

“三生融合”背景下深圳市空间功能分异及形成机理研究

吴泽洲¹²³, 马志忠¹²³, 曲 垚⁴, 吴晨澈⁵, 徐可西⁶, 刘于铖^{123*}

¹ 生态环境部滨海城市水土环境演化重点实验室(筹) 广东深圳

² 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室 广东深圳

³ 深圳大学中澳 BIM 与智慧建造联合研究中心 广东深圳

⁴ 中城院(北京)环境科技股份有限公司 北京

⁵ 数字中国研究院(福建)数据要素研究中心 福建福州

⁶ 浙大城市学院国土空间规划学院 浙江杭州

【摘要】深圳土地开发强度高,导致生产、生活与生态功能在有限空间内交织,功能叠置与空间分异并存。本文以 12514 个街区单元为对象,利用高德兴趣点(POI)、开放街道地图(OSM)路网和 1 m 分辨率不透水面数据划分空间类型,并结合自然生态与社会经济变量,采用空间自相关、基尼系数、区位熵、普通最小二乘回归和地理加权回归分析其分异特征与形成条件。结果表明,生产空间与混合三生空间的集聚性最强,生态相关空间相对分散;混合三生空间在纳入统计的 9 个行政区均有分布,生活空间在福田、罗湖和南山等成熟城区总体占优,在龙岗、龙华等人口密集地区也表现出一定集聚。生产和生活空间主要与经济发展、人口、道路和人类活动相联系,混合三生空间还受到植被覆盖等生态条件影响,生态空间则与植被和地形条件联系更紧密。地理加权回归模型(GWR)在多数空间类型上的拟合度有所提高,表明全局平均关系难以完全解释城市内部差异。深圳空间治理可依据局部集聚类型和总体关联特征识别功能优化重点,并通过动态监测与滚动调整提高治理响应的针对性。

【关键词】三生空间;空间分异;空间自相关;地理加权回归;深圳市

【基金项目】深圳市哲学社会科学规划课题(SZ2025D026);杭州市哲学社会科学规划课题(2026QTQN37)

【收稿日期】2026 年 7 月 5 日

【出刊日期】2026 年 8 月 1 日

【DOI】10.12208/j.aes.20260010

Spatial differentiation and formation mechanisms of production-living-ecological functions in Shenzhen under the framework of production-living-ecological integration

Ze Zhou Wu¹²³, Zhi Zhong Ma¹²³, Jie Qu⁴, Chen Wei Wu⁵, Ke Xi Xu⁶, Yu Cheng Liu^{123*}

¹Key Laboratory of Coastal Urban Soil-Water Environmental Evolution, Ministry of Ecology and Environment (under construction), Shenzhen, Guangdong

²State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen, Guangdong

³Sino-Australia Joint Research Center in BIM and Smart Construction, Shenzhen, Guangdong

⁴Zhongcheng Yuan (Beijing) Environmental Technology Co., Ltd., Beijing

⁵Digital China Research Institute (Fujian) Data Elements Research Center, Fuzhou, Fujian

⁶School of Spatial Planning and Design, Hangzhou City University, Hangzhou, Zhejiang

【Abstract】Shenzhen is characterized by intensive land development, with production, living, and ecological functions concentrated within a limited urban space, where functional overlap and spatial differentiation coexist. This study examines 12,514 urban blocks. Utilize amap Points of Interest (POI), OpenStreetMap (OSM) road network, and 1 m impervious-surface data are used to classify spatial functions, while natural and socioeconomic variables are incorporated to examine their formation conditions. Spatial autocorrelation, the Gini coefficient, location quotient,

*通讯作者: 刘于铖

ordinary least squares regression, and geographically weighted regression are applied. Production space and mixed production-living-ecological space show the strongest agglomeration, whereas ecological-function spaces are relatively dispersed. Mixed-function spaces occur across the nine districts included in the administrative comparison. Living space is relatively concentrated in mature districts such as Futian, Luohu, and Nanshan, with additional clusters in densely populated Longgang and Longhua. Production and living spaces are closely associated with economic development, population, road conditions, and human activity. Mixed-function space is also related to vegetation cover and other ecological conditions, while ecological space is more strongly associated with vegetation and topography. The Geographically Weighted Regression (GWR) model improves model fit for most spatial types, indicating that citywide average relationships do not fully explain intra-urban variation. Spatial governance in Shenzhen may therefore use local clustering patterns and overall statistical associations to identify functional optimization priorities, supported by dynamic monitoring and iterative adjustment.

【Keywords】 Production-living-ecological space; Spatial differentiation; Spatial autocorrelation; Geographically weighted regression; Shenzhen

1 引言

生产、生活和生态功能共同嵌入城市土地利用和居民活动之中^[1-2]。当城市发展由增量扩张转向存量提质, 空间治理开始更多关注不同功能能否在有限空间内协调配置。深圳的特殊之处在于, 土地资源紧张、人口和产业密集, 山体、河流与海岸又把可建设空间分割得较为有限。多种功能因此被压缩在相近的空间里: 一方面提高了土地利用效率, 另一方面也带来了职住分离、公共服务不足和生态斑块破碎等问题。厘清这些功能如何分布、又由哪些因素塑造, 是理解深圳城市空间结构的必要环节。

