域，之后使用融合工具对所有面要素进行合并，便可得到厦门市轨交站点客流吸引范围。

由于“一岛、两湾、多组团”的特殊城市空间结构，厦门本岛的城市建设密度高，轨交客流量大，相邻站点间距小，是本次研究的理想样本。经过测算可知，厦门市轨道交通相邻站点叠合域面积约占轨道交通站域总面积的 41.7%左右（图 7），近乎半数的客流源于相邻站点叠合域中，由此，本文选择厦门市为例进行研究具有切实的意义。

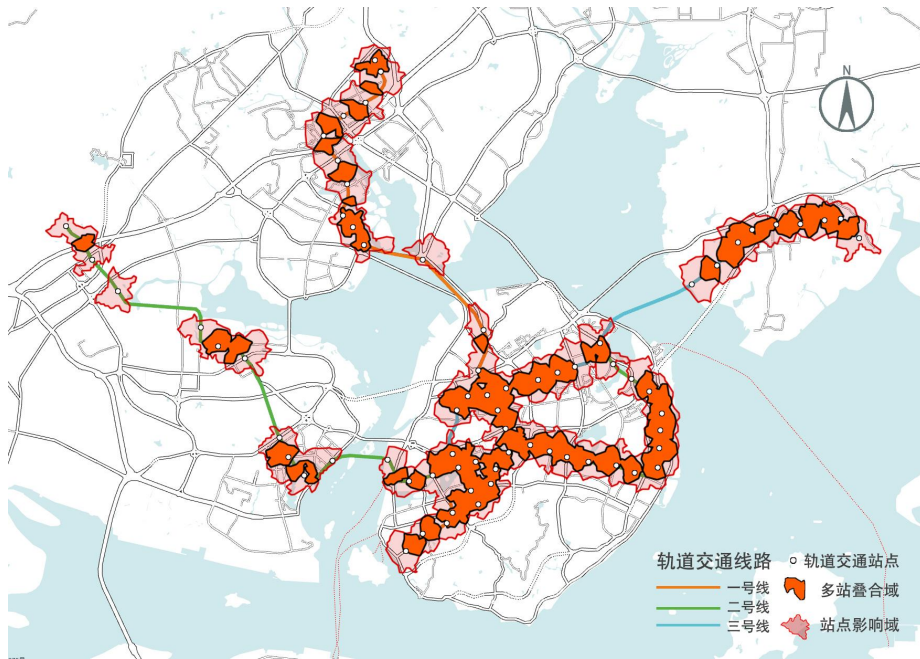


图 7 步行 10min 的等时重叠面积与非重叠面积大致比例 (来源: 作者自绘)

### 3.2 相邻站点叠合域客流贡献系数

使用核密度分析将厦门市的轨道交通站点影响域地图栅格化, 之后分别制作距离圈层栅格图和城市人口热力栅格图。首先需要定义移动搜索半径“窗口”, 并将其中心点与离散点单元格的中心进行对齐。接下来, 对地图进行栅格化处理, 划分为 100m\*100m 的栅格单元, 将连续的空间数据转化为离散的数据形式, 便于后续的计算和分析。在栅格化之后, 通过核密度函数来计算每个空间点对窗口内各网格的密度贡献值。在本次研究中选择五次或六次递减的核密度函数形式。

首先以轨道交通车站中心点为圆心, 每 200m 为半径划距离圈层, 将所有车站的距离圈层全部映射到栅格地图中, 确定每个栅格的所属圈层 (图 8), 如果一个栅格介于两个圈层之间, 则将其算作与车站距离更近的圈层。其次, 根据人群密度的大小, 将热力值划分为 5 个等级, 之后将工作热力值与居住热力值叠加, 取平均值, 得到车站客流吸引范围的平均热力值, 并以此为数据对每个栅格进行赋值。之后, 将人口热力值映射到距离圈层中, 得到每个栅格热力值所对应的距离圈层 (图 9), 再对每个车站每个圈层的热力值进行计算, 将对应圈层每个栅格的热力值相加, 再除以栅格数量取平均值, 得到每个车站对应各个圈层的不同热力值。

