

城市交通与土地利用发展和协同水平组合评价

方法构建与应用

马小毅 何鸿杰 刘明敏

【摘要】针对国土空间规划城市体检评估中特定颗粒度要求、交通和土地利用互动关系缺乏多维度评价等问题，提出一种基于节点场所(Node-Place)模型和数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)模型改进的组合评价方法。首先基于Node-Place模型构造发展水平评价模型，计算交通设施和土地利用的指标综合值，并根据发展水平函数进行计算，获得表示区域开发程度的发展水平；然后基于DEA模型构建协同水平评价模型，将交通设施和土地利用指标分别作为输入，另一方作为输出，计算两种情况下的投入产出效率，并根据协同水平函数进行计算，获得表示区域供需匹配程度的协同水平；最后综合发展水平和协同水平，判断交通与土地利用协同的优化方向与幅度。基于广州市组合评价的实际应用案例结果说明，组合评价方法可从发展水平和协同水平两种维度对区域进行评价，能够对比不同区域的开发强度和供需匹配状态，并提供指标优化值为空间规划改进方向和幅度提供参考。评价结果可应用于空间资源投放水平判断等多种国土空间规划场景。

【关键词】国土空间规划；交通与土地利用；发展水平；协同水平；组合评价

0 引言

自然资源部发布了《国土空间规划城市体检评估规程》(以下简称《规程》)，并于2021年6月18日起实施。该规程对城市体检评估提出新要求，需要在特定周期以一定数据颗粒度对城市发展阶段特征及规划实施效果进行分析和评价。但《规程》中只针对体检使用指标做出要求，并未给出具体的体检评估方法或者评估后改善优化方法，因此相关规划从业者还需要自行探索和建立城市体检评估和优化的详细方法流程。对于现行规划技术体系和实践中既有的交通和土地利用评估方法，宏观方面主要涉及城市交通发展战略规划、城市综合交通体系规划或交通专项研究，从市域范围明确与需求匹配的未来交通模式、设施建设的发展目标^[1]；微观方面主要涉及详细规划，在较小范围内估计土地开发对周边交通设施产生的承载压力，并给出详细的周边改善建议。前者范围较大，评估颗粒度不足，且只能定制宏观优化策略；后者尽管能获得较细致的优化建议，但研究范围较小，基础数据要求和评估成本高，同时部分细节并不是体检评估关注的内容。既有评价实践主要聚焦于表示交通设施容量或土地开发强度水平的发展水平，忽略两者的协同关系。因此需要针对《规程》重新构建颗粒度适中、反映交通与土地利用协同的评估和优化方法，对城市不同区域的交通与土地利用进行

评估并定制优化策略。

1 国内外研究

当前对土地利用和交通设施相互关系研究主要集中在定量模型和更进一步的一体化模型。定量模型包括基于复合系统理论、基于经济投入产出效率、基于专家打分法的协调评价方法。复合系统理论主要包括序参量^[2]、耦合度^[3]、系统动力学^[4]、节点-场所模型^[5]等方法或理论，使用复合系统内部指标来对子系统间的匹配程度进行评价。基于经济投入产生效率的代表评价方法是数据包络分析模型(Data Envelopment Analysis, DEA)^[6]，该方法通过对不同区域构造决策单元，计算相对效率值，进行匹配程度评价。专家打分法主要包括层次分析法、模糊数学等方法，通过预先确定计算指标的权重完成协调匹配水平的评价。

一体化模型主要包括劳瑞模型、基于规划方法、基于经济分析方法和基于中微观仿真模拟方法。劳瑞模型用于描述居住人口和活动产生区位，定量表示出行活动和土地利用的相互作用^[7]。基于规划方法利用预设的指标体系和目标函数寻找最优土地利用和交通发展方案，如以规划求解为基础的土地使用优化系统模型^[8]。基于经济分析方法的基本原理是从城市土地使用成本角度建立土地与交通利用的关系，传统的模型包括 PECAS(Production, Exchange, Consumption Allocation System)^[9]和 LUTE(Land Use, Transport, Environment)^[10]。中微观仿真模拟方法是从较小区域或个体角度模拟土地和交通的相互作用，如元胞自动机等。

