

DOI: 10.5846/stxb201810232296

岳文泽, 章佳民, 刘勇, 张玮. 多源空间数据整合视角下的城市开发强度研究. 生态学报, 2019, 39(21): - .

Yue W Z, Zhang J M, Liu Y, Zhang W. Measuring urban development intensity based on the integration of multi-source spatial data. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

多源空间数据整合视角下的城市开发强度研究

岳文泽¹, 章佳民¹, 刘 勇^{2,*}, 张 玮³

1 浙江大学土地管理系, 杭州 310058

2 重庆大学建设管理与房地产学院, 重庆 400045

3 上海市地质调查研究院土地利用规划所, 上海 200072

摘要: 城市开发强度能直观表征人类活动强度, 对指导城市规划与管理、促进城市可持续发展具有重要价值。本文采用社会-经济-生态系统耦合视角构建城市开发强度的多维测度体系, 整合多源空间数据, 测度了杭州市主城及三个副城的开发强度并揭示了其空间分布特征。结果表明, 杭州城市开发强度由主城向副城呈波动降低, 高强度开发过度集中于主城, 主城的疏散有待加强; 各副城开发强度不一, 江南城与主城呈现跨江融合, 临平城、下沙城空间上较为独立; 各开发维度中, 建筑强度、功能强度及效益强度热点区分布基本一致, 环境响应高强度区则集聚于主副城交界处, 表现出空间异质性。多维测度体系可较好表征城市开发强度, 对城市规划及精细化管理具有一定的应用价值。

关键词: 城市开发强度; 熵权 TOPSIS 模型; 多维测度; 空间分析; 杭州市

Measuring urban development intensity based on the integration of multi-source spatial data

YUE Wenze¹, ZHANG Jiamin¹, LIU Yong^{2,*}, ZHANG Wei³

1 Department of Land management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2 School of Construction Management and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China

3 Land Planning Department, Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China

Abstract: Urban development intensity can directly indicate human activities intensity, which provides valuable information on instructing urban planning and sustainable development. This paper developed a multidimensional measuring system of urban development intensity from a perspective of social, economic, and ecological coupling system. The urban development intensity of the center and three sub-centers in Hangzhou was measured to uncover the spatial characteristics based on the integration of multi-source spatial data. Results indicated that the urban development intensity in Hangzhou declined from the center to the sub-centers. The high intensity development was mainly occurred in the city center, which implied that evacuation function needs to be further enhanced in the main center. Moreover, the development intensity of each sub-center in was different. Jiangnan sub-center and the center represented a cross-river integration, while Linping sub-center and Xiasha sub-center were spatially independent. The hotspot distribution of building intensity, intensity and output intensity were consistent, while the area with high environmental responding intensity was concentrated in the boundary between the center and the sub-centers, which exhibited spatial heterogeneity. The developed multidimensional measuring system by integrating multi-source spatial data has a great potential for characterizing urban development intensity, which is valuable for improving urban planning and management in a detailed manner.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671533, 41771534, 41871169, 51508513); 中央高校基本业务费资助

收稿日期: 2018-10-23; **修订日期:** 2019-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyong80@cqu.edu.cn

Key Words: urban development intensity; entropy weight-TOPSIS model; multidimensional measurement; spatial analysis; Hangzhou City

2015 年联合国发展峰会将可持续城市正式列为 17 个未来发展目标之一,足以窥见城市可持续发展问题的全球性与紧迫性。20 世纪 90 年代分税制改革后,在土地财政的背景下,各个城市都大力推动卫星城、大学城及工业园区的规模扩张^[1-3],导致城市发展陷入一个矛盾困境:一方面城市用地迅速扩张占用大量耕地,全国耕地面积不断减少,2011 年以来已降低近 350 万公顷,逼近耕地保护红线^[4];另一方面城市建设用地缺乏科学规划和有效管理,2016 年人均城镇建设用地上为 149 m²,远超国家标准上限,存量建设用地也存在利用粗放、低效等问题^[5]。城市用地扩张侵占耕地与存量用地低效利用的矛盾已成为制约城市可持续发展的瓶颈^[6]。在城镇化快速推进的背景下,城市土地的刚性需求十分旺盛^[7],能否扭转这一困境是关乎我国城市可持续发展的关键问题。城市开发强度是可持续发展的核心指标之一,是社会、经济、文化、生态多要素构成的耦合指标。科学准确地理解以及定量测度城市开发强度,是认清城市空间利用效率、实现可持续发展战略的重要前提^[8]。

当前,学术界对城市开发强度的研究,主要集中于概念内涵界定、评价方法构建及指标选择等方面。部分学者从投入产出视角探讨城市开发强度的内涵。例如,Turner^[9]和 Brookfield^[10]强调城市开发的产出强度和土地资本、劳动力及技术的投入强度;Erb 等人^[11]进而将城市开发强度归纳为投入强度、产出强度和系统属性变化等三个维度。部分学者从景观系统的角度出发,将城市开发强度定义为满足人类生存和发展的需要而对城市生态系统的干扰程度,体现为城市土地利用/覆被变化及其生态环境变化^[12-13]。城市开发强度的测度方法由单因素评价向多因素综合测度转变。单因素评价仅反映了城市开发某一方面而非全部内涵,因此多因素评价逐渐成为主流测度方法。不同学者采用了不同的多因素评价模型,例如层次分析法、熵权法的线性加权模型^[14-15],主成分分析模型^[16]以及等级赋值模型^[17]等。其中,线性加权模型较好地反映评价对象的差异性,应用最为广泛。近年来,也有学者采用基于数据挖掘的聚类分析、BP 人工神经网络和模糊综合法等方法^[18-20]。此类方法关注指标数值间的相关关系,忽视了概念本身的内涵,且计算过程相对繁琐,应用难度较大。不同学者根据其内涵界定选择了不同的评价指标,建筑密度、容积率^[21]、交通密度、人口密度^[22]等社会经济指标成为核心评价指标。目前还缺乏将不同维度综合起来的逻辑框架,尚未厘清不同维度指标之间的逻辑关系,从而影响了测度结果的可信度。

对城市开发强度的实证研究多以统计数据为基础,评价单元以区县等行政单元为主,在数据精度上有很大的限制,无法展现城市内部差异性特征,而对于城市规划管理来说,直观地识别出街区或地块等更精细尺度的城市开发低效闲置区,具有重要的实践价值。最近,一些学者尝试以街区、宗地等尺度^[23-24]评估城市开发强度,但受数据的限制,多以人口密度、经济密度等简单维度来表征开发强度,未能充分阐述开发强度多层次的丰富内涵。多源大数据的出现,为城市开发强度研究提供了新的思路与方法,其中通过观测仪器、各类传感器、网络交易、自媒体、视频等数据源产生的海量大数据呈指数级增长,为城市开发强度的精细化研究提供了可能,满足了城市规划及管理的现实需求^[25]。

