

基于轨道交通可达性的土地利用开发协调评估研究

周溶伟 王晓 龙俊仁

【摘要】在城市系统中，土地利用与轨道交通有着密切联系，而土地开发开发与轨道交通建设规划隶属于不同部门统筹，亟需建立面向轨道交通可达性的土地利用开发协调评估方法和路径。本文以深圳市为例，构筑 2025 年轨道交通拓扑网络，考虑出行时间、区域人口岗位等因素，评估轨道交通站点 3 公里范围区域轨道交通可达性水平。通过轨道交通可达性与土地开发强度密度分区的双变量空间关联分析，结果显示：2025 年深圳市整体轨道交通与土地利用开发处于均衡发展；但城市外围地区，如机场东、白坭坑、沙井、光明、盐田等地区，呈现轨道交通较高可达-开发强度较低或者轨道交通较低可达-开发密度较高的不均衡发展特征。针对轨道交通与土地开发强度发展不均衡地区，从规划调整、体制机制等方面提出建议，为其他大城市评估并促进轨道交通与土地利用开发协调发展提供参考路径。

【关键词】轨道交通；可达性；开发强度；深圳市

1 引言

城市轨道交通的建设有利于提升沿线土地的可达性，提高沿线土地的开发速度、开发强度和土地价值，轨道交通与土地利用的协调发展显得尤为重要^[1]。由于城市轨道交通建设规划与土地利用规划隶属于不同政府部门分管，较难形成“轨道交通-土地利用”的反馈闭环，以深圳市为例，新一轮深圳市国土空间规划、深圳市城市规划标准与准则-密度分区指引等城市空间规划与轨道交通专项规划尚未建立有效互动机制^{[2] [3] [4]}，存在潜在轨道交通与土地利用发展不均衡的问题。此外，利用以百度、高德 API 为代表的互联网路径爬取技术较难实现对规划轨道交通网络周边区域各端点最短路径信息的获取，制约了精准评估规划轨道交通网络与土地利用开发协调度。

本文以深圳市规划年轨道交通网络(包含 196 公里市域城际网络和 648 公里城市轨道交通网

络) 为例, 构建轨道交通拓扑网络模型, 利用最短路径模型, 测算轨道交通站点周边 500 米栅格间最短出行时间, 综合考虑栅格 2025 年人口岗位分布, 评估各栅格轨道交通可达性水平。分别利用双变量全局莫兰指数和双变量局部莫兰指数模型, 从城市层面评估轨道交通可达性与建设用地开发强度的整体耦合度, 识别各栅格轨道交通与土地利用耦合度类别, 针对不同类别区域, 提出未来城市及轨道交通规划与建设的建议。

