

空间治理视角下的城市建成区 土地混合利用功能与结构

王开家^{1,2,3}, 徐伟铭^{1,2,3}, 李楚瑜^{1,2,3}, 邵尔辉^{1,2,3}, 杨 慧^{1,2,3}

(1. 福州大学数字中国研究院(福建), 福州 350108; 2. 福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350002; 3. 福州大学地理空间信息技术国家地方联合工程技术研究中心, 福州 350002)

摘要: 城市建成区土地混合利用对促进城市用地集约利用、提升国土空间治理水平具有重要意义。以福州市七个区县为研究区, 利用多源数据提取福州建成区范围; 在街区尺度下, 基于POI数据与自然语言处理技术(BERT模型), 构建一种顾及城市混合功能语义的混合模式提取方法(MixedFunc2Vec), 并从土地利用混合功能与结构两大维度开展城市建成区土地混合利用研究。结果表明: (1) MixedFunc2Vec方法解决了传统城市功能语义提取中存在的“一词多义”问题, 能够捕捉更加丰富的POI语义信息, 并提取得到六大类混合功能模式; (2) 福州市建成区内, 模式6(居住+公交+绿地)内部的土地利用结构多样性最为丰富, 而以各类产业为主导的模式5则处于最低的多样性水平, 建成区内呈现多地多中心集聚式发展态势; (3) 在结构兼容性方面, 建成区内兼容性指数达到0.7以上的街区约有1803个, 模式1(居住+商业)与模式6(居住+公交+绿地)的平均兼容性指数均为0.8525, 除此之外, 以产业功能为主导的区域及其周边区域, 其混合兼容性水平仍有提升空间; (4) 综合结构多样性与兼容性的测度结果, 福州市建成区内各街区可划分得到“高一高”街区、“高一低”街区、“低一高”街区与“低一低”街区等四类街区, 并提出了基于不同混合功能模式的空间差异化街区调整建议。本文可为丰富现有土地混合利用理论与方法体系、城市空间格局优化及国土空间规划政策制定提供一定科学依据。

关键词: POI; 城市建成区; 土地混合利用; BERT模型; 福州市

近年来, 随着城市不断聚集发展, 城市土地资源日益短缺, 粗放式的城市发展方式开始逐步向精细式转变^[1], 城市建成区内的国土开发进入了以存量为主的空间利用阶段, 存量规划成为国土空间规划的必然选择^[2]。为促进土地利用效率不断提高, 发挥城市发展绿色可持续效应和提升城市发展质量, 土地混合利用成为了国土空间高效配置的重要方式之一^[3]。

土地混合利用起源于20世纪60年代西方城市规划领域, 具体内涵是指两种或多种土地利用类型在一定时空范围内的混合状态。土地混合利用是一个结构功能系统, “土地利用结构”是“混合功能”在空间上的显相体现, 其研究内容主要包括功能与结构两大维度^[4]。当前, 在土地利用功能提取方面, 学者们多采用社会感知地理大数据(社交网络数据、出租车轨迹、兴趣点和遥感影像)来对城市功能进行提取^[5-7]。近年来, 区域混合信

收稿日期: 2022-08-08; 修订日期: 2022-12-02

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23100502); 国家重点研发计划(2017YFB0503505-6); 福建省科技厅引导性项目(2022H0009)

作者简介: 王开家(1997-), 女, 浙江温州人, 硕士, 研究方向为国土空间规划、城市土地混合利用。

E-mail: 492714672@qq.com

通讯作者: 徐伟铭(1986-), 男, 福建闽侯人, 博士, 副研究员, 研究方向为国土空间规划、智慧城市应用。

E-mail: xwming2@126.com

息的挖掘开始逐渐得到关注。Zhang等^[8]利用手机信令数据、POI数据,挖掘深圳市土地混合比例与混合功能;刘菁菁等^[9]采用百度POI数据,基于LDA模型挖掘北京市四环内的主题混合模式,考虑POI数据的潜在语义信息,通过POI频率判断区域的功能,但忽略了POI内部的空间相关性。也有学者考虑POI地理信息的重要性,采用不同的语料构建策略,通过Word2vec模型提取POI之间的空间上下文信息,来对城市街区进行功能识别^[10]。但由于Word2vec模型训练结束后,每个单词具有固定唯一的语义信息,无法随上下文内容的变化而作动态调整,而在现实中,不同混合区域中同种POI所承载的语义不同,进而所表达的区域混合功能语义也将存在差异。因此,如何构建恰当的语料,解决城市混合区域中POI语料的一词多义问题,实现更贴近现实的城市混合功能语义提取,是目前亟待解决的问题之一。

在土地利用结构测度方面,学者们主要是基于用地多样性来开展测度工作,通过采用辛普森指数、香农指数等多样性相关指标计算混合度^[11,12]。也有学者提出了不同的兼容性指数来测度用地兼容性^[13-15],以反映土地混合利用程度,多样性强调用地类型的丰富程度,兼容性则强调用地类型之间的协调性。近年来,因POI数据量大、获取便利、信息量丰富等优点,学者们开始在混合测度方面引入POI数据开展研究。周德等^[16]以POI数据为基础,从土地利用功能与结构两方面开展了杭州市土地混合利用评价;张佰林等^[15]则利用POI数据测度了农村居民点的业态兼容性;此外,针对三生功能的混合测度,李建春等^[17]以济南市为例,基于POI数据构建面向三生空间的多功能混合利用分析框架。然而目前大多数研究仍少有基于街区尺度下,聚焦于城市活动丰富复杂的建成区内部的混合结构测度研究。因此,仍需深入基于城市建成区混合功能模式内部的街区土地混合利用测度的研究工作,实现能够满足不同模式主导区域的土地混合利用空间差异化管理。

针对上述存在的问题,本文将以“功能—结构”为研究架构,利用POI大数据,探索性构建城市建成区内融合“功能—结构”双维度的土地混合利用研究框架。结合自然语言处理技术(BERT模型),构建一种顾及城市混合功能语义的混合模式提取方法(MixedFunc2Vec),提取宏观尺度的城市土地混合功能模式,并在此基础上度量微观尺度街区土地利用结构多样性与结构兼容性,实现城市建成区双维度土地混合利用信息挖掘,为丰富现有土地混合利用理论与方法体系、寻找国土空间合理布局方案和区域协调发展提供参考及依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况与数据来源

福州市位于福建省东部沿海、闽江下游。近年来,福州市辖区内人地关系日渐紧张。当前,福建省人民政府发布《福州都市圈发展规划》,并大力支持福州市建设强省会城市以及国家中心城市,使得城市土地资源的发展压力进一步加大。因此,针对福州市山多地少、城市用地紧张等一系列问题,本文以福州市七个主要区县(鼓楼区、台江区、仓山区、晋安区、马尾区、长乐区与闽侯县)为研究区(图1),建立融合“功能—结构”双维度的城市建成区土地混合利用研究框架,对促进该地区土地混合利用统筹布局、实现福州市国土空间高效配置,具有一定的实践意义。

本文通过高德API获取到2022年1月福州市七个区县POI数据共260149条,福州市

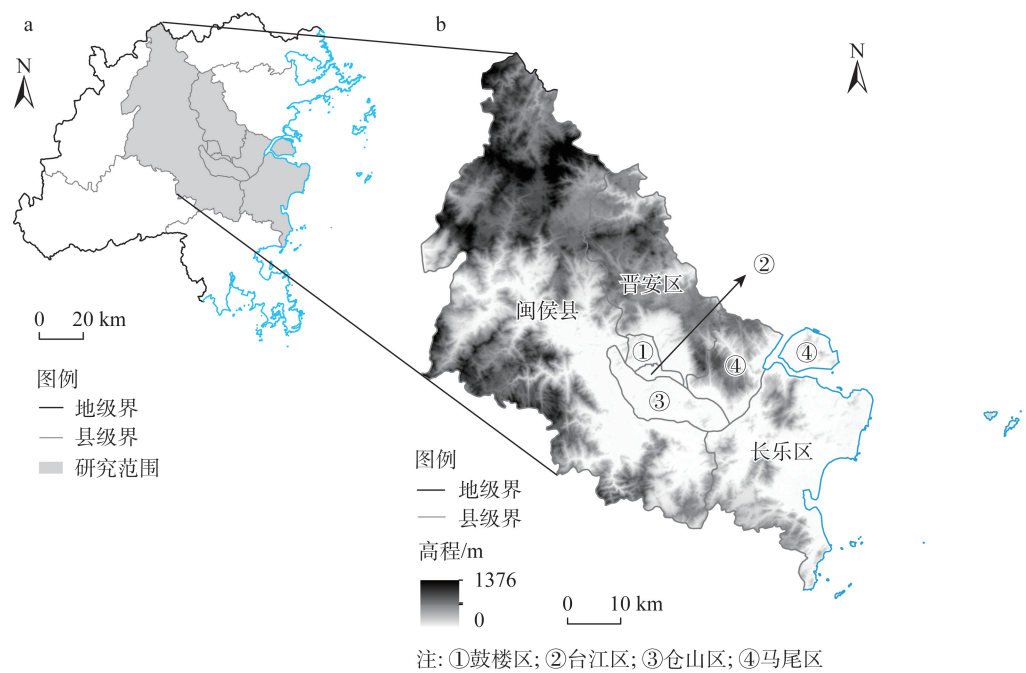


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

道路数据通过 OSM 网站 (<https://export.hotosm.org/en/v3/exports/new/>) 下载得到, 夜间灯光数据则是通过 EOGdata 网站 (<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>) 下载得到的 2021 年 12 月 NPP/VIIRS 月平均夜间灯光数据, 行政区划数据通过资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>) 获取, 福州市 2021 年高清卫星地图则通过水经注软件下载获取。