目前国内外对土地利用和交通设施相互关系研究虽已比较深入，但仍有研究对象单元精度有限、指标权重赋值缺乏科学依据等常见问题。另外，既有相互关系的评价维度仍集中在发展水平上，评价视角不足，评价结果难以精准。例如生态景区或林场区域的发展水平较低，但由于少量出行活动和有限交通设施相互匹配，因此该类区域协同水平较高；相反，城中村或新城镇的发展水平较高，但由于大量出行活动和稀缺交通设施不匹配，因此协同水平普遍偏低，以上两类区域各存在优缺点，但若仅关注发展水平的情况下会得出前者劣于后者的错误结论。因此，有必要结合《规程》对城市体检评估要求，从发展水平和协同水平两种维度出发，构建适应我国城市交通与土地利用协同评价方法，以对城市内部较小颗粒度单元进行客观评估并定制优化策略。

2 评价方法与指标

2.1 组合评价方法

评价发展水平需要综合考虑土地利用和交通设施指标，根据体检评估场景调整研究对象

单元颗粒度大小，判断区域的发展水平，与其他区域进行比较。节点场所(Node-Place)模型认为交通设施供给服务水平决定交通网络中的“节点价值”，土地利用出行活动情况决定周边区域的“场所价值”，价值越高，区域的发展水平越高，因此选用该模型综合评价发展水平。传统 Node-Place 模型缺乏比较基准、两种价值比较困难的问题，通过添加基准、构造发展水平评价函数、偏度分布调整等模型改进方法，可提高评价结果直观程度、客观性和评价精度。

由于存在高发展水平低协同水平、低发展水平高协同水平的可能，因此除发展水平外，对区域进行体检评估还需评价表示交通设施供给和土地利用活动需求间匹配程度的协同水平。DEA 模型是根据指定供给和需求指标计算系统投入产出效率的专用方法，提供评价和优化两种功能，且与 Node-Place 模型类似，可构造任意颗粒度大小的决策单元代表研究对象单元，因此选用该模型评价协同水平。传统 DEA 模型存在输入输出单向、输入输出指标互换结果不同的问题，为避免土地利用和交通设施指标分别作为输入指标时评价结果产生分歧，将上述两种指标分别作为输入利用 DEA 模型计算投入产出效率，再通过构造的协同水平计算函数完成评价，保证评价结果双向一致。

综上，从发展水平和协同水平两个维度评价研究区域，基于改进的 Node-Place 模型和 DEA 模型建立组合评价方法，具体流程如图 1 所示。

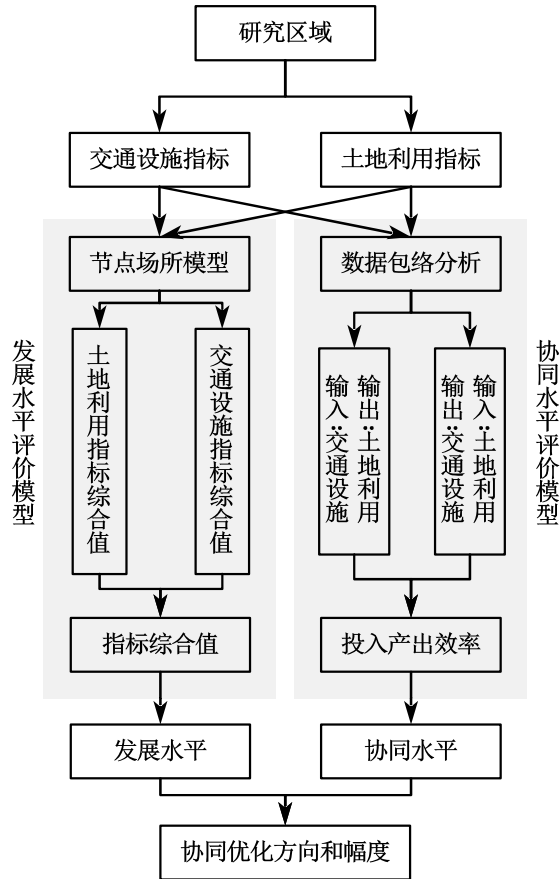


图1 组合评价模型结构

2.2 选用指标

由于构建方法关注的是城市体检评估过程中，交通设施供给和土地利用活动出行需求的绝对水平和相互关系，因此选取指标时，要求土地利用指标与出行活动强度直接正相关，交通设施指标与设施容量和承载力直接正相关，选用指标如下表所示。