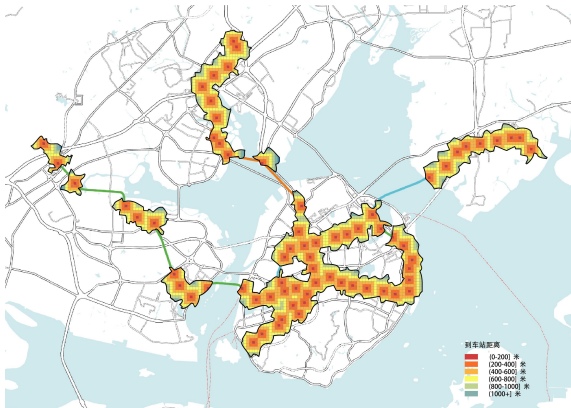


图 8 客流吸引范围内到车站距离的空间分布情况

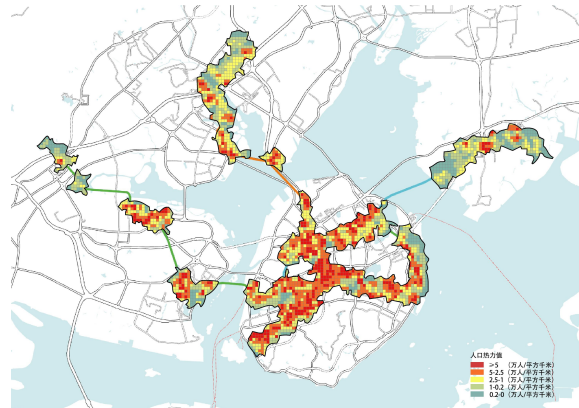


图 9 客流吸引范围内人口热力空间分布情况

采用 OLS 回归，探析不同距离圈层热力值与客流量之间的关系，得出各距离圈层热力值的拟合系数（表 2）。对拟合结果进行检验，其中  $R^2$  为实际值与计算值之间的差的平方和，即残差的平方和，一般认为拟合效果好的  $R^2$  至少大于 0.775。根据回归结果， $R^2$  取值为 0.784，说明模型的拟合结果较好，变量得到了有效的解释。

表 2 OLS 模型回归结果

不同距离圈层	回归系数	p 值	标准差	VIF
截距	2.574	0.000***	0.001	---
(0-200]m	0.177	0.000***	0.006	1.116
(200-400]m	0.219	0.000***	0.051	1.643
(400-600]m	0.134	0.000***	0.003	2.384
(600-800]m	0.079	0.000***	0.001	1.929
$R^2$			0.784	

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示  $p \leq 0.1$ 、 $p \leq 0.05$ 、 $p \leq 0.01$ ，分别表示在 10%、5%、1%水平上具有显著性

在所有距离圈层变量当中，(200-400]米圈层内的热力值与轨道交通车站的客流总量具有最强的正相关关系，其回归系数达到了 0.219，说明该圈层中 21.9%的热力值为轨道交通的客流量做出了贡献，可以理解为(200-400]米圈层内每单位面积栅格中约有 21.9%的人口为轨道交通的日常使用人群。与以往认知所不相同的是，轨道交通的主要客流来源并非随着距离的扩大而减少的，反而是呈现出先增大后减少的情况，推测原因可能有两个，一是厦门市的轨道交通建成使用年限不长，大部分市民没有养成乘坐轨道交通出行的习惯，还未形成以轨道交通为主要运力的城市公共交通运输构成；二是厦门市围绕车站进行的 TOD 超高强度开发不足，车站吸引的主要客流仍以周边较远区域为主。(0-200]米和(400-600]米两个圈层的人口热力值也为轨道交通客流做出了一定的贡献，(600-800]米圈层的回归系数最小，仅为 0.079，可以理解为(600-800]米圈层每单位面积栅格中仅有约 7.9%的人口为轨道交通的日常乘客。

## 4 结果分析与研究结论

### 4.1 特征变量重要程度

从随机森林的回归结果来看（图 10），影响进出站客流差的特征变量重要程度存在异同，从重要程度的总体来看，TOD 的 3D 原则，即密度、多样性和设计处于明显的主导地位，这三个层面的建成环境要素对于叠合域客流差异影响的解释程度达到了 78%。也就意味着绝大部分的影响是由以上因素所造成的。特别是在高密度、高多样性的城市中心区域，合理的空间设计、功能布局 and 交通组织对于减少客流差异、提高城市交通效率至关重要。