因此,本文充分发挥多源空间数据的精细尺度优势,从多个维度探析城市开发强度的内涵,构建城市开发强度多维测度的逻辑框架,并以杭州市为例进行实证研究,参考《城市居住区规划设计规范(GB50180-93)》对居住区最小等级(居住组团)规模控制在 1000—3000 人的标准^[26],以评价尺度与居住组团人口规模相适应的原则,在 250 × 250 m 网格尺度上,定量测度了城市开发强度并探讨了其空间分布规律及结构性特征。

1 研究方法

1.1 城市开发强度的多维内涵

城市开发是城镇化过程中人类活动与土地系统交互的复杂过程,不仅是人类经济社会活动对土地的单方

面开发与利用过程,还包含社会-经济-生态环境等多系统耦合的动态过程^[27]。土地是人类生存和发展的基础,是城市开发过程中一切人类活动的基本载体,人类在土地承载下通过建造房屋、发展产业等活动来满足基本的生产生活需要,一方面工业、商业等经济活动为人类发展提供必需的保障与财富;另一方面随着城市建设用地范围和人类活动强度的增加,不断向自然系统施加影响、干扰和胁迫,促使环境要素发生改变,功能发生退化,催生各种生态环境问题。反过来,生态系统的承载能力约束着人口、经济的规模,生态环境的变化进一步作用于人类开发活动,限制着开发建设规模与强度,制约着人类开发活动的效率。

城市开发的完整过程可以理解以城镇化发展为目标,在人-地交互系统中经过人类社会开发建设等利用活动,一方面实现经济效益的产出,另一方面转化为环境要素的变化。由此可以将城市开发分解为三个主要过程,即开发利用、经济产出与环境响应。其中,开发利用过程是人类利用行为的综合反映,是城市开发的施力阶段,城市系统中具体可以体现为在土地上的居住、商业、工业等人类开发活动;经济产出和环境响应是城市开发的受力转化阶段,经济产出是生产活动所转化的经济价值,而环境响应则是人类活动行为所产生的外部环境效应。由此,城市开发强度内涵可理解为城市区域范围内所构成的人-地交互系统中,开发利用、经济产出和环境响应等多个过程综合强度的大小(图1)。

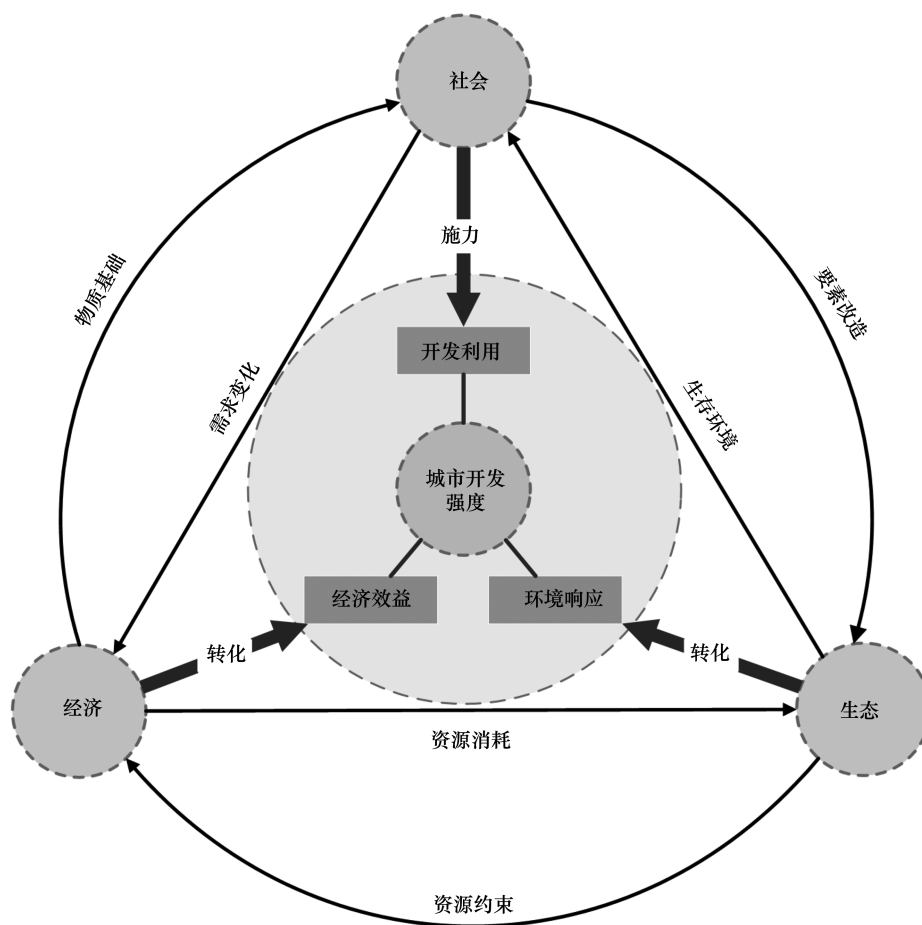


图1 城市开发强度内涵多维体系表达的逻辑框架

Fig.1 The logic framework of urban development intensity based on the multidimensional recognition

1.2 城市开发强度的测度体系

根据图1的逻辑框架,本文建立一个“多维度-多层次-多源数据”的城市开发强度的测度体系(图2)。其中包含了建筑、功能、效益和环境响应4个维度,维度层、指标层、方法层与数据层4个层次,以及网络大数据、自媒体数据、统计数据、监测数据、遥感数据等多源数据。

首先,依据城市开发强度的多维内涵,结合城市系统的特点,将其划分为建筑强度、功能强度、效益强度和环境响应强度等4个维度。建筑强度与功能强度反映城市开发施力阶段的开发利用过程,其中建筑强度是人类开发活动最直观的体现,通过建造建筑物或构造物,承载了各类城市活动,可选取建筑容积率和建筑密度2个指标;功能强度主要衡量城市承载的居住、商业、工业及公共服务等多项功能,可选取住宅密度、商户密度、企业密度和公共服务密度4个指标。效益强度和环境响应强度则分别反映城市开发受力转化阶段的经济价值与外部环境效应,其中效益强度体现的是城市开发带来的经济产出强度,主要侧重于非农产业产出,可选择二产产值和三产产值2个指标;环境响应强度是环境对人类活动行为的响应与反馈,从侧面体现出城市开发强度,考虑到城市热岛效应和大气污染的典型性和代表性,可选用地表温度和空气质量2个指标。

其次,建筑容积率与建筑密度指标均可通过建筑轮廓与高度数据计算得到,在拓扑检查修正的基础上,建筑容积率为评价单元内的总建筑面积与土地面积的比值,建筑密度为评价单元内的建筑基底面积与土地面积的比值;功能强度指标测算以城市POI数据为基础,利用不同POI类型点数据的集聚程度来反映不同功能的分布特征,住宅密度、商户密度、企业密度和公共服务密度分别采用相应的住宅小区、商店店面、公司企业和公共服务设施POI的核密度表征;效益强度指标则利用传统的经济统计数据与夜间灯光数据的高相关性,构建空间网格化模型,计算各评价单元的效益强度指标,本文将浙江省90个县(区)级行政单元作为样本,将县(区)级平均灯光强度分别与二产产值、三产产值进行回归模拟,经多种回归模型比较,幂函数的拟合效果最好,拟合优度分别达到了0.651和0.709,因此利用幂函数计算网格级评价单元的二产产值、三产产值拟合值,最后采用误差系数修正的方法进行修正,得到实际指标值;环境响应强度指标均经过遥感数据反演得到,其中地表温度利用Landsat 8遥感影像进行大气校正法反演得到,空气质量则由利用MODIS L1B数据进行暗像元法反演得到的气溶胶光学厚度表示。为保证研究时间与空间尺度的一致性,所有数据均选择2015年作为时间截点;空间尺度统一到250 m的正方形评价网格单元。