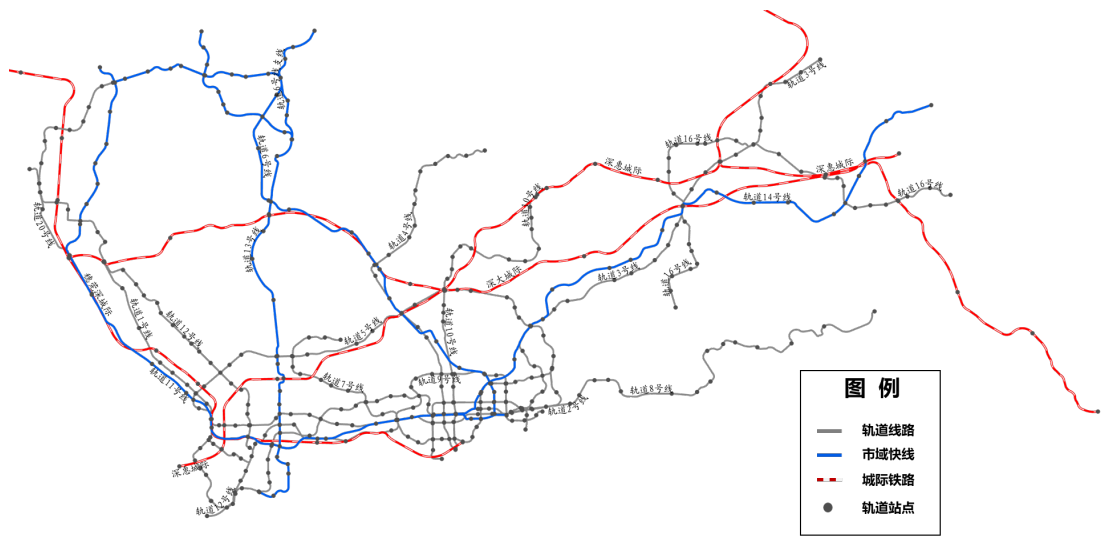


图 1 2025 年深圳市轨道交通网络图

2 研究方法

2.1 基于 GIS 构建 2025 年轨道交通拓扑网络模型

利用 GIS 软件, 构建 2025 年轨道交通拓扑路网模型, 考虑交通设施本身包括轨道交通线路、站点和轨道交通线路间换乘节点的连接, 以及起始点栅格和终止点栅格的属性, 包括人口岗位量、建成区面积、至 3km 范围内轨道交通站点优先考虑接驳工具及接驳时间。具体过程为:

(1) **空间数据导入。**将深圳市 2025 年轨道交通线路网络、站点、区域栅格导入本地地理数据库, 抽象为有向网络。

(2) 设置轨道交通网络的连通规则。按照轨道交通不同等级，建立线网线段-节点拓扑网络模型，根据不同层次轨道交通线路设计速度、站间距、车内时间、停站时间等，综合测算线路区间旅行时间。

表 1 各轨道交通制式车内时间与站间距关系表

线路类型	设计速度 (km/h)	车内时间 T (min) 与 站间距 L (km) 关系	停站时间 (s)
轨道普线	80	$T=0.91*L+0.49$	40
市域快线	100	$T=0.79*L+0.68$	40
	120	$T=0.73*L+0.60$	40
城际线	200	$T=0.6*L$	120 或 180

(3) 设定轨道交通线路间换乘连接。综合考虑不同层次线路发车间隔、车站布局等因素，按照不同线路间换乘设置不同换乘时间，其中城市轨道交通线路换乘城市轨道交通线路设置为 5 分钟、城市轨道交通线路与城际轨道交通线路以及城际轨道交通线路间线路换乘设置为 10 分钟。

(4) 划定轨道交通辐射范围，构建辐射区域岗位与站点的连通。按照站点周边不同范围（300 米、500 米、800 米、1000 米、1500 米、2000 米、3000 米）内的栅格，假定设置不同的接驳方式与站点连接，并对应设置接驳时间。

表 2 不同距离接驳方式及对应接驳时间表

距离范围 (m)	接驳方式	非直线系数	接驳距离 (m)	出行速度(km/h)	接驳旅途时间 (min)	接驳等候时间 (min)	接驳总时间 (min)
300	步行	1.2	360	4.5	5	0	5
500			600		8		8
800			960		12		12
1000	自行车		1200	10.8	9	3	11

1500			1800		12		15
2000	公交车	2	4000	18	13	5	18
3000			6000		20		25

2.2 轨道交通交通可达性模型

在轨道交通拓扑网络模型的基础上，利用 Dijkstra(迪杰斯特拉)算法^[5]迭代测算某一轨道交通辐射栅格至其他轨道交通辐射栅格出行时间，并统计栅格 45 分钟可以到达的栅格名称及数量。通过评估各栅格 45 分钟可以到达人口与岗位数量，反映栅格利用轨道交通高效到达居住点和就业点的水平。具体过程如下：