现有研究已从空间分类识别拓展到功能关系、空间异质性和驱动机制分析^[3-4]。早期研究多从土地利用类型、土地多功能性和生态系统服务出发, 对“三生空间”进行分类和识别^[1-2,5]; 此后, 相关研究进一步采用耦合协调、生态环境效应评价和情景模拟等方法, 讨论其演变过程、功能冲突与优化方向^[6-9]。POI、手机信令、出行轨迹和高分辨率遥感数据的应用, 又把城市功能研究推进到街区 and 地块尺度^[10-12]。不过, 识别精度提高以后, 仍有两个问题没有得到充分回答: 不同功能在行政区之间如何配置, 同一驱动因素在城市内部是否始终以相同方式发挥作用。全局统计和普通回归可以概括总体关系, 却容易掩盖中心城区、产业走廊和生态地区之间的差别。

本文以深圳市精细化街区单元为基础, 利用空间自相关、基尼系数和区位熵分析功能集聚与区际差异^[13], 再通过普通最小二乘回归和地理加权回归考察自然条件、人口、交通和经济因素与空间功能

分布的总体联系及空间非平稳性^[14]。在此基础上, 进一步从局部集聚类型、总体关联特征和动态变化三个角度讨论空间功能治理路径。

2 研究区、数据与方法

2.1 研究区概况

深圳位于珠江口东岸, 是粤港澳大湾区核心城市之一。西部和中部以连片建成区、产业园区和城市组团为主, 人口、就业与公共服务资源较为集中; 东部山地、海岸和生态控制区域分布较多。宝安-光明、龙华-龙岗-坪山等产业走廊与福田、罗湖、南山等成熟城区在自然条件、开发强度和功能结构上存在明显差异。研究区位置见图 1(a)。

2.2 数据来源与处理

研究数据由空间功能识别数据、自然生态数据、社会经济数据以及行政区划与统计资料四部分构成, 具体见表 1。空间功能识别以 2024 年行政区划、高德 POI、OSM 路网和 1 m 分辨率不透水面数据为基础。高德 POI 原始数据经去重、越界剔除和无效类别清洗后保留 830788 条。自然生态变量包括高程、坡度、年均温度、年均降水量、植被覆盖率和距河流距离, 社会经济变量包括人口密度、道路密度、距居民点距离、经济发展水平和人类活动强度。POI 主要反映城市设施供给与人类活动分布, 对自然生态实体的刻画则由不透水面、植被、地形和河流等数据加以补充。

不同分析内容采用相应的空间尺度。空间集聚特征在街区单元尺度进行分析, 行政区配置差异按宝安、福田、光明、龙岗、龙华、罗湖、南山、坪山和盐田 9 个行政区汇总统计, 大鹏新区不纳入基尼

系数和区位熵计算。形成机理分析将空间类型结果与 11 项影响因素统一至 1 km×1 km 网格, 以保证各类变量在空间上的对应关系。

2.3 研究单元与空间类型划分

研究单元以 OSM 道路中心线和 1 m 分辨率不

透水面边界为基础划定。按照道路等级设置缓冲范围, 并剔除面积小于 3000 m² 的零碎地块后, 共得到 12514 个研究单元。依据 POI 所表征的生产、生活和生态服务属性, 结合功能强度与地理实体面积评分, 测算各研究单元的三类功能值。

表 1 研究数据来源与用途

数据类别	主要数据/指标	数据来源及说明	主要用途与处理
空间功能识别	行政区划	国家基础地理信息中心提供的 2024 版国家地理信息公共服务平台（天地图）省、市、县三级行政区划矢量数据（审图号：GS（2024）0650 号）	界定研究区空间范围, 对比分析各行政区划配置差异
	高德 POI	基于高德地图开放平台获取的 2024 年深圳市全类别 POI 数据（坐标系为 GCS-02）	经数据清洗与重分类, 作为“三生空间”（生产-生活-生态）功能识别的核心数据来源
	OSM 路网	基于 OpenStreetMap 平台, 通过 Overpass API 工具提取的 2024 年道路网矢量数据	经拓扑修正与道路分级, 用以划分研究单元并测算道路密度
	Landsat-8 遥感影像	地理空间数据云平台分发的 Landsat 8 OLI/TIRS 遥感影像（2024 年, 空间分辨率 30 m）	辅助判定 POI 对应空间实体的占地规模参考
	1m 不透水面	武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室发布的 SinoLC-1 中国 1 米分辨率土地覆盖图（2023 年版）	提取建成区边界, 并辅助划分研究单元
	高程、坡度	地理空间数据云平台提供的 ASTER GDEM V3 数字高程模型数据（空间分辨率 30 m）; 坡度基于该数字高程模型提取	刻画地形特征; 统一投影后重采样至 1 km 网格
自然生态	年均温度、年均降水量	国家地球系统科学数据中心提供的中国 1 km 分辨率逐月平均气温与降水量栅格数据（基于多年平均值）	表征区域气候条件, 并重采样至 1 km 网格
	植被覆盖率	地理空间数据云平台提供的 MODIS MOD13Q1 植被指数产品（2024 年, 空间分辨率 250 m）; 植被覆盖率由 NDVI 计算得到	表征地表植被覆盖状况, 并重采样至 1 km 网格
	距河流距离	国家基础地理信息中心提供的 2024 版国家地理信息公共服务平台水系矢量数据	测算各网格单元至最近河流的空间距离
社会经济	人口密度	中国科学院资源环境科学数据中心提供的中国人口空间分布公里网格数据集（2020 年, 空间分辨率 1 km）	表征人口空间集聚特征
	道路密度	基于 OpenStreetMap 2024 年道路网矢量数据核算	按 1 km 网格统计单位面积内道路长度
	距居民点距离	基于高德地图开放平台 2024 年居住类及居民地类 POI 点数据测算	测算各网格单元至最近居民点的空间距离
	经济发展水平	中国科学院资源环境科学数据中心提供的中国 GDP 空间分布公里网格数据集（2020 年, 空间分辨率 1 km）, 结合人口网格数据核算人均 GDP	表征区域经济空间分异格局
	人类活动强度	美国科罗拉多矿业学院地球观测组（EOG）发布的全球年度 NPP-VIIRS 夜间灯光数据集（2023 年, 空间分辨率约 500 m）	刻画人类活动空间强度, 并重采样至 1 km 网格
统计与规划	统计年鉴及规划资料	深圳市统计局《深圳统计年鉴》（2024 年）及深圳市规划和自然资源局《深圳市国土空间总体规划（2021-2035 年）》等	用于研究区概况阐述、行政区横向比对及结果解释与验证