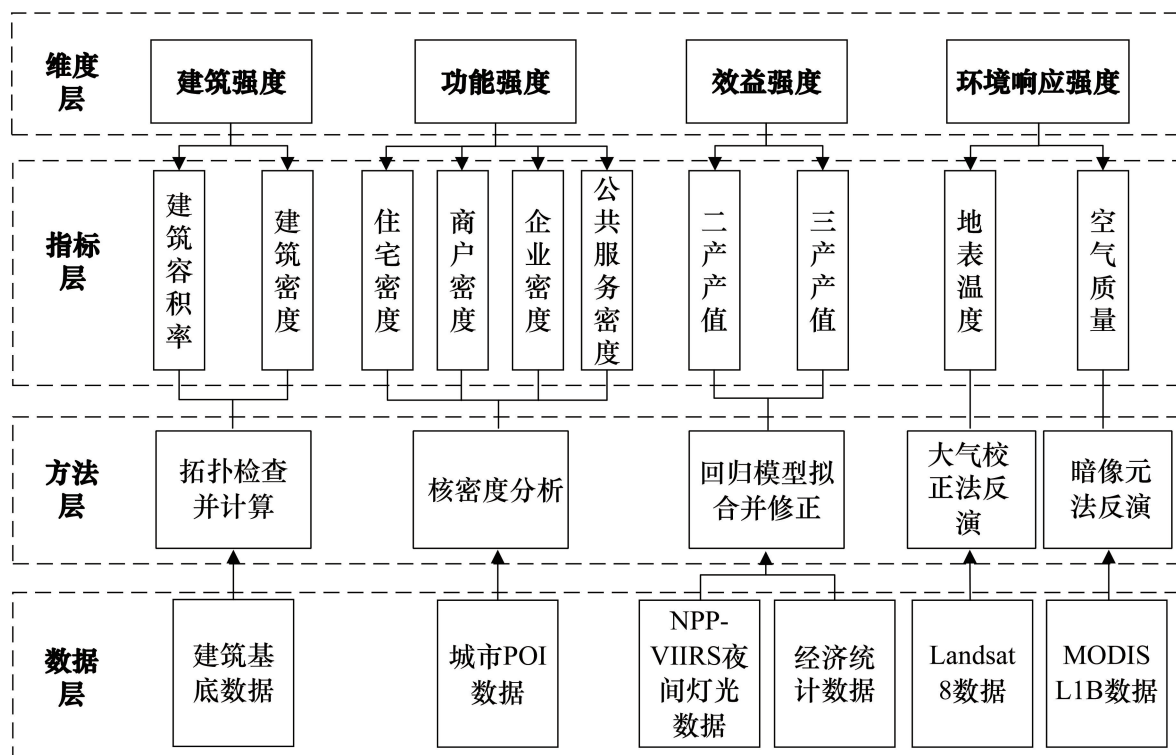


图2 多维度-多层次-多源的城市开发强度测度体系

Fig.2 Multi-dimensional, multi-layer and multi-source measure system of urban development intensity

1.3 基于熵权 TPOIS 模型的综合测度

TOPSIS 模型最初由 Hwang 和 Yoon 在 1981 年提出,用于多目标的决策分析过程,近年来,其应用范围不断扩大,除传统的决策评价外,在经济风险决策、经济效率测评和生态安全评价^[28-29]等多个领域也得到了广泛的应用。其基本原理是通过比较各评价对象与最优及最劣值的接近程度,依次对评价对象进行排序,确定评价对象的优劣,其优点在于从不同的维度出发,综合反映评价对象与各维度最优值的差距。熵权 TOPSIS 模型则是对传统 TOPSIS 模型的改进,通过熵权法赋予各指标不同的权重,客观反映不同指标的重要程度^[30]。熵权法属于客观赋权法,根据各指标的变异水平来确定其权重,指标的变异水平越大,其权重越大,对非正态数据来说,能够有效反映数据隐含的信息,从而提高指标的辨识度,以避免因选取指标的相近性而造成评价结果的等级差距过小。

基于熵权 TOPSIS 模型的城市开发强度测度过程具体如下:

(1) 利用极差标准化法进行无量纲化:

$$X_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{i,j}}{\max_{1 \leq i \leq n} x_{i,j} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{i,j}} \quad (1)$$

式中, $X_{i,j}$ 为标准化后第 i 个研究单元第 j 项指标值, n 为评价单元的个数, $x_{i,j}$ 为第 i 个研究单元第 j 项指标值。

(2) 计算信息熵:

$$EI_j = - \frac{\sum_{i=1}^n P_{i,j} \ln P_{i,j}}{\ln n}, \text{ 其中 } P_{i,j} = \frac{X_{i,j}}{\sum_{i=1}^n X_{i,j}} \quad (2)$$

式中, EI_j 为第 j 项指标的信息熵。

(3) 确定指标权重:

$$W_j = \frac{1 - EI_j}{m - \sum_{j=1}^m EI_j} \quad (3)$$

式中, W_j 为第 j 项指标的权重, m 为评价指标的个数。

(4) 计算指标加权结果:

$$C_{i,j} = W_j \times X_{i,j} \quad (4)$$

式中, $C_{i,j}$ 为第 i 个评价单元第 j 项指标加权值。

(5) 确定各指标的最优解和最劣解:

$$\begin{aligned} V_j^+ &= \max(C_{1,j}, C_{2,j}, \dots, C_{n,j}) \\ V_j^- &= \min(C_{1,j}, C_{2,j}, \dots, C_{n,j}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, V_j^+ 和 V_j^- 分别为第 j 项指标的最优解和最劣解。

(6) 计算评价单元与最优解、最劣解的距离:

$$\begin{aligned} EU_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_j^+ - X_{i,j})^2} \\ EU_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{i,j} - V_j^-)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, EU_i^+ 为第 i 个评价单元与最优解的距离, EU_i^- 为第 i 个评价单元与最劣解的距离。

(7) 计算综合强度:

$$LUI_i = \frac{EU_i^-}{EU_i^+ + EU_i^-} \quad (7)$$

式中, LUI_i 分别为第 i 个评价单元的城市开发强度综合指数。

1.4 空间分布格局的规律分析

为进一步分析杭州市城市开发强度的空间分布特征,在测算结果的基础上,首先利用 ArcGIS 10.4 软件中的 3D 分析工具分别构建主城和三个副城方向的开发强度剖面图,刻画 4 个维度与综合开发强度在三个方向上的剖面分布特征,探究主城与副城间城市开发的差异起伏。其次利用空间自相关分析探究杭州市整体和区域上开发强度不同维度下的空间集聚性,其中全局自相关分析用于研究区域整体的空间集聚特征,采用全局 Moran 指数(公式 8)和全局 G 系数(公式 9),局部自相关分析用于分析某一研究单元与其邻近单元的相似程度,采用热点分析 (Getis-Ord G_i^*) (公式 10)。