1.2 研究方法

1.2.1 研究思路

本文的整体研究思路如图 2 所示, 主要分为三部分, 第一部分为结合夜间灯光数据与 POI 数据, 提取福州市城市建成区边界, 基于提取结果划分建成区内部研究单元 (街区); 第二部分, 结合自然语言处理技术 (BERT 模型), 采用顾及城市混合功能语义的混合模式提取方法 (MixedFunc2Vec), 对建成区内的街区进行城市混合功能模式提取; 第三部分, 基于混合功能模式提取结果, 融合土地利用结构多样性与兼容性, 开展混合功能模式内部的街区测度。最后基于以上研究结果, 本文对福州市建成区土地混合利用空间格局进行了综合分析, 并提出了针对不同混合功能模式区域的街区尺度空间治理调控建议。

1.2.2 建成区提取与研究单元划分

(1) 建成区提取

城市建成区边界提取是科学实施城市规划和建设的重要基础^[18], 也是认识城市土地混合利用空间布局的前提。本文采用郑洪晗等^[19]提出的一种结合夜间灯光数据与 POI 数据的城市建成区提取方法。首先根据夜间灯光数据的影像特征, 参考 Cai 等^[20]进行大量实验得到的尺度、形状和紧致度参数设定, 进行影像多尺度分割, 计算综合考虑对象面积与平均亮度的建成区指数 X , 借助阈值分割法进行提取。建成区指数 X 公式如下:

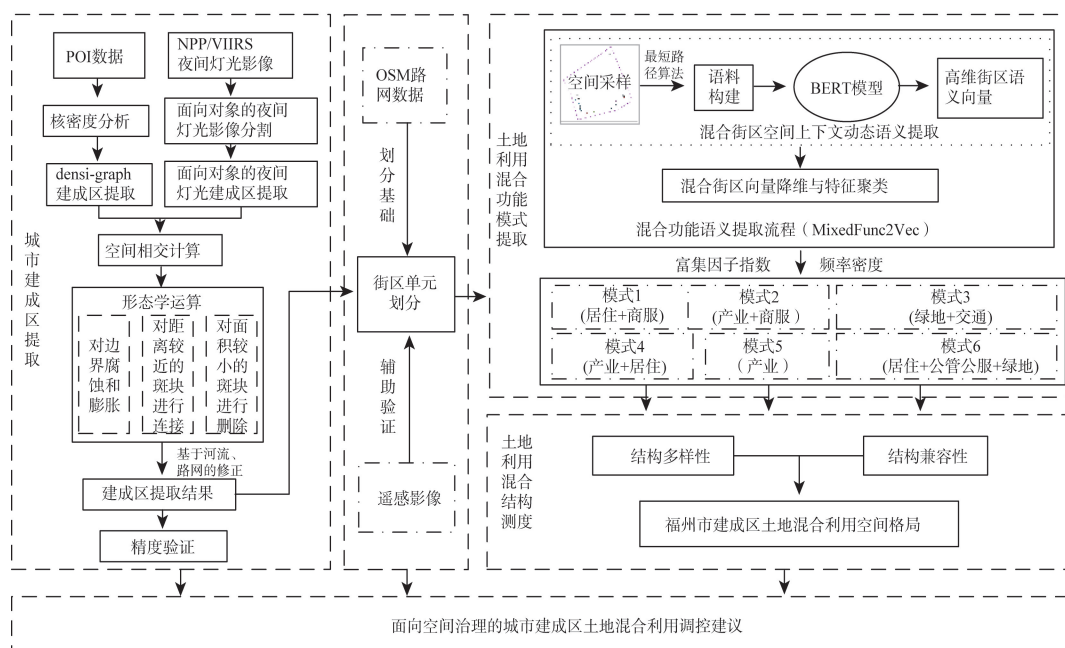


图2 技术路线

Fig. 2 Technology route

$$X = Area^{0.2} \times NTL_{mean} \quad (1)$$

式中： $Area$ 为分割对象的面积 (km^2)； NTL_{mean} 为分割对象的平均亮度值。

POI数据作为人类活动数据成为近几年识别城市建成区的一个主要数据源^[21-23]，本文选择与城市建成区分布相关性较大的POI类型，涵盖餐饮服务、购物服务、科教文化服务等13个大类，以实现更高精度的提取。采用许泽宁等^[24]提出的densi-graph方法，根据城市建成区与郊野地区的交界处存在一个POI核密度临界值 r 这一理论基础，提取得到基于POI数据的城市建成区边界，此处的 r 值，参考许泽宁等^[24]的研究结果，选定 r 为5%。

$$\lim_{dd} \frac{d(\Delta S_d^{1/2})}{dd} > r \quad (2)$$

式中：定义 S_d 表示核密度值为 d 的等值线围合的面积 (km^2)； $\Delta S_d^{1/2}$ 是 S_d 的理论半径增量 (km)； r 定义为城市空间结构变化的容许值。

将两类数据提取得到的建成区边界进行相交计算，并利用形态学算法对得到的相交结果进行膨胀腐蚀操作，以消除个别细碎区域以及存在的边界不平滑或有尖角的现象，再结合建成区范围内的主要河流分布与路网，对其进行修整，得到最终的提取结果。本文通过目视解译来获取建成区参考边界，与结合夜间灯光数据与POI数据提取得到的建成区边界进行对比，对最终提取结果进行精度评价。

(2) 研究单元划分

研究采用OSM道路数据进行单元划分，首先对重复或不完整的道路数据进行删除和补充等预处理工作，并结合福州市高清卫星影像对路网进行进一步修正。考虑到城市中的水系河流对街区划分同样存在一定分割作用，因此为提高研究单元划分的准确性，引入水系河流同时作为分割依据，将处理好的闭合道路生成街区单元，得到最终用于后续

研究的街区划分结果。

1.2.3 基于MixedFunc2Vec的土地利用混合功能研究

(1) 混合功能语义提取流程

本文基于BERT模型与城市POI数据,研究设计了一种提取混合功能语义的算法(MixedFunc2Vec),以识别城市土地利用混合功能模式。首先,计算每个街区的质心坐标,并以此作为研究范围的采样位置,并使用一种最短路径算法根据点的坐标生成街区语料库,再通过BERT模型训练得到768维高维向量,考虑到BERT获取的语义向量在相似度计算方面效果不佳等问题,本文基于BERT-whitening模型将其降维到256维,利用K-Means算法基于其语义特征,将其进行聚类,得到最终的结果(图3)。

① 语料构建

为了增加POI语料的丰富性,本文选择POI数据中的type 3来构建街区语料,为了模仿自然语言中词语的语序,采用Yao等^[10]提出的基于贪心思想的最短路径算法,构建街区上下文POI信息。由此,可得到街区的POI列表表示,例如:[(CLS), 诊所, 美容美发店, 风景名胜, 中餐厅, 公司, 美容美发店, (SEP)],用于下一步模型的训练。另外,由于本文采用BERT模型开展POI语义嵌入,而BERT模型存在无法处理过长句子的缺陷,因此采用POI语料分段的处理策略,将输入语料(长度为 L)分成 $k=L/510$ 个小段落,将它们依次输入BERT,得到 k 个语料段落的表示,使用平均池化来合并所有段落的语义嵌入,从而得到该长语料街区的语义向量表示(图4)。

② 基于BERT模型的混合街区特征向量生成

BERT是一种基于transformer架构的语言模型,主要分为预训练和微调两个步骤^[25]。与传统的神经网络新语言模型相比,BERT在文本分类、文本相似度、智能问答、文本标记和命名实体识别等多个自然语言处理任务中取得了最好的效果。研究通过将上文构

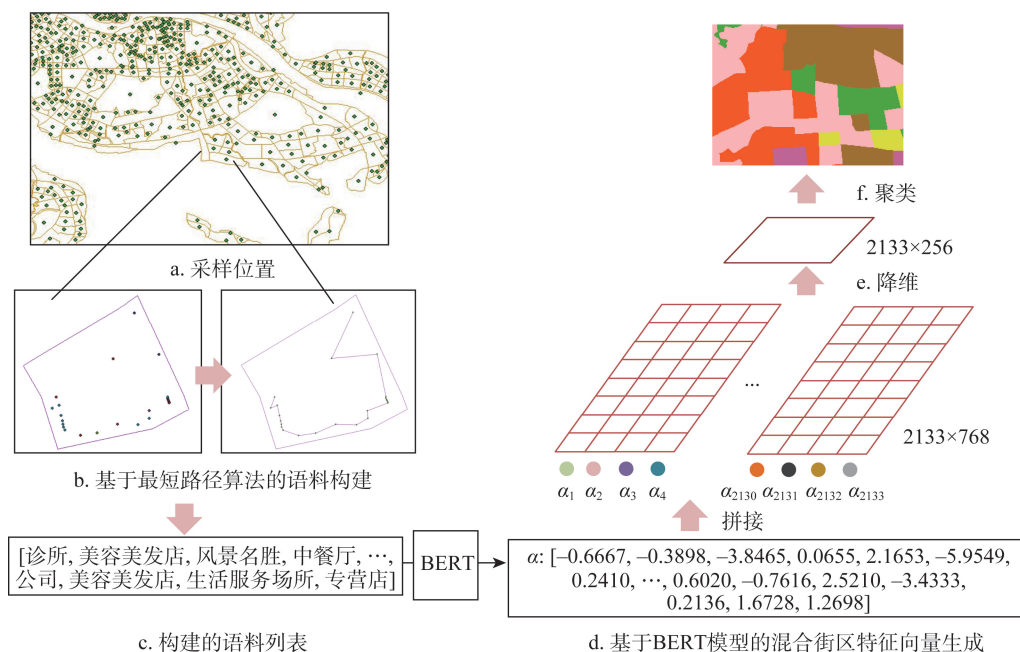


图3 混合功能语义提取流程 (MixedFunc2Vec)