表1 选用指标示例

指标类型	指标名称、符号和单位
交通设施指标	轨道站点覆盖面积占比 t_1 (%)
	轨道线路接入数量 t_2 (条)
	轨道线网密度 t_3 (km/ km ²)
	常规公交站点覆盖面积占比 t_4 (%)
	常规公交线路接入数量 t_5 (条)

	常规公交线网密度 t_6 (km/ km ²)
	常规公交站点密度 t_7 (个/ km ²)
	高等级道路密度 t_8 (km/ km ²)
	低等级道路密度 t_9 (km/ km ²)
	个体交通方式到达大型交通枢纽的时间 t_{10} (min)
	公共交通方式到达大型交通枢纽的时间 t_{11} (min)
	个体交通方式到达城市中心的平均时间 t_{12} (min)
	个体交通方式到达城市中心的平均时间 t_{12} (min)
	公共交通方式到达城市中心的平均时间 t_{13} (min)
土地利用指标	人口密度 I_1 (万人/ km ²)
	就业密度 I_2 (万/ km ²)
	建设用地面积占比 I_3 (%)
	容积率 I_4
	产业用地面积占比 I_5 (%)
	兴趣点 POI 密度 I_6 (个/ km ²)

由于交通设施指标 t_9 、 t_{10} 、 t_{11} 和 t_{12} 属于逆向指标，指标值越大交通供给越差，进行发展和协同水平评价前需要对其分布进行逆向处理，即 $t_{im}' = \sqrt{\max_{i=1,2,\dots,N} t_{im} + 1 - t_{im}}$ 。

3 模型构建与结果优化

3.1 发展水平评价模型

设交通小区 i 的土地利用和交通设施系统对应的指标综合值分别为 P_i 和 Q_i 。以发展水平均差于所有交通小区的区域为基准，该基准区域的 P_i 和 Q_i 应等于 0。

交通小区 i 中，输入和输出系统综合指标水平与基准区域的差距定义为交通小区 i 的发展水平，即发展水平 D_i 定义为：

$$D_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \quad (1)$$

P_i 和 Q_i 计算方面，Node-Place 模型首先对上述土地利用和交通设施指标进行标准化处理，消除指标的量纲和数量影响，防止交通小区间的发展水平对比出现偏差。然后直接相加分别得出场所值和节点值，之后将场所值和节点值进行标准化，处理后的结果分别代表各个区域的场所价值和节点价值^[11]。该方法无需人工确定指标权重，结果客观性较强。设研究范围内共有 N 个交通小区，在交通小区 i 上有 M 个指标组成的输入向量 $\mathbf{X}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}\}$ ，由于原始模型对价值参考系的设计存在缺陷，对其进行改进，构造以下指标综合值计算方法 $F(\cdot)$ ，具体流程如下：

Step 1 需要处理的输入指标向量为 $\mathbf{X}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}\}$ ，对 N 个 \mathbf{X}_i 以指标为单位进行转置变形获得 M 个包含所有小区单个指标值的向量 $\mathbf{W}_m = \{x_{1m}, x_{2m}, \dots, x_{Nm}\}$ ；

Step 2 由于大部分指标对应的 \mathbf{W}_m 呈偏态分布，计算综合指标前对 \mathbf{W}_m 进行 Box-Cox 变换(Box-Cox transformation)^[12]，以减少其单变量分布的偏度而更接近正态分布。

Step 3 对 \mathbf{W}_m 进行最小值最大值归一化：

$$x_{im}' = \frac{x_{im} - \min(\mathbf{W}_m)}{\max(\mathbf{W}_m) - \min(\mathbf{W}_m)} \quad (2)$$

Step 4 对归一化后的 x_{im}' 进行求和，获得各交通小区的指标加 $z_i = \sum_{m=1}^M x_{im}'$ 和值，并组成向量 $\mathbf{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ ；

Step 5 对 \mathbf{Z} 进行标准化，并减去标准化后最小的指标加和值，得到输入指标的指标综合值 C_i ：

$$C_i = \frac{z_i - \mu(\mathbf{Z})}{\sigma(\mathbf{Z})} - \min\left(\frac{\mathbf{Z} - \mu(\mathbf{Z})}{\sigma(\mathbf{Z})}\right) \quad (3)$$

