

# 城市交通网络形态对工业用地转型的影响

## ——以武汉市为例<sup>1</sup>

饶映雪<sup>1,2</sup> 钟意<sup>1,2</sup> 戴德艺<sup>3\*</sup>

(1. 中南民族大学公共管理学院, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北民族地区经济社会发展研究中心, 湖北 武汉 430074;

3. 湖北经济学院工商管理学院, 湖北 武汉 430205)

**【摘要】**: 城市交通网络的发展通过改变各类城市用地可达性, 推动周边土地利用结构重新“洗牌”, 成为城市更新的主要驱动力之一。以重要工业城市——武汉市为例, 运用核密度分析、地理加权回归、对数衰减函数比较探讨了 2014 ~ 2019 年不同交通道路网络对城市工业用地转型的影响。研究结果表明: (1) 各等级交通道路网络沿线“工转居”总量大于“工转商”总量。(2) 支路路网对“工转居”、次干道路网对“工转商”显著相关且正向驱动作用明显, 并分别呈现出由南至北减弱、由东向西减弱的态势。(3) 路网对“工转居”的吸引作用: 次干道 > 主干道 > 铁路; 路网对“工转商”的吸引作用: 高速路 > 次干道 > 主干道。基于研究成果, 对中国城市空间优化、交通网络规划政策制定提供相关建议。

**【关键词】**: 交通网络形态; 工业用地转型; 地理加权回归; 武汉市

**【中图分类号】**: F420 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2023)03- 0451- 13

**【DOI】**: 10. 11870/cjlyzyyhj202303001

新时代城市工业用地转型不仅是特定产权关系为基础的分配再分配过程<sup>[1]</sup>, 也是城市生产活动空间的调整优化, 对生态文明建设、新型城镇化发展理念下的城市格局重塑具有重要意义。2015 年中央经济工作会议提出供给侧改革, 城市工业用地转型成为促进经济发展方式转变的重要途径, 2021 年国务院政府工作报告中指出“继续完成‘三去一降一补’重要任务”, 城市工业用地转型研究仍是重要任务<sup>[2]</sup>。依据工业区位论的运输区位法则, 选择工业用地布局的核心因素是交通便利。在现代城市空间形态持续变化的背景下, 城市工业用地由于环境保护压力、经济发展等原因而面临着功能升级、布局调整的新挑战, 城市交通网络调整则成为工业用地转型的重要推动力之一。由此, 研究城市交通网络形态对工业用地转型影响具有重要现实意义, 有助于揭示交

<sup>1</sup> **【收稿日期】**: 2022- 03- 23; **【修回日期】**: 2022- 09- 06

**【基金项目】**: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CS222003); 湖北省科技创新人才及服务专项软科学重点项目(2022EDA029)

**【作者简介】**: 饶映雪(1984 ~ ), 女, 教授, 主要研究方向为土地利用与政策. E- mail: raoyingxue\_ryx@163

**【\* 通讯作者 E- mail】**: rande@hbue

通网络形态对工业用地转型的空间效应，优化城市交通网络和工业用地布局。

LUTI (Land Use-Transport Interaction) 研究最早可追溯至 1964 年 Lorry 提出的空间相互作用模型，城市交通对城市土地利用的影响研究是 LUTI 研究重要议题之一<sup>[3]</sup>。随着城市空间优化与交通发展，各国学者在城市交通对城市土地利用影响的理论<sup>[4]</sup>、模型<sup>[5]</sup>、案例应用<sup>[6]</sup>等方面的研究取得了丰富成果，研究内容也从早期集中探讨主干道、快速路、铁路等传统交通设施对土地利用变化的影响，扩展到近年关注地铁、轻轨等新兴轨道交通及其站点对城市各类用地的差异性影响上。在城市各类交通对土地利用影响深化研究的同时，一些学者开始意识到交通规模、等级对城市土地利用也形成了某些作用特征：交通网络对土地利用变化的影响效应大小与道路等级、距道路距离、原有土地利用类型等条件因素联系密切<sup>[6]</sup>。受限于不同等级道路运载能力、规模差异等因素，不同等级城市交通道路(高速路<sup>[7]</sup>、铁路<sup>[8]</sup>、普通公路<sup>[9,10]</sup>、城域轨道<sup>[11,12]</sup>等)对土地利用类型变化、土地利用影响范围显示出明显异质性：例如，张映雪等<sup>[13]</sup>以北京市为研究区，发现高速路沿线以耕地转为建设用地为主要特征且对土地景观格局的影响范围约在 6 km 处；郑林昌等<sup>[14]</sup>研究发现高铁站点、高铁路线分别在周围 1 km、200 m 范围内对城市土地利用影响具有空间递减性，且从影响效应大小来看，高铁站点大于高铁路线两侧；王慧敏等<sup>[10]</sup>以武汉城市圈公路为例，认为高速路、国道、省道以及县乡道对沿线土地利用变化面积、动态度、结构、转移规律的影响具有异质性、系统性。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》要求，“分层分类完善交通网络”“推动交通与其他基础设施协同发展”。然而，现有研究多分别从单一类型交通网络出发，关注某一特定等级道路对土地利用变化的影响大小，而从全面、系统角度出发对交通网络复合系统与土地利用变化间互动关系研究较少。由此，我们有必要在区分城市交通网络等级的基础上，进一步探讨不同级别交通网络形态如何影响用地变化。

同时，原土地利用状况作为条件变量，在交通网络对城市用地变化作用中展现了约束性，目前研究主要集中于原土地利用结构调整<sup>[15,16,17]</sup>、用地扩张<sup>[18,19]</sup>、用地开发强度增加<sup>[20,21]</sup>、土地功能空间分异<sup>[22]</sup>、用地变化预测<sup>[23,24]</sup>等方面，原土地利用类型主要包括商业用地<sup>[25]</sup>、居住用地<sup>[26]</sup>、建设用地<sup>[27]</sup>、沿线综合土地形态<sup>[11]</sup>等。工业用地的优化管理是实现城市升级、节能减排的重要依托。然而，由于城市内部具体工业数据不易获取等原因，这一特殊地类却在交通网络对城市土地利用变化影响研究中较少被专门考虑。此外，目前交通网络对土地利用变化影响定量研究多采用景观生态<sup>[28]</sup>、大数据挖掘<sup>[28,29]</sup>、GIS-T 空间分析<sup>[21]</sup>等方法，其中 GWR 集成变参回归和局部回归思想、廊道效应遵循距离衰减规律，两者可精准识别“空间非平稳性”，为厘清交通网络-用地转化关系提供技术支撑，被广泛应用于 LUTI 一体化研究中<sup>[30,31]</sup>。

基于此，本文以武汉市中心城区为例，以 GWR、廊道效应分析为技术支撑，在明确工业用地转型分布特征的基础上，探讨不同类型、不同等级交通网络对工业用地转型的异质性影响，并基于交通网络-工业用地转型关联、城市空间优化目标提出相关管控建议，为打造高效便捷城市交通网络、城市产业规划升级、土地优化配置提供参考与借鉴。

## 1 研究设计

### 1.1 理论基础

作为城市人流、物流等各种社会经济活动的基础载体，城市各级交通基于“节点(Node)”和“连线(Link)”相互支撑，构成区域交通的网络形态。交通网络形态作为城市交通网络重要属性之一，直接影响着区域出行可达性、城市出行者出行成本及出行方式，对城市土地利用产生重要的约束和引导作用。