影响叠合域去往相邻站点进站客流差的主要建成环境因素为功能混合度（15.9%）、居住密度（11.7%）以及车站出入口密度（9.9%）。相邻站点间功能混合度高的站域范围，意味着该区域内功能设施的种类和数量更为丰富，从而提供了多元化的客流来源，集购物、娱乐、办公等多功能于一体的综合体，往往能够吸引大量的客流；居住密度对客流差的影响推测可能主要源于早高峰时段的通勤需求差异，根本原因是轨道交通具有强通勤属性，因此，在站点规划和建设时，应充分考虑周边的居住密度，以便更好地满足通勤客流的出行需求；相较于前两个指标，车站出入口



密度更多从微观层面体现其影响。更多的车站出入口数量意味着更多的进入车站的可能，对弱目的性客流具有更高的吸引力。因此，在站点设计和建设时，应合理布局车站出入口，以提高站点的可达性和便利性。

影响叠合域中相邻站点出站客流差的主要建成环境因素为功能混合度（15.9%）、站城衔接设施密度（11.8%）以及就业密度（11.1%），与进站客流差相同的是，出站客流差的三个主要指标也对应了密度、多样性和设计三大原则，并且功能混合度对出站客流差的影响同样最为显著，说明功能更为丰富的目的地可以吸引更多的人群；站城衔接设施包括了过街天桥、人行步道、地下通道等，对出站客流差的影响主要体现在这些设施的存在很大程度上减少了乘客前往最终目的地的绕行距离，从而缩短了整体出行时间，出行时间的减少可以在很大程度上促进乘客的出行意愿，进而增加出站客流量；就业密度对出站客流的影响主要体现在早高峰工作场所周边大量涌现的客流。就业密度越高的区域，往往意味着该区域有较多的工作场所，因此在早高峰时段，这些区域的出站客流量也会相应增加。