Fig. 3 Hybrid functional semantic extraction process

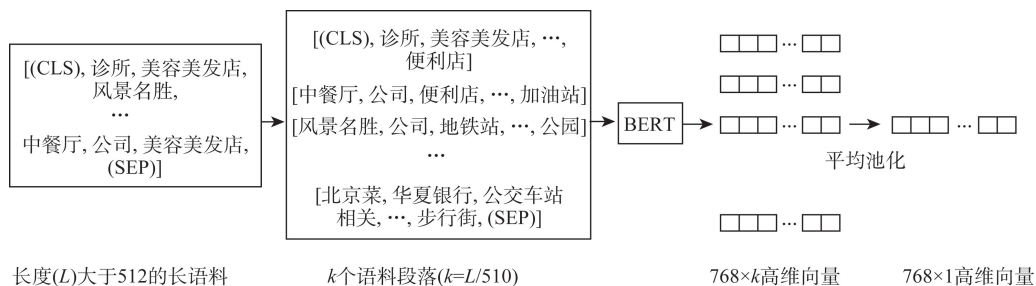


图4 长语料处理策略

Fig. 4 Long corpus processing strategy

建的POI语料输入BERT模型, 以实现对该街区混合功能语义的向量化表达(图5)。传统语言模型 Word2vec 本质上是静态词嵌入, 训练结束后, 每个单词具有固定唯一的语义信息, 无法随上下文内容的变化而作动态调整。而在现实中, 不同土地混合利用区域内, 同种POI承载的功能语义是不同的, 在以风景名胜为主的混合区域中, 餐饮POI作为一种辅助功能存在该区域, 而在以商业娱乐为主的混合区域中, 餐饮POI则是作为一个主要功能存在。因此本文选用能够根据上下文动态调整单词语义的BERT模型开展研究, 以解决POI词嵌入的“一词多义”问题, 即使对于同类型的POI, 如果具有不同的空间上下文关系, 其嵌入也会生成不同的向量(图6)。由于BERT训练成本较高, 采用谷歌发布的基于中文维基预训练的BERT模型(隐藏层数=12, 隐藏单元数量=768, 注意力层数=12, 总参数=110M, 包括7322个预训练汉字字典), 以生成符合混合街区特征的768维动态句向量。

③ 基于BERT-whitening的高维向量降维

得到每个街区的向量表达后, 将每个向量进行拼接, 得到采样位置数量×向量维数大小的向量矩阵(2133×768), 但由于直接使用BERT获取的语义向量在相似度计算方面效果不佳, 且生成向量维数过高可能将出现“维数灾难”。因此, 为避免其对模式提取结果

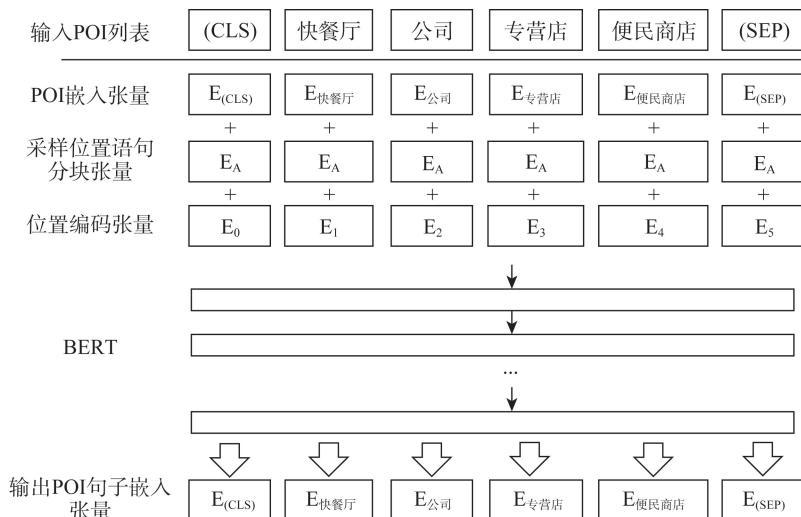


图5 基于BERT模型的向量嵌入

Fig. 5 Vector embedding based on BERT model

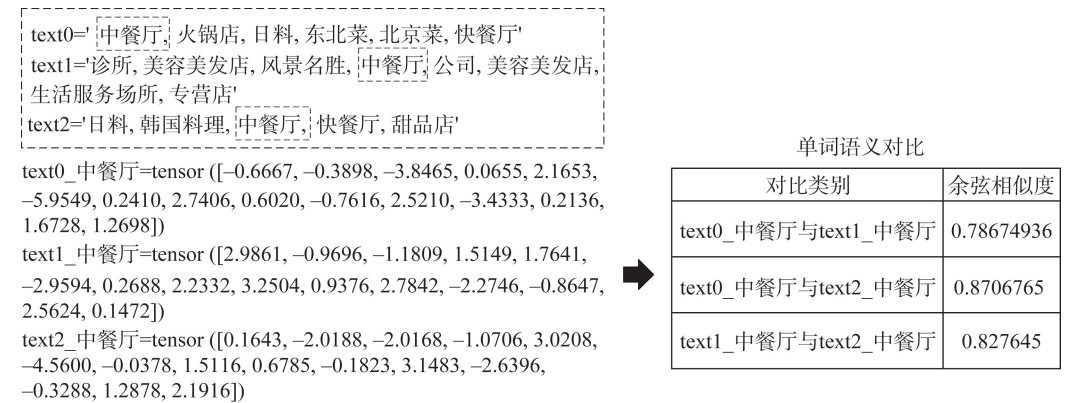


图6 “一词多义”示意图

Fig. 6 Diagram of "multiple meanings of a word"

的影响, 本文采用一种简单有效的BERT-whitening方法^[26]对其进行降维处理, 以提高基于语义信息的模式提取结果准确性, 也使其更符合现实世界中的POI单词数目。

④ 基于语义特征的街区向量聚类

参考已有研究^[10], 本文采用聚类工作中常用的K-means算法将街区句向量进行聚类, 使得具有相似混合特征的混合街区集聚, 从而提取不同的土地混合模式。

(2) 土地利用混合功能模式识别

得到区域聚类后, 本文参考自然语言处理中的TF-IDF算法, 使用POI频数密度(FD)和富集因子指数(EF)两个指标来计算不同的城市区域中POI的分布情况^[27]。

① 频数密度

计算每类POI在每个聚类的频数密度FD, 得到每种POI类型在不同聚类中的分布情况。公式如下:

$$FD_{ij} = N_{ij} / A_i \tag{3}$$

式中: N_{ij} 为第 j 类POI在聚类 i 中的数量 (个); A_i 为聚类 i 的区域总面积 (km^2)。POI类型采用一级类型。

② 富集因子

本文引入富集因子指数来避免在城市空间中, 某些类型POI可能会频繁出现导致对街区功能产生误判的问题, 如下所示:

$$EF_i^j = (N_i^j / N_i) / (N^j / N) \tag{4}$$

式中: EF_i^j 表示第 i 个聚类中第 j 类POI的EF值; N_i^j 表示第 i 个聚类内第 j 类的POI类型个数 (个); N_i 表示第 i 个聚类中所有的POI数量 (个); N^j 表示第 j 类POI在整个区域中的总数 (个); N 表示整个区域中的POI总数 (个)。

1.2.4 基于多样性与兼容性的土地利用混合结构研究

研究选择从结构多样性和兼容性两个角度对城市土地混合利用水平进行测度, 考虑到两类指标不同量纲的影响, 本文将对测度结果进行归一化处理。参照《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南 (试行) 》, 将POI数据用地类型进行划分 (表1)。由于POI数据只是一个抽象的点元素, 无法涵盖所代表地理实体用地规模。因此, 本文基于福州市的实际情况以及指标量化的难易程度, 参考已有的研究成果^[28], 设

表1 POI数据与用地类型对照表

Table 1 Comparison of POI data and land use type

	POI 大类	用地类型	影响度（面积）
商服用地	餐饮服务	餐饮用地	10
	购物服务	零售商业用地	15
	金融保险服务	商务金融用地	30
	生活服务	其他商服用地	10
	体育休闲服务	娱乐康体用地	10
	住宿服务	旅馆用地	10
公共管理与公共服务用地	政府机构及社会团体	机关团体用地	30
	科教文化服务	科教文化用地	30
	医疗保健服务	医疗卫生用地	20
一类工业用地	公司企业	一类工业用地用地	30
二三类工业用地	工厂及产业园	二三类工业用地	70
物流仓储用地	物流仓储场地	物流仓储用地	30
农林牧渔用地	农林牧渔基地	农林牧渔用地	60
交通运输用地	交通设施服务	交通设施用地	15
居住用地	商务住宅	居住用地	50
绿地	公园绿地	公园与绿地	95
	风景名胜	风景名胜设施用地	95

定相应权重（影响度）。

（1）结构多样性测度

本文使用生物多样性指数——Hill number 来对土地利用混合度进行衡量^[29]。

$${}^qD = \left(\sum_{i=1}^n P_i^q \right)^{1/(1-q)} \quad (5)$$

式中： P_i 为用地类型 i 出现的频率；参数 q 为阶数，当 $q=1$ 时，即为香农指数，其值越大，代表区域内土地利用结构多样性越丰富，混合程度越高，本文选择应用最广泛的香农指数来作为衡量土地混合度的指标。

（2）结构兼容性测度

当前大多数土地混合利用研究仍然缺少对兼容性的测度，而土地混合利用的兼容性更加侧重于用地类型之间的互相协调，为了能够更加充分地展现福州市土地混合利用整体格局，本文基于表1当中各类POI对应的影响度（面积），进而得到各用地类型的面积加权结果，采用Zhuo等^[30]提出的基于面积加权向量的混合度指数（Area-Weighted Vector-based Mix Degree Index, WVMDI），以衡量街区间的土地混合利用兼容性，其值越大，表明用地类型兼容性越高，即混合程度越高。该指数充分考虑了用地类型之间的相容性关系以及邻域地块面积的影响，将相邻地块的面积考虑为权重，潜在地反映了土地利用类型之间的外部性效应，是城市土地混合利用兼容性测度的有效衡量指标。

$$WVMDI = 1 - \frac{\sum_j^n (C_{ij} \times A_i / A_j)}{\sum_j^n (A_i / A_j)} \quad (6)$$

式中： $WVMDI$ 为土地利用兼容性指数； C_{ij} 为兼容性值，不同用地之间兼容性值如表2所示； A_i/A_j 为用地 i 与用地 j 的加权面积之比。