式(3)中， μ 表示均值， σ 表示方差。

通过上述流程，任何指标体系场景下，交通小区的指标综合值均可通过计算 $C_i = F(\mathbf{X}_i)$

获得。设交通小区 i 土地利用指标向量为 \mathbf{L}_i ，交通设施指标向量为 \mathbf{T}_i ，分别计算交通小区 i 的土地利用和交通设施系统指标综合值 $P_i = F(\mathbf{L}_i)$ 和 $Q_i = F(\mathbf{T}_i)$ 后，进一步按式(1)计算可获得各小区的发展水平 D_i 。

3.2 协同水平评价模型

3.2.1 投入产出效率计算

假设单个小区 i 是交通设施系统和土地利用系统组成的复合系统，土地利用产生的出行需求由交通设施进行承担。在交通小区 i 的复合系统中，有 M 个指标组成的输入向量 $\mathbf{X}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}\}$ 和 K 个指标组成的输出向量 $\mathbf{Y}_i = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iK}\}$ 。两者对应的重要度向量为 $\mathbf{U}_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iM}\}$ 和 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iK})^T$ 。

当交通小区 i 的交通设施或土地利用一方作为系统输入，另一方作为系统输出时，系统单位输入效益的投入产出效率 E_i 定义为：

$$E_i = \frac{\mathbf{V}_i^T \mathbf{Y}_i}{\mathbf{U}_i^T \mathbf{X}_i} = \frac{\sum_{k=1}^K v_{ik} y_{ik}}{\sum_{m=1}^M u_{im} x_{im}} \quad (4)$$

根据式(4)定义可知，当复合系统的输入越少，输出越高时，系统的投入产出效率越高。显然每个交通小区都存在一种最优 \mathbf{U}_i 和 \mathbf{V}_i 组合，使得 E_i 最大化， E_i 的最大值 $\hat{E}_i = \max E_i$ 不会受 \mathbf{U}_i 和 \mathbf{V}_i 的变化影响。因此使用 \hat{E}_i 代替 E_i ，小区间的投入产出效率根据 \hat{E}_i 的最大潜力 \hat{E}_i 进行比较，可有效避免主观赋权的影响。

求解 \hat{E}_i 的常用模型为 DEA 模型，该模型可在合理的重要度约束下计算 $\max E_i$ [13]。此处使用 DEA 模型中的输入导向 CCR 模型求解 \hat{E}_i [14]：

$$\max E_i \quad (5)$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & E_r \leq 1, \quad r = 1, 2, \dots, N \\ & \mathbf{U}_r \geq \mathbf{0}, \quad \mathbf{V}_r \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中， r 为交通小区编号； N 为交通小区的数量。

使用 Charnes-Cooper 变换获得以下等价的线性规划形式以减少求解难度[15]：

$$\min \left[E_i - \varepsilon \left(\sum_{m=1}^M s_m^- + \sum_{k=1}^K s_k^+ \right) \right] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \sum_{r=1}^N x_{rm} \lambda_r + s_m^- = E_i x_{im}, \quad m = 1, 2, \dots, M \\ & \sum_{r=1}^N \lambda_r y_{rk} - s_k^+ = y_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, K \\ & \lambda_r \geq 0, \quad s_m^-, s_k^+ \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)和(8)中, s_m^- 和 s_k^+ 分别为输入指标的剩余变量和输出指标的亏空变量, 表示交通小区 i 相应指标与前沿面的距离, 即交通小区 i 改善至完全协同时, 对应指标需要优化的量; λ_r 表示交通小区 i 和其他小区 r 的相关系数; ε 为阿基米德无穷小量。

3.2.2 协同水平计算

由于求解式(7)和(8)获得的 \widehat{E}_i 最大值不超过 1, 以土地利用系统、交通设施系统分别作为输入、输出为例, 土地利用出行需求远小于交通设施供给与两者近似相等两种情况下的 \widehat{E}_i 均等于 1。为了防止对协同水平的误判, 将复合系统中的土地利用系统和交通设施系统互相作为输入输出, 基于不同输入基准判断复合系统的协同水平, 有以下两种场景:

1. 土地利用系统作为输入时, 求解 \widehat{E}_i , 获得单位土地利用出行活动需求对交通设施的占用情况, 输入越大, 输出越小, 单位出行活动占用的交通设施供给越少, 投入产出效率越低;

2. 交通设施系统作为输入时, 求解 \widehat{E}_i , 获得单位交通设施服务的土地利用出行活动水平, 输入越大, 输出越小, 单位交通设施服务的出行活动越少, 投入产出效率越低。

当前者 \widehat{E}_i 远小于后者时, 说明土地利用出行需求过高, 交通设施不足; 前者 \widehat{E}_i 远大于后者时, 说明土地利用出行需求过低, 交通设施过剩。只有当前者 \widehat{E}_i 接近后者 \widehat{E}_i 时, 才说明土地利用与交通设施基本匹配协同。

协同水平计算具体流程如下:

Step 1 设置 $X_i = L_i$, $Y_i = T_i$, 求解 CCR 模型得到交通小区 i 复合系统的协同水平、土地利用系统的输入剩余向量 $\{s_1^-, s_2^-, \dots, s_m^-\}$ 和规模效益值 $\sum_{r=1}^N \lambda_r$, 分别记为 $\widehat{E}_{L,i}$ 、 $S_{L,i}^-$ 和 $\mu_{L,i}$ 。

Step 2 设置 $X_i = T_i$, $Y_i = L_i$, 求解 CCR 模型得到交通小区 i 复合系统的协同水平、交通

设施系统的输入剩余向量 $\{s_1^-, s_2^-, \dots, s_m^-\}$ 和规模效益值 $\sum_{r=1}^N \lambda_r$ ，分别记为 $\widehat{E}_{T,i}$ 、 $S_{T,i}^-$ 和 $\mu_{T,i}$ 。

Step 3 当 $\widehat{E}_{L,i} \approx \widehat{E}_{T,i}$ 时，土地利用或交通设施任意一方作为输入，投入产出效率基本不变，此时土地利用出行需求和交通设施供给能力基本匹配协同，因此构造下列函数描述两者的协同水平 θ_i ：

$$\theta_i = \frac{\min\{\widehat{E}_{L,i}, \widehat{E}_{T,i}\}}{\max\{\widehat{E}_{L,i}, \widehat{E}_{T,i}\}} \quad (9)$$

式(9)中 θ_i 越高，小区交通设施供给能力与土地利用活动需求匹配程度越高。

3.3 结果评价和指标优化

3.3.1 结果评价

发展水平方面，区域发展水平的评价结果需要进行分级，以在市域层面完成空间结构划分。具体做法是根据设定期望的分级数量，使用自然间断点分级法对 D_i 进行阈值划分和分级，各小区可进一步获得不同的发展水平等级。

协同水平方面，式(9)表明， $\widehat{E}_{L,i}$ 和 $\widehat{E}_{T,i}$ 越接近， θ_i 越大，说明土地利用出行活动需求与交通设施供给能力匹配程度越高。当 $\widehat{E}_{L,i} = \widehat{E}_{T,i}$ 时， θ_i 达到最大值 1，表示两者完全匹配，当 $\widehat{E}_{L,i}$ 和 $\widehat{E}_{T,i}$ 一方为 1，另一方接近 0 时， θ_i 接近最小值 0，表示两者完全不匹配。值得注意的是， $\widehat{E}_{L,i}$ 和 $\widehat{E}_{T,i}$ 相等时，一定满足 $\widehat{E}_{L,i} = \widehat{E}_{T,i} = 1$ ，即无论土地利用和交通设施系统任何一方作为系统输入，复合系统的投入产出效率均能相对最大化，此时土地利用和交通设施系统完全协同。

3.3.2 指标优化

当 $\mu_{L,i} < 1$ 时，土地利用系统处于规模效益递增状态，应增加开发水平和出行活动强度以改善对交通设施的利用程度，否则应降低。当 $\mu_{T,i} < 1$ 时，交通设施系统处于规模效益递增状态，应增加交通设施建设投入和容量以承载更多出行活动，否则应减少。通常， P_i 或 Q_i 越高， $\mu_{L,i}$ 或 $\mu_{T,i}$ 越高，表示土地利用或交通设施发展水平越大，对应的资源投入性价比越低。

将协同水平 θ_i 小于 1 的交通小区 i 投影到前沿面，根据投影结果和规划场景，获得土地

利用或交通设施指标的优化指标向量 \widehat{L}_i 和 \widehat{T}_i ：

$$\widehat{L}_i = \begin{cases} L_i + S_{T,i}^+, \mu_{L,i} < 1 \\ \widehat{E}_{L,i} \cdot L_i - S_{L,i}^-, \mu_{L,i} > 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\widehat{T}_i = \begin{cases} T_i + S_{L,i}^+, \mu_{T,i} < 1 \\ \widehat{E}_{T,i} \cdot T_i - S_{T,i}^-, \mu_{T,i} > 1 \end{cases} \quad (11)$$

4 实例分析

选用体检评估范围为现状广州市域整体，总面积 7434.4km²，总计 3989 个交通小区，作为评价对象单元。

4.1 发展水平评价

利用发展水平评价模型及各交通小区的选用指标，进行发展水平计算，计算结果如图 2 和图 3 所示。假设期望的分级数量为 8，利用自然间断点分级法将各小区 D_i 分为 8 类，分级阈值为 1.26、1.94、2.61、3.23、3.82、4.42 和 5.01。图 2 中散点图纵坐标和横坐标分别表示小区的交通设施和土地利用指标综合值，通过两个坐标值的相对大小，可对比小区间的发展水平。与散点图原点距离越远的小区，发展水平越大，小区的交通设施承载力或土地利用出行活动强度越大。散点图中发展水平较高的小区基本聚集在图 3 的城市中心区域。随着向城市远郊区辐射，小区的发展水平逐渐下降，对应的交通设施建设投入和土地开发强度也逐渐下降。

因此可以发展水平等级为基础，支撑城市空间结构的确定，8 种发展等级将城市划分为多个区带，这些区带分布与交通设施位置和土地开发强度高度相关。此外，可设定发展水平等级阈值以划定城镇开发边界，将低发展水平调出开发边界，例如将 1 和 2 级发展水平等级（即发展水平值小于 1.94）的区域移除城镇开发边界，剩余的边界范围将集中在城市近郊以内和部分轨道沿线远郊区域。

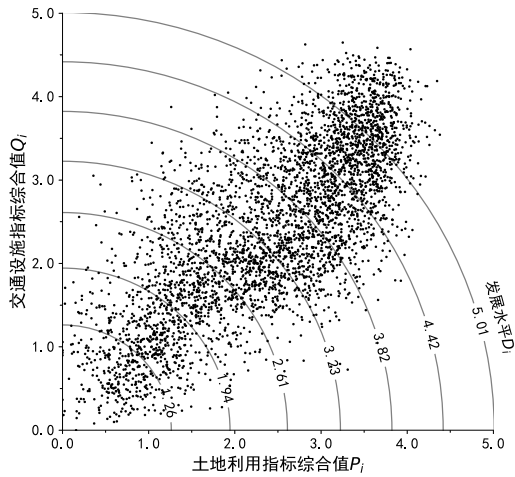


图 2 各交通小区发展水平散点图

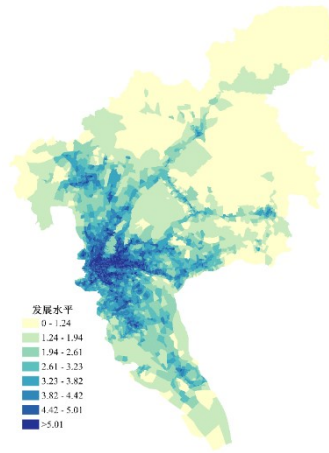


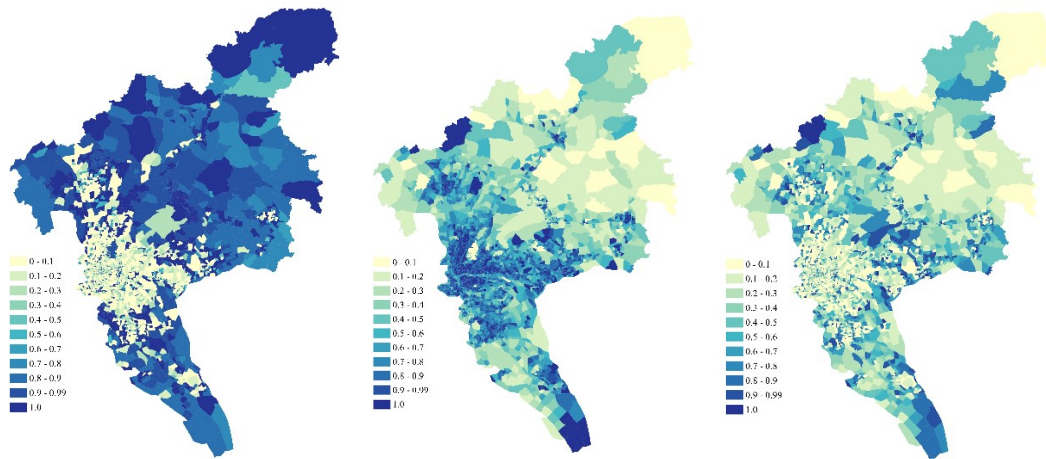
图 3 各交通小区发展水平分布图

4.2 协同水平评价

利用协同水平评价模型及各交通小区的选用指标，进行协同水平计算，计算结果如图 4 所示。图 4(a)、(b)、(c) 分别表示各交通小区的 $\hat{E}_{L,i}$ 、 $\hat{E}_{T,i}$ 和 θ_i 。图 4(a) 中，随着不断向城市中心外辐射，土地利用作为输入时的投入产出效率 $\hat{E}_{L,i}$ 逐渐增大，说明土地开发强度和出行活动需求逐渐减少，且出行需求下降较交通供给下降速率更快，单位出行活动占用的交通设施供给逐渐增多。而图 4(b) 中交通设施作为输入时的投入产出效率 $\hat{E}_{T,i}$ 变化趋势则与 $\hat{E}_{L,i}$ 完全相反，说明随着不断向城市中心外辐射，出行需求下降较交通供给下降速率更快，单位交通设施服务的出行活动逐渐减小。

图 4(c) 为根据 $\hat{E}_{L,i}$ 和 $\hat{E}_{T,i}$ 进一步计算获得的协同水平 θ_i ，随着不断向城市中心外辐射， θ_i 呈现先增大后减少的趋势，说明在大部分城市中心区域和郊区区域交通设施与土地利用供需匹配水平较低，在近郊区两者匹配水平反而较高。

协同水平可用于协同产业和交通设施布局，在城市中心区域，产业相关出行需求强于交通设施供给，协同水平较低，此类区域交通设施饱和，不宜再进驻产业；在城市远郊区域，产业需求远小于交通供给，此类区域交通设施使用率较低，应减少交通设施布局，减少设施过剩，同时增加产业密度，提供出行活动需求。



(a)输入为土地利用的投入产出效率 (b)输入为交通设施的投入产出效率 (c)协同水平
图 4 各交通小区投入产出效率和协同水平分布图

4.3 优化方向和幅度

除协同产业和交通设施布局外，协同评价结果还可辅助判断空间资源精准投放。协同水平评价模型获得表 1 所示规模效益状态后，根据式(10)和(11)进一步计算获得如表 2 所示的指标优化具体值。分别以城市中心、近郊和远郊三个交通小区为例说明协同评价模型给出的指标优化值和规模效益状态如何指导规划优化策略制定、精准确定资源投放量。

大部分位于城市中心的小区，两种规模效益状态均处于递减状态，继续投放土地开发或交通设施建设资源带来回报有限，不宜继续进行增量开发，如表 2 的中心小区 1207，模型优化值建议降低区域的人口就业密度、容积率、轨道和高等级道路密度。

部分位于城市近郊区域的小区，土地利用和交通设施分别作为输入时，处于规模效益递减和递增状态，此类区域发展水平位于中间等级，应继续增加交通设施建设资源投入，同时减少土地开发，如表 2 的近郊小区 806 应在减少人口就业密度、容积率的情况下，提高公交站点和高等级道路密度。

大部分位于城市远郊区域的小区，两种规模效益状态均处于规模效益递增状态，继续增加土地利用开发或交通设施建设资源投放可获得较高收益，此类区域发展水平较低，继续开发的较大，如表 2 的远郊小区 3047，模型优化值建议提升区域所有的交通设施和土地利用指标。

表 1 规模效益状态示例

评价指标		中心小区 1207		近郊小区 806		远郊小区 3047	
		状态值	状态	状态值	状态	状态值	状态
规模效益状态	$\mu_{L,i}$	5.37	规模效	2.32	规模效	0.86	规模效
			益递减		益递减		益递增
	$\mu_{T,i}$	1.04	规模效	0.98	规模效	0.48	规模效
			益递减		益递增		益递增