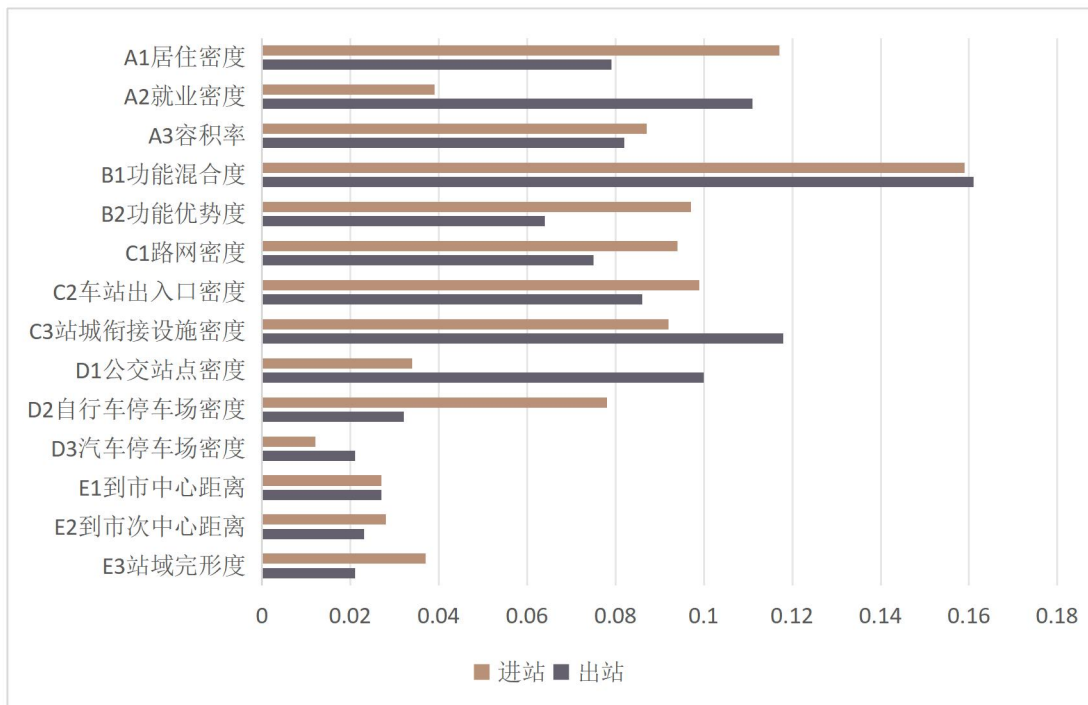


图 10 特征变量重要程度预测结果（来源：作者自绘）

#### 4.2 建成环境对客流分布的非线性分析

部分依赖图（Partial Dependence Plot, PDP）是解释机器学习模型预测结果的另一个重要工具，反映了因变量和目标解释变量  $x_s$  之间的关系。这些目标变量通常是关键的或需要理解的完成环境因子，其余变量构成目标解释变量的补集  $x_c$ 。表达式如下：

$$f_S(x_S) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_S, x_C^{(i)}) \quad (2)$$

式中： $f(x_s, x_c)$  为给定样本的相应函数； $x_c^{(i)}$  为  $x_c$  中第  $i$  个样本的实际取值； $x_s$  的取值则需遍历数据集  $x_c$  的所有取值。x 至多包含 2 个解释变量。当  $|x_c|=1$  时，PDP 刻画因变量随单一目标变量改变的变化趋势；当  $|x_c|=2$  时，反映两个目标变量的综合效应。

由于篇幅所限，本文仅详述 6 个具有代表性的特征变量结果（图 11）：

A3 当容积率差别较小时，进出站客流差别较小，因站点周边建设和人口密度相似导致客流量相近。随着容积率差增大，客流差也增大，因为容积率的不同影响了人们的出行选择。然而，当容积率差继续增大时，客流差反而下降，尤其在一个站点位于公园或绿地附近时，即使容积率小，其独特的环境仍能吸引大量客流。容积率差大反映站点发展不均衡，容积率高的区域因交通拥堵，人们更倾向于乘坐地铁，而容积率低的区域则因环境宜人，步行或骑行者增多，进出站客流量无明显差别。

B1 功能混合度差别越大，客流差越大。功能混合度高的站点因集居住、商业、文化、娱乐等多种功能于一体，提供便利的生活条件，满足出行的复杂性和多样性，从而吸引大量且稳定的客流[21]。并且通过提高功能混合度，可以在一定程度上缓解由轨道交通带来的城市蔓延，从而遏制市郊卧城化与城市空心化。而功能混合度较低的站点因土地利用类型单一，对乘客的吸引力有限，导致客流量相对较低，居民可能需要前往其他站点满足需求。通过减少出行距离，功能混合度高的区域能够吸引更多的步行和轨道交通出行，从而提升公共交通的使用率[22]。

B2 功能优势度小的地方功能较为平均，客流量差小。随着功能优势度增大，站域功能逐渐单一，客流减少；当优势产业形成主导功能时，客流量增加。在功能优势度差别小的地方，客流差较小；随着差别增大，客流差增大。当一个站点有主导功能而另一个站点功能单一时，客流差最大；但当另一个站点也出现主导功能时，客流差缩小。功能优势度差别过大的相邻站点可能存在人员流动少、城市空间割裂的问题，因此需在城市土地利用规划时考虑平衡相邻地块的用地功能种类的数量差异，避免相邻地块功能数量差异过大，造成客流的极不均衡。

C2 车站出入口密度差越大，客流差越大，但出入口数量的多少主要由前期客流预估决定，因此分析结果可能存在因果关系倒置。出入口数量影响着车站的可达性，尤其是在车站覆盖区域较大或服务范围复杂的情况下，出入口多样化能够更好地满足乘客的出行需求[23]，根据预测结果，每增加一个出入口客流量增加 3061 人次。此外，更多的出入口有助于减少绕路系数，从而在提升客流的同时优化周边的土地利用效率[24]。进站客流差受出入口密度差影响更大，密度越大，越容易减少绕路系数，提高进站效率，对于出站的乘客而言，车站出入口密度的大小可能会影响其目的地的寻路决策，但不会影响其出站行为本身。当出入口密度差达 4.1（个/平方千米）时，客流量差出现突变，结合实例发现，这部分突变是由于换乘站的存在而引起的，换乘站点的车站出入口密度基本上都是相邻站点的两倍，这也是因为厦门市的轨道交通换乘站只存在双线换乘。