表2 各用地兼容性一览表^[4]
Table 2 The compatibility list of land use

	商服用地	公共管理与公共服务用地	居住用地	一类工业用地	二三类工业用地	物流仓储用地	绿地	交通运输用地	农林牧渔用地
商服用地	0	0.03	0	0.19	0.95	0.08	0	0	0.05
公共管理与公共服务用地	0.03	0	0	0.55	0.98	0.53	0	0	0
居住用地	0	0	0	0.45	0.99	0.45	0	0	0
一类工业用地	0.19	0.55	0.45	0	0.06	0.01	0.45	0	0.08
二三类工业用地	0.95	0.98	0.99	0.06	0	0.06	0.75	0	0.64
物流仓储用地	0.08	0.53	0.45	0.01	0.06	0	0.45	0	0.1
绿地	0	0	0	0.45	0.75	0.45	0	0	0.03
交通运输用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0
农林牧渔用地	0.05	0	0	0.08	0.64	0.1	0.03	0	0

2 结果分析

2.1 福州市建成区提取与单元划分结果

利用夜间灯光数据与POI数据提取得到建成区结果如图7所示，根据福州市相关规划确定的发展战略、方向及空间结构，其结果符合福州市“一轴、两城、六组团”滨江滨海空间发展格局的规划预期，主城区地块完整，靠近长乐滨海新城方向，地块则趋于破碎化。本文将人工目视解译结果作为建成区边界参考，得到精度评价结果：OA=85.63%，取得良好的提取效果。基于提取得到的建成区范围，划分得到2214个街区单元，后续研究将在此提取结果的基础上开展。

2.2 福州市土地利用混合功能模式提取结果

利用本文构建的MixedFunc2Vec方法，得到福州市建成区土地混合功能模式提取结果。根据POI数据与用地类型对照表，以及富集因子与频数密度的计算结果，将福州市建成区内各个街区划分为六个集群区域，即为六类混合模式，每个集群区域均包含多种城市功能类型，与现实世界中城市建成区内的土地利用高度异质化和混合化特点是相一致的。

2.2.1 城市土地混合功能模式提取和分类结果

通过计算得到的每类集聚区中不同POI类型的富集因子指数（EF）与频数密度（FD），分析POI在不同街区的分布情况，如表3所示，本文将富集因子指数（EF）与频数密度（FD）数值的大小进行由绿到红的可视化展示，红色越深数值越大，绿色越深数值越小。针对频数密度（FD）误将频数过高的常见POI识别为主导功能的缺陷，富集因子指数（EF）可避免该类问题，且可筛选出在其他区域少量出现而在某一区域多次出现的功能类型，即区域的特殊主导功能类型。因此，本文以富集因子指数为主，频数密度为辅助，对集聚区的主导功能混合模式进行综合判断（图8），以下对识别结果进行逐一分析：

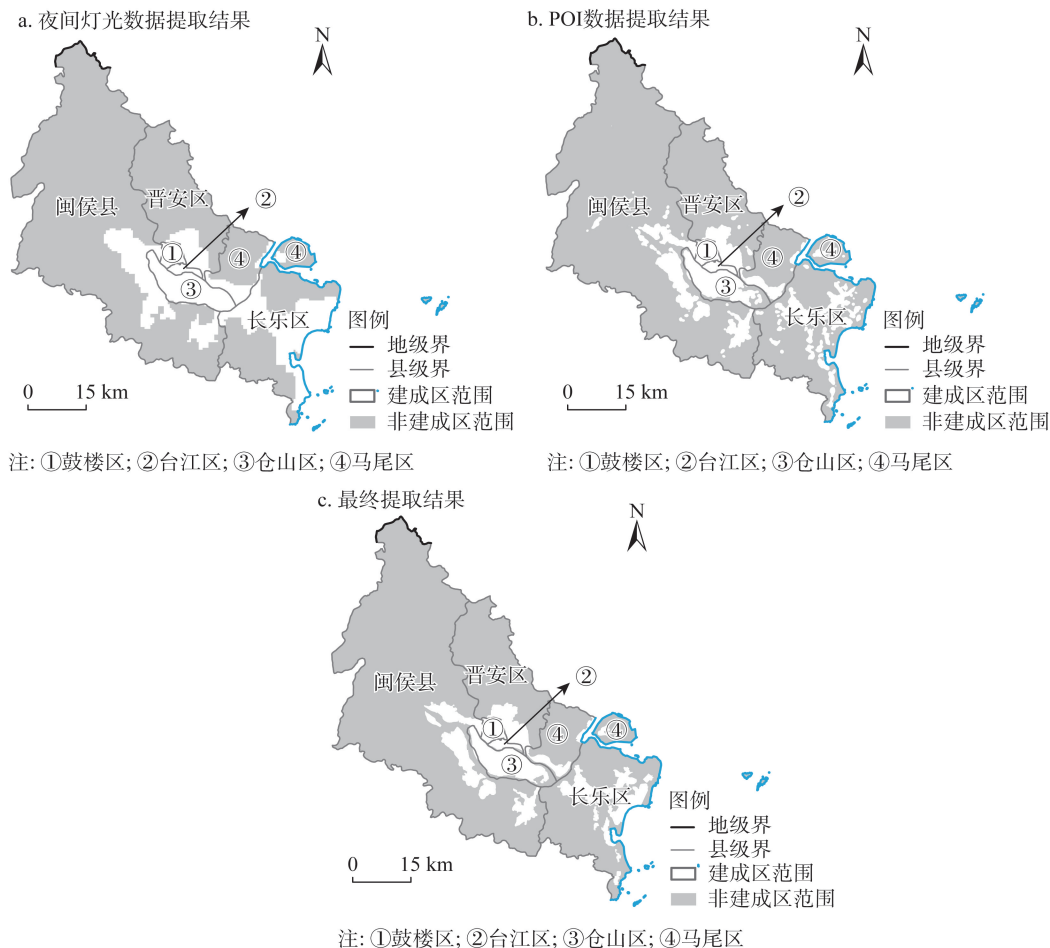


图7 建成区提取

Fig. 7 Extraction of built-up area

(1) 模式1: 居住+商服

该混合区域与其他混合区域相比, POI体量较大, 且分布有大量商服类POI, 区域内 EF 值与 FD 较高的均为生活服务($EF=1.14$ 、 $FD=133.64$)、餐饮服务($EF=1.26$ 、 $FD=176.46$)与购物服务($EF=1.12$ 、 $FD=241.64$)类POI, 同时也分布着大量金融保险服务、医疗保健服务等服务场所。该区域内分布着东街口商圈、泰禾广场商圈、宝龙广场商圈、上下杭文化街区等福州市最著名的商业街区, 同时, 通过将模式1区域与其他模式区域进行横向对比可知, 模式1区域内分布着较多的商业住宅POI($FD=15.46$), 因此判断该区域的混合模式为以商服与居住功能主导的混合街区。

(2) 模式2: 产业+商服

该混合区域 EF 值最高的分别为工厂及产业园($EF=1.98$)、农林牧渔基地($EF=1.74$)、购物服务($EF=1.69$)、物流仓储场地($EF=1.64$)与公司企业($EF=1.43$)类POI。同时 FD 值最高的为购物服务类POI($FD=140.62$), 远远高于区域内其他类型POI, 且此类区域靠近产业主导模式区域, 可推断其属于产业功能区域与其他功能区域的过渡性区域。因此, 将该区域判断为属于以产业与商服为主导的区域混合模式。

表3 *FD*和*EF*指标计算结果

Table 3 *FD* and *EF* index calculation results

类型	模式1		模式2		模式3		模式4		模式5		模式6	
	<i>FD</i>	<i>EF</i>	<i>FD</i>	<i>EF</i>	<i>FD</i>	<i>EF</i>	<i>FD</i>	<i>EF</i>	<i>FD</i>	<i>EF</i>	<i>FD</i>	<i>EF</i>
餐饮服务	176.4562	1.2636	33.4937	0.6215	6.4873	0.3225	19.2685	0.5194	3.6530	0.1579	67.2852	0.8614
风景名胜	4.3900	0.6312	2.5954	0.9669	4.2043	4.1957	2.0143	1.0901	0.6596	0.5725	6.0249	1.5485
公园广场	0.7571	0.6742	0.2014	0.4646	1.2432	7.6842	0.1855	0.6219	0.0254	0.1364	0.9750	1.5522
公司企业	28.9352	0.3920	40.7987	1.4323	9.1094	0.8567	68.0228	3.4692	75.3932	6.1668	42.5380	1.0303
工厂及产业园	0.8548	0.2764	2.3604	1.9774	0.5425	1.2174	3.7636	4.5801	4.3125	8.4170	0.9023	0.5215
农林牧渔基地	0.1038	0.3900	0.1790	1.7426	0.1130	2.9476	0.2253	3.1863	0.2283	5.1788	0.1310	0.8798
购物服务	241.6351	1.1208	140.6198	1.6901	7.1881	0.2314	31.7784	0.5548	14.2567	0.3992	80.0553	0.6638
交通设施服务	29.0390	0.6868	8.4685	0.5189	21.2703	3.4916	12.8545	1.1443	7.1791	1.0250	38.7179	1.6369
金融保险服务	8.8045	0.7986	1.4431	0.3392	3.3002	2.0776	3.9889	1.3618	0.9640	0.5278	9.7577	1.5821
科教文化服务	30.5471	0.8300	7.1820	0.5056	15.5515	2.9329	9.7270	0.9948	3.2978	0.5409	30.1463	1.4642
商务住宅	15.4577	0.8220	4.4860	0.5177	5.1763	1.6002	18.7381	0.9620	1.6235	0.4365	20.1412	1.6036
生活服务	133.6366	1.1424	31.3905	0.6953	9.5841	0.5687	25.6295	0.8247	7.2806	0.3757	63.3341	0.9679
物流仓储场地	0.0794	0.4076	0.1231	1.6374	0.0000	0.0000	0.2915	5.6354	0.2790	8.6506	0.0218	0.2004
体育休闲服务	13.9516	0.9268	2.8079	0.4833	4.9051	2.2617	3.9491	0.9875	0.8879	0.3561	11.2930	1.3411
医疗保健服务	33.1481	1.2109	5.1460	0.4871	2.1926	0.5560	3.0347	0.4173	0.4313	0.0951	16.0227	1.0464
政府机构及社会团体	20.4421	0.7292	5.9738	0.5522	15.8680	3.9291	7.0766	0.9502	3.5261	0.7594	24.5943	1.5684
住宿服务	8.1084	0.9367	1.9242	0.5760	1.2206	0.9788	1.5240	0.6627	0.1268	0.0885	7.2255	1.4922