表 2 各指标的原始值与优化值对比

指标		中心小区 1207		近郊小区 806		远郊小区 3047	
		原始值	优化值	原始值	优化值	原始值	优化值
土地利用指标	l_1 (万人/ km ²)	1.57	0.15	4.92	0.74	0.12	0.81
	l_2 (万/ km ²)	0.71	0.07	2.70	0.41	0.05	0.28
	l_4	2.77	0.12	2.28	0.08	0.01	0.24
交通设施指标	t_3 (km/ km ²)	2.40	0.48	12.02	12.02	1.36	11.71
	t_7 (km/ km ²)	2.83	2.90	11.00	25.24	2.15	6.34
	t_8 (km/ km ²)	1.21	0.49	7.09	8.62	7.07	8.49

5 结语

针对《规程》缺少体检评估方法指导、有一定的颗粒度要求、既有实践缺乏对土地利用和交通设互动关系多维度评价等问题,利用改进的节点场所模型提取指标相对大小和数据包络模型自主确定指标重要度的特点,建立发展水平和协同水平组合评价方法,从发展水平和协同水平两种维度共同评价特定颗粒度的区域。该模型根据输入的交通设施和土地利用指标,使用节点场所模型和数据包络模型求解指标综合值和投入产出效率,再进一步计算获得发展水平和协同水平,评价过程中,模型可自主确定指标权重。通过模型评价结果可知,发展水平可反映城市不同区域间土地利用出行需求和交通设施供给能力的相对大小,用于确定城市空间结构和划定城镇开发边界;协同水平可反应不同区域间的供需匹配程度,用于协同产业和交通设施布局。同时,协同水平评价模型还可给出不同指标对应的优化值,作为规划

优化方向和幅度的参考，用于精准判断空间资源投放水平。通过广州案例实践，交通与土地利用发展水平和协同水平组合评价方法科学可行，具有较高的客观性和全面性。

参考文献

- [1] 张野. 控规单元土地利用与城市交通协调方法研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [2] 赵延峰, 陈艳艳, 罗铭. 城市交通复合系统协调度模型研究[J]. 道路与安全, 2006(04): 31-33+45.
- [3] 孙爱军, 吴钧, 刘国光, 庞金亮. 交通与城市化的耦合度分析——以江苏省为例[J]. 城市交通, 2007(02): 42-46.
- [4] 赵廷峰. 城市土地利用与城市交通协调发展研究[D]. 北京北京工业大学, 2006: 1-93.
- [5] Bertolini L, Spit T, Ebrary I. Cities on rails: The development of railway stations and their surroundings. *Physics in Medicine & Biology*, 1998, 58(2): 287-299.
- [6] 杨励雅, 邵春福. 城市交通与土地利用协调关系的数据包络分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2007(06): 107-112.
- [7] 陈佩虹, 王稼琼. 交通与土地利用模型——劳瑞模型的理论基础及改进形式[J]. 生产力研究, 2007(14): 77-80. DOI: 10.19374/j.cnki.14-1145/f.2007.14.034.
- [8] Waddell P, Nourzad F. Urbansim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2002, 68(3): 297-314.
- [9] Hunt J D, Abraham J E. Design and implementation of PECAS: A generalised system for allocating economic production, exchange and consumption quantities[M]. *Integrated Land-Use and Transportation Models*. Emerald Group Publishing Limited, 2005: 253-273.
- [10] James E. Moore, Kim T J. Mills' Urban System Models: Perspective and Template for LUTE Applications[J]. *Computer, Environment and Urban Systems*, 1995, 19(4): 207-225.
- [11] Reusser D E, Loukopoulos 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.
- [12] Box G E P, Cox D R. An analysis of transformations[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1964, 26(2): 211-243.
- [13] Boussofiane A, Dyson R G, Thanassoulis E. Applied data envelopment analysis[J]. *European*

journal of operational research, 1991, 52(1): 1-15.

[14] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European journal of operational research, 1978, 2(6): 429-444.

[15] Charnes A, Cooper W, Lewin A Y, et al. Data envelopment analysis theory, methodology and applications[J]. Journal of the Operational Research society, 1997, 48(3): 332-333.

作者简介

马小毅, 男, 研究生, 广州市交通规划研究院有限公司, 副总经理, 教授级高级工程师。
电子邮箱: 406017386@qq.com

何鸿杰, 男, 研究生, 广州市交通规划研究院有限公司。电子邮箱: 38528244@qq.com

刘明敏, 男, 本科, 广州市交通规划研究院有限公司, 高级工程师。电子邮箱:
robbenmanu@163.com