C3 站城衔接设施密度对出站客流差的影响大于进站客流。密度差较小时，客流差变化不明显；随着密度差增大，出站客流差先增大，随后进站客流差也增大。当密度差达到约 4.82（个/平方千米）时，影响出现边际递减效应，客流差不再明显增加。天桥、地下街等站城衔接设施可以增加车站与周边地块的连接，提高周边地点的可达性，因此增加站城衔接设施可以提升周边地块的商业价值，进而与客流提升形成良性循环。但是过多的衔接设施会导致效益下降，直至成本超出实际效益时，不再适合增建，为平衡客流，建议控制衔接设施差在 4.25（个/平方千米）以下。

D1 公交站点密度差越大，客流差越大，表明公交换乘是轨道交通的有效补充。密度差小于 5.8-6.4（个/平方千米）时，客流差不大；密度差超过这一范围，客流差反而减小，说明公交密度过大会与轨道交通竞争，降低其客流量。当密度差别不大时，可通过增加密度较低站点的公交线路来促进客流增长；当密度差别大时，应增加公交高密度站点的公交数量，以缓解轨道交通的客流压力。

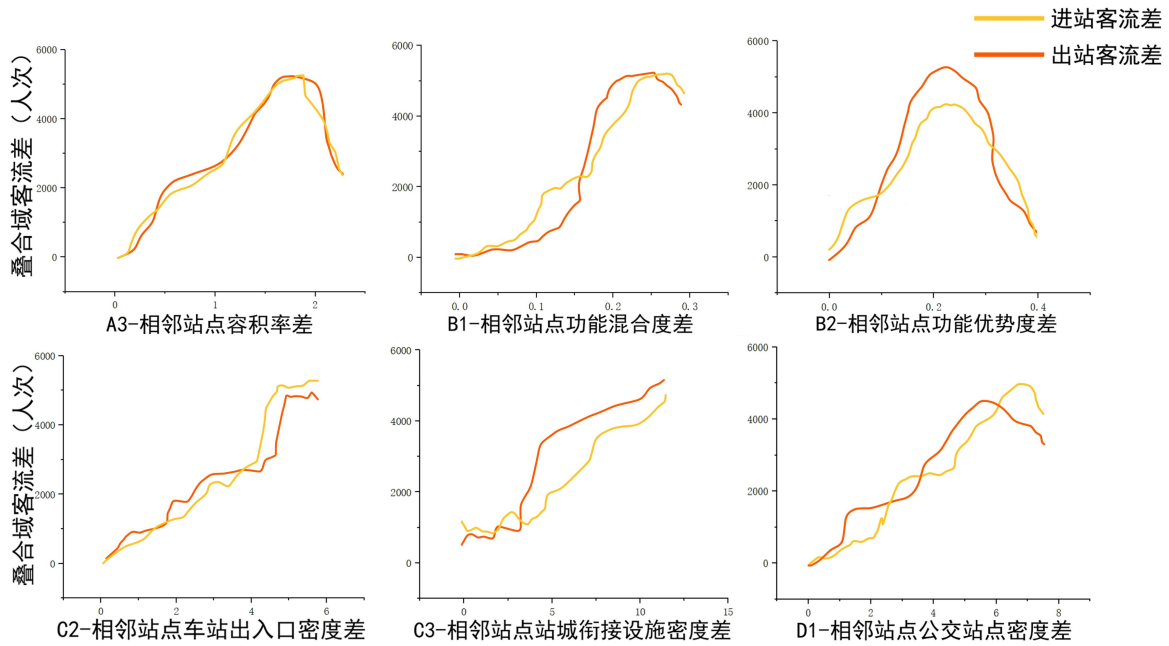


图 11 随机森林回归部分依赖图 (来源: 作者自绘)

## 结语

本研究分析了我国当前轨道交通发展阶段, 阐述了当前轨道交通站点客流超饱和的现象, 将问题聚焦于相邻站点, 以相邻站点间的客流分布为着手点, 研究影响相邻站点叠合域客流分布的建成环境因素。研究表明, 轨道交通站点周边的空间设计在很大程度上影响客流的分布和规模, 通过优化站点周边的土地利用结构、增加车站出入口数量、优化步行连接网络以及优化与公交系统的协作可以提升轨道交通的使用率, 优化相邻站点间的客流分布情况。由于多站点之间空间连通的不不断提升, 功能分布、空间容量、交通换乘等多种城市因素均会发生不同程度的变化。今后将分别从功能、流线、空间承载等方面论证多站协同效应对城市发展建设的具体作用, 以期为未来的高密度城区再开发城市设计提供理论支持。