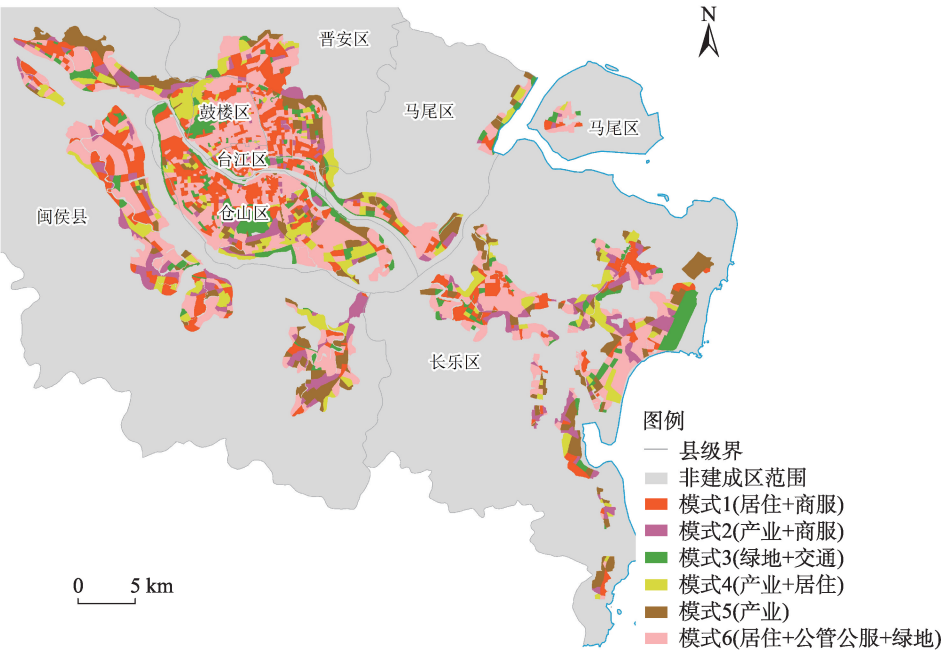


图8 福州市建成区土地利用混合功能模式

Fig. 8 Mixed mode of land use function of built-up areas in Fuzhou

(3) 模式3：绿地+交通

该混合区域内公园与风景名胜类POI的*EF*值最高 (*EF*=7.68、4.20)，*FD*值最高的为交通设施服务类POI (*FD*=21.27)，同时也分布着科教文化服务与政府机构及社会团体类POI，作为辅助功能出现在该区域，该区域覆盖了诸多福州市绿地设施，如西湖公园、

牛岗山公园、高盖山公园等,与指标计算结果显示一致,同时也涵盖了高速路口、收费站等与交通相关的POI,以及一些重要交通枢纽如福州站、福州南站等。因此,认为该类区域属于以绿地与交通运输功能为主导的区域混合模式,同时也可体现出福州市绿地设施的交通可达性良好。

(4) 模式4: 产业+居住

该区域中 EF 值最高的POI类别依次为物流仓储用地($EF=5.64$)、工厂及产业园($EF=4.58$)、公司企业($EF=3.47$)与农林牧渔基地($EF=3.19$),同时,从 FD 值角度来看,该区域分布着大量公司企业($FD=68.02$),也存在着一定数量的购物服务($FD=31.78$)、生活服务类POI($FD=25.63$)以及住宅($FD=18.74$),但这三类POI的 EF 值处于较低水平,分别为:0.55、0.82以及0.96,由此可知该区域与集群5的产业主导型相比,虽然同样以产业为主导,但相当一部分主导功能为住宅及其他相关配套设施。对照卫星影像可知,该区域主要为居民社区与公司企业、工厂及产业园交错分布地带。因此,综合判断该区域属于以产业和居住为主导的区域混合模式。

(5) 模式5: 产业

该区域中物流仓储场地($EF=8.65$)、工厂及产业园($EF=8.42$)、公司企业($EF=6.17$)和农林牧渔基地($EF=5.18$)的 EF 值远高于区域内其他类型POI。此外,公司企业类POI的 FD 值为75.39,区域内分布着大量公司企业,呈现明显的产业主导型混合模式,该区域分布着福州市多个著名产业集聚混合区:福州市软件园、闽侯县经济技术开发区以及福州市主城区东部的富安物流园、福兴经济开发区、东南公路港钢材物流园等。因此,判断该区域属于以产业为主导的区域混合模式。

(6) 模式6: 居住+城管公厕+绿地

相比其他区域,该混合区域内住宅($EF=1.60$)、金融保险($EF=1.58$)、政府机构及社会团体($EF=1.57$)、公园($EF=1.55$)、风景名胜($EF=1.55$)等多种功能类型POI的 EF 值均处于较高水平,承载了行政办公、教育科研、文化活动等公共管理与服务功能,如福州市政府机构、大学城均位于该区域内。餐饮服务、购物服务与生活服务类POI的 FD 值虽然处于较高水平,然而其 EF 值均小于1,故不考虑将其认定为主导功能类型,而是将其认定为区域之间常见的辅助功能类型,因此将该区域最终判断为居住+城管公厕+绿地主导型的区域混合模式,这也说明了城管公厕类设施往往倾向于与居民区混合布局,同时也含有大量作为配套设施的餐饮服务、购物服务和生活服务类POI,表明成熟社区往往拥有良好的商业服务。

2.2.2 不同混合区域语义信息对比

本文以每类混合功能模式区域的街区语义向量均值表示该模式类型,并通过计算不同模式语义向量之间的余弦相似度来比较不同模式之间的语义信息。表4为具体计算结果。

由区域语义相似度计算结果可知,针对以产业为主导的混合模式5,模式1(0.6598)、模式3(0.7601)、模式6(0.8047)与之相比,区域语义信息差异较大,说明产业集聚区域和其他几类混合区域在承载功能上存在较明显的空间异质性,但与模式4(0.9492)、模式2(0.9291)相比,区域语义信息则更为相似,这是由于在以公司企业、工厂及产业园为主的区域中,商服类、住宅类更多作为一种附属功能与之共存,具有很强的相关性。模式6与模式4的语义相似度较高(0.9218),这可能是由于在中心城区,

表4 混合功能模式向量相似度对比

Table 4 Comparison of vector similarity of mixed function mode

	模式1 (居住+商服)	模式2 (产业+商服)	模式3 (绿地+交通)	模式4 (产业+居住)	模式5 (产业)	模式6 (居住+城管公服+绿地)	街区数 量/个
模式1 (居住+商服)	1	0.9189	0.7936	0.8484	0.6598	0.9188	799
模式2 (产业+商服)	0.9189	1	0.7962	0.9221	0.9291	0.8051	239
模式3 (绿地+交通)	0.7936	0.7962	1	0.8818	0.7601	0.7961	203
模式4 (产业+居住)	0.8484	0.9221	0.8818	1	0.9492	0.9218	182
模式5 (产业)	0.6598	0.9291	0.7601	0.9492	1	0.8047	235
模式6 (居住+城管公服+绿地)	0.9188	0.8051	0.7961	0.9218	0.8047	1	475

住宅类街区总是与一些公司企业、城管公服混合布局。模式1与模式2（0.9189）、模式6（0.9188）相比，语义相似度非常接近，且均分布在福州市三环与附近区域，表明商业服务作为一种重要的城市功能成分，以主导功能或辅助功能的形式存在于城市的混合功能布局中。总体而言，城市是一个空间连贯的多功能混合复杂系统，区域之间既存在空间异质性，也存在相似性。

2.3 福州市土地利用混合结构性测度结果

2.3.1 结构多样性测度结果

本文分别取0.66与0.33为分界线，将福州市建成区结构多样性测度结果划分为高、中、低三类。从面积分布上看，建成区内各街区结构多样性测度值主要集中在中高值区间，总体呈现较高水平。从空间分布上看（图9），区域内总体呈现若干个分散的聚集区，具体表现为由核心向外围逐渐降低的辐射状分布态势，空间布局不均衡。根据空间自相关分析结果表明，福州市建成区内土地利用结构多样性为显著正自相关，具有空间集聚性特征。

从划分得到的土地利用混合功能模式来看，本文对结构多样性测度结果进行单因素方差分析（ANOVA），可知针对不同土地混合功能模式的区域，其平均结构多样性存在显著差异。模式6（居住+城管公服+绿地）内部土地利用结构多样性最为丰富，高值街区个数有388个，占比超过50%，模式1（居住+商服）次之，模式2、模式3、模式4与模式5则均处于较低的多样性水平，这是由于模式1（居住+商服）与模式6（居住+城管公服+绿地）主要分布在鼓楼区、台江区、闽侯大学城等城市活动丰富复杂的热点地区，区域内功能设施多样，而模式2（产业+商服）、模式3（绿地+交通）、模式4（产业+居住）主要分布在热点地区的周边，以公园绿地、各类产业集聚地与商服、住宅的混合区域为主；以模式5（产业）为主导的区域内则主要为福州市主要的几大产业集中区，以工厂、产业园与公司企业为主，用地结构单一，因此其多样性水平处于最低水平。

