

城市轨道交通站点周边多层次土地利用优化分析

陈书恺
上海交通大学

摘要: 大力发展公共交通系统和合理规划土地利用是从根本上解决交通问题的两大途径。公交为导向的土地开发模式（TOD）通过集约化、多样性的土地开发利用能够为轨道线路带来巨大客流量，缓解城市道路交通拥挤。为了落实 TOD 模式的具体应用，本文主要研究如何在站点周边用地合理制定土地开发强度以最大发挥 TOD 模式效用。首先，通过聚类分析方法合理区分站点功能，并基于可达性指标，利用 ArcGIS 空间分析功能划分站点周边影响区域。结合站点周边用地结构和 TOD 规划导向，建立双目标土地利用优化模型。通过求解模型获得各类用地最优容积率范围，以此可对站点周边地区现有开发规模强度模式进行评价，并为未来 TOD 规划与决策提供参考。

关键词: 公交导向土地开发，轨道交通，土地利用，双目标规划模型

一、引言

近年来，随着城镇化进程的加快及机动车保有量快速增长，现代城市交通需求规模急剧增大。以上海市为例，第四次上海市综合交通调查表明，私人小汽车注册量已接近 140.2 万辆，居民机动化出行达到 40% 以上。居民机动化出行距离持续增长必将导致交通堵塞、环境污染等问题。因此，要实现城市交通的可持续发展，必须从土地开发与利用出发，实行以公共交通为主导（TOD）的用地规划。

如今我国正处于轨道交通大规模建设时期，是推进 TOD 模式的最佳时机。但是，由于发展时间短，我国大中城市中轨道交通站点周边用地开发还存在一些问题，例如，站点周边土地开发多样性和混合程度与 TOD 模式要求仍有一定差距，开发强度分布格局还有待完善，慢行交通配套设施不够健全等。这样一方面导致职住平衡水平较低，给道路交通系统造成较大压力，另一方面也无法充分发挥轨道交通优势。此外，在商务核心区内往往忽视绿地和行人步行环境的建设，公共场所面积过少，同样不符合 TOD 模式要求的良好的环境品质。

因此，本文从实证研究角度出发，以上海市典型地铁站点周边土地利用为研究对象进行基础数据调研和理论方法研究。从交通、规划等多学科交叉的视角研究站点区域可达性差异和空间圈层划分方法，对科学设置站点周边用地开发容积率提供方法和理论支撑，从而为上海未来轨道交通建设及周边土地利用优化调控提供相关建议，也为国内其他城市轨道交通配套用地规划提供实证参考和借鉴。

二、研究方法与优化模型

为了定量研究轨道站点周边用地开发模式，首先需要明确不同轨道站点的功能导向，并在此基础上建立优化模型并设定相关参数范围。由于规划建设目的以及区位条件的不同，不同轨道站点周边区域用地结构和开发强度往往呈现较大差异，为了准确区分站点功能特征，有必要从现有用地结构出发，通过聚类方法对轨道交通站点功能导向进行分析，找出功能相近的站点集合，为后续设定参数和建立优化模型奠定基础。

影响站点功能的因素很多，其中最主要的因素是站点周边各类用地性质的组成和面积分布比例。为了充分体现不同站点土地利用差异性，本文选取各类型用地面积比例作为功能划分的主要影响因素。由于不同土地混合利用程度可能导致功能导向不同，因此本研究将土地利用优势度指数作为聚类分析的另一个量化指标。土地利用优势度指数越大，站点影响区范围内不同种类用地面积差异越大，其计算公式如下：

$$D = H_{\max} - H = \ln(m) + \sum_{i=1}^m P_i \ln(P_i) \quad (1)$$

其中， D 表示站点周边用地优势度指数； H 表示站点用地多样性指数； P_i 表示站点影响区域范围内第 i 类土地利用面积比例， m 为区域内出现的土地利用类型总数。

确定轨道站点影响区域范围是站点周边用地规划的前提。本文在划定站点影响区域时充分考虑了路网布局和土地利用对周边用地可达性的影响。本文可达性定义为出行者到达轨道站点的最短步行时间，由于出行者在不同用地类型和路网上可能消耗不同的单位时间，因此有必要在地理信息数据栅格化的基础上计算步行时间。单位栅格的可达性定义为

$$A_i = \min_j T_{ij} \quad (2)$$

其中， A_i 为栅格 i 的可达性， T_{ij} 为栅格 i 至站点 j 的最短步行时间。

由此定义可见，每个栅格节点的可达性主要由其距离该点最近的地铁站点以及最短时间确定，该可达性定义法具有直观、简洁的特点，适合于宏观层面的可达性计算和评价。在此基础上，同过 ArcGIS 空间分析功能计算各栅格与站点之间的距离成本，可将轨道站点周边地区划分为 3 个圈层，各个圈层的功能划分大致如下：0-3 分钟圈层：以商住混合用地和行政办公用地为主的高密度开发；3-6 分钟圈层：以公共服务用地向居住用地过渡的混合用地；6-10 分钟圈层：开发强度进一步降低，一般以居住用地和公园绿地为主。

在圈层划分的基础上，本文建立了双目标优化模型，计算各圈层每类土地利用类型的最优容积率，优化模型具体如下：

$$\max Z_1 = \sum_i \sum_j L_{i,j} \cdot x_{i,j} \cdot s_j \cdot k_j \quad (3)$$

$$\min Z_2 = \frac{\sum_i \sum_j c_i \cdot L_{i,j} \cdot x_{i,j} \cdot s_j \cdot k_j}{\sum_i \sum_j L_{i,j} \cdot x_{i,j} \cdot s_j \cdot k_j} \quad (4)$$

$$f_{j, \min} \leq x_{i,j} \leq f_{j, \max} \quad \forall i \quad (5)$$

$$x_{1,j} \geq x_{2,j} \geq x_{3,j} \quad \forall j \quad (6)$$

$$\frac{\sum_i \sum_{j=2}^4 L_{i,j} x_{i,j}}{\sum_i L_{i,1} x_{i,1}} \geq \gamma \quad (7)$$

$$A_j + \beta_j \leq \frac{\sum_i L_{i,j} \cdot x_{i,j}}{L} \leq A_j + \alpha_j \quad \forall j \quad (8)$$

式中, $L_{i,j}$ 表示圈层 i 中土地利用类型 j 用地面积 (m^2); $x_{i,j}$ 表示圈层 i 中土地利用类型 j 容积率大小 ($i=1$, 居住用地; $i=2$, 商业用地; $i=3$, 公共行政用地); s_j 表示土地利用类型 j 轨道交通分担率; k_j 表示土地利用类型 j 人均出行率 (次/人); c_i 表示圈层 i 中平均出行时间 (分钟); $f_{j,\max}$ 和 $f_{j,\min}$ 分别表示优化模型中土地利用类型 j 容积率上限与下限值。 A_j 表示参照轨道交通站点土地利用类型 j 用地比重; α_j 以及 β_j 值分别表示土地利用类型 j 用地比重差值的上限与下限值。

在模型的目标函数中, Z_1 为衡量轨道交通站点客流量的指标 (面积·次/人), 即提高轨道交通站点客运量; Z_2 为衡量轨道交通站点出行成本的指标, 即减少轨道交通出行者步行时间。约束条件(5)表示容积率的管控值; 式(6)表示不同空间圈层开发强度限制, 容积率随着离站点距离增加而逐层递减; 式(7)表示站点类型的功能限制, 即由于站点功能不同而导致其各土地利用类型中公共建筑与居住面积比重的差别; 式(8)表示土地混合利用程度限制, 分别以功能相近的成熟站点周边土地利用现状为参照, 尽可能减小研究站点与参考站点的用地差别。

以上模型为双目标非线性规划模型, 其中各类参数 γ , α_j 以及 β_j 值可依据站点的功能分类, 参考与其功能相近并处于相似区位条件站点进行设定。考虑到目标函数的非线性特征, 本文采用 MATLAB 遗传算法工具箱求解模型。

三、结果与分析

本文选取了上海市范围内 20 个具有 TOD 模式开发特征或潜力的站点作为分类样本，所有样本站点所在区位覆盖上海内环、中外与外环各区域。以 10 分钟步行时间为标准（800 米）确定站点的影响区域，计算各类用地占地面积比例和用地优势度指标。经过分层聚类分析，可将 20 个样本站点分为五类：核心区商业办公型站点，非核心区商业办公型站点，公共服务型站点，居住型站点，交通枢纽型站点以及科教办公型站点。分类结果如表 1 所示。

表 1 站点功能分类结果及对应特征

站点类型		相关站点	用地比例特征	优势度
商业办公型站点	核心区	徐家汇、五角场	居住用地比例 <40%，商业办公用地比例 >40%	< 0.3
	非核心区	七宝、大连路、莘庄、莲花路、世纪大道	居住用地比例 >40%，商业办公用地比例 >30%	< 0.4
公共服务型站点		人民广场、虹口体育场、耀华路	居住用地比例 <40%，商业办公用地比例 >25%，公园绿地比例 >20%	< 0.3
居住型站点		曹杨路、大华三路、娄山关路、彭浦新村、巨峰路、赤峰路、鲁班路	居住用地比例 >50%，商业办公用地比例 <30%	> 0.3
交通枢纽型站点		上海火车站、上海南站	交通设施用地比例 >30%	< 0.2
科教办公型站点		张江高科	教育科研用地 > 10%，办公用地比例 >30%	< 0.2

一般说来，核心区商业办公型站点位于内环以内，而非核心区商业办公站点则多分布于中环与外环之间。商业办公站点的用地类型比例分布相比于居住型站点更加均匀。本文分别选取居住型站点以及非核心区商业办公型站点中的娄山关路和莲花路地铁站作为进一步研究对象，其参考站点分别为曹杨路站和莘庄地铁站。

娄山关路和莲花路地铁站分别位于 2 号线和 1 号线上，根据站点周边路网和各类土地利用类型分布现状生成出行时间成本栅格图，绘制其周边步行时间圈层，如图 1、2 所示。

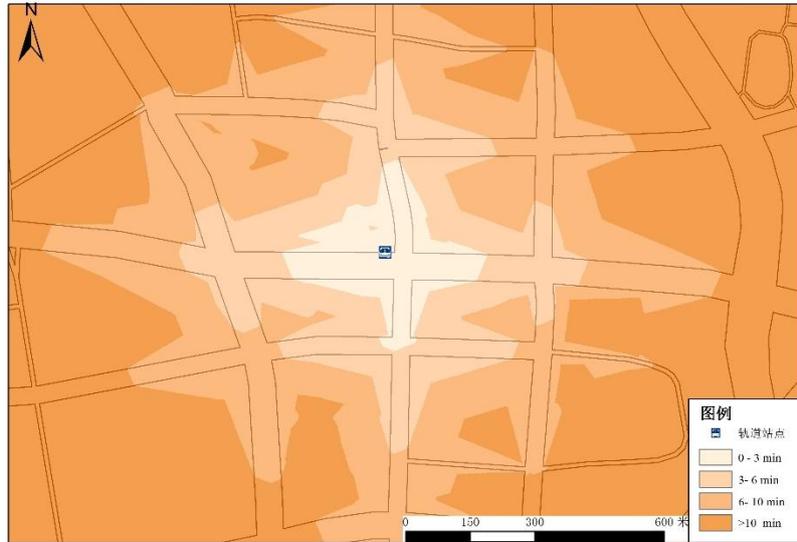


图 1 娄山关路周边步行时间圈层图



图 2 莲花路周边步行时间圈层图

如图 1-2 所示，可达性圈层主要沿着路网向外延伸扩展，如果路密度较高，其延伸范围相对较广，反之街区尺度较大，其圈层延伸范围将受到影响。娄山关路站周边路网分布较为规整，0-3 分钟圈层能够覆盖天山商住楼、虹桥公寓等商住混合小区；然而，随着离地铁站距离增加，地块面积逐渐增大，路网密度有所下降。对于莲花路站，其周边街区尺寸相比于娄山关路地铁站较大，因而通达性相对较差。

根据聚类分析结果，娄山关路和莲花路地铁站分别属于非核心区商业公共型和居住型地铁站，其优化模型参数设置将有所不同。例如，结合参考站点曹杨路

站周边建设情况，娄山关路站优化模型中 γ 值设定为 0.3，居住与公共建筑（商业金融与办公行政）面积比值比例上下限分别为 0.4-0.6 与 0.2-0.4。对于莲花路站，模型中 γ 值设定为 0.5，居住与公共建筑（商业金融与办公行政）面积比值比例上下限分别为 0.4-0.5 与 0.3-0.4。根据相关文献调查统计结果设置出行率和轨道交通分担率，求解优化模型，可得到一系列 Pareto 最优解，选择具有代表性的三个解，分别表示出行时间最少、客流量和出行时间相对平衡以及最高客流量的容积率方案。娄山关路和莲花路站的最优解与开发现状对比结果如表 2-3 所示：

表 2 帕累托最优解与现状对比（娄山关路站）

方案	0-3 分钟			3-6 分钟			6-10 分钟		
	居住用地	行政办公	商业金融	居住用地	行政办公	商业金融	居住用地	行政办公	商业金融
X1	2.00	0.00	3.50	2.00	3.35	3.34	1.61	2.07	1.96
X2	2.00	0.00	3.50	2.00	3.02	3.42	1.76	2.62	2.80
X3	2.00	0.00	3.50	2.00	3.02	3.43	2.00	2.11	3.26
现状	2.55	0.00	3.18	1.71	4.95	2.93	2.29	3.29	3.28

表 3 帕累托最优解与现状对比（莲花路站）

方案	0-3 分钟			3-6 分钟			6-10 分钟		
	居住用地	行政办公	商业金融	居住用地	行政办公	商业金融	居住用地	行政办公	商业金融
X ₁	1.80	2.50	2.48	1.79	1.71	1.71	1.47	1.64	1.65
X ₂	1.80	2.49	2.48	1.80	1.78	2.00	1.72	1.67	1.70
X ₃	1.80	2.45	2.46	1.80	2.30	2.28	1.79	1.75	1.80
现状	1.81	1.15	2.54	1.43	1.11	1.74	1.28	1.22	1.13

对于娄山关路站，三个方案中 0-6 分钟圈层内各类用地容积率差别不大，各方案主要通过调节 6-10 分钟圈层的用地容积率以减少出行成本和周边环境负荷。6 分钟圈层内的居住用地开发强度已能够满足 TOD 模式要求，而行政办公用地在高密度开发的同时也大致形成了逐层递减开发格局。在新建项目中，外圈层住宅容积率不宜过高，应保持在 1.6-2 左右，而核心圈层的公共用地开发强度一般可在 2-3.3 左右。同时，由于站点周边公共用地开发强度较高，而人均绿地面积相对较低。有必要利用现有空间资源提高绿化率，提升办公居住环境品质。

在莲花路站中，外围两个圈层内居住用地开发强度与理想值仍有一定差距，说明外围的老式居民区仍有继续开发利用的潜力，其开发强度可在 1.4-1.8 之间。

考虑到莲花路站周边城开中心还处于建设当中，其站点 10 分钟圈层内的行政办公用地容积率还有较大提升空间。根据最优解结果，其最佳容积率至少在 1.7-2.3 范围内。此外，现有商业用地在 6-10 分钟圈层内开发强度还有待提高，以提升居民社区活力。

四、结论

本文通过借鉴国外最新研究成果，引入空间分层理念，定量计算土地开发强度推荐值，以落实 TOD 理论在城市土地开发中的应用。为了确定研究站点功能导向，本文选择了各类用地面积比例和用地优势度指标对上海市 20 个典型轨道站点进行功能聚类分析，将站点功能具体分为核心区以及非核心区商业办公型站点，公共服务型站点，居住型站点，交通枢纽型站点以及科教办公型站点。利用 ArcGIS 空间分析方法，确定了基于可达性的轨道站点影响范围。提出了基于不同空间层次的土地开发强度的双目标优化模型，确保在获得最大轨道站点运量同时实现开发强度最优布局，减小平均出行时间。结果发现其中 0-3 分钟圈层开发强度较高，外围圈层容积率下降明显，各个圈层功能导向为：商业办公-商住混合-居住。通过对比案例站点开发现状，发现除了应在核心圈层内提倡高密度土地开发以外，还应特别注意在外围圈层新建项目控制开发强度，以营造良好的居住生活环境品质。