## 参考文献

- [1] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[M]. 北京: 人民出版社, 2020.10.
- [2] 黄倩. 城市轨道交通线路多车站协同限流方法研究[D].西南交通大学,2017.
- [3] 谢丽平. 城市轨道交通路网多站协同客流控制研究[D].北京交通大学,2018.
- [4] Cervero R, Kockelman K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 1997, 2(3): 199-219.
- [5] Yang J, French S, Holt J, et al. Measuring the structure of U.S. metropolitan areas, 1970-2000: Spatial statistical metrics and an application to commuting behavior. *Journal of the American Planning Association*, 2012, 78(2): 197-209.
- [6] Zhao P, Lv B, Roo G. Impact of the jobs- housing balance on urban commuting in Beijing in the transformation era. *Journey of Transport Geography*, 2011, 19(1): 59-69.
- [7] Curtis, C., Evolution of the transit-oriented development model for low-density cities: a case study of Perth new railway corridor [i]Planning, Practice & Research, 2008, 23 (3) : 285 -302.
- [8] 贾洪飞, 杨丽丽, 唐明, 孟丹. 综合交通枢纽内部行人微观特性及建模需求研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2009.(2): 17-22.
- [9] Kitamura R, Mokhtarian P, Laidet L. A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the San Francisco Bay Area. *Transportation*, 1997, 24(2): 125-158.
- [10] Boarnet M, Sarmiento S. Can land use policy really affect travel behavior? A study of the link between non-work

---

and land use characteristics. *Urban Studies*, 1998, 35(7): 1155-1169.

- [11] Peng Z, Dueker K, Strathman J. Residential location, employment location, and commuter responses to parking charges. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1996, 1556: 109-118.
- [12] Olszewski P, Wibowo S. Using equivalent walking distance to assess pedestrian accessibility to transit stations in Singapore. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2005, 1927: 38-45.
- [13] 吴韬, 严建伟. 北京市轨道站点吸引范围研究. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(3): 183-188.
- [14] 辜峥嵘. 城市轨道交通站际地下空间设计研究[D]. 重庆大学, 2018.
- [15] 覃文忠, 王建梅, 刘妙龙. 地理加权回归分析空间数据的空间非平稳性[J]. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 2005(04): 476-479.
- [16] Breiman L. Bagging predictors[J]. *Machine learning*, 1996, 24: 123-140.
- [17] Yang L, Ao Y, Ke J, et al. To walk or not to walk? Examining non-linear effects of streetscape greenery on walking propensity of older adults[J]. *Journal of transport geography*, 2021, 94: 103099.
- [18] 戴洁, 张宁, 何铁军, 等. 步行环境对轨道交通站点接驳范围的影响. *都市轨道交通*, 2009, 22(5): 46-49.
- [19] 林坚, 宋丽青, 马晨越. 旧城区轨道交通站点周边土地利用调控及动因——以北京市中心城储备用地的规划调整为例[J]. *城市规划*, 2011, 08: 14-19.
- [20] 秦昱晨. 轨交站域影响步行路径选择行为的主客观因素作用一致性研究[D]. 华侨大学, 2023. DOI: 10.27155/d.cnki.ghqiu.2023.000676.
- [21] Duncan M. The impact of transit-oriented development on housing prices in San Diego, CA[J]. *Urban studies*, 2011, 48(1): 101-127.
- [22] Kamruzzaman M, Baker D, Washington S, et al. Residential dissonance and mode choice[J]. *Journal of Transport Geography*, 2013, 33: 12-28.
- [23] Zhu H, Yang X, Wang Y. Prediction of daily entrance and exit passenger flow of rail transit stations by deep learning method[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 2018(1): 6142724.
- [24] Yao C, Li G, Yan S. Design Strategies to Improve Metro Transit Station Walking Environments: Five Stations in Chongqing, China[J]. *Buildings*, 2024, 14(4): 1025.