在功能占比的基础上, 采用 0.3~0.5 的参数比例 范围识别各单元的主导功能及主副关系, 并将分类

结果赋值至相应研究单元, 形成最终空间类型图层。研究单元共划分为生产空间、生活空间、生态空间、主生产-副生活空间、主生活-副生产空间、主生态-副生活空间和混合三生空间 7 类, 各空间类型的分布见图 1 (b), 单元数量构成见表 2。这 7 类空间

概括了街区内部生产、生活和生态功能的构成及主次关系。单一功能空间体现某一功能的主导地位, 主-副功能空间反映两类功能之间的层级关系, 混合三生空间则表现为三类功能相对均衡。

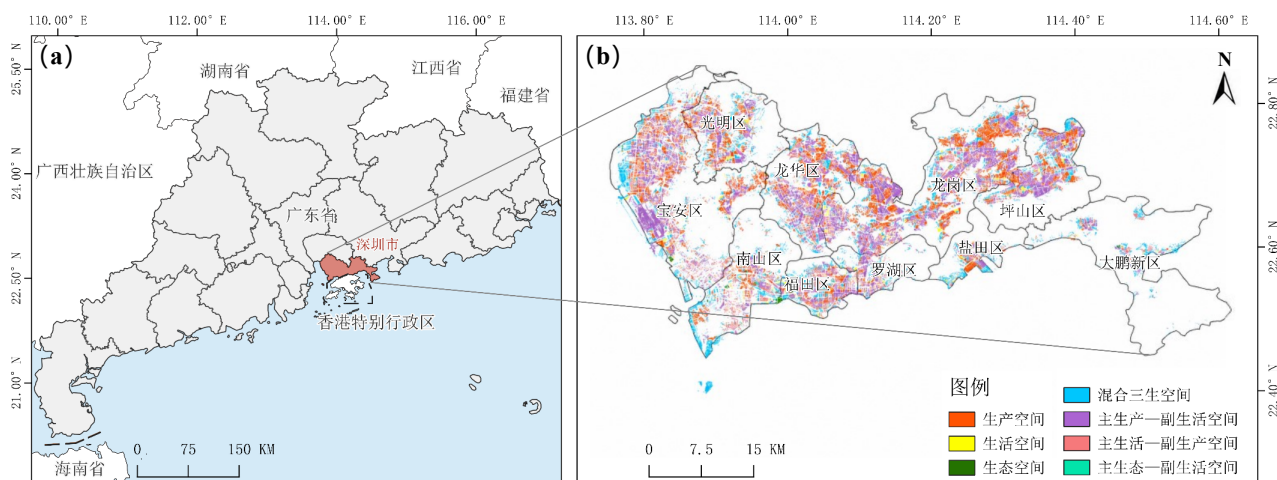


图 1 深圳市研究区位置及“三生空间”类型分布

(a) 深圳市在广东省的区位; (b) 深圳市“三生空间”类型分布

注: 图 1 (b) 依据参数比例范围为 0.3~0.5 的最终空间类型划分结果绘制; 大鹏新区为功能区, 不纳入基尼系数和区位熵的行政区统计。

表 2 0.3~0.5 参数范围内各空间类型的单元构成

空间类型	研究单元数量/个	数量占比/%
生产空间	2455	19.62
生活空间	435	3.48
生态空间	115	0.92
主生产-副生活空间	2087	16.68
主生活-副生产空间	1767	14.12
主生态-副生活空间	8	0.06
混合三生空间	5647	45.13
合计	12514	100.00

注: 数量占比为各空间类型研究单元数量占全部 12514 个研究单元的比例; 受小数位数保留影响, 各分项之和与 100% 存在微小差异。

2.4 分析方法

2.4.1 空间集聚特征分析

采用全局 Moran's I 检验各类空间在市域范围内的总体空间自相关性, 并利用局部空间关联指标 (LISA) 识别高-高、低-低、高-低和低-高四种局部关联类型^[13]。全局 Moran's I 计算公式如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

局部 Moran's I 计算公式如下:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

式中, n 为研究单元数; x_i 和 x_j 分别为第 i 、 j 个研究单元的属性值; $\bar{x}$ 为全部研究单元属性值的平均数; w_{ij} 为研究单元 i 和 j 之间的空间权重; S^2 为属性值的方差。全局 Moran's I 用于判断总体集聚程度, 局部 Moran's I 用于识别具体单元及其邻域的集聚或离群特征。