（1）利用 Dijkstra 算法识别轨道交通辐射范围栅格最短出行时间路径

1) 创建距离权重邻接矩阵。确定规划节点，根据区间通行时间进行路段节点距离权重的赋值，同一节点距离为 0、非相邻节点之间距离为 ∞ 。

2) 创建标记节点集合 $M=\{\text{Origin_Node}\}$ 与未标记节点集合 U （包含 Origin_Node 以外的所有节点），以 Origin_node 作为第一次迭代初始点开始从集合 U 中搜索距离 Origin_node 最近节点 Cloest_Node ，并记录对应最近节点的节点值。

3) 将 Closet_Node 节点作为下一次迭代初始点，设置 Origin_Node 为 Destination_Node 并从未标记节点集合 U 中取出，放入标记集合 M 中，对未标记节点集合 U 中各个节点与起始点的距离值进行更新。

4) 通过多次迭代，直至搜索到目标点，结束计算，获得栅格间最短出行时间路径及路径出行时间。

（2）评价栅格轨道交通可达性水平

可达性作为衡量交通公平程度的重要指标，反映个体利用给定的交通方式获得资源的难

易程度。在评估可达性水平方式中，设定特定时间内获取累积机会能力是许多学者用来度量可达性的首选^[6]。结合深圳发展实际情况，将轨道交通可达性水平界定为从某一区域出发，利用以轨道交通为主导的出行交通方式，45 分钟范围内可获得的人口和岗位数量，反映个体高效轨道交通出行获取居住和就业的水平。

根据可达性水平界定条件，在栅格间最短出行时间的基础上，统计 45 分钟内出行关联相关的栅格 OD 对、45 分钟可达人口岗位数量。

2.3 空间相关分析

空间相关分析是一种统计检验方法，在给定的显著性水平下，分析评价指标的空间集聚特征。莫兰指数是度量空间相关性的一个重要指标，分为全局莫兰指数(Global Moran's I) 和安瑟伦局部莫兰指数(Anselin Local Moran's I)^[7]。全局莫兰指数是随机变量 X 在空间单元 i (即 x_i) 与空间单元 j (即 x_j) 的空间相关性，经过方差归一化之后的值为-1.0~1.0。Moran's I>0 表示空间正相关，值越大相关性越明显；Moran's I<0 表示空间负相关，值越小空间差异越大；Moran's I=0 表示空间呈随机性。安瑟伦局部莫兰指数作为细粒度的空间统计工具，可以利用自身数据与周边数据的比较生成聚类特征分组。

空间自相关的全局莫兰指数可表示为：

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2},$$

式中：I 为全局莫兰指数；n 为要素总数； S_0 为空间权重的聚合； w_{ij} 为要素 i 与 j 之间的空间权重； z_i 为要素 i 指定属性与平均值($\bar{z}$)的偏差， z_j 为要素 j 指定属性与平均值($\bar{z}$)的偏差。其中，

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j}.$$

计算出全局莫兰指数后，使用 Z 检验对其进行验证。

$$Z = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}},$$

其中，

$$E[I] = \frac{1}{n-1},$$

$$V[I] = E[I^2] - E[I]^2,$$

$$P = (1 - \text{NORMSDIST}(Z)) \times 2,$$

式中：Z 为偏离方差的程度；P 表示原假设为真时的概率，NORMSDIST 为正态累积分布函数，在 95%的置信水平下，满足 $|Z| > 1.96$ 或 $P < 0.05$ ，即可拒绝原假设，有充分理由认为莫兰指数显著。

在进行设施空间相关评价时，先进行全局莫兰指数分析，判断设施是否有集聚特征，若有，进行安瑟伦局部莫兰指数分析，进一步分析局部样本分布。

3 结果及分析

3.1 2025 年轨道交通可达性水平结果

基于轨道交通拓扑模型和可达性模型，测算 2025 年深圳市轨道交通辐射范围内所有栅格 45 分钟可达人口岗位数量，利用 GIS 软件，将栅格落入空间进行可视化，如图 2 所示。