其驱动机制(图 1)主要表现为：(1)交通网络形态直接改善城市土地单元通达度，进而提升交通网络沿线土地价值<sup>[32]</sup>，工业用地由于对城市中心或商业中心距离远近不敏感而迁至租金较低的郊区。(2)交通网络形态直接影响出行者出行方式，如城市轨道交通建设促进站域周围工业用地再开发，站域内土地走向职住、公共服务、商业为主导的一体化城市格局，站域内“工转居”“工转商”现象多有发生<sup>[15]</sup>。(3)交通网络形态发展降低交通成本，具体通过降低原材料、工业产品运输成本等方式推动市中心工业用地再配置<sup>[33]</sup>。由此，交通网络形态既是城市建设的外在表征，也是城市更新、工业用地转型的内在驱动力。在现代城市要素流动频率加快、联系愈发紧密的条件下，交通网络形态与工业用地利用格局良好适配，有助于充分挖掘土地生产要素作用，充

分发挥交通基础设施功能，而单方面滞后、错配则会导致城市内部土地利用效率低下、资源浪费。

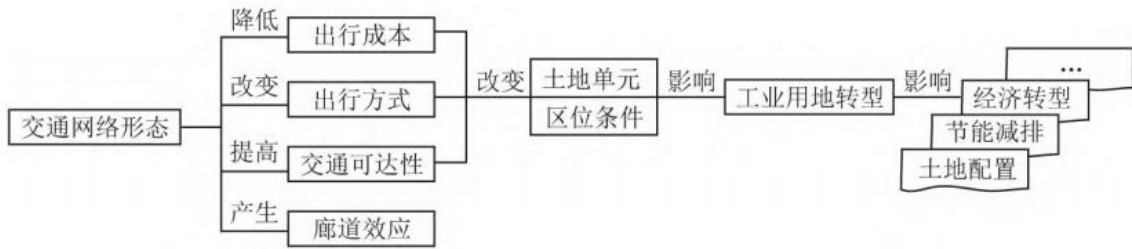


图 1 交通网络形态对工业用地转型的影响机制

Fig. 1 Influence mechanism of transportation network form on industrial land transformation

### 1.2 研究区域

武汉市地处湖北省东部，是我国重要综合交通枢纽，素有“九省通衢”之称，亦是中部典型工业城市之一。新旧动能转换背景下，武汉市持续面临制造业升级转型、产业用地优化调整的问题。《武汉市国土空间总体规划(2021-2035年)》明确提出“主城做优、四副做强”、“创新治理，推进规划全生命周期管理”的规划要求。优化国土空间格局，打造国际交通枢纽，建设繁荣宜业的幸福家园，是武汉市新一轮国土空间规划的重要目标。2014~2019年，武汉市各类各级交通网络沿线的 2 449.46 hm<sup>2</sup> 工业用地实现了转型，其中 599.15 hm<sup>2</sup> 转变为居住用地、387.70 hm<sup>2</sup> 转变为商业用地。持续推进的工业用地转型，以及转型过程与交通网络的实际关联，使武汉市成为研究交通网络形态与工业用地转变关系的典型范例。

基于数据可得性，本文研究区域主要包括七大区，分别为长江以北的江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区以及长江南岸的武昌区、青山区、洪山区，面积共计 130 252.56 hm<sup>2</sup>(图 2)。

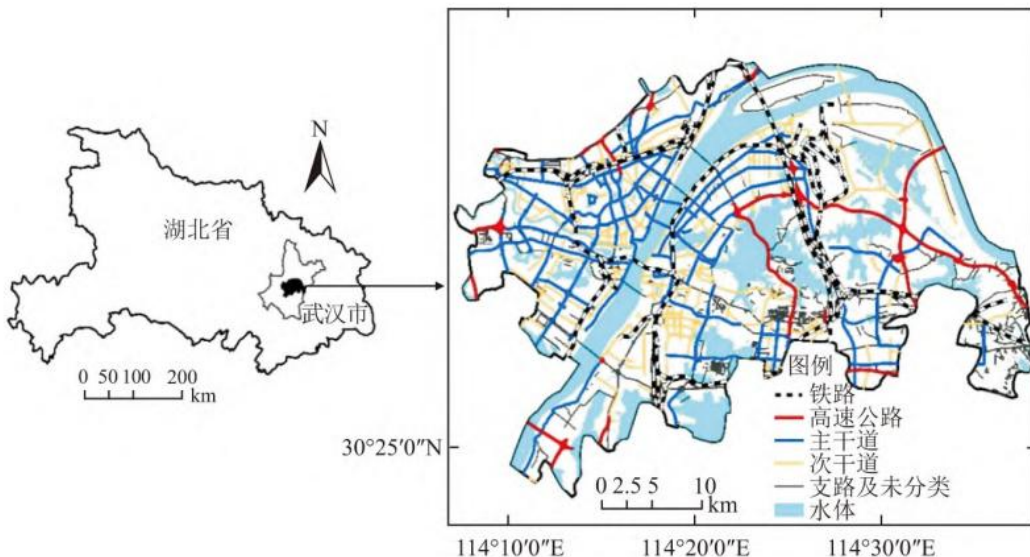


图 2 武汉市研究区域图

Fig. 2 Study area map of Wuhan

### 1.3 数据与研究方法

#### 1.3.1 数据来源与预处理

本文采用的数据包括武汉市中心城区土地利用现状数据以及武汉市中心城区交通网络数据。将武汉市中心城区二调中工业用地图斑与三调中居住、商业服务设施用地图斑进行叠加，运用 ArcGIS10.2 叠加分析工具对其进行擦除，分别得到武汉市中心城区“工转居”、“工转商”图斑 1544、695 个。同时，从 Google 遥感影像中提取武汉市中心城区交通网络数据，并依据《城市道路工程设计规范(CJJ37-2012)》将其划分为高速公路、铁路、主干道、次干道、支路 5 种类型。

#### 1.3.2 核密度分析

核密度估计法主要通过非参数的数据集输入来计算地理现象空间分布距离衰减效应，用以表现地理空间数据聚集状态。本文运用核密度函数分析武汉市“工转居”、“工转商”的空间分布密度特征：首先运用 ArcGIS10.2 软件提取研究区域转型工业用地图斑的质心，采取空间分析中的核密度分析板块，将图斑面积作为计算权重，核密度函数值越高则说明“工转居”“工转商”的分布越集中；然后依据核密度函数值运用自然断点法将研究区域工业用地图斑划分为低密度区、次低密度区、中密度区、次高密度区以及高密度区五类。对比 2014 年工业用地数据与 2019 年商业用地、居住用地数据，提取武汉市工业用地转型地块，计算武汉市工业用地转型分布核密度函数，探索工业用地转型的空间聚集特征，其计算公式为：

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中： $f(x)$  表示工业用地转型分布核密度函数； $n$  表示工业用地图斑要素数量； $h$  表示工业用地图斑要素宽度； $k$  为核密度函数； $(x-x_i)$  则表示工业用地图斑  $x$  到工业用地图斑  $x_i$  的距离。

#### 1.3.3 基于 GWR 的驱动作用空间异质性分析

地理加权回归通过引入研究单元空间位置，建立局部回归方程，得到不同位置的回归系数，体现影响作用的空间异质性，其正负反映出自变量对因变量的驱动性或抑制性，其大小则反映作用的强弱。为了更加精准表现武汉市工业用地转型空间分布与各等级交通网络的空间关联模式，本文采取各等级交通网络密度值与工业用地转型核密度函数值来测度研究区域不同等级交通网络对工业用地转型驱动作用的空间异质性。