2.4.2 行政区配置差异分析

采用基尼系数衡量某类空间在 9 个行政区之间

的配置差异。计算前, 按照该类空间在各行政区中的面积比重由低到高排序, 计算公式为:

$$G = 1 - x_1 y_1 - \sum_{i=2}^n (x_i - x_{i-1})(y_i + y_{i-1})$$

式中, G 为基尼系数; n 为行政区数量, 本文取 9; x_i 为排序前第 i 个行政区的累计土地面积占 9 个行政区总面积的比例; y_i 为前 i 个行政区内某类空间面积占该类空间总面积的比例。基尼系数越大, 说明该类空间在行政区之间的分布越集中。

区位熵用于比较某类空间在单个行政区中的相对集中程度, 计算公式为:

$$LQ_{ij} = \frac{e_{ij}/e_j}{E_i/E}$$

式中, LQ_{ij} 为行政区 y_i 中空间类型 j 的区位熵; e_{ij} 为行政区 i 中空间类型 j 的面积; E_i 为行政区 i 的总面积; e_j 为 9 个行政区内空间类型 j 的面积; E 为 9 个行政区的总面积。区位熵大于 1, 表示该空间类型在相应行政区中的面积比重高于整体水平; 小于 1 则表示低于整体水平。

2.4.3 影响因素与空间异质性分析

为统一多源变量的分析尺度, 将街区尺度空间类型结果与 11 项影响因素转换至 1 km×1 km 网格。以各空间类型经网格化处理形成的空间分布表征值为因变量, 以 6 项自然生态变量和 5 项社会经济变量为自变量。自然生态变量包括高程、坡度、年均温度、年均降水量、植被覆盖率和距河流距离; 社会经济变量包括人口密度、道路密度、距居民点距离、经济发展水平和人类活动强度。

在皮尔逊相关分析基础上, 先利用普通最小二乘回归 (OLS) 估计各因素与空间类型分布之间的全市平均联系, 再通过地理加权回归 (GWR) 考察回归关系随空间位置变化的空间非平稳性^[14]:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i$$

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$

式中, y_i 为第 i 个网格内相应空间类型的分布表征值; x_{ik} 为第 i 个网格中第 k 项影响因素的取值; p 为影响因素数量; β_0 和 β_k 分别为 OLS 模型的常数项和回归系数; (u_i, v_i) 为第 i 个网格中心点的空间坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 和 $\beta_k(u_i, v_i)$ 分别为相应位置的局部截距和局部回归系数; ε_i 为随机误差项。

采用 R^2 、校正 R^2 和 AICc 比较模型拟合效果。在因变量和样本范围相同的情况下, R^2 和校正 R^2 越高、AICc 越低, 模型拟合效果越好。

3 深圳市空间功能分异特征

3.1 空间集聚特征

各空间类型的 Moran's I 和基尼系数见表 3。生产空间的 Moran's I 最高, 为 0.7546; 混合三生空间次之, 为 0.7282。主生产-副生活空间、主生活-副生产空间和生活空间分别为 0.6552、0.6506 和 0.6005, 均达到 5% 显著水平。生态空间的 Moran's I 为 0.0507, P 值为 0.0530; 主生态—副生活空间的 Moran's I 为 0.0012, P 值为 0.7530, 两类空间的全局集聚特征较弱。生态相关空间在建成区内多呈零散嵌入, 这一格局与生态斑块破碎以及 POI 对自然生态实体的表征能力有关。

生产空间连续分布有利于企业联系和产业配套, 但生活服务若未同步进入, 通勤距离和公共设施缺口可能被拉长。混合三生空间也存在内部差别: 成熟城区的混合多来自长期功能叠加, 外围地区的混合则可能处于产业导入、居住增长和生态空间调整尚未稳定的阶段。这两种情况不能仅凭集聚程度作等同判断。

表 3 各空间类型的空间自相关与配置均衡性

空间类型	Moran's I	P 值	基尼系数
生产空间	0.7546	0.0012	0.21
生活空间	0.6005	0.0021	0.34
生态空间	0.0507	0.0530	0.24
主生产-副生活空间	0.6552	0.0016	0.22
主生活-副生产空间	0.6506	0.0052	0.37
主生态-副生活空间	0.0012	0.7530	0.82
混合三生空间	0.7282	0.0015	0.04

注: 显著性判断依据 P 值, 其中 $P < 0.05$ 表示通过 5% 显著性检验。

图2给出了主要空间类型的LISA集聚格局。混合三生空间的高-高集聚区主要位于前海深港合作区、南山科技园及其周边, 科创、商务、居住和公共服务在这些地区密集叠置。生产空间的高-高集聚区集中在龙岗-坂田、坪山和龙华等产业片区, 福田、罗湖及南山部分地块则呈低-低集聚。生活空间在宝安、龙岗和坪山部分片区出现低值集聚或低-高关联。这些地区人口和产业增长较快, 但居住及公共服务供给并未完全同步。主生产-副生活空间主要沿龙华-坂田、龙岗-宝龙-坪山等产业走廊分布, 主生活-副生产

空间则更多出现在福城-观澜、龙华-坂田等轨道交通和居住开发较集中的地区。

高-低和低-高类型虽然面积不一定大, 却更能反映功能转换中的局部矛盾。它们多位于成熟城区与产业片区的交界、轨道站点周边或新旧建设区域之间: 单个街区的功能强度与周边明显不同, 规划调整、旧工业区更新或人口快速导入已经改变了原有空间关系。相比稳定的高-高集聚区, 过渡地带的功能关系更不稳定, 规划响应不宜简单参照邻区平均特征。