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j} \quad (9)$$

$$G^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - \bar{x}^2} \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (10)$$

式中, x_i 和 x_j 分别为评价单元 i 和 j 的指标值, n 为评价单元的个数, $\bar{x}$ 为指标平均值, w_{ij} 为空间权重矩阵。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区域

杭州市地处浙江省北部,位于长江三角洲南翼、杭州湾西岸、钱塘江下游,是浙江省的省会以及政治、经济、文化、金融和科教中心,同时也是长三角城市群南翼中心城市。依据 2016 年修订的《杭州市城市总体规划(2001—2020 年)》,杭州市的空间发展布局为“一主三副六组团六条生态带”,从原有的以西湖周边地区为核心区的单核式结构向以钱塘江为轴线的多中心结构发展,本文以当前杭州市建成区分布为基础,将杭州市“一主三副”的城区范围作为研究区域(图 3),即包含主城、江南城、下沙城和临平城等三个副城。

2.2 数据来源

研究数据以百度地图的建筑基底数据、城市 POI(兴趣点)数据、夜间灯光数据、Landsat 8 遥感数据以及 MODIS L1B 产品数据等多源大数据为基础,并辅以传统的行政边界矢量数据和经济统计数据。其中建筑基底数据采集自百度地图(<https://map.baidu.com/>) 矢量瓦片中的三维建筑物图层,包含了建筑物的坐标、轮廓和高度等信息;城市 POI 数据则是基于百度地图的 API 接口获取的电子地图中用户感兴趣的点数据,总共包含住宅小区、公司企业、商业大厦、宾馆酒店、餐饮服务和金融服务等 30 类 POI;夜间灯光数据为 NPP/VIIIRS 新型夜灯数据,为 2015 年全年辐射值的合成产品,其空间分辨率约为 483.33 米,同时已清除及过滤掉火灾和其他短暂灯光等异常值;Landsat 8 遥感数据下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),其空间分辨率为 30 m,成像时间为 2015 年 10 月 13 日;MODIS L1B 产品数据由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布,其空间分辨率为 1000 m,包含热红外、辐射率以及反射率数据,并含有经纬度、太阳与传感器的天顶角和方位角等信息;行政边界矢量数据由国家基础地理信息中心的 1:100 万全国基础地理数据库提取获得;经济统计数据主要来源于 2015 年的《浙江统计年鉴》以及浙江省杭州市的统计

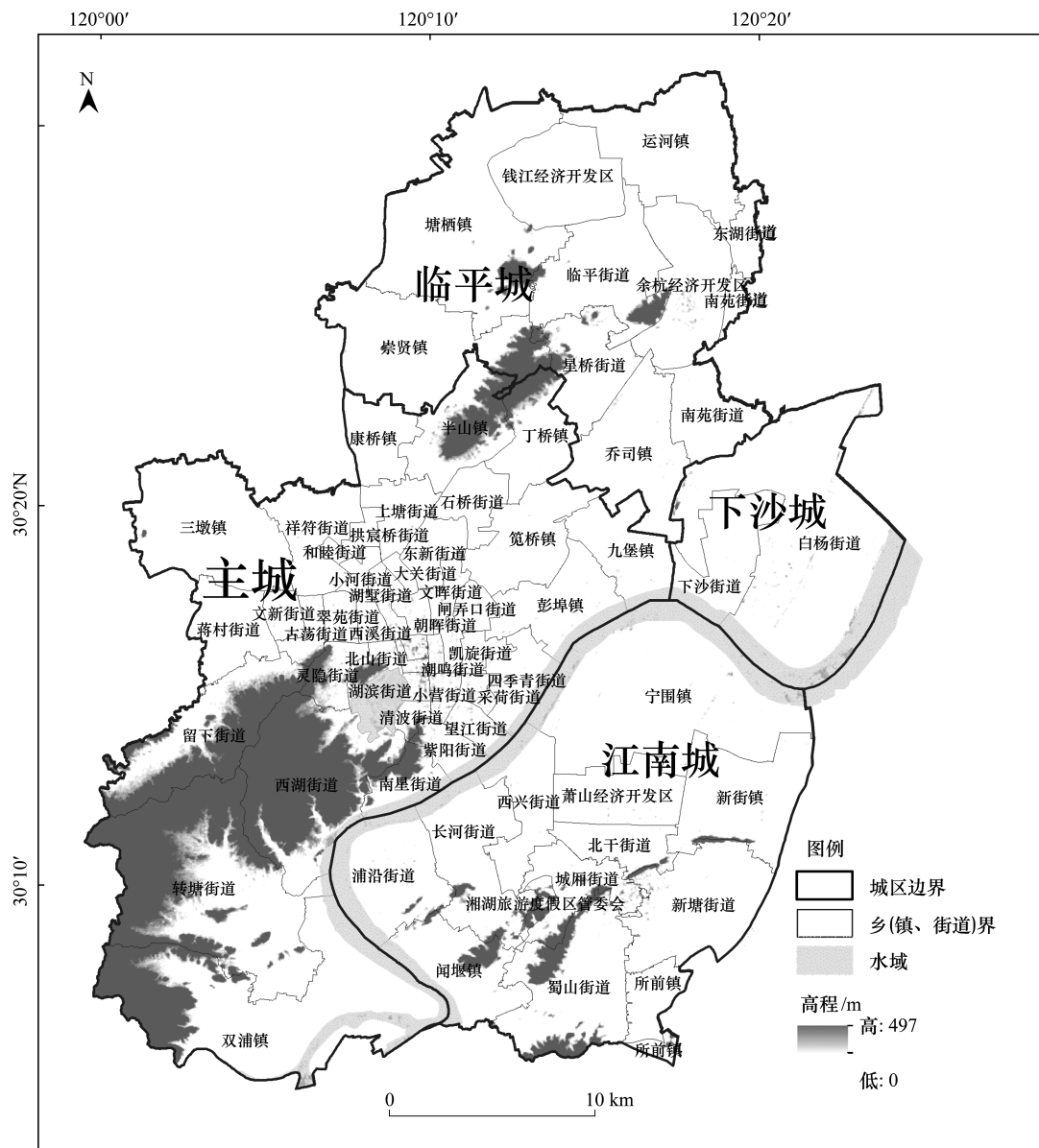


图3 研究区地理位置

Fig.3 Location of the study area

局网站。

3 结果分析

3.1 城市开发强度的定量测度结果

城市开发强度各维度的测度结果如图4所示。主城和江南城建筑强度高值单元分布较广,临平、下沙城整体建筑强度较低。其中主城高值单元呈集中连片的特征,南至钱塘江沿岸的紫阳街道,东至闸弄口街道,北至石桥街道,西至文新街道,但西南部有大范围零值区域分布,开发程度较低;江南城建筑强度较大,但高值单元分布相对较为分散;临平城虽整体范围较小,但高值单元则相对集中;下沙城则相反,整体建设范围较广,但高值单元数量小,开发程度较低。