2.3.2 结构兼容性测度结果

福州市建成区结构兼容性测度结果显示，建成区内兼容性水平较高，兼容性归一化

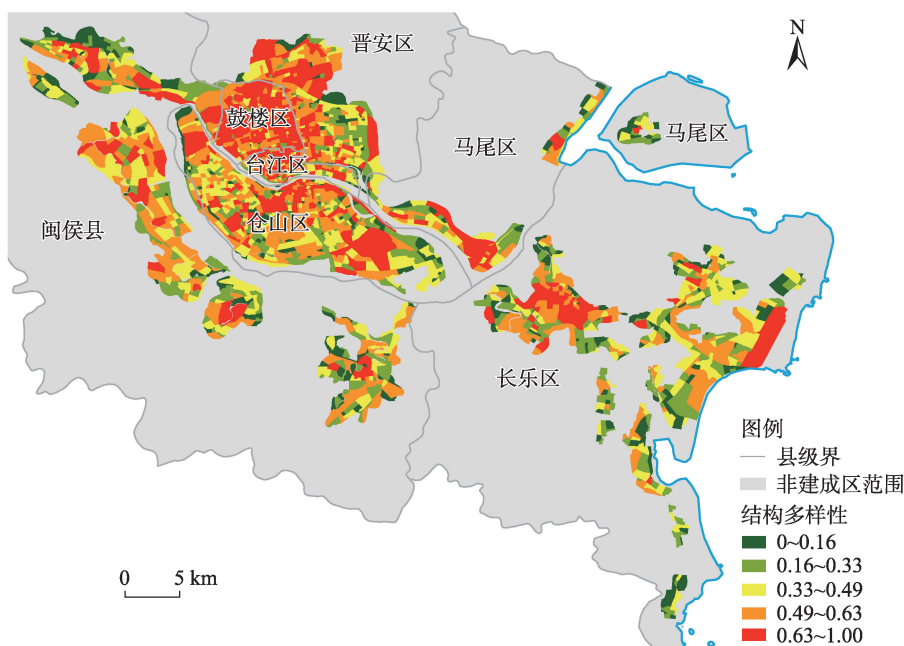


图9 福州市建成区结构多样性

Fig. 9 Structural diversity of built-up areas in Fuzhou

指数达到0.7以上的街区约有1803个。从各类土地利用混合功能模式来看(图10),模式1与模式6依然处于较高的兼容性水平,其平均兼容性指数均为0.8525,这是由于这两类模式引导下的街区内部,POI类型丰富齐全,数目众多,且主要为商服、居住、城管公服等对环境无污染或污染性较少的功能类型,其内部产业类型对居住和公共设施等环境基本无干扰和污染,例如电子信息类企业等。因此,以上两类混合模式兼容性程度高;模式4(产业+居住)与模式2(产业+商服)主要为产业、住宅与商服的功能交错区域,由于产业型用地与住宅、商服等用地兼容性较差,因此使得这两种模式的兼容性处于中下水平;而以各类产业为主导的模式5,则处于最低的兼容性水平(0.7566),这是由于其内部公共公服类、绿地类等具有正外部性的POI类型占比较小,且产业类型以化工、机械制造、纺织等为主,对周边环境质量的影响较大,导致土地利用产生的负外部性较强。总体而言,除模式1和模式6之外的区域,即以产业功能为主导的区域及其周边区域,其混合兼容性水平仍有提升空间。

2.4 面向空间治理的福州市建成区土地混合利用格局分析与调控建议

城市土地混合利用在注重结构多样性的同时,也应当注重土地利用类型之间的结构兼容性。因此,本文进一步综合结构

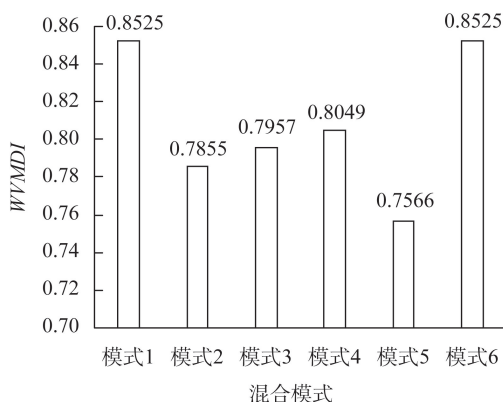


图10 不同模式兼容性水平对比

Fig. 10 Comparison of compatibility levels of different modes

多样性与结构兼容性两个街区尺度的土地混合测度指数，通过散点图将计算结果可视化展示，对建成区内的街区进行划分。由于兼容性指数计算结果普遍较高，为实现更准确的划分结果，选择以所有街区的兼容性指数平均值0.8作为分界线；而多样性指数分布更为均匀，则选择以0.5作为分界线，分类结果如图11所示。“高一高”街区，即土地混合利用水平较高，可继续维持现状发展的区域；“高一低”街区、“低—高”街区与“低—低”街区则视为未来仍需进一步提升土地混合利用水平的区域。本文共得到福州市建成区内“高一高”街区651个，“高一低”街区176个，“低—高”街区920个，“低—低”街区386个，由此可知，福州市建成区内除去多样性与兼容性均不足的街区需进行改进之外，还有大量兼容性较高但多样性有待改进的街区。

为综合考虑不同区域用地布局特点，开展更具有指向性的城市土地混合利用空间治理，基于提取得到的六类混合功能模式，结合结构多样性与兼容性测度街区划分结果，得到街区尺度下六类混合功能模式的土地混合利用空间格局，如图12、图13所示，图13a~图13f为各类混合功能模式街区土地混合利用测度整体布局，图13a1~图13f1为各类模式对应的局部放大的待提升典型区域。

(1) 模式1（居住+商服）

该类模式主导下的街区大致分布于福州市的多个商业中心位置，商住混合特点明显。其“高一高”街区的个数达到建成区内所有“高一高”街区的40%以上，结构兼容性处于区域内的较高水平，相比而言，结构多样性方面则显示不足，“低—高”街区个数有243个，此外，多样性与兼容性均不足的“低—低”街区则有73个，

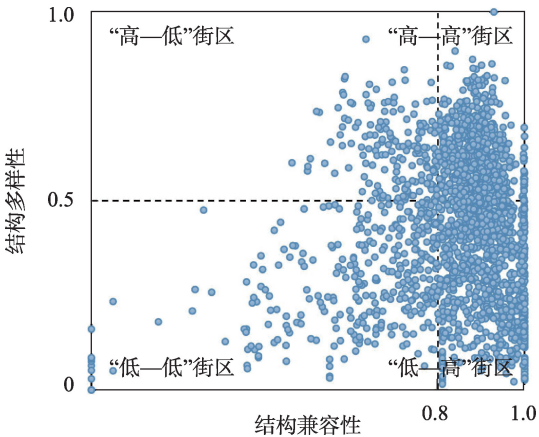


图 11 基于“结构多样性—结构兼容性”的街区散点图
Fig. 11 Street scatter map based on "structural diversity-structural compatibility"

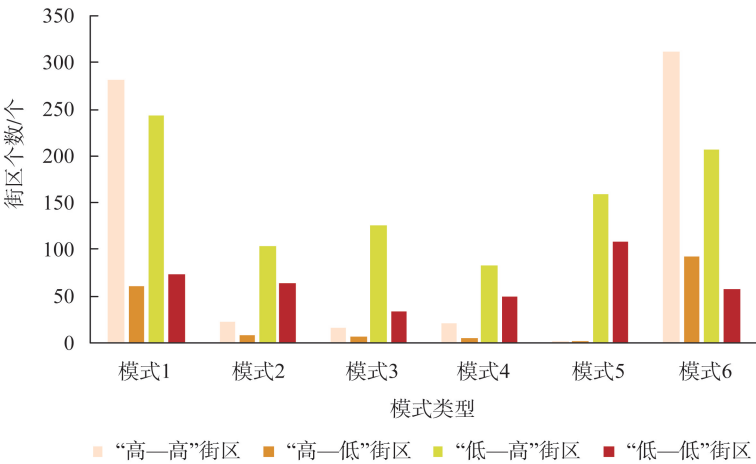


图 12 不同混合功能模式下的结构性测度街区个数统计

Fig. 12 Statistics of the number of blocks for structural measurement under different mixed function models

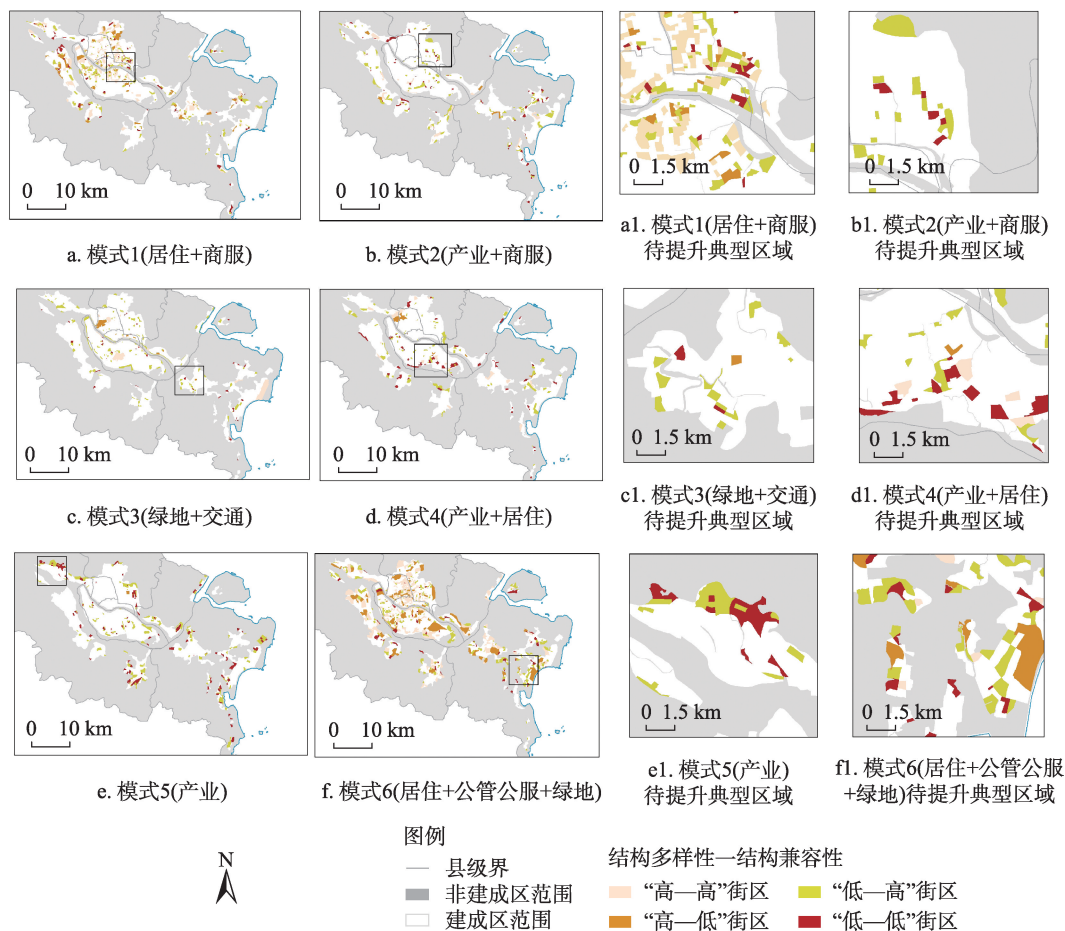


图13 街区尺度下的福州市建成区土地混合利用空间格局

Fig. 13 Spatial pattern of mixed land use in built-up areas of Fuzhou city at the block scale