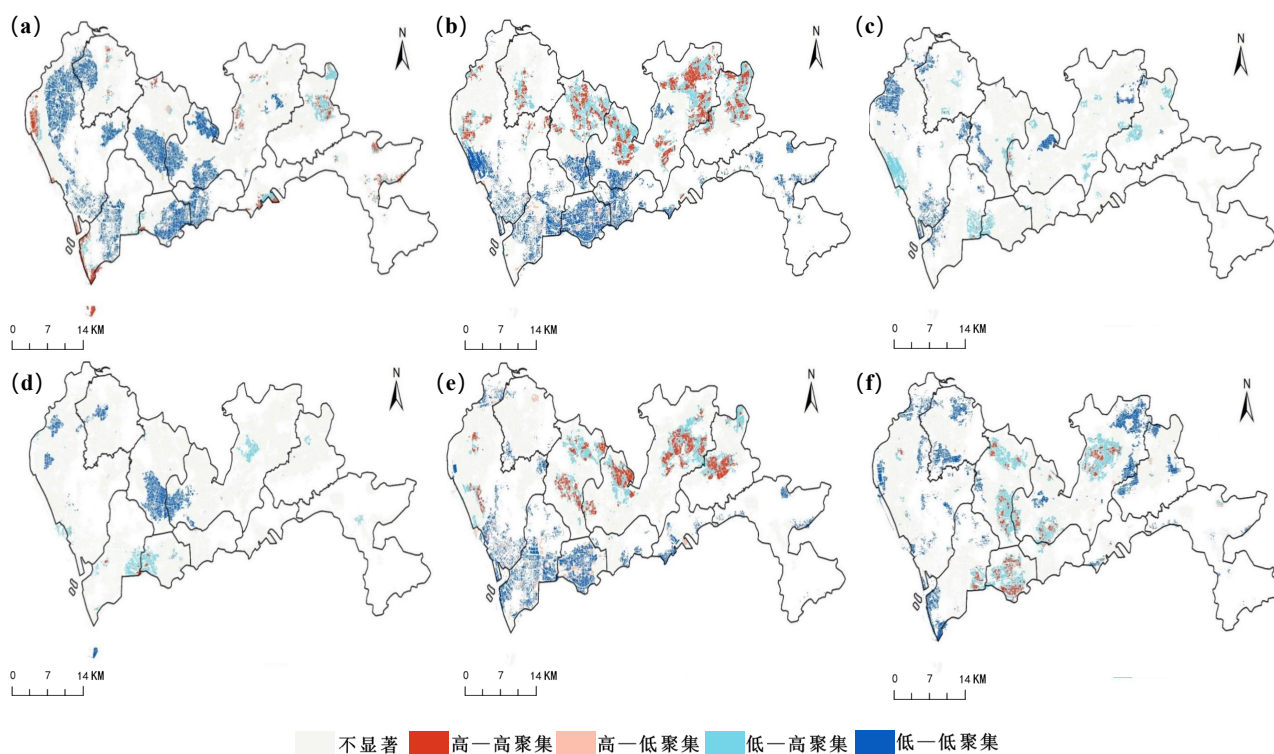


图2 深圳市主要空间类型 LISA 集聚格局

(a) 混合三生空间; (b) 生产空间; (c) 生活空间; (d) 生态空间;
(e) 主生产-副生活空间; (f) 主生活-副生产空间

3.2 行政区配置差异

从基尼系数看, 不同空间类型的区际分布差异较大。混合三生空间的基尼系数为 0.04, 在纳入统计的 9 个行政区之间分布相对均衡; 生产空间和主生产-副生活空间分别为 0.21 和 0.22, 区际差异相对较小。生活空间和主生活-副生产空间分别为 0.34 和 0.37, 区际差异高于生产类空间。主生态-副生活空间的基尼系数达到 0.82, 主要集中在少数兼具生态资源与建设条件的地区。混合空间覆盖范围较广, 各街区的功能支撑程度仍有差别, 部分地区仍存在

生态空间不足、公共服务短板和通勤压力。

各行政区主要空间类型的区位熵见图3。生产空间在龙岗(1.602)、龙华(1.457)、光明(1.357)和宝安(1.250)的比重高于全市平均水平, 与北部和东部产业走廊的长期发展较为一致。生活空间在福田(3.321)、罗湖(1.972)、龙岗(1.222)、南山(1.201)和龙华(1.145)相对集中, 福田、罗湖和南山等成熟城区总体占优, 龙岗、龙华等人口密集地区也表现出一定集聚。生态空间在盐田(2.101)、南山(1.812)和福田(1.502)的区位熵较高, 与山

海资源、城市公园和生态修复空间的分布有关。坪山的主生活-副生产空间区位熵达到 6.509, 在当地高度集中。

区位熵反映相对优势。福田生活空间的区位熵较高, 但中心城区同时承载了更高的人口密度和跨区服

务需求, 公共服务仍可能面临压力。坪山主生活-副生产空间的数值突出, 也可能受到该类型全市基数较小的影响。因而, 区位熵需要与人口规模、功能面积和实际服务半径结合解读。单个高值不足以判断一个行政区是否已经实现职住平衡或生态服务充分。