主城与副城的功能强度差异最为显著,主城功能强度远远大于三个副城。主城在旧城中心形成了较大范

围的高值集聚中心,体现出较高的人类活动强度;其他地区则形成了几个较小的高值单元相对集中区域,其中江南城集中分布在萧山城区北干街道,临平城和下沙城均集中于行政中心附近。

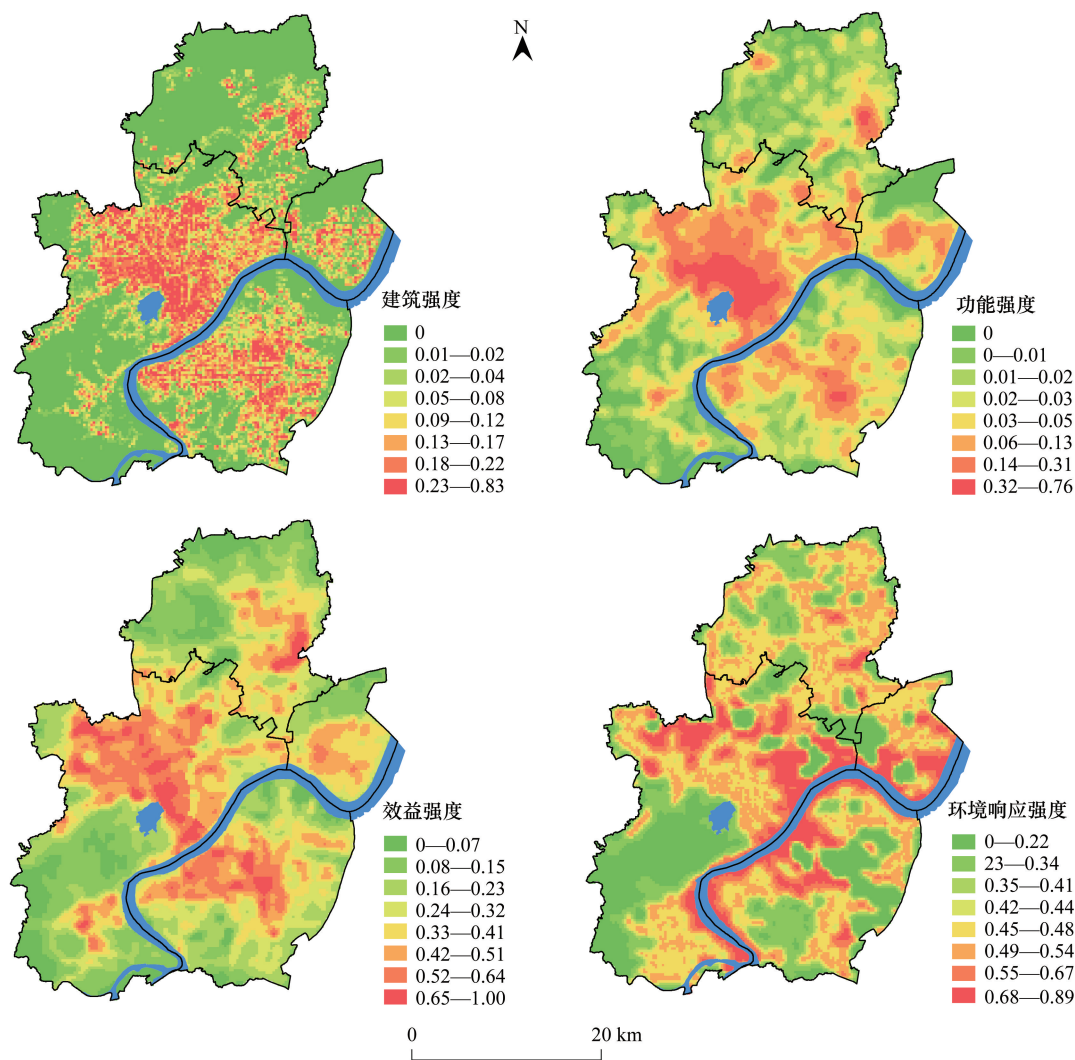


图4 城市开发强度各维度测度结果

Fig.4 Measure results of four dimensions of urban development intensity

效益强度高值集聚范围最广,其中主城与江南城高值单元跨江相接。主城西湖以东和以北地区形成广阔的高值集聚区,最高值分布于上城区、下城区及拱墅区的东部地区,同时西南部之江新城也形成了较小的高值中心;江南城高值单元集中在滨江区和萧山城区,并与主城隔江相接;临平城和下沙城高值单元分布于城区和开发区附近。

环境响应强度呈现明显的沿江分布特征。主城高值单元分布数量较多,但相对较为分散,主要分布在江干区西部与拱墅区西北部;江南城高值单元分布在滨江区和萧山城区北部;下沙城南部沿江地区环境响应强度较高;临平城高值区域范围较小,环境受影响程度较小。

利用熵权 TOPSIS 模型得到综合的城市开发强度如图 5 所示。2015 年,杭州市城市开发强度整体呈现明显的多中心结构特征。其中主城以西湖为界,东部及北部地区形成广泛的高强度开发区,其最高值分布于西湖东面的旧城中心地区,西南部地区则形成面积较大的低强度开发区;江南城在三个副城中高强度开发面积较广,从萧山城区延伸至滨江城区,并与主城高值区域跨江相接;临平城和下沙城开发强度较弱,并且高强度开发区域与主城相对独立,其中临平城分布于东部的余杭经济开发区和南苑街道,下沙城分布于中西部的下

沙街道。

3.2 城市开发强度的空间剖面分析

由 ArcGIS 中 3D 分析工具构建主城与三个副城方向的空间剖面图,其横轴为距市中心的距离,纵轴为相应维度的强度值。据图 6,除环境响应强度外,分维度与综合的城市开发强度由主城向副城呈波动下降趋势。建筑强度在三个副城方向上波动均比较剧烈,其中在西湖周边的中心城区呈现较高的强度,三个副城中,江南城建筑强度较高,且高值区域范围较广,而通往下沙城和临平城方向均分布有连续的低值区域;功能强度中主城与三个副城的差异最为明显,三个方向上均在中心城区 2 km 以内形成极高值聚集区,而在 5 km 以外功能强度显著降低,随后在副城中心逐渐提升;效益强度在三个副城方向上也有较为明显的波动,其中在主城区中心区域形成最高峰,随后逐步下降,三个副城方向分别在钱塘江南北两岸的滨江高新园区和上城区沿江区域、杭州经济开发区、余杭区经济开发区形成小高峰;综合的城市开发强度中主副城的差距相对较小,其中江南城方向,由主城中心向外逐渐降低,至上城区沿江区域形成小高峰,跨江后在滨江和萧山城区也分别分布有小高峰,下沙城方向,分别在彭埠东北地块和杭州经济开发区

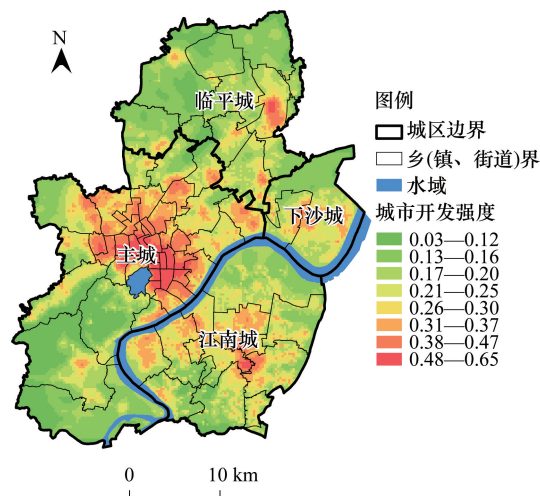


图 5 城市开发强度综合测度结果

Fig.5 Comprehensive measure result of urban development intensity

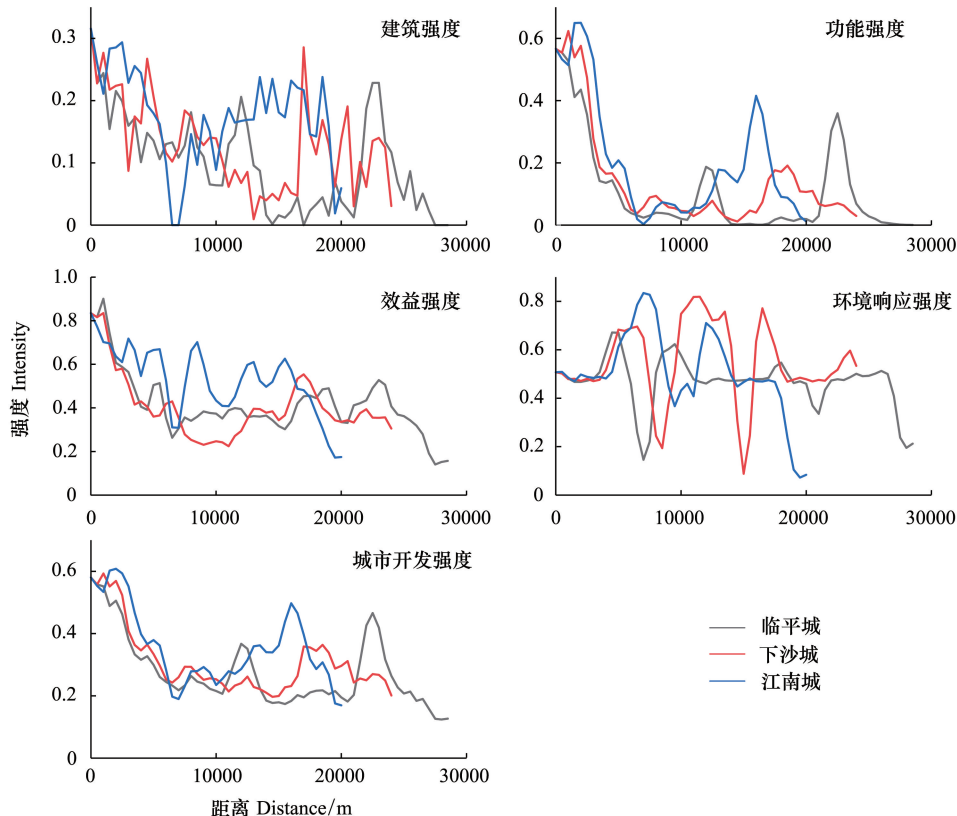


图 6 城市开发强度各维度剖面图

Fig.6 Profile graphs of each dimension of urban development intensity

西部地块形成低谷,临平城方向,在石桥和笕桥地块交界处存在一个低谷,随后逐渐上升并在临平城区形成高峰。

其次,主城与副城边界处环境响应强度相对较大。由图 6(d)可知,环境响应强度与城市土地利用其他维度的剖面变化差异较大,主城和副城中心区域环境响应强度均处于中等水平,其中主城中心区在 4 km 以内强度较为一致,波动平缓。三个副城方向上均在 5 km 左右的城区边缘地界形成小高峰,在临平城和下沙城方向,钱塘江沿岸地块均为最高峰,体现了在沿江开发带来的环境影响。

3.3 城市开发强度的空间集聚规律

首先,城市开发强度高值集聚特征显著。由全局 Moran 指数(表 1)可知,所有维度的全局 Moran 指数均较高,其中只有建筑维度的 Moran 指数为 0.74,其他维度都超过了 0.9,显示了城市开发强度在空间上高度的自相关性;而由 Z 得分可知,所有维度均为正值,表征城市土地利用存在正向的空间相关性,即相似的开发强度更趋向于空间集聚。全局 G 系数的计算结果中,所有维度的 Z 得分均为正值,且在 99%的置信度下显著,体现了城市开发强呈现出高度的空间自相关性,尤其是高强度开发集聚特征显著。

表 1 城市开发强度各维度全局自相关系数

Table 1 Global autocorrelation coefficient of each dimension of urban development intensity

维度 Dimension	全局 Moran 指数 Global Moran's I			全局 G 系数 Getis-Ord general G		
	I	Z 得分	P 值	G	Z 得分	P 值
建筑 Building	0.74	143.39	0.00	0.00002	143.89	0.00
功能 Function	0.99	196.50	0.00	0.00002	196.53	0.00
效益 Benefit	0.98	193.32	0.00	0.00001	188.76	0.00
环境响应 Environmental responding	0.96	190.20	0.00	0.00001	179.74	0.00
综合 Urban development	0.96	190.46	0.00	0.00001	180.17	0.00

其次,建筑强度、功能强度及效益强度热点区分布较为一致,具有较强的空间自相关性(图 7)。主城从滨江区块沿湖滨、武林广场地区北上至上塘、祥符以及三墩地区,形成范围最大的热点区,江南城热点区分布在萧山城区和滨江区,临平城和下沙城热点区规模较小。综合开发强度中(图 8),热点区以西湖为中心的湖滨、武林广场地块向外扩张,往西至三墩、蒋村和文新地区,往北至祥符、上塘和石桥地区,往东至杭州东站附近,往南则从钱江新城跨江沿滨江高新区至萧山城区,而东部九堡地区、下沙金沙湖及沿江地区形成热点区,北部临平和乔司地区也存在相对独立的小范围热点区域。

4 讨论

4.1 城市开发强度的空间分布规律

首先,从空间分布来看,杭州市城市开发强度总体呈现主城强、副城较弱的特征,高强度开发过度集中于城区中心。主城延安路及近湖地区作为杭州原城市核心区,人口、基础设施、商业配套等各项要素高度集聚,并具有较强的辐射效应,周边城北、城西及钱江新城地区开发强度也逐年升高;副城多分布于核心区外围,受主城辐射作用有限,资源、要素均滞后于主城。近年来,在多中心、组团式规划的引导下,副城产业发展带来了人口活动密度的增加和商业配套设施的深入,但因空间距离与腹地深度的制约,副城之间的开发强度不同。其中江南城有逐渐向主城融合的趋势,临平城、下沙城与主城的的功能性空间相对独立。江南城与主城隔江相望,拥有广阔的发展空间,得益于拥江发展战略,滨江与奥体板块在国家级高新技术产业开发区与亚运新城的带动下,各类资源要素优先集聚,逐渐发展成为杭州新的商务集聚区。下沙城属于新建的大学城,对高新产业的直接带动不足,吸纳产业、集聚人口的能力相对较弱,开发强度整体滞后。临平城距主城最远,与主城的过渡地带缺乏经济辐射与产业支撑,形成较大范围的低强度区域,是未来城市空间扩张的潜在区域。

其次,从评价维度来看,环境响应强度的评价结果与其他维度差异较大。尽管主城开发建设以及人类活

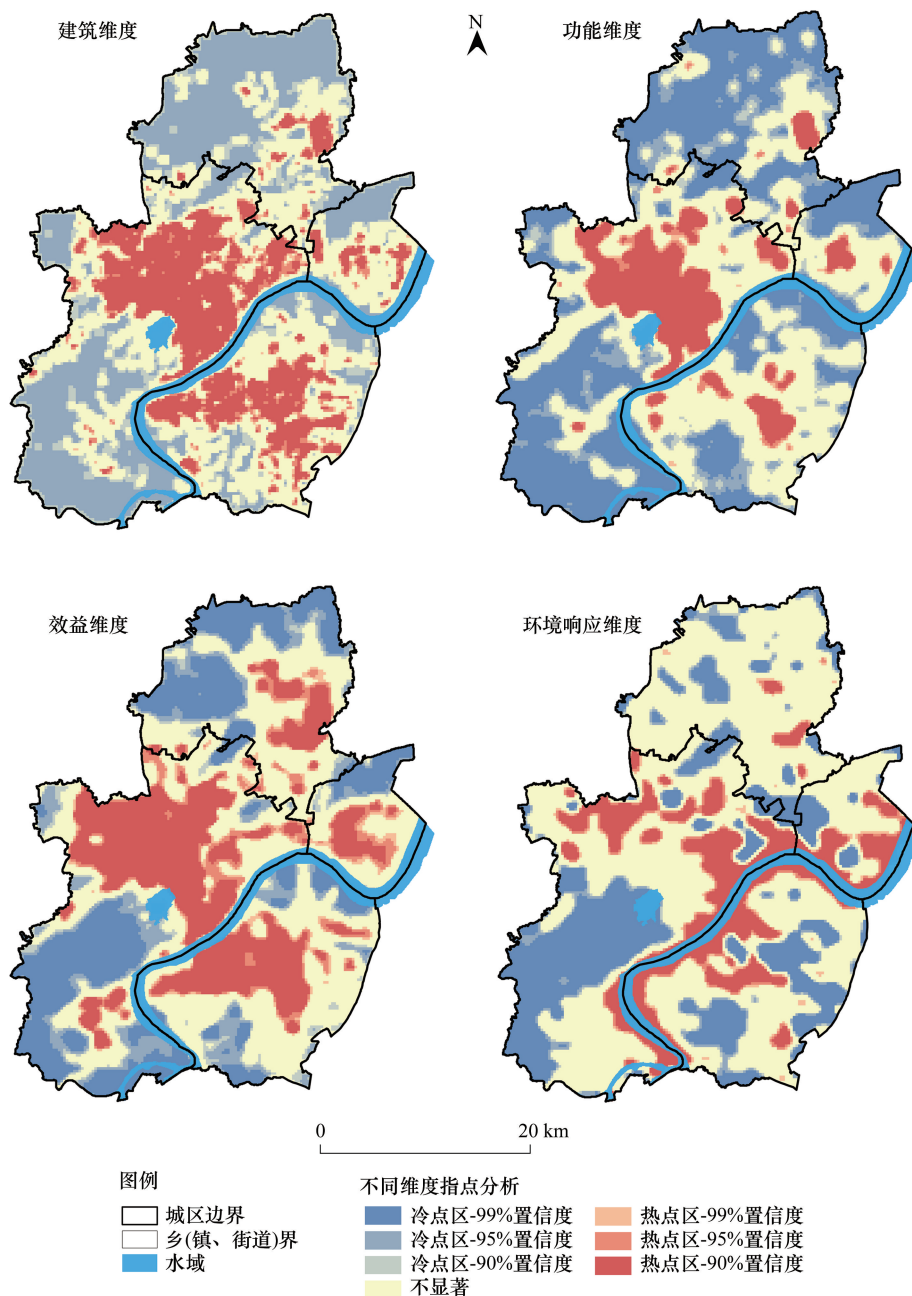


图7 城市开发强度各维度热点分析

Fig.7 Hotspot analysis of four dimensions of urban development intensity

动等强度均相对较高,但受城市规划与环境保护的严格制约,如西湖地区的建筑高度受到严格管控,保证了主城相对较优的区域环境。在产业升级政策导向下,污染大、能耗大的工业企业搬迁至城郊,使城郊环境破坏日益严峻,环境响应强度呈现高值。尤其是环境相对脆弱的沿江地区,随着沿江开发建设力度不断加大,生态环境受到严重影响。

4.2 政策建议

根据城市开发强度的结果,本文认为不同地区宜采取针对性的治理与管控措施,并提出如下政策建议:(1)重点关注主城中心区域开发强度过高的区域,疏散主城过度的功能集聚压力。这一区域需要实行严格的管制政策,减少过度的建设开发项目,合理布局城市生态用地,提高居民生活舒适性。同时向副城进行人口分

流和城市功能疏散,以缓解交通拥堵、环境恶化等“城市病”问题。(2)注重提升开发强度低洼地区,提高其土地集约利用度。例如,彭埠、笕桥、乔司等主副中心交界地区,未来需要以产业升级、功能提升为抓手集聚人口,挖潜存量低效用地,促进土地的高效利用。(3)加强主副中心之间的功能性联系。针对下沙、临平、江南等副城的开发强度差异,充分发挥各自的比较优势,实行差异性的功能定位,尤其是通过市内轨道交通的纽带作用,加强主副城之间的功能性联系。(4)保护沿江地区的生态环境。在产业郊区化与拥江发展战略的背景下,应协调好开发与保护的关系,实行严格的产业准入机制,优化调节产业结构,推进郊区环境保护与整治,城市规划中注重生态用地配置,加强生态景观带打造,提升城市环境质量。

5 结论

本文基于社会-经济-生态系统耦合视角,建立了一个城市开发强度的多维测度体系,主要涉及建筑、功能、效益及环境响应等四个维度,并基于多源空间数据提取了上述维度下的10个评价指标,评估了杭州的城市开发强度及空间分布特征,得出以下结论:

(1)杭州城市开发强度由主城向副城呈波动降低,并且高强度开发过度集中于主城,西湖周边至钱塘新城的核心区域承担了大部分的商业、居住及社会功能,这说明主城的疏解有待加强,以轨道交通加强主副城的功能联系,促进城市的要素流动,提升副城的城市功能。