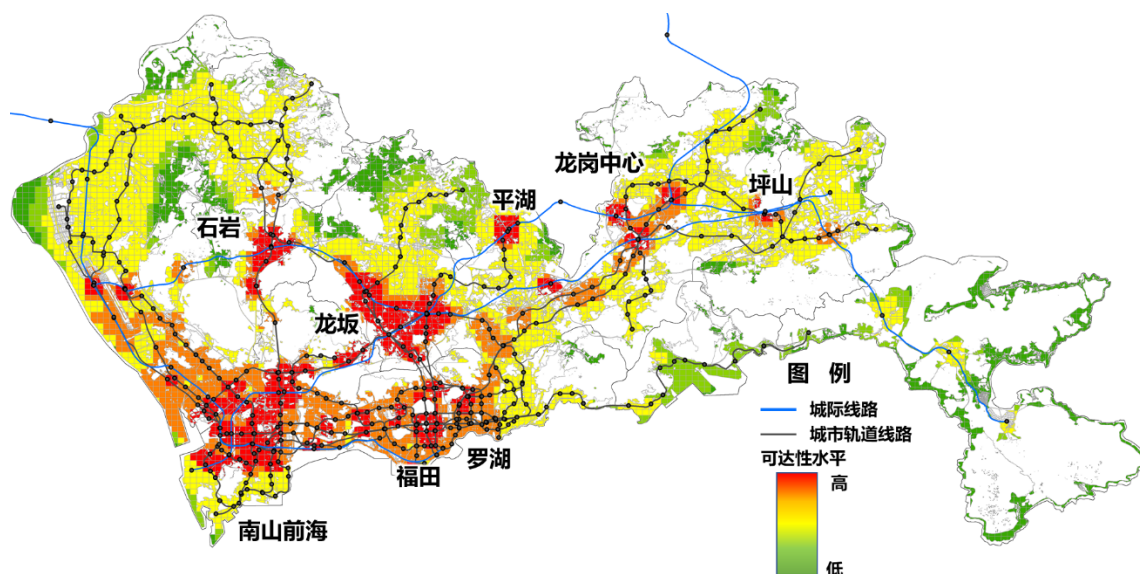


图 2 2025 年深圳市轨道交通可达性水平图

轨道交通高可达区域主要分布在城市核心区以及城市外围中心区域，其中，南山前海、福田、龙坂等城市核心区区域位于城市最为核心地区，与人口岗位高密度集聚区空间距离较近，时间成本代价相对较小；区域内有城际轨道、城市轨道快线、城市轨道普线等多层次轨道交通接入，服务水平较高，区域呈现整体可达性较高。部分外围城市中心，例如龙岗中心、坪山、平湖、石岩、机场东等区域，虽距离人口岗位高密度区域范围有限，但有城际和城市轨道快线接入，核心站点周边区域可达性仍处于较高水平。

轨道交通中可达区域主要分布于非城市核心区轨道交通沿线区域以及部分核心区区域。其中，空港-沙井、光明、观澜、横岗等区域与城市人口岗位高密度集聚区域存在一定空间距离，且区域内轨道交通主要以城市轨道普线服务为主，长距离高效辐射有限，轨道交通可达性等级处于中等。另外，蛇口、黄贝、翠竹、莲塘等区域主要以城市轨道普线服务覆盖为主，且线路走向相对曲折，45 分钟内辐射高密度人口岗位集聚区域有限。

轨道交通低可达区域主要分布于非轨道交通沿线的城市外围区域，该类区域位于城市较为偏远地区，距离轨道交通站点有一定距离，轨道交通可达性相对较低。

3.2 规划土地利用开发水平结果

依据《深圳市城市规划标准与准则》提出的密度分区，将城市建设而用地地块用地密度分为五个等级（不包括机场、港口、核电站等特殊管理地区），分别为密度一区、密度二区、密度三区、密度四区、密度五区，按照不同密度区域等级和用地属性明确基准容积率，如下表所示。