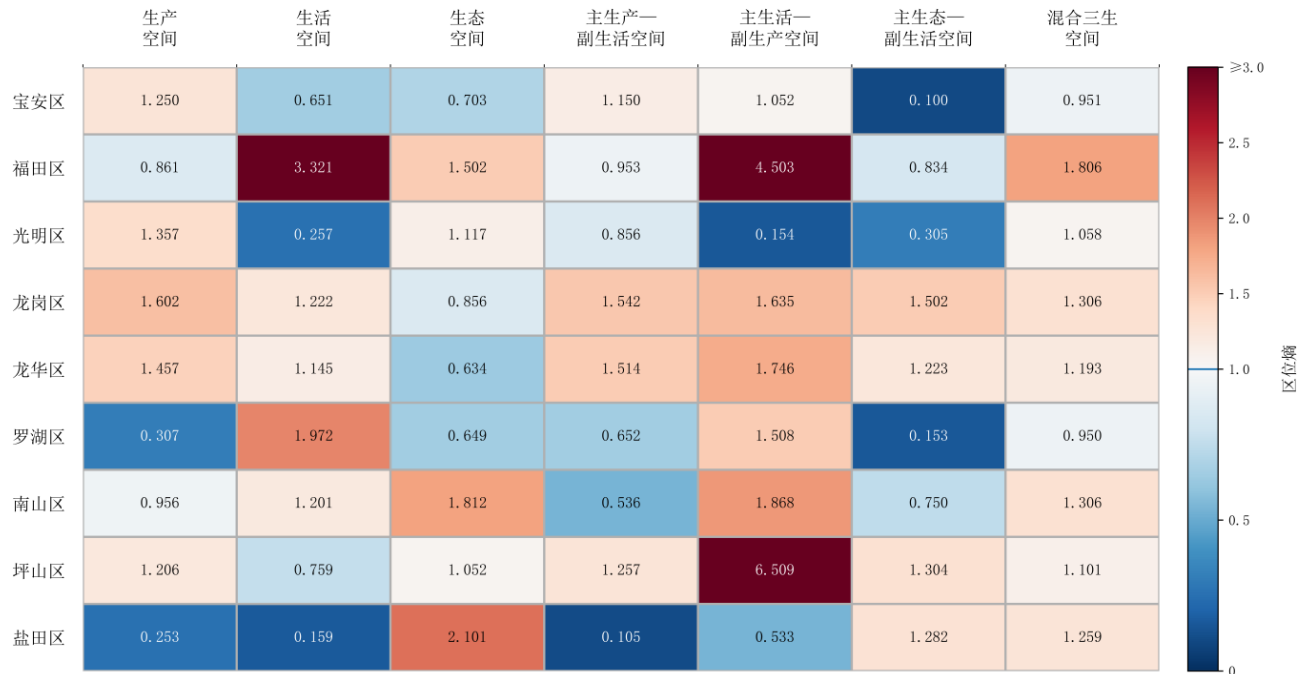


图3 深圳市各行政区主要空间类型区位熵

4 深圳市空间功能形成机理

4.1 影响因素的整体作用

本文从自然生态和社会经济两个方面分析深圳空间功能的形成条件。高程、坡度、植被和水系等自然因素主要反映建设适宜性与生态本底, 人口、道路、经济发展和人类活动等社会经济因素主要反映功能需求和开发强度。OLS 用于概括各因素与空间类型分布的全市平均联系, GWR 用于比较这些联系在不同区位上的差异。

主要空间类型的 OLS 回归结果见表 4。相关性检验未发现变量之间存在高度相关关系。经济发展水平与混合三生空间、生产空间和生活空间均呈显著正向联系, 人口密度、道路密度和人类活动强度也大多与生产、生活及复合功能正相关。深圳西部和中部长期集中了较多人口、产业与交通资源, 建设类功能在这些地区呈现较高集聚度。

植被覆盖率为混合三生空间呈显著正向联系。南山、福田等成熟城区中的城市公园、滨水空间和绿廊, 与商务、居住和公共服务共同构成功能复合。

但该系数反映的是全市平均关系, 对单个混合街区的生态品质解释有限。连续绿地不足、绿量主要来自零散附属空间的片区, 应结合更细尺度的蓝绿网络和可达性数据进一步判断。

自然因素的作用随空间类型而变化。植被覆盖率与生态空间呈显著正向联系, 与生产和生活空间呈负向联系; 高程与生态空间正相关, 与生产和混合空间负相关, 说明地形条件对建设活动具有一定约束。距河流距离和坡度的系数方向较为复杂, 相关关系还受到河岸开发、洪涝风险、岸线治理和坡地利用方式影响。

各类 OLS 模型的 R^2 介于 0.212~0.398, 所选自然-社会经济变量能够解释一部分空间差异, 仍有相当比例的形成过程未被覆盖。深圳长期的规划分区、工业用地政策、土地价格以及不同阶段的城市更新, 都可能在街区功能中留下较强的历史痕迹。这些因素难以用单期栅格变量完整表达, 表中系数主要用于解释变量间的统计联系, 不作为确定的政策效应。

4.2 影响因素作用的空间差异

不同模型的拟合结果见表 5。从决定系数看, GWR 模型在混合三生空间、生产空间、生态空间、主生产-副生活空间和主生活-副生产空间中的拟合度有所提高, 其中生产空间的 R^2 由 0.332 提高至 0.438, 生态空间由 0.212 提高至 0.368, 混合三生空间由 0.386 提高至 0.468。生活空间和主生态-副生活空间的 R^2 未得到改善。主生活-副生产空间虽然 R^2 有所提高, 但校正 R^2 仅为 0.285, 模型改善程度仍需谨慎判断。各类空间的 GWR 模型 AICc 均低于相应 OLS 模型, 表明局部模型在拟合效果与模型复杂度之间总体具有一定优势。