(2)在“一主三副”空间发展规划的指引下,杭州多中心城市结构初显,但副城开发强度不一。江南城受到主城的辐射作用,已基本实现与主城的跨江融合。临平城、下沙城空间上较为独立,空间扩散效应较弱,与主城相连的中间地带开发相对滞后。

(3)各评价维度中,建筑强度、功能强度及效益强度热点区分布较一致,体现了城市开发、功能利用及经济效益等维度的高度相关性。环境响应高强度则集聚于主副城交界区,表明城市边缘区的城市环境问题凸显,是制约城市可持续发展的热点区,也是今后城市治理上亟待强化的区域。

但是,本文在环境响应维度中,只考虑具有全域分布特征的城市热岛及空气质量等问题,而一些典型的点源或者线性分布的环境污染则没有考虑;效益维度中采用与经济活动高度相关的夜灯数据空间化模拟二、三产值,一定程度上影响了测度的精确性。

参考文献 (References):

- [1] 王翠平, 王豪伟, 李春明, 董仁才. 基于 DMSP/OLS 影像的我国主要城市群空间扩张特征分析. 生态学报, 2012, 32(3): 942-954.
- [2] 兰肖雄, 刘盛和, 胡章. 我国城市蔓延概念的界定与思考. 地域研究与开发, 2012, 31(3): 53-57, 63-63.
- [3] 刘彦随, 乔陆印. 中国新型城镇化背景下耕地保护制度与政策创新. 经济地理, 2014, 34(4): 1-6.
- [4] 吴泽斌, 刘卫东, 罗文斌, 汪友结. 我国耕地保护的绩效评价及其省际差异分析. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1785-1793.
- [5] 车前进, 段学军, 郭磊, 王磊, 曹有挥. 长江三角洲地区城镇空间扩展特征及机制. 地理学报, 2011, 66(4): 446-456.
- [6] 吴郁玲, 曲福田, 周勇. 城市土地市场发育与土地集约利用分析及对策——以江苏省开发区为例. 资源科学, 2009, 31(2): 303-309.
- [7] 丁成日, 高卫星. 中国“土地”城市化和土地问题. 城市发展研究, 2018, 25(1): 29-36.
- [8] 刘芳, 闫慧敏, 刘纪远, 肖向明, 秦元伟. 21 世纪初中国土地利用强度的空间分布格局. 地理学报, 2016, 71(7): 1130-1143.
- [9] Turner B L, Doolittle W E. The concept and measure of agricultural intensity. The Professional Geographer, 2010, 30(3): 297-301.
- [10] Brookfield H C. Intensification and disintensification in pacific agriculture: A theoretical approach. Pacific Viewpoint, 1972, 13(1): 30-48.

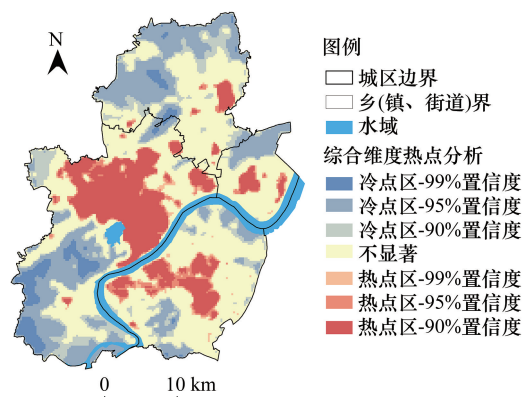


图8 城市开发强度热点分析

Fig.8 Hotspot analysis of urban development intensity

- [11] Erb K H, Haberl H, Jepsen M R, Kuemmerle T, Lindner M, Müller D, Verburg P H, Reenberg A. A conceptual framework for analysing and measuring land-use intensity. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 464-470.
- [12] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 周全斌, 赵晓丽. 中国土地利用时空特征分析. *地理学报*, 2001, 56(6): 631-639.
- [13] 刘艳军, 于会胜, 刘德刚, 祝丽媛. 东北地区建设用地开发强度格局演变的空间分异机制. *地理学报*, 2018, 73(5): 818-831.
- [14] 李猷, 王仰麟, 彭建, 常青, 宋治清, 刘小茜. 基于景观生态的城市土地开发适宜性评价——以丹东市为例. *生态学报*, 2010, 30(8): 2141-2150.
- [15] 赵磊, 刘洪彬, 于国锋, 李铁柱, 孙伟, 王闯. 基于熵权法土地资源可持续利用综合评价研究——以辽宁省葫芦岛市为例. *资源与产业*, 2012, 14(4): 63-69.
- [16] 朱天明, 杨桂山, 苏伟忠, 万荣荣. 长三角地区城市土地集约利用与经济社会发展协调评价. *资源科学*, 2009, 31(7): 1109-1116.
- [17] Li X Z, Sun Y G, Mander Ü, He Y L. Effects of land use intensity on soil nutrient distribution after reclamation in an estuary landscape. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 699-707.
- [18] 张微微, 李红, 霍霄妮, 孙丹峰, 周连第. 基于能值分析的农业土地利用强度. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 204-210.
- [19] 李焕, 徐建春, 李翠珍, 徐知渊, 范晓娟. 基于 BP 人工神经网络的开发区土地集约利用评价——以浙江省为例. *地域研究与开发*, 2011, 30(4): 122-126.
- [20] 杨敬锋, 薛月菊, 胡月明, 陈志民, 陈强, 包世泰. 基于关联规则和模糊判据的土地评价方法. *农业工程学报*, 2008, 25(5): 74-77.
- [21] 赵亚莉, 刘友兆. 城市土地开发强度差异及影响因素研究——基于 222 个地级及以上城市面板数据. *资源科学*, 2013, 35(2): 380-387.
- [22] 侯圣银. 京津冀地区主要城市土地利用强度研究——基于引力模型的实证检验. 北京: 首都经济贸易大学, 2017.
- [23] Wang F H, Antipova A, Porta S. Street centrality and land use intensity in Baton Rouge, Louisiana. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(2): 285-293.
- [24] 李智, 余宝林, 陈晓, 赵建利. 基于 MAPGIS 的土地利用强度分析——以秦皇岛市主城区为例. *测绘与空间地理信息*, 2008, 31(4): 34-36, 41-41.
- [25] 秦萧, 甄峰. 大数据与小数据结合: 信息时代城市研究方法探讨. *地理科学*, 2017, 37(3): 321-330.
- [26] 吴洁璇. 开放数据支持下的城市建设用地利用效率评价方法研究. 南京: 南京大学, 2016.
- [27] 倪维秋. 中国三大城市群城市土地利用经济、社会、生态效益的耦合协调性及其空间格局. *城市发展研究*, 2016, 23(12): 69-77.
- [28] Tsaur R C. Decision risk analysis for an interval TOPSIS method. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, 218(8): 4295-4304.
- [29] Jun K S, Chung E S, Sung J Y, Lee K S. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(24): 5228-5242.
- [30] 杜挺, 谢贤健, 梁海艳, 黄安, 韩全芳. 基于熵权 TOPSIS 和 GIS 的重庆市县域经济综合评价及空间分析. *经济地理*, 2014, 34(6): 40-47.