首先，运用 ArcGIS10.2 软件线密度分析板块，以各级道路长度为权重分别求取研究区域内各级道路网络的空间分布密度，其计算公式为：

$$Density = \frac{(L_1 \times V_1) - (L_2 \times V_2)}{S} \quad (2)$$

式中：Density 表示线密度值；S 表示搜索范围面积；L1、L2 表示个等级交通路线在搜索范围内的长度；V1、V2 表示相对应权重值。分别计算不同等级交通网络密度值，并对交通路线权重赋值。

然后，采用地理加权回归模型测度研究不同类型、等级交通网络对工业用地转型强度的影响，公式如下：

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, V_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中：i 等于 1, 2, 3...n; ( $\mu_i, V_i$ ) 是第 i 个样本点的空间位置坐标； $\beta_k(\mu_i, V_i)$  是第 i 个样本点的第 k 个回归参数； $\varepsilon_i$  是第 i 个样本点的随机误差。

### 1.3.4 廊道效应与对数衰减函数

城市具有交通廊道、景观廊道、生态廊道等多种廊道类型，其中，交通廊道作为组织城市建设用地的“骨架”，是各类廊道中最重要的廊道之一。廊道效应是廊道对周边区域的空间影响，这种空间影响强度往往随着与廊道之间的距离增加而呈现梯度性衰减，如图 3 所示。本文采用对数衰减函数，测度不同等级道路网络形态对工业用地转型的廊道效应，公式如下：

$$D = f(e) = a \ln \left( \frac{a \pm \sqrt{(a^2 - e^2)}}{e} \right) \mp \sqrt{(a^2 - e^2)} \quad (4)$$

式中：e 表示各等级道路网络梯度场效益；D 表示距各等级道路网络的距离；a 表示最大廊道效应强度，为常数。

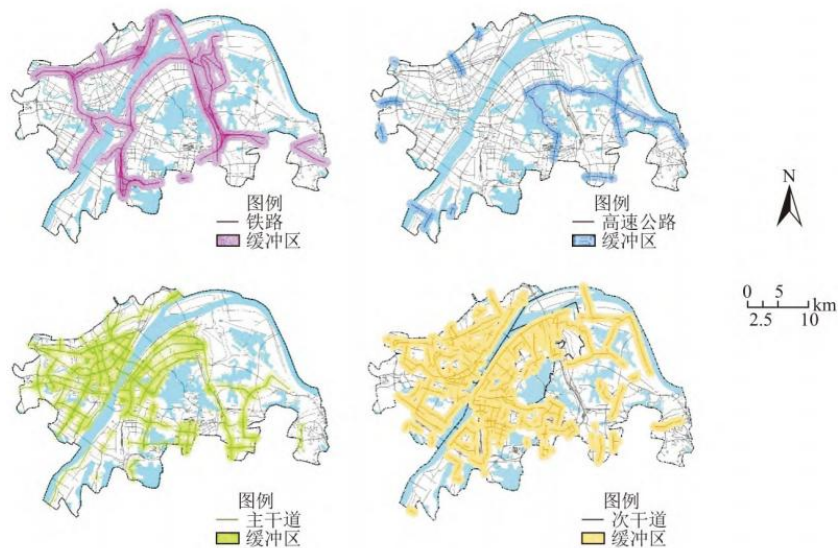


图 3 武汉各等级交通道路网络及其缓冲区图

Fig. 3 Road network of various levels in Wuhan and its buffer zone map

## 2 结果与分析

### 2.1 武汉市工业用地转型空间分布分析

图 4 显示了 2014~2019 年武汉市研究区域内“工转居”、“工转商”的核密度图。如图 4a 所示，“工转居”现象主要集中于武汉市近郊区轨道交通交叉地带，共存在 4 大聚集区：(1) 聚集于硚口区古田路街道附近，多转型为一般住宅用地，与易家墩老工业区位置基本相符；(2) 趋于江岸区汉黄路街道附近，其中大多数转型为一般住宅用地，少数转型为别墅用地，与唐家墩老工业区位置基本相符；(3) 汇聚在白沙洲大道南段外侧，与白沙洲老工业区位置基本一致；(4) 靠近光谷大道东侧，与关山老工业区位置相吻合。在武汉市“窄马路、密路网”政策理念驱动、城市交通用地日益集约的背景下，武汉市中心城区面临工业用地利用效率提升和空间布局优化的挑战。武汉市中心城区交通网络系统和公共配套的不断优化，推动了土地价格上涨，在市场机制作用下，低效工业企业被迫或主动退出市区，促进了工业用地向居住用地转换。

依据城市地租理论，交通枢纽附近因更高的可达性吸引了更高使用成本、更高产出效益的用地类型。从图 4b 可以看出，研究区域 2014~2019 年工业用地转型为商业用地主要存在两大空间聚集区域：(1) 分布在洪山区光谷大道高架东侧；(2) 聚集于江岸区长丰大道高架以北。武汉市中心城区“工转商”聚集区与“工转居”聚集区空间分布基本重叠，与临近重要交通干道改造相呼应。说明武汉市中心城区交通网络的完善，驱动各类工业用地向城市边缘置换，工业用地被高密度利用的居住、商业服务业用地所取代。

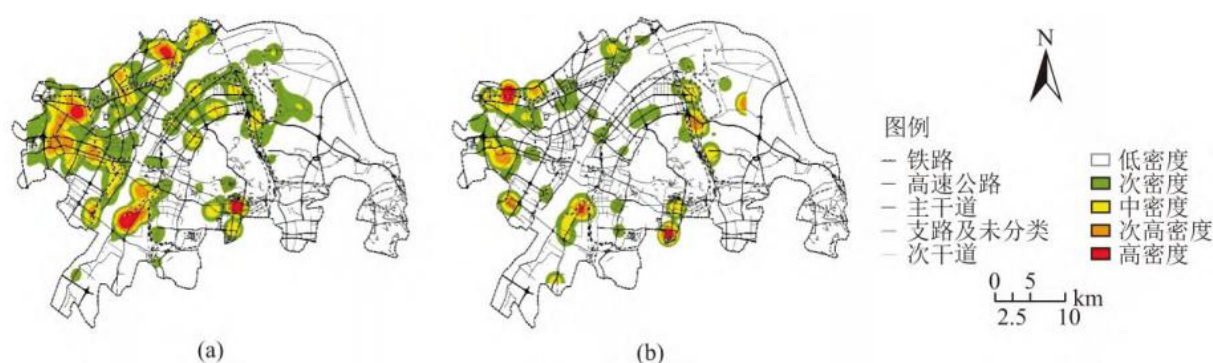


图 4 2014~2019 年工业用地转型为居住、商业用地核密度图

Fig. 4 Nuclear density map of transformation of industrial land into residential and commercial land from 2014 to 2019

### 2.2 武汉市交通通达度与工业用地转型相关性及空间耦合性分析

#### 2.2.1 基于 OLS 的驱动作用全局性分析

采用 ArcGIS10.2 空间提取工具，按照工业用地转型图斑计算道路密度以及工业用地转型密度，并运用 SPSS 软件进行相关性分析，得到武汉市各等级道路网络与工业用地转型的相关性系数，分析各等级路网通达度对工业用地转型现象的全局性驱动作用，如表 1 所示。

表 1 交通密度与工业用地转型核密度相关性

交通类型	铁路	高速公路	主干道	次干道	支路
交通密度与工转居	-0.004***	-3.238*	-0.810***	-1.157***	1.609***
交通密度与工转商	-0.002**	2.895	-1.453**	1.511**	-1.937***

注： \*表示  $p < 0.1$ , \*\*表示  $p < 0.05$ , \*\*\*表示  $p < 0.01$ .

在各等级交通密度与“工转居”核密度相关性方面：除了支路与“工转居”用地核密度相关系数在 0.001 水平上显著正相关外，铁路、高速路、主干道、次干道与“工转居”用地核密度相关系数均呈负相关关系，且交通道路网络对“工转居”的驱动强度排序为：高速公路网络>支路网络>次干道网络>主干道网络>铁路网络。

在各等级交通密度与“工转商”核密度相关性方面：铁路、主干道、次干道、支路网络密度对“工转商”均存在显著影响，其中次干道与“工转商”用地核密度相关系数在 0.01 水平上显著正相关，而铁路、主干道、支路则与“工转商”用地核密度相关系数呈负相关关系。交通道路网络对“工转商”的综合驱动强度排序为：支路网络>次干道网络>主干道网络>铁路网络。

由此表明，武汉市各等级交通网络基本上对城市工业用地转型现象产生显著驱动作用，各等级交通道路网络驱动作用差异明显，优化城市支路网络布局有助于城市工业用地向居住用地转型，优化城市次干道网络布局则有助于城市工业用地向商业用地转型。

### 2.2.2 基于 GWR 的驱动作用空间异质性分析

通过 ArcGIS10.2 软件空间关系建模板块得到武汉市各等级交通网络密度局部回归系数渲染图，见图 5，并基于此分析城市各等级道路网络密度对城市工业用地转型现象的驱动作用及空间异质性。由图 5 可知，城市不同类型、不同等级交通网络密度驱动作用表现出明显空间异质性。以各类交通道路网络为驱动机制的“工转居”空间异质性回归结果见表 2。支路路网密度的“工转居”驱动标准化回归系数为正，驱动作用呈现出由南至北减弱的势态。其他路网密度“工转居”驱动标准化回归系数则为负，其中，铁路路网密度驱动作用呈现出西南向东北减弱的趋势，高速路网密度驱动作用呈现出洪山区、张家湾高而其余地区低的势态，主干道网驱动作用呈现出西北向东南减弱趋势，次干道网密度驱动作用呈现出西南向东北减弱的趋势。可见，支路路网在各级交通网络中表现出对“工转居”的明显正向驱动影响，其原因在于：在工业用地向居住用地转型过程中，由于商业、行政办公等用地已占据了市中心等交通密集区，居住用地迫于地价因素、居住者出行需求因素等，多分布于距铁路、高速路、干道具有一定距离的区域；而以支路为骨架支撑的街坊，既能满足居民日常步行休闲、购物需求，也能与干道形成互通耦合关系，从而成为“工转居”的集中分布区。同时，近年来武汉市结合土地利用规划进一步完善公交、慢行导向的绿色交通系统，以城市公交网络串连城市住宅板块、以城市支路网络驳接公交系统高效运行，使城市支路重新焕发活力，“工转居”现象更多发生于支路周围，此现象亦与《武汉市国土空间规划(2021-2035)》交通规划部分相吻合。

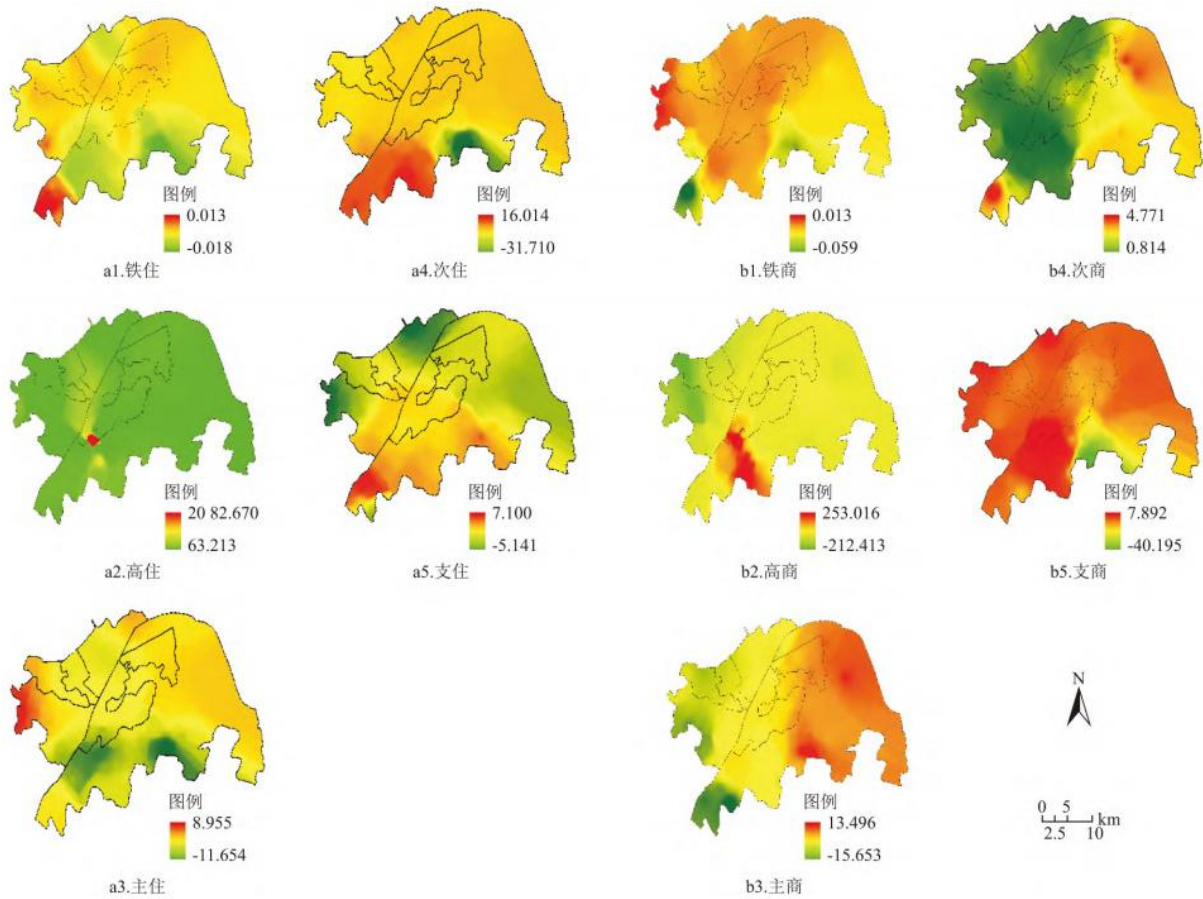


图5 各等级交通网络密度局部回归系数渲染图①

Fig. 5 Rendering of local regression coefficients of traffic network density at various levels

以各类交通道路网络为驱动机制的“工转商”空间异质性回归结果见表3, 次干道路网密度的“工转商”驱动标准化回归系数为正, 驱动作用呈现由西北向东南减弱的势态。高速公路网由于在全局性分析中未通过显著性检验而未进行GWR分析。而其他道路网密度“工转商”驱动标准化回归系数为负, 其中, 铁路网密度驱动作用呈现出西北强而南弱的势态, 主干带路网密度驱动作用呈现出由东北向西南减弱的趋势, 支路路网密度驱动作用呈现出由四周向光谷区域减弱的势态。可见, 次干道路网在各级交通网络中表现出对“工转商”的明显正向驱动影响, 其原因在于: 武汉市主城区作为城市商业用地扩张的核心地带, 在前期规划、发展过程中已形成辐射主要交通网络枢纽的中心商业区格局, 新增“工转商”用地在原址基础上主要以细化、调整城市居民服务功能为主, 因此其主要依托武汉市商业主中心而作为社区级商业点多规划、新建于次干道旁, 从而优化武汉市次干道两侧开发强度, 便于满足市民回家、出门途中的购物等需求。

表2 交通与“工转居”地理加权回归标准化回归系数与冷热点表

	平均值	最大值	最小值	热点	冷点
铁路	-0.004	0.013	-0.019	洪山区石咀枢纽附近	洪山区关山附近
高速公路	-15.656	120.396	-6.002.081	洪山区张家湾附近	-
	-0.658	9.199	-8.348	汉阳区黄金口附近	洪山区关山、武昌区白沙洲

主干道					
次干道	-0.401	14.322	-29.953	洪山区青菱湖附近	洪山区关山附近
支路	0.453	7.006	-4.637	洪山区石咀枢纽附近	汉阳区西部、江岸区北部

表3 交通与“工转商”地理加权回归标准化回归系数与冷热点表

	平均值	最大值	最小值	热点	冷点
铁路	-0.004	0.013	-0.058	汉阳区黄金口附近	洪山区石咀枢纽附近
主干道	-0.804	13.505	-15.673	洪山区关山、青山区青化路	洪山区石咀枢纽附近
次干道	2.331	7.369	-13.554	洪山区石咀枢纽、青山区青化路	洪山区张家湾附近
支路	-0.545	7.900	-40.345	-	洪山区关山附近

总体而言，武汉市交通道路网络对城市工业用地转型驱动的空间异质性明显，次干道路网、支路路网对城市工业用地转型正向驱动作用相对较大，反映了武汉市城市化迈向成熟阶段，街道级别、社区级别的次干道、支路路网的完善对工业用地转为居住用地产生了积极影响。因此，要推动武汉市老旧工业用地转型升级和空间优化，应重点优化以街区组合单元为依托的次干道、支路系统，以推动城市空间肌理的细化。

## 2.3 武汉交通网络廊道效应及其分异

### 2.3.1 铁路

2014~2019年，武汉市研究区域内铁路周边廊道区域内“工转居”用地面积为269.28 hm<sup>2</sup>，且铁路对沿线的“工转居”具有吸引作用。在武汉市中心城区内，铁路站点周边地块由于配套设施齐全、聚集，同时为安置铁路交通运输带来的外来人口，往往推动一部分工业用地转换为居住用地。由图6所示，第I至IV区的工业转居住用地面积分别约占走廊区工业转居住用地总面积的29.18%、27.8%、18.15%和24.85%，铁路走廊效应对“工转居”的影响从I区到III区呈减小趋势，从III区到IV区有所回增，在I区铁路周边走廊区域的“工转居”现象最为强烈。

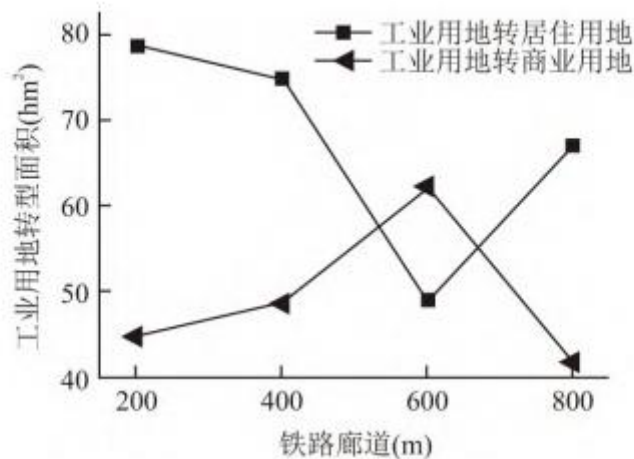


图 6 2014~2019 年研究区域内铁路“工转居”、“工转商”的各廊道面积图

Fig. 6 Area map of orridors of railway “industrial land to residential land” and “industrial land to commercial land” in study area from 2014 to 2019

2014~2019 年，武汉市研究区域内铁路周边廊道区域的“工转商”用地总面积为 197.25 hm<sup>2</sup>，铁路对沿线的“工转商”转换有一定干扰作用。武汉由于位于我国交通战略核心位置，铁路网络布局及其周边商业用地经过严格规控，近年来铁路网周围“工转商”用地未见明显增长。如图 6 所示，I~IV 走廊区域中的“工转商”用地面积分别占“工转商”用地总面积的 22.64%、24.60%、31.55%和 21.20%。铁路走廊效应对“工转商”转换的影响从 I 区到 III 区依次增加，从 III 区到 IV 区有所下降。

### 2.3.2 高速公路

2014~2019 年，武汉市研究区域内高速公路周边廊道区域工业转居住用地面积为 57.21 hm<sup>2</sup>，且高速公路对沿线的“工转居”转换具有干扰作用。城市高速公路的开通提升了沿线城市可达性，产生时空收敛与空间叠加双重效应，扩大周边地块市场潜力从而为企业聚集提供现实条件、挤压新增居住用地空间。由图 7 可知，第 I 至 IV 区的“工转居”用地面积分别占走廊区“工转居”用地总面积的 16.24%、24.69%、24.31%和 34.76%。高速公路走廊效应对“工转居”现象的影响从 I 区到 IV 区呈增加趋势，且高速公路周边走廊 IV 区内工业用地向居住用地转换最为强烈。

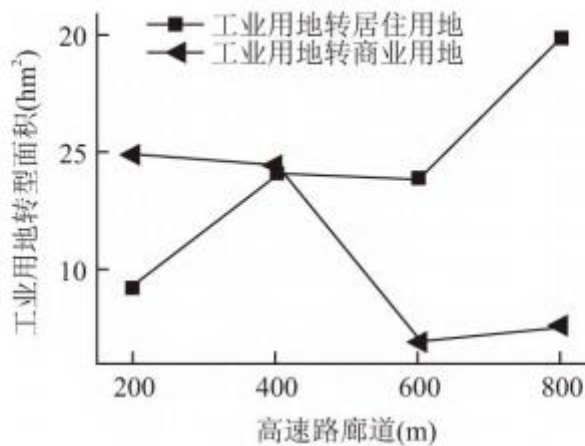


图 7 2014~2019 年研究区域内高速公路“工转居”  
“工转商”的各廊道区域面积图

Fig. 7 Area map of corridors of highways “industrial land converted to residential land” and “industrial land converted to commercial land” in study area from 2014 to 2019

2014~2019 年，高速周边廊道区域工业转商业用地面积为 44.00  $\text{hm}^2$ ，且高速公路对沿线的“工转商”有吸引作用。从图 7 中可以看出，从区 I 到 III 区，“工转商”转换量逐步减小，从区 III 到区 IV，“工转商”现象则略有回升，其分别占“工转商”用地总面积的 33.94%、32.89%、15.79%和 17.37%。

### 2.3.3 主干道

2014~2019 年，主干道周边廊道区域工业转居住用地面积为 410.61  $\text{hm}^2$ ，且主干道对沿线的“工转居”有吸引作用。主干道以交通功能为主，往往对居住用地、商业用地有聚集作用。如图 8 所示，第 I 至 IV 区的“工转居”用地面积分别占走廊区“工转居”用地总面积的 25.77%、34.08%、24.00%和 16.15%，第 I 至 IV 区“工转居”现象先增后减。其中，II 区“工转居”强度最大，而 IV 区“工转居”强度最小。

2014~2017 年，主干道周边廊道区域工业转商业用地面积为 273.64  $\text{hm}^2$ ，且主干道对沿线的“工转商”转换具有吸引作用。图 8 显示，第 I 至 IV 区的“工转商”用地面积分别占走廊区域内“工转商”用地总面积的 31.38%、23.75%、28.87%及 16.00%。主干道走廊效应对“工转商”现象的影响从 I 区到 IV 区总体上呈减小趋势。

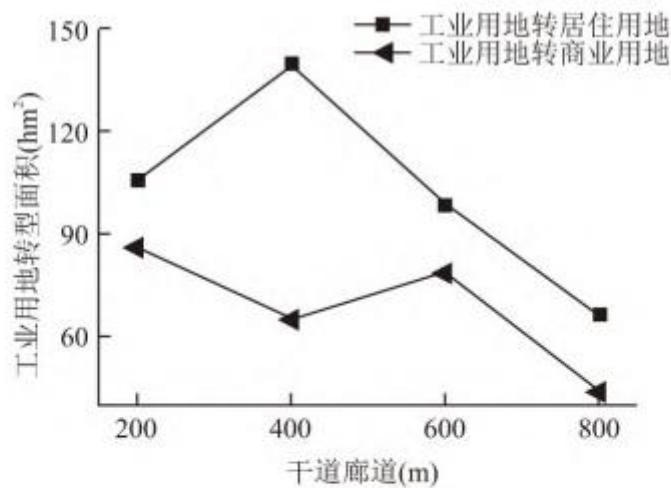


图 8 2014~2019 年研究区域内主干道“工转居”、“工转商”的各廊道区域面积图

Fig. 8 Area map of corridors of main roads “industrial land converted to residential land” and “industrial land converted to commercial land” in study area from 2014 to 2019

#### 2.3.4 次干道

2014~2019 年，次干道周边廊道区域工业转居住用地面积为 452.07 hm<sup>2</sup>，且主干道对沿线的“工转居”有吸引作用。次干道作为城市主干道的补充，具有集散车流、生活服务双重功能，其两旁主要以居住、商业用地开发为主，因此次干道对“工转居”“工转商”吸引效应水平基本符合距离衰减规律。如图 9 所示，第 I 至 IV 区的“工转居”用地面积分别占走廊区“工转居”用地总面积的 37.43%、30.08%、20.57%和 11.92%，第 I 至 IV 区“工转居”现象呈现下降趋势。

自 2014 至 2017 年，次干道周边廊道区域工业转商业用地面积为 280.31 hm<sup>2</sup>，且次干道对沿线的“工转商”转换具有吸引作用。图 9 显示，第 I 至 IV 区的“工转商”用地面积分别占走廊区域内“工转商”用地总面积的 33.53%、24.67%、24.44%和 17.37%。次干道走廊效应对“工转商”现象的影响从 I 区到 IV 区呈减小趋势。

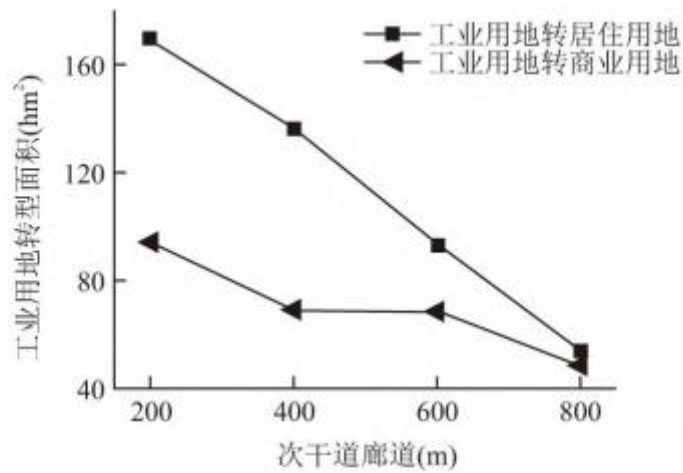


图9 2014~2019年研究区域内次干道“工转居”、“工转商”的各廊道区域面积图

Fig. 9 Area map of corridors of secondary roads “industrial land converted to residential land” and “industrial land converted to commercial land” in study area from 2014 to 2019

总体来看，交通网络对“工转居”吸引力差异具体表现为：次干道最高，主干道次之，铁路最低且高速公路路网对其具有排斥作用；交通网络对“工转商”吸引力差异具体表现为：高速路最高，次干道、主干道次之且铁路对其具有排斥作用，如表4所示。

表4 2014~2019年研究区域各类交通网络对沿线工业用地转型的函数

交通网络类别	“工转居”或“工转商”	函数
铁路	工业转居住用地	$y = -2.264x + 30.655$
	工业转商业用地	$y = 0.263x + 24.340$
高速公路	工业转居住用地	$y = 5.518x + 11.205$
	工业转商业用地	$y = -6.681x + 41.700$
主干道	工业转居住用地	$y = -3.894x + 34.735$

	工业转商业用地	$y=-4.102+35.255$
次干道	工业转居住用地	$y=-8.604+46.510$
	工业转商业用地	$y=-4.871x+37.18$

### 3 结论与启示

武汉市既是我国“十四五”规划确定的国际交通枢纽城市，又是长江经济带工业化领先的三大核心城市之一。本文基于武汉市工业用地转型过程，分析了不同类型、等级交通网络对于工业用地转型的驱动作用，探索不同交通网络周围的“工转居”“工转商”现象。当前，工业用地转型是我国大、中型城市升级发展面临的普遍问题，我国传统工业城市(如重庆、沈阳、武汉、天津等)、非传统工业城市(如北京、杭州、青岛等)均将绿色、宜居、创新作为新一轮城市更新的重要发展目标，存量工业用地转型持续推进。作为传统工业城市和交通枢纽城市的代表——武汉市，研究其交通网络形态对城市工业用地转型的影响，对我国城市更新实践具有重要参考价值，具体结论如下：

(1)从分布上来看，“工转居”现象主要分布在轨道交通交叉地带、“工转商”现象主要聚集于城市主干道附近，且各等级交通道路网络沿线“工转居”总量大于“工转商”总量反映了居住用地选址对轨道交通的偏好规律，也与全国范围新经济形势下商业用地扩张降速的现状相符。

(2)从空间耦合性来看，武汉市各种类型、各种等级交通网络对工业用地转型影响显著，且驱动影响存在空间异质性。其中，支路路网对“工转居”、次干道路网对“工转商”显著相关且正向驱动作用明显，并分别呈现出由南至北减弱、由东向西减弱的态势。

(3)从廊道效应来看，各等级交通道路网络对工业用地转型具有类型分异性。路网对“工转居”的吸引作用排序为：次干道>主干道>铁路；路网对“工转商”的吸引作用排序为：高速路>次干道>主干道。

(4)工业用地转型的时空变化显示出明显的阶段特征，由连片集中转型发展为散点状局部转型，转型规模下降，由城市中心逐步向外扩散，反映了新时期以武汉为代表的趋向稳定成熟城市的工业用地转型时空特征。

基于上述结论，为增强我国交通网络形态对城市工业用地转型的激励作用，促进城市可持续更新，完善城市交通网络形态建设，提升工业用地转型效率，建议如下：

(1)适度提升轨道交通站点功能混合度，完善分类分级交通设施，实现工业用地转型结构优化。首先，在开发城市轨道交通沿线用地时，充分借鉴 TOD 规划理念，实现复合化、多功能、现代化的城市设施一体化布置，提升现代城市生活居住品质；其次，为支撑主干道附近商业空间发展活力，应在充分考虑沿路商业区业态、多样性等基础上，在主干道附近合理设置接驳口、投放交通站点、布置支路等措施，在缓解主干道交通压力的同时串联起沿街商业地块、支撑其长足发展；最后，在依托城市发展需求的基础上，严格把控“工转居”“工转商”用地审批，不宜盲目扩大“工转居”“工转商”建设规模，而应在更注重居住、商业的配套的同时兼顾产业用地合理布局。

(2)增强支路对“工转居”支撑度，改善升级次干道路网密度，构建以次干道、支路路网为基础的城市工业用地转型支撑机制。目前，中国大城市已进入现代化交通系统建设阶段，支路、次干道网络建设对增强城市微循环、更新的作用日益增强。一

方面,居住用地开发更依赖于完善的支路路网,“工转居”选址宜优先结合支路路网规划,以支路路网完善城市社区机理,并以支路机动车限行、单项循环、畸形交叉口改造等措施保障社区适度开放性、资源共享性、环境适宜性;另一方面,商业用地开发更依赖于通行能力相对较大的次干道所形成的交通区位,“工转商”选址宜优先考虑次干道附近工业用地,促进“工转商”转型规划则应重点加强次干道路网建设,以其集散主干道交通、服务组团连接等功能来加强促进城市商业多中心结构空间形成,满足城市居民购物、娱乐、文化服务等需求,增加城市就业机会。

(3)充分认识不同路网形态对工业用地转型异质性影响,实施“交通+土地+人”一体化规划策略。区域和城市规划方面,应在对区域内路网形态等级、参数进行科学合理调查评估的基础上识别老旧工业用地区域,通过科学合理布局和调整城市路网结构(按照廊道效应差异适当降低道路与改造区域的局部接近度),达到推动区域老旧工业用地自然转型的效果。城市土地开发方面,则应充分认识到不同路网形态对工业用地转型影响的差异,应在关注区域购房者、租房者需求的基础上,住宅开发优先选择次干道、主干道、铁路接近度较高的区域,而商业用地开发则应该优先选择高速路、次干道、主干道接近度较高的区域。

(4)根据工业用地转型的时空变化特征,实施工业用地转型的阶段管控。在转型的快速推进阶段、稳定阶段应分别采取不同的管控措施:快速推进阶段应立足国土空间规划的用地结构调整,合理调整交通、居住、商业、工业等主要用地类型比例,推进工业用地规模化转型;稳定阶段应立足区域控制性详细规划、修建性详细规划的方案优化,完善各级各类交通设施,优化用地多样性利用,推进转型的精细管控。

## 参考文献

- [1] 何鹤鸣,张京祥.产权交易的政策干预:城市存量用地再开发的新制度经济学解析[J].经济地理,2017,37(2):7-14. HE H M,ZHANG J X.Policy intervention on property rights transaction:New institutional economic analysis of urban inventory land redevelopment[J].Economic Geography,2017,37(2):7-14.
- [2] 赵小凤,楼佳俊,李祯,等.工业土地利用转型研究进展[J].现代城市研究,2017,32(10):7-11,17. ZHAO X F,LOU J J,LI Y,et al.Industrial land use transition:A literature review[J].Modern Urban Research,2017,32(10):7-11,17.
- [3] 谭琦川,黄贤金.城市土地利用与交通相互作用(LUTI)研究进展与展望[J].中国土地科学,2018,32(7):81-89. TAN Q C,HUANG X J.Research progress and prospect on urban land use-transport interaction(LUTI)[J].China Land Science,2018,32(7):81-89.
- [4] 何尹杰,吴大放,刘艳艳.城市轨道交通对土地利用的影响研究综述——基于Citespace的计量分析[J].地球科学进展,2018,33(12):1259-1271. HE Y J,WU D F,LIU Y Y.Review on the impacts of public rail transport on urban land use change:A citespace-based quantitative analysis[J].Advances in Earth Science,2018,33(12):1259-1271.
- [5] 杨励雅,秦燕燕,邵春福.轨道交通建设影响下土地利用性质空间分异的组合预测模型[J].中国铁道科学,2008,29(1):114-119. YANG L Y,QIN Y Y,SHAO C F.Integrated forecasting model for the space differentiation of land use type under the influence of rail transit construction[J].China Railway Science,2008,29(1):114-119.
- [6] 胡金晓,朱明,濮励杰,等.交通道路对区域土地利用变化的影响研究进展[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):205-214. HU J X,ZHU M,PU L J,et al.Progress of the research on the influence of traffic road on regional land use change[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(1):205-214.
- [7] 崔学刚,方创琳,张蕾.山东半岛城市群高速交通优势度与土地利用效率的空间关系[J].地理学报,

---

2018, 73(6):1149-1161. CUI X G, FANG C L, ZHANG Q. Spatial relationship between high-speed transport superiority degree and land-use efficiency in Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6):1149-1161.

[8] 初楠臣, 姜博, 吴相利, 等. 环渤海高铁沿线可达性及其空间格局演变研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(10):2373-2382. CHU N C, JIANG B, WU X L, et al. Study on the accessibility and spatial pattern evolution along Circum-Bohai-Sea high-speed rail[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(10):2373-2382.

[9] 牟风云, 龙秋月, 李子辉, 等. 2005—2015年重庆市公路与土地利用格局的关系[J]. *现代城市研究*, 2020, 35(10):60-67. MU F Y, LONG Q Y, LI Z H, et al. The relationship between highway and land use pattern in Chongqing from 2005 to 2015[J]. *Modern Urban Research*, 2020, 35(10):60-67.

[10] 王慧敏, 危小建, 刘耀林. 武汉城市圈公路沿线土地利用变化规律分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(10):1585-1593. WANG H M, WEI X J, LIU Y L. Analysis of land use change along roads in Wuhan urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(10):1585-1593.

[11] 何尹杰, 吴大放, 刘艳艳, 等. 城市轨道交通对土地利用变化的影响——以广州市3、7号线为例[J]. *经济地理*, 2021, 41(6):171-179. HE Y J, WU D F, LIU Y Y, et al. The influence of urban public rail transport on the land use change: A case study of the metro line 3 and line 7 in Guangzhou[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(6):171-179.

[12] 王迎, 张安录. 城市轨道交通土地价值增值时空效应及政府投资优先序——基于价值捕获视角[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2021(2):165-173, 184. WANG Y, ZHANG A L. Temporal and spatial effects of land value increment of urban rail transit and investment priority: From the perspective of government land value capture[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2021(2):165-173, 184.

[13] 张映雪, 莫文波, 王勇, 等. 北京市高速公路周边土地利用变化对景观格局的影响[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(1):28-38. ZHANG Y X, MO W B, WANG Y, et al. Impacts of land use changes on landscape patterns around expressways in Beijing[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(1):28-38.

[14] 郑林昌, Shikha Thapa Magar. 中国高速铁路是否显著影响城市土地利用——来自站点、线路和典型城市土地利用变化的回答[J]. *河北大学学报(哲学社会科学版)*, 2022, 47(2):62-75. ZHENG L C, MAGAR S. Whether China's high speed railway significantly affects urban land use: Answers from stations, routes and typical urban land use changes[J]. *Journal of Hebei University (Philosophy and Social Science)*, 2022, 47(2):62-75.

[15] 胡昂, 刘杰, 李想, 等. 多中心城市轨道交通典型站域的土地利用特征演化研究——以日本东京为例[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(5):746-757. HU A, LIU J, LI X, et al. Study on the evolution of land use characteristics in typical station areas of multi-center urban rail transit: Taking Tokyo as an example[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 53(5):746-757.

[16] 宗二凯, 徐小平, 孙科, 等. 宁波市轨道交通客流现状与周边用地的关系[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(4):37-41, 45. ZONG E K, XU X P, SUN K, et al. Relationship between Ningbo rail transit current passenger flow and surrounding land use[J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(4):37-41, 45.

[17] 钟奕纯, 冯健, 何晓蓉. 轨道交通对不同区段土地利用影响差异研究——以武汉轨道交通2号线为例[J]. *地域研究与*

---

开发, 2016, 35(5):86-93. ZHONG Y C, FENG J, HE X R. The different impacts of rail transit on urban land use between different sections: A case study of the No. 2 rail transit line in Wuhan[J]. Areal Research and Development, 2016, 35(5):86-93.

[18] 谷一桢, 郑思齐. 轨道交通对住宅价格和土地开发强度的影响——以北京市 13 号线为例[J]. 地理学报, 2010, 65(2):213-223. GU Y Z, ZHENG S Q. The impacts of rail transit on property values and land development intensity: The case of No. 13 line in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(2):213-223.

[19] 任鹏, 彭建东, 杨红, 等. 武汉市轨道交通站点周边地区职住平衡与建成环境的关系研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(7):1231-1245. REN P, PENG J D, YANG H, et al. Relationship between jobs-housing balance and built environment in areas around urban rail transit stations of Wuhan[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(7):1231-1245.

[20] 赵哲, 曾晨, 程轶皎. 交通路网的空间外溢性对土地集约利用的影响——以京津冀城市群为例[J]. 经济地理, 2020, 40(7):174-183. ZHAO Z, ZENG C, CHENG Y J. The spillover effect of traffic network on intensive land use: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2020, 40(7):174-183.

[21] 宋成镇, 陈延斌, 殷冠文, 等. 交通网络中心性与土地利用强度的相关性及其空间异质性研究——以青岛市主城区为例[J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(2):201-211. SONG C Z, CHEN Y B, YIN G W, et al. Correlation and spatial heterogeneity between road network centrality and land use intensity: A case study of Qingdao City[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022, 38(2):201-211.

[22] 毛蒋兴, 闫小培. 城市交通干道对土地利用的廊道效应研究——以广州大道为例[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5):58-61. MAO J X, YAN X P. Corridor effects of the urban transport artery on land use: A case study of the Guangzhou avenue[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(5):58-61.

[23] 王家丰, 王蓉, 冯永玖, 等. 顾及轨道交通影响的浙中城市群土地利用多情景模拟与分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3):605-615. WANG J F, WANG R, FENG Y J, et al. Simulating land use patterns of the mid-Zhejiang urban agglomeration considering the effects of urban rail transit[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(3):605-615.

[24] 张童, 姚士谋, 胡伟平, 等. 基于交通可达性的广佛都市区城市扩展的模拟与分析[J]. 地理科学, 2018, 38(5):737-746. ZHANG T, YAO S M, HU W P, et al. Simulation of urban expansion in Guangzhou-Foshan metropolitan area under the influence of accessibility[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(5):737-746.

[25] 曹哲静. 城市商业中心与交通中心的叠合与分异: 基于复杂网络分析的东京轨道交通网络与城市形态耦合研究[J]. 国际城市规划, 2020, 35(3):42-53. CAO Z J. Configuration of urban commercial centers and transport centers: Evidence from Tokyo transit network and urban morphology based on the complex network analysis[J]. Urban Planning International, 2020, 35(3):42-53.

[26] 崔娜娜, 古恒宇, 沈体雁, 等. 交通空间布局对城市住房价格影响研究——基于对北京市道路网络形态与房价相关性分析[J]. 价格理论与实践, 2019(2):63-66. CUI N N, GU H Y, SHEN T Y, et al. Research on the influence of traffic spatial layout on urban housing price: Based on the analysis of the correlation between Beijing Road network configuration and housing price[J]. Price: Theory & Practice, 2019(2):63-66.

---

[27] 曾源源, 胡守庚, 瞿诗进. 长江中游经济带交通区位条件变化与建设用地扩张时空耦合规律[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12):2651-2662. ZENG Y Y, HU S G, QU S J. Spatial-temporal coupling of traffic location change and construction land expansion in the middle of Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12):2651-2662.

[28] 朱新华, 钟苏娟. “流空间”视角下高铁对城市土地利用的影响——基于 DPSIR-PLS 模型分析[J]. 资源科学, 2019, 41(12):2262-2273. ZHU X H, ZHONG S J. Effects of high-speed rail on urban land use from the perspective of “space of flows”:An analysis based on DPSIR-PLS model[J]. Resources Science, 2019, 41(12):2262-2273.

[29] 于涛, 包安明, 刘铁, 等. 不同等级道路对玛纳斯河流域土地利用与景观格局的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11):2427-2439. YU T, BAO A M, LIU T, et al. Effects of different level roads on land use and landscape pattern of Manas River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11):2427-2439.

[30] 高德辉, 许奇, 陈培文, 等. 城市轨道交通客流与精细尺度建成环境的空间特征分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6):25-32. GAO D H, XU Q, CHEN P W, et al. Spatial characteristics of urban rail transit passenger flows and fine-scale built environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(6):25-32.

[31] 乐晓辉, 陈君娴, 杨家文. 深圳轨道交通对城市空间结构的影响——基于地价梯度和开发强度梯度的分析[J]. 地理研究, 2016, 35(11):2091-2104. LE X H, CHEN J X, YANG J W. Impact of rail transit on urban spatial structure in Shenzhen:Analysis based on land parcel price and FAR gradients[J]. Geographical Research, 2016, 35(11):2091-2104.

[32] 杨君, 何欢, 胡巧莲, 等. 基于路网密度的城市功能用地空间分布相关性研究——以益阳市中心城区为例[J]. 经济地理, 2018, 38(12):97-103. YANG J, HE H, HU Q L, et al. Relationships between road network density and spatial distribution of urban functional land:A case study of central urban area in Yiyang city[J]. Economic Geography, 2018, 38(12):97-103.

[33] SHARMA C, SEHGAL S. Impact of infrastructure on output, productivity and efficiency[J]. Indian Growth and Development Review, 2010, 3(2):100-121.

## 注释

①a1、a2、a3、a4、a5 分别表示铁路、高速、主干道、次干道、支路路网密度对“工转居”密度的局部回归系数渲染图;b1、b2、b3、b4、b5 分别表示铁路、高速、主干道、次干道、支路路网密度对“工转商”密度的局部回归系数渲染图。