GWR 模型在多数空间类型上的拟合度有所提高, 表明全市平均关系难以完整解释城市内部的空间差异。

这一结果与深圳市内部开发基础和空间约束差异较大的现实情况基本一致。福田、罗湖和南山等成熟城区人口、经济和交通资源较为集中, 生产、生活与公共服务功能叠置较多; 龙岗、龙华、光明和坪山等产业与人口持续导入地区, 功能配置可能受到道路建设和公共服务供给进程的影响; 盐田及东部山地、滨海地区则更多受到地形、植被和生态保护要求约束。上述差异表明, 影响因素与空间功能分布的关系具有一定空间非平稳性, GWR 模型能够在全市平均关系之外补充反映不同区位的局部特征。具体地区中各因素的作用方向和强度, 仍需结合局部系数、规划分区及空间管控资料进一步解释。

表 4 主要空间类型的 OLS 回归系数

影响因素	混合三生	生产	生活	生态
高程	-0.032*	-0.028**	-0.018	0.042**
坡度	0.125**	0.138**	-0.035**	-0.058**
年均温度	-0.085**	0.072**	0.048**	-0.062**
年均降水量	-0.015*	0.018**	-0.012	0.025**
植被覆盖率	2.150**	-0.680**	-0.320**	2.850**
距河流距离	-0.012*	-0.018**	-0.010**	0.022**
人口密度	0.045**	0.065**	0.058**	-0.025**
道路密度	0.018**	0.025**	0.022**	-0.015*
距居民点距离	0.035**	-0.042**	-0.038**	0.025**
经济发展水平	1.250**	1.480**	1.350**	-0.550**
人类活动强度	0.085**	0.120**	0.115**	-0.065**
R^2	0.386	0.332	0.398	0.212
校正 R^2	0.375	0.321	0.387	0.202

注: **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$ 。

表 5 OLS 与 GWR 模型比较

空间类型	OLS R^2	OLS 校正 R^2	GWR R^2	GWR 校正 R^2	OLS AICc	GWR AICc
生产空间	0.332	0.321	0.438	0.403	11850	2545
生活空间	0.398	0.387	0.392	0.358	9850	2680
生态空间	0.212	0.202	0.368	0.335	15875	2885
主生产-副生活空间	0.365	0.355	0.445	0.412	10230	2384
主生活-副生产空间	0.378	0.367	0.441	0.285	9450	3255
主生态-副生活空间	0.395	0.383	0.362	0.235	9580	3840
混合三生空间	0.386	0.375	0.468	0.435	13235	2250

5 深圳市空间功能优化路径

5.1 局部集聚类型与优化重点

局部集聚类型可为功能短板识别和优化重点划定提供依据。对于生产空间高-高集聚区, 应优先核查住房、教育医疗、日常服务和交通联系是否与就业规模匹配; 混合三生空间高值集聚区, 应关注公共设施负荷、开放空间连续性和生态承载。高-低、低-高关联单元多位于功能转换地带或区域边界, 治理重点是改善相邻街区之间的设施共享、慢行联系和空间过渡。生态相关空间较为零散的地区, 应优先维护绿地、水系和山体之间的连续联系。生产、生活与生态功能的协调还需结合服务供需和生态承载综合判断^[15]。

5.2 影响因素差异与分区管控

OLS 结果反映了自然生态和社会经济因素与各类空间分布的全市平均联系, GWR 在多数空间类型上的拟合度有所提高, 提示全市平均关系可能难以充分解释市域内部差异。对于生产、生活及复合功能集中分布的地区, 应重点校核就业、居住、公共服务与交通承载之间的匹配关系; 对于生态功能集中分布、自然本底约束较强的地区, 应控制新增建设对植被、地形等生态条件的扰动, 维护生态空间连续性^[16]。对于模型解释度较低或多种因素共同作用的地区, 不宜根据单一回归系数直接确定管控措施, 可结合规划用途、建设时序和设施供需进行分阶段

调整, 避免仅按行政区边界作统一处理。

5.3 空间功能监测与动态调整

单期识别反映的是现状格局, 空间治理还需持续跟踪功能变化。可定期整合 POI、不透水面、路网和人口活动数据, 更新各类空间的数量、集聚格局和区位熵, 重点跟踪 LISA 局部离群单元、功能类型交错区, 以及区位熵和模型解释力的阶段性变化^[17]。监测结果需结合公共服务供需、生态连通性和交通可达性进行复核。对于处于持续开发阶段的新兴片区, 可根据开发进程滚动调整设施规模和建设时序, 使规划响应与人口、产业和生态条件的变化保持衔接。基于上述空间分异特征与影响因素分析, 深圳市不同空间情形下的潜在问题及治理重点见表 6。

5.4 对其他高密度城市的借鉴

本文采用的精细街区识别与空间分析方法, 对土地资源紧张、人口和产业高度集聚的城市具有一定参考价值。其他城市可利用路网、不透水面和 POI 数据划分研究单元并识别空间功能, 再结合空间自相关、基尼系数、区位熵和 OLS-GWR 模型分析功能集聚、区际差异及影响因素。由于不同城市的产业结构、设施类型和自然条件存在差异, POI 分类、功能划分阈值和影响因素应根据当地情况重新确定。对于粤港澳大湾区其他高密度城市, 本文方法可用于识别生产、生活和生态功能的局部集聚及配置差异, 为分区优化提供参考。