零星分布在建成区各地，因此需主要对以上两类街区进行调整。如图13a1所示的典型区域，其内部分布的主要为以商住功能为主的街区，缺乏其他辅助功能类型，而“低—低”街区则是由于存在公司企业与商住混合而导致的兼容性下降，可后续增加其他对环境影响较小的功能布局，并调整工厂企业布局，以缓解用地冲突与增加街区活力。

(2) 模式2（产业+商服）与模式4（产业+居住）

该两类模式处于各类混合功能模式的中等混合水平，且街区总数较少，其中“低—高”与“低—低”街区数量占比超过80%以上，主要分布在福州市建成区的四周与边缘地区，即城市边缘功能较为杂乱的区域。如图13b1与图13d1所示的待提升典型区域，位于福州市中心城区东部的产业主导区域附近，对于该类区域，未来可将其中较为零散的产业类地块进行搬迁整合，增加街区内必要的公用设施，使得街区混合功能在保证多样性与兼容性的基础上走向秩序化与规整化。

(3) 模式3（绿地+交通）

该类模式下各个街区的土地混合利用水平与模式2、模式4相似，具有较多的多样性不足的街区，这是由于该类模式大多数街区地块为公园绿地与城市滨水休闲带，功能较为单一，因此其结构兼容性较高，而多样性较低。该类街区可继续维持以绿地功能为核

心,作为城市必不可少的生态空间,发挥其生态游憩休闲价值。而对于图 13c1 中的街区,位于长乐区吴航组团外围,靠近交通设施的滨水街区,未来可结合上位规划要求,可适当引导其向以公共交通为主导(TOD)或滨水绿地为主题的街区发展。

(4) 模式5(产业)

该区域内结构多样性与兼容性均为各类混合功能模式中的最低水平,主要为“低—高”街区与“低—低”街区两类,大部分街区功能结构较为单一,存在多样性不足、兼容性冲突等问题。以包括图 13e1 中的街区在内的福州市东中西三大工业集中区,闽侯县经济开发区、福兴经济开发区、长乐经济开发区为例,该部分区域内,分布着大量制造业企业、工业园等,包括纺织、冶金、建材等产业,对周边环境质量的影响较大,各地类相互作用引发了环境污染等一系列负外部效应。因此,需进一步盘活区域各功能要素重新流动配置,围绕以产业功能为核心,对其他次要功能进行一定取舍,迁出与产业功能冲突较大的功能布局。

(5) 模式6(居住+公管公服+绿地)

该模式的结构多样性和兼容性均处于较高水平,大量分布于中心城区,属于福州市设施齐全且功能协调的成熟街区,分布着福州市主要政府机构、教育科研用地、居住用地以及绿地等。但在长乐滨海新城地区(图 13f1)存在个别街区结构多样性处于较低水平,主要为单一商服或居住功能区域,也有大片多样性较高而兼容性较低的街区,这是由于该街区内分布着对兼容性影响较大的工厂企业,并与该街区内的住宅区产生了兼容性冲突,因此可对其进行用地类型的调整,当前长乐区发展正在新兴崛起阶段,未来可继续引入办公、生态绿化、交通站点等空间布局,推动各类功能空间融合及综合利用,保证结构多样性与兼容协同提升。

总体而言,针对当前福州市社会经济高速增长、城市土地利用亟需增量提质的发展背景,对不同混合功能模式区域实施针对性的混合利用提升措施是具有一定必要性的。基于不同混合功能模式土地利用特点,迁出或者调入必要的区域功能,协调区域内部各地类相互作用引发的污染等负外部效应,推行环境友好型的用地“增量”开发,避免因兼容性差从而降低人居环境质量等问题,以更好地提升城市土地混合利用质量水平,从而为建立符合不同区域需求的土地混合利用空间差异化治理机制提供支撑。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以福州市建成区内融合“功能—结构”双维度的土地混合利用研究为主要内容,结合自然语言处理技术(BERT模型),构建一种顾及城市混合功能语义的混合模式提取方法(MixedFunc2Vec),提取宏观尺度的城市土地混合功能模式,度量微观尺度街区土地利用结构多样性与结构兼容性,揭示了福州市建成区内土地混合利用空间分布特征,实现城市建成区双维度土地混合利用信息挖掘,并基于以上结果,对福州市建成区各类混合功能模式区域提出了相应的调整建议。具体研究结论如下:

(1) 基于BERT模型的语义信息挖掘与动态变化优势,本文构建的MixedFunc2Vec方法解决了传统城市功能语义提取中存在的“一词多义”问题,能够捕捉城市混合功能环境中更加丰富的量化信息。依据POI高维混合功能语义信息,福州市建成区各街区的混合功能模式可划分为六大类:模式1(居住+商服)、模式2(产业+商服)、模式3(绿

地+交通)、模式4(产业+居住)、模式5(产业)与模式6(居住+城管公服+绿地)。通过不同混合区域之间的语义信息对比,可知不同混合功能模式的语义空间异质性明显,住宅类街区倾向于与公司企业、城管公服混合布局,而商服则以主导或辅助功能的形式存在于城市的大部分混合功能布局中。

(2) 福州市建成区内土地混合利用结构多样性总体呈现较高水平。从空间分布上看,区域内呈现显著的空间正自相关性,呈现多地多中心集聚式发展态势。不同土地混合功能模式的区域,其平均结构多样性存在显著差异,模式6(居住+城管公服+绿地)内部土地利用结构多样性最为丰富,而以各类产业为主导的模式5,其区域内分布有大量产业园区,园区内功能单一,处于最低的多样性水平。

(3) 在结构兼容性方面,建成区内兼容性指数达到0.7以上的街区约有1803个。模式1(居住+商服)与模式6(居住+城管公服+绿地)处于较高的兼容性水平,其平均兼容性指数均为0.8525,其余混合功能模式的平均兼容性水平则均处于0.7~0.8之间,模式5(产业)的兼容性水平最低,为0.7566。综合各类模式的土地利用兼容性测度结果来看,以产业功能为主导的区域及其周边区域,其混合兼容性水平仍有提升空间。

(4) 综合结构多样性与兼容性的测度结果,将福州市建成区内各街区土地混合利用水平进行定量划分,得到“高一高”街区651个,“高一低”街区176个,“低一高”街区920个,“低一低”街区386个,并进一步结合提取得到的各类混合功能模式,得到每类模式街区尺度下的土地混合利用空间格局。最后,联系福州实际,分析每类模式不同的土地混合利用空间布局情况,并提出面向空间治理的区域功能调整建议,以期能够为建立符合不同区域需求的城市土地混合利用空间差异化治理机制提供支撑。

3.2 讨论

本文的MixedFunc2Vec方法通过采用POI这类实时更新的地理空间大数据,将POI数据映射到高维向量空间,从向量视角解读城市混合区域的功能语义,使得同一种功能类型在不同的城市混合功能环境中可代表不同的内涵,实现功能语义动态变化,为城市土地混合功能模式挖掘提供了新方法。同时,本文除了考虑传统的结构多样性测度之外,增加了对城市用地关系维度的考量,即对结构兼容性的测度,实现了更加全面的城市土地混合利用空间测度,是对现有土地混合利用理论与方法体系的进一步丰富和完善。在对城市进行空间监测与空间治理方面,与传统土地混合利用研究方法相比,本文方法数据获取便捷,时效性强,且成本费用低,能够高效理解城市的复杂功能配置与空间结构,可助力城市规划者实现城市土地混合利用变化趋势的动态监测,及时评估区域在规划、建设后的区域混合功能与结构性变化,从街区尺度辅助实现更具有空间指向性的土地混合利用区域调整策略,可为推进城市国土空间合理布局与区域协调发展提供参考,辅助空间治理决策。

本文构建的融合“功能—结构”双维度的土地混合利用研究框架,是基于POI类型与土地利用类型的对应关系,并考虑POI的占地面积进行的一次研究探索,但本文仅将POI一级类与占地面积进行对应,在进行混合测度时,各个地类的占比可能存在一定误差,且得到的研究结果主要是针对空间水平方向,而对空间垂直方向上的土地混合利用分布仍旧缺乏探讨。此外,在国土空间治理中推行土地混合利用理念,但土地混合利用的上限仍需一定的量化指标。因此,本文后续仍可向以下几个方向进行改进:(1)可结合城市建筑矢量数据及其他多源地理数据,进一步考量城市中土地混合利用的垂直分

布; (2) 可进一步细化POI二级类、三级类与占地面积之间的对应关系, 以减少利用POI数据计算土地利用混合度时的误差; (3) 还可对土地混合利用多样性和兼容性的合理取值区间进行探讨, 从而为继续完善城市土地混合利用研究、推进国土空间治理与优化提供理论依据和科学支撑。

参考文献(References):

- [1] ZHAO M X, XU G F, JONG M, et al. Examining the density and diversity of human activity in the built environment: The case of the Pearl River Delta, China. *Sustainability*, 2020, 12(9): 3700, Doi: 10.3390/su12093700.
- [2] 秦萧, 甄峰. 基于要素流动的城镇建设用地配置方法框架探讨. *自然资源学报*, 2022, 37(11): 2774-2788. [QIN X, ZHEN F. Discussion on urban construction land allocation based on element flow. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(11): 2774-2788.]
- [3] 刘润佳, 把多勋. 中国省会城市紧凑度与城镇化水平关系. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 586-600. [LIU R J, BA D X. The relationship between urban compactness and urbanization level in capital cities of China. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 586-600.]
- [4] 郑红玉, 黄建洪, 卓跃飞, 等. 土地混合利用测度研究进展. *中国土地科学*, 2019, 33(3): 95-104. [ZHENG H Y, HUANG J H, ZHUO Y F, et al. Research progress on the measurement of mixed land use. *China Land Science*, 2019, 33(3): 95-104.]
- [5] YUAN J, ZHENG Y, XIE X. Discovering regions of different functions in a city using human mobility and POIs. In: YANG Q, AGARWAL D, PEI J. *Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York: Association for Computing Machinery, 2012: 186-194.
- [6] 韩昊英, 于翔, 龙瀛. 基于北京公交刷卡数据和兴趣点的功能区识别. *城市规划*, 2016, 40(6): 52-60. [HAN H Y, YU X, LONG Y. Identifying urban functional zones using bus smart card data and points of interest in Beijing. *City Planning Review*, 2016, 40(6): 52-60.]
- [7] 陈世莉, 陶海燕, 李旭亮, 等. 基于潜在语义信息的城市功能区识别: 广州市浮动车GPS时空数据挖掘. *地理学报*, 2016, 71(3): 471-483. [CHEN S L, TAO H Y, LI X L, et al. Discovering urban functional regions using latent semantic information: Spatiotemporal data mining of floating cars GPS data of Guangzhou. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 471-483.]
- [8] ZHANG J B, LI X, YAO Y, et al. The Traj2Vec model to quantify residents' spatial trajectories and estimate the proportions of urban land-use types. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021, 35(1): 193-211.
- [9] 刘菁菁, 刘雨思, 伊迪升, 等. 北京市四环内街区尺度下的主题混合模式挖掘. *地球信息科学学报*, 2020, 22(6): 1370-1382. [LIU J J, LIU Y S, YI D S, et al. Extracting mixed topic patterns within downtown Beijing at the block level. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(6): 1370-1382.]
- [10] YAO Y, LI X, LIU X P, et al. Sensing spatial distribution of urban land use by integrating points-of-interest and Google Word2Vec model. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(4): 825-848.
- [11] MERCADO R, PAEZ A. Determinants of distance traveled with a focus on the elderly: A multilevel analysis in the Hamilton CMA, Canada. *Journal of Transport Geography*, 2009, 17(1): 65-76.
- [12] COMER D, GREENE J S. The development and application of a land use diversity index for Oklahoma city, OK. *Applied Geography*, 2015, 60: 46-57.
- [13] 张佰林, 钱家乘, 蔡为民. 论农村居民点用地混合利用的研究框架. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 2929-2941. [ZHANG B L, QIAN J C, CAI W M. Discussion on mixed use of rural residential land research framework. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(12): 2929-2941.]
- [14] 师浩辰, 赵渺希, 陈佩谦. 土地混合使用视角下的地块间兼容度测度: 以湖南省湘潭市市辖区为例. *热带地理*, 2021, 41(4): 746-759. [SHI H C, ZHAO M X, CHEN P Q. Measuring the functional compatibility of land from the perspective of land-use mix: A case study of Xiangtan. *Tropical Geography*, 2021, 41(4): 746-759.]
- [15] 张佰林, 王昭颖, 朱敏杰. 农村居民点用地混合利用特征及驱动力. *农业工程学报*, 2022, 38(3): 267-275. [ZHANG B L, WANG Z Y, ZHU M J. Characteristics and driving forces of the mixed use of rural settlement land. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(3): 267-275.]

- [16] 周德, 钟文钰, 周婷, 等. 基于POI数据的城市土地混合利用评价及影响因素分析: 以杭州市主城区为例. 中国土地科学, 2021, 35(8): 96-106. [ZHOU D, ZHONG W Y, ZHOU T, et al. Assessment on urban mixed land use and analysis of its influencing factors based on poi data: A case of the main districts of Hangzhou city. China Land Science, 2021, 35(8): 96-106.]
- [17] 李建春, 起晓星, 袁文华. 基于POI数据的建设用地多功能混合利用空间分异研究. 地理科学进展, 2022, 41(2): 239-250. [LI J C, QI X X, YUAN W H. Spatial differentiation of multi-functional mixed use of construction land based on points of interest. Progress in Geography, 2022, 41(2): 239-250.]
- [18] 张扬, 郑凤娇, 刘艳芳, 等. 基于POI与不透水表面指数的城市建成区提取. 地理科学, 2022, 42(3): 506-514. [ZHANG Y, ZHENG F J, LIU Y F, et al. Extracting urban built-up area based on impervious surface area and POI data. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(3): 506-514.]
- [19] 郑洪哈, 桂志鹏, 栗法, 等. 夜间灯光数据和兴趣点数据结合的建成区提取方法. 地理与地理信息科学, 2019, 35(2): 25-32. [ZHENG H H, GUI Z P, LI F, et al. Extraction method of built-up area by combining night light data and interest point data. Geography and Geo-Information Science, 2019, 35(2): 25-32.]
- [20] CAI J, HUANG B, SONG Y. Using multi-source geospatial big data to identify the structure of polycentric cities. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 210-221.
- [21] 曹芳洁, 邱芸, 邹艳. 基于H/T断裂法与POI数据的建成区快速提取方法. 地理与地理信息科学, 2020, 36(6): 48-54. [CAO F J, QIU Y, ZOU Y. A fast extraction method of built-up area based on H/T breaks method and POI data. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(6): 48-54.]
- [22] 王方民, 骆畅, 杨朝现, 等. 基于兴趣点密度与城市扩张曲线的城市建成区边界识别. 西南大学学报: 自然科学版, 2021, 43(12): 115-126. [WANG F M, LUO C, YANG C X, et al. Identifying the boundary of urban built-up area based on density of POI and urban expansion curve. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2021, 43(12): 115-126.]
- [23] 厉飞, 闫庆武, 邹雅婧, 等. 利用夜间灯光POI的城市建成区提取精度研究: 以珞珈一号01星和NPP/VIIRS夜间灯光影像为例. 武汉大学学报: 信息科学版, 2021, 46(6): 825-835. [LI F, YAN Q W, ZOU Y J, et al. Extraction accuracy of urban built-up area based on nighttime light data and POI: A case study of Luojia 1-01 and NPP/VIIRS nighttime light images. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(6): 825-835.]
- [24] 许泽宁, 高晓路. 基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法. 地理学报, 2016, 71(6): 928-939. [XU Z N, GAO X L. A novel method for identifying the boundary of urban built-up areas with POI data. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(6): 928-939.]
- [25] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In: BURSTEIN J, DORAN C, SOLORIO T. Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1. Minneapolis: Association for Computational Linguistics, 2018: 4171-4186.
- [26] 张春雷. 基于嵌入表示的知识图谱实体对齐研究. 长春: 吉林大学, 2022. [ZHANG C L. Study on embedding-based entity alignment for knowledge graphs. Changchun: Jilin University, 2022.]
- [27] ZHAI W, BAI X Y, SHI Y, et al. Beyond Word2vec: An approach for urban functional region extraction and identification by combining Place2vec and POIs. Computers Environment and Urban Systems, 2019, 74(3): 1-12.
- [28] 曹根榕, 顾朝林, 张乔扬. 基于POI数据的中心城区“三生空间”识别及格局分析: 以上海市中心城区为例. 城市规划学刊, 2019, (2): 44-53. [CAO G R, GU C L, ZHANG Q Y. Recognition of "ecological space, living space, and production space" in the urban central area based on POI data: The case of Shanghai. Urban Planning Forum, 2019, (2): 44-53.]
- [29] HILL M O. Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. Ecology, 1973, 54: 427-431.
- [30] ZHUO Y F, ZHENG H Y, WU C F, et al. Compatibility mix degree index: A novel measure to characterize urban land use mix pattern. Computers, Environment and Urban Systems, 2019, 75: 49-60.

A study on the function and structure of mixed land use in urban built-up areas from the perspective of spatial governance

WANG Kai-jia^{1,2,3}, XU Wei-ming^{1,2,3}, LI Chu-yu^{1,2,3}, SHAO Er-hui^{1,2,3}, YANG Hui^{1,2,3}

(1. The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

3. National Engineering Research Centre of Geospatial Information Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Mixed land use in urban built-up areas is important for promoting intensive use of urban land and improving the level of land spatial governance. This paper takes seven districts and counties in Fuzhou as the study area and uses multi-source data to extract the built-up area of this city. Based on POI data and natural language processing technology (BERT model), a mixed pattern extraction method (MixedFunc2Vec) that takes into account the semantics of urban mixed functions is constructed at the block scale, and the study of mixed land use in urban built-up areas is carried out from two dimensions of mixed functions and structures of land use. The results show that: (1) MixedFunc2Vec method solves the problem of "multiple meanings of words" in traditional city function semantic extraction, captures richer semantic information of POI, and extracts six types of mixed function patterns. (2) In the built-up area of Fuzhou, mode 6 (residential + public services + green space) has the richest land use structural diversity, while mode 5, which is dominated by various industries, is at the lowest diversity level and shows a cluster development trend of multi-location and multi-center. (3) In terms of structural compatibility, there are about 1803 blocks in the built-up area with a compatibility index of 0.7 or more. The average compatibility index of mode 1 (residential + commercial services) and mode 6 (residential + public services + green space) are both 0.8525, except for the industrial function-oriented areas and their surrounding areas, which still have room for improvement. (4) Based on the measurement results of structural diversity and compatibility, the blocks in the built-up area of Fuzhou can be divided into four types, including high-high, high-low, low-high, and low-low patterns, and suggestions are made to adjust the blocks based on different mixed functional patterns. This study can provide some scientific basis for enriching the existing theoretical and methodological system of mixed land use, urban spatial pattern optimization and territorial spatial planning policy formulation.

Keywords: POI; urban built-up area; mixed land use; BERT model; Fuzhou city