表 3 不同用地容积率表图

密度分区	居住		商业服务	工业		物流仓储	
	基准容积率	上限容积率		新型产业用地	普通工业	物流用地	仓储用地
一区	4.6	6.0	5.4	4.0	3.5	4.0	3.5
二区	4.6	6.0	4.5	4.0	3.5	4.0	3.5
三区	3.5	5.0	4.0	4.0	3.5	4.0	3.5
四区	2.5	4.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
五区	1.0	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

综合考虑栅格密度分区等级和用地性质，将未来规划容积率落入空间上，如图 3 所示。

整体呈现城市核心区整体高密度，外围地区开发强度相对较低的特征。城市高密度开发区域主要集中在罗湖、福田、南山、前海、宝中、龙坂等城市核心区区域，以及部分外围中心，如龙岗中心、坪山中心、平湖、光明中心等。

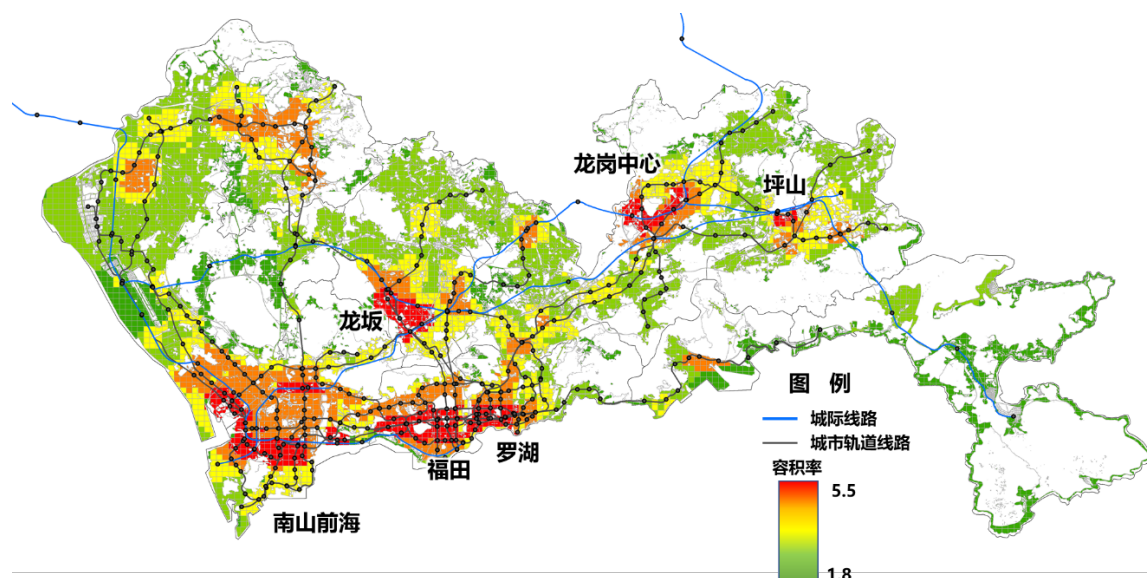


图 3 规划容积率分布图

3.3 可达性与建设用地协调发展分析

3.3.1 全局协调性分析

将轨道交通网络通过空间句法转化为线段组合，求出全局整合度；轨道交通的全局可达性通过全局整合度进行评价，以区域规划开发密度分布作为研究基础，评估轨道交通沿线区域联紧密程度，即利用轨道交通是否能轻松到达某一区域，是评价轨道交通可达性的重要指标。

将栅格建设用地开发强度与轨道交通可达性进行量化分析，将数据导入 GeoDa 软件，计算相关的空间权重，以轨道可达性水平为主变量，以建设用地开发强度水平为次变量，通过对双变量进行莫兰指数相关性分析，结果发现莫兰全局相关指数为 0.688，其中 P-value 为 0.001，Z-value 为 32.58，拒绝原假设或通过显著性检验，表明轨道交通可达性与建设用地开发强度整体呈现正相关。

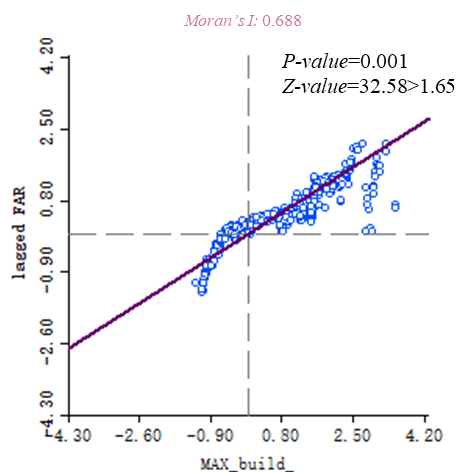


图 4 双变量全局莫兰指数相关性分析图

3.3.2 局部协调性分析

为进一步探究城市不同区域建设用地规划开发强度与轨道交通可达性水平的协调发展情况，将数据导入 GeoDa 软件，以轨道交通可达性水平为主变量，以建设用地开发强度水平为次变量，进行局部莫兰指数分析，结果图 5 所示。规划轨道交通可达性与用地开发强度整体处于协调发展，其中约 56% 的栅格区域属于高可达高开发强度等级与低可达低开发强度等级，轨道交通与土地利用发展基本协调。高可达高开发强度区域主要分布在城市核心区内以及外围东部中心，包括平湖、龙岗中心、坪山中心等区域。另一方面，城市外围地区轨道交通与土地开发的不均衡性相对较高。机场东、空港、石岩、白坭坑、坪地等区域呈现轨道交通较高可达、开发强度较低的不均衡发展情况，无法充分发挥轨道交通对于站点周边开发与带动作用；沙井、光明、观澜、盐田等区域呈现较低轨道交通可达、较高密度开发的情况，轨道交通服务无法满足该类较高开发密度片区内乘客高质量轨道交通出行。

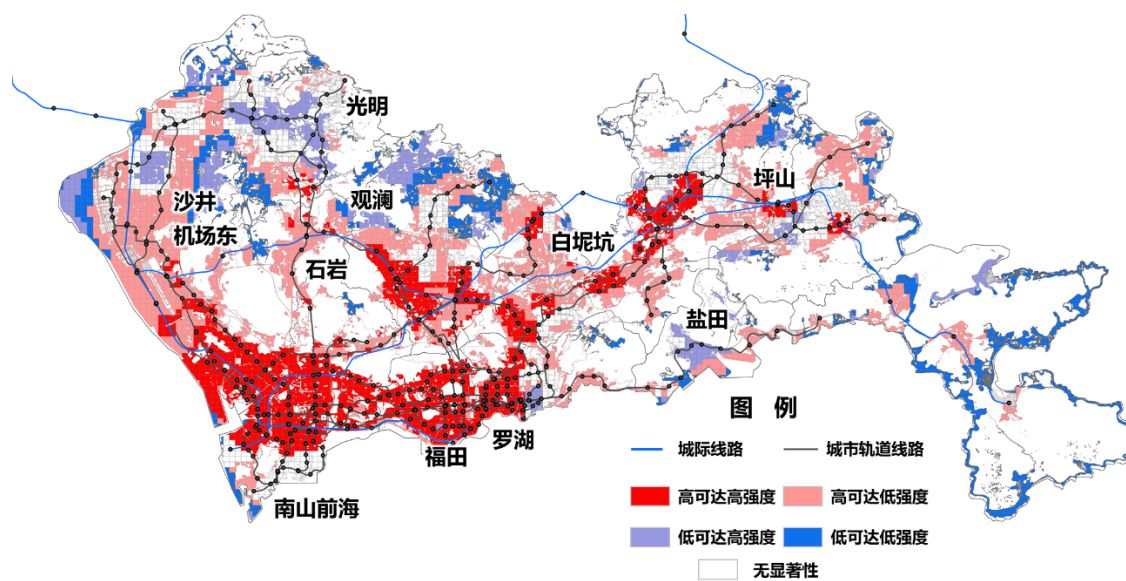


图 5 双变量全局莫兰指数相关性分析图

3.4 建议

3.4.1 依托相关上位规划，加强城市外围地区轨道交通与土地强度均衡发展

针对低轨道交通可达性高开发强度区域，建议利用城市轨道交通线网规划、建设规划等上位规划的研究，结合最新城市国土空间规划等城市空间布局的要求，研究该类区域轨道交通线路加大供给需求的必要性和迫切性，重点研究建设 18 号线、22 号线等轨道交通线路的必要性和迫切性，推动对沙井、光明、观澜、盐田等地区轨道交通可达性的提升。

针对高轨道交通可达性低开发强度区域，在编制新一轮《深圳市城市规划标准与准则-密度分区指引》时，综合用地情况、开发限制等因素，适当增加机场东、空港、石岩、白坭坑、坪地等区域开发强度。

3.4.2 推动建立公交（轨道交通）可达性与开发强度联系机制，形成高效协同互动

从城市层面，探索建立公共交通（轨道交通）可达性与开发容积率联系互动机制，在推动深标容积率优化修正时，探索将公共交通可达性纳入深标开发强度制定的核心因素，推动

高可达性轨道交通站点区域特别是核心区域密度提升,促使增量开发向轨道交通枢纽站点集聚。同时,强化轨道交通对城市更新容积率引导作用城市更新容积率上限与轨道交通可达性挂钩,避免存量时代的全域高密度蔓延。

4 结论

基于轨道交通线网、人口岗位栅格等数据,利用拓扑网络和最短路径模型,构建 2025 年轨道交通可达性模型,识别出深圳市轨道交通高可达区域主要分布于城市核心区内部以及部分外围区域。通过轨道交通与土地开发强度的双变量空间关联分析结果显示,轨道交通可达性与土地开发强度整体处于协调发展区域(56%栅格区域处于协调发展),但城市外围地区轨道交通与开发强度发展不均衡较为明显,未来应重点加强该类区域轨道交通服务覆盖,特别是城市轨道快线,或适当提升部分区域开发强度标准,促进轨道交通与土地利用协调发展。同时,需从城市层面,构建一套公共交通可达性与开发容积率联系机制,强化二者互动关系。

参考文献

- [1] 李锁平. 都市圈轨道交通的土地利用若干问题研究. 东南大学, 2005.
- [2] 深圳市规划和自然资源局. 深圳市国土空间总体规划(2020-2035 年)(草案)公示. 深圳, 2021.
- [3] 深圳市规划和自然资源局. 深圳市城市规划标准与准则-密度分区指引. 深圳, 2018.
- [4] 深圳市城市轨道交通规划设计研究中心股份有限公司. 深圳市城市轨道交通第四期建设规划调整(2017-2022 年)[R]. 深圳, 2019.
- [5] 李宁宁, 刘玉树. 改进的 Dijkstra 算法在 GIS 路径规划中的应用[J]. 计算机与现代化, 2004, 000(009): 12-14.
- [6] 向谦楠, 陈义华. 轨道交通可达性与区域经济发展的相关研究[J]. 铁道运输与经济,

2010(11): 69-72.

[7]白永亮, 杨扬. 长江经济带城市制造业集聚的空间外部性: 识别与应用[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2019, 025(003): 14-28.

作者简介

周溶伟, 男, 硕士, 深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司, 助理工程师。电子信箱: zhourw@sutpc.com

王晓, 男, 硕士, 深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司, 高级工程师。电子信箱: wangxiao@sutpc.com

龙俊仁, 男, 硕士, 深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司, 高级工程师。电子信箱: ljr@sutpc.com