表 6 深圳市空间功能分异特征及治理重点

空间分异特征	潜在空间问题	治理重点
生产空间高-高集聚区	部分集聚区可能存在生活服务与就业规模不匹配	结合就业人口规模补充住房、教育、医疗和日常服务设施, 完善公共交通联系
混合三生空间呈高-高集聚	多类功能密集叠置, 可能增加公共空间与生态环境承载压力	核查公共服务承载能力, 增加开放空间和绿地, 改善慢行环境及蓝绿空间联系
局部出现高-低、低-高关联单元	相邻街区之间功能差异较大, 边界地区设施衔接不足	加强相邻街区之间的设施共享、慢行联系和公共空间衔接, 改善功能过渡
生态相关空间分布较为零散	生态斑块之间联系不足, 局部生态空间易受到建设活动干扰	维护山体、水系和绿地之间的生态联系, 严格控制重要生态节点周边的建设扰动
不同区域的功能集聚与配置特征存在差异	统一管控难以充分反映城市内部的局部差异	建立分区监测和定期评估机制, 根据空间功能变化及时调整治理重点

6 结论

(1) 深圳空间功能呈现明显集聚, 不同类型之间差异较大。生产空间和混合三生空间的集聚度最高。生活空间在福田、罗湖和南山等成熟城区总体占优, 龙岗、龙华等人口密集地区也有一定集聚。生

态相关空间与山海资源、城市公园和生态控制区域的分布联系较紧密, 在建成区内较为零散。混合空间覆盖较广, 其内部的公共服务供给和生态支撑仍需结合街区条件进一步判断。

(2) 社会经济条件与建设类功能的空间分布联

系较为显著。经济发展、人口密度、道路密度和人类活动强度与生产、生活空间呈显著正向联系; 混合三生空间同时与社会经济集聚和植被覆盖等生态条件相关, 高程和植被与生态空间的联系更为突出。GWR 在多数空间类型上获得了更高拟合度, 提示全局平均关系难以充分解释城市内部差异; 生活空间和主生态-副生活空间的模型拟合未得到改善, 现有变量对其空间分布的解释仍然有限, 规划管制、历史开发和设施配置等因素还需结合其他资料进一步分析。

(3) 空间治理应依据空间分异特征与关联因素确定优化重点。对于生产空间高—高集聚区, 应优先核查生活服务与就业规模的匹配状况; 混合三生空间高值集聚区需关注功能负荷与生态支撑; 高-低和低-高关联单元应加强相邻空间之间的设施与公共空间衔接; 自然本底约束较强的地区需控制新增建设扰动。结合 POI、路网、不透水面和人口活动数据开展动态监测, 可为持续开发地区和功能交错地区的滚动调整提供依据。

参考文献

- [1] 李广东, 方创琳. 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 49-65.
- [2] 江东, 林刚, 付晶莹. “三生空间”统筹的科学基础与优化途径探析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1085-1101.
- [3] ZHANG W, YUAN Q, CAI H. Unravelling regional development through the production-living-ecological perspective: Assessing heterogeneity and expert insights[J]. Urban Climate, 2024, 55: 101937.
- [4] LI H, ZHANG P, ZHANG L, et al. Research on the evolutionary characteristics and mechanism of production-living-ecological space in Shanxi Province, China[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 31379.
- [5] 刘继来, 刘彦随, 李裕瑞. 中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1290-1304.
- [6] 孔冬艳, 陈会广, 吴孔森. 中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1116-1135.
- [7] FU J, BU Z, JIANG D, et al. Sustainable land use diagnosis based on the perspective of production-living-ecological spaces in China[J]. Land Use Policy, 2022, 122: 106386.
- [8] LI S, CHEN Y, HUANG Q. Spatial allocation and sustainable development: A study of production-living-ecological spaces in the Yangtze River Delta[J]. Frontiers in Environmental Science, 2025, 12: 1481186.
- [9] WU S, MO W, ZHANG R, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanism of production-living-ecological space from 1990 to 2020 in Hunan, Central China[J]. Sustainability, 2025, 17(4): 1703.
- [10] 杨振山, 苏锦华, 杨航, 等. 基于多源数据的城市功能区精细化研究——以北京为例[J]. 地理研究, 2021, 40(2): 477-494.
- [11] YUAN N J, ZHENG Y, XIE X, et al. Discovering urban functional zones using latent activity trajectories[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2015, 27(3): 712-725.
- [12] ZHANG X, DU S, WANG Q. Hierarchical semantic cognition for urban functional zones with VHR satellite images and POI data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 132: 170-184.
- [13] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [14] FOTHERINGHAM A S, BRUNSDON C, CHARLTON M. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships[M]. Chichester: Wiley, 2002.
- [15] 张令达, 侯全华, 段亚琼. 生态文明背景下三生空间研究: 内涵、进展与对策[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 47-59.
- [16] 陈阳, 岳文泽, 张亮, 等. 国土空间规划视角下生态空间管制分区的理论思考[J]. 中国土地科学, 2020, 34(8): 1-9.
- [17] 林良国, 赵耀龙, 柯恩童. 面向城市更新的地理空间信息技术研究现状与展望[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(4): 898-914.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS