引文格式:卢宾宾,田小溪,秦思娴,等.基于地理加权建模技术的武汉市土地资源承载力评价研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(3):430-438.DOI:10.13203/j.whugis20220778

Citation:LU Binbin,TIAN Xiaoxi,QIN Sixian,et al.Urban Land Carrying Capacity Evaluation of Wuhan City with Geographically Weighted Techniques[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(3):430-438.DOI:10.13203/j.whugis20220778

基于地理加权建模技术的武汉市土地资源承载力评价研究

卢宾宾[1] 田小溪[1] 秦思娴[2] 史祎琳[1] 李建松[1]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 武汉市测绘研究院,湖北 武汉,430022

摘 要:在中国全面推进生态文明建设的背景下,资源环境承载力监测评价研究具有重要的理论和实践意义。随着城镇化进程的高速推进,城市土地资源逐步成为城市发展的核心资源要素,吸引了众多学者的关注。但在以往研究中,评价分析方法多以宏观的全局统计为主,难以满足城市尺度下进行精细尺度分析评价的需求,也无法体现评价指标及其关系所呈现的空间异质性或非平稳性特征。以武汉市土地资源承载力评价为例,采用地理加权汇总统计、地理加权主成分分析和地理加权回归分析等基础地理加权建模技术实现了集成评价、影响要素和成因分析,更加合理地阐释了武汉市建成区土地承载压力分布及其影响要素。结果证明,地理加权建模技术框架能够实现城市土地资源承载力精细化评价,从全新的视角实现单项指标分析与综合评价,而随着地理加权建模技术的拓展与演化,分析层次更加丰富,为更多场景与领域的应用提供可行的技术方案。

关键词:土地资源;土地承载力;空间统计;空间异质性;地理加权建模

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-06-25

DOI:10.13203/j.whugis20220778 **文章编号**:1671-8860(2025)03-0430-09

Urban Land Carrying Capacity Evaluation of Wuhan City with Geographically Weighted Techniques

LU Binbin[1] *TIAN Xiaoxi*[1] *QIN Sixian*[2] *SHI Yilin*[1] *LI Jiansong*[1]

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Wuhan Geomatics Institute, Wuhan 430022, China

Abstract: **Objectives**: With the rapid urbanization in China, urban land resource has become a key part in urban development, and attracted more and more attentions. However, global methods were traditionally adopted for its carrying capacity evaluation and analysis, which largely ignored the spatial heterogeneities or non-stationarities in the data relationships. **Methods**: In this paper, we proposed a technical framework to evaluate and analyze the urban land carrying capacity with geographically weighted (GW) techniques from local perspective. We exemplified this framework with a case study in Wuhan City. In details, we adopted GW summary statistics, GW principal component analysis and GW regression to conduct the evaluation and analysis. **Results**: The comprehensive pressure of land carrying capacity shows a decaying trend from the city center to the outside areas, to which population density and floor area ratio contribute the most. Moreover, different factors present spatially varying influences on the comprehensive pressure of land carrying capacity. **Conclusions**: The proposed framework with GW techniques works well on evaluating and analyzing urban land carrying capacity from local perspective, and its evolution is still ongoing with more local techniques involved, which makes it be applicable in more cases and scenarios.

基金项目:国家自然科学基金(42071368);中央高校自主科研项目(2042022dx0001)。

第一作者:卢宾宾,博士,副教授,主要从事空间统计、地理加权回归分析、地理加权建模技术等方面的研究。binbinlu@whu.edu.cn

Key words: land resources; land carrying capacity; spatial statistics; spatial heterogeneity; geographically weighted model

2017年中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》,明确建立健全资源环境承载力监测与预警体系是推进中国生态文明建设的关键环节。而资源环境承载力精细评价技术与方法的研究是构建该体系的核心内容,也逐步得到越来越多学者的关注。

国内学者围绕资源环境承载力的基础理论、评价方法及实践应用等方面,在国家级、区域级、城市级等不同尺度下对土地[1-3]、水[4]、环境要素[5]、生态[6]等单项以及综合的资源环境承载力评价及其预警机制[7]进行了丰富的研究与探索。其中,在中国城镇化进程高速推进的背景下,城市土地资源逐步成为城市发展的核心资源要素[8],土地资源承载力研究从传统的关注农业生产更多地转向其对城市化过程的约束作用。但是,以往研究多以指标体系探索为主,在评价方法方面多以宏观的全局统计为主,不能满足评价区域从全国、区域尺度研究聚焦到城市级单元时进行精细尺度分析评价的需求[9]。

值得注意的是,在地理学研究中,空间变量及其关系在不同位置或区域可能呈现复杂、多样、各异的过程、现象或规律,即空间异质性或非平稳性特征[10]。1996年,地理加权回归分析(geographically weighted regression, GWR)技术被提出[11],区别于单一普适建模的传统空间统计分析方法,通过因地制宜式的空间变参数估计实现空间变量及其关系的精细化局部视角分析[12],将关于空间关系异质性特征的研究推向一个新的阶段。随着GWR技术的发展,涌现了广义GWR(generalized GWR)[13]、地理加权序数回归分析(geographically weighted ordinal regression, GWOR)[14]、多尺度GWR[15-16]和时空GWR(geographically and temporally weighted regression, GTWR)[17]等技术扩展;与此同时,还出现了一系列其他地理加权类技术,如地理加权汇总统计(geographically weighted summary statistics, GWSS)[18]、地理加权主成分分析(geographically weighted principal components analysis, GWPCA)[19]和地理加权判别分析(geographically weighted discriminant analysis, GWDA)[20]等,形成了能够满足不同层次需要的空间计量分析技术体系。但是,目前地理加权建模技术的应用仍多以单一使用为主[21],未能充分发挥不同技术之间的互补特性,而土地资源环境承载力评价与分析为其集成应用提供了一个绝佳的应用场景。

本文针对城市土地资源承载力,以武汉市为例,探索利用地理加权建模技术贯穿整个评价过程,提供精细尺度分析评价结果,以期为城市土地资源承载力分析评价提供新的技术思路与分析视角,同时也侧面反映地理加权建模技术的集成应用效果。

1　地理加权建模技术

地理加权建模技术的本质是采用关于位置的求解,按照地理学第一定律所呈现的距离衰减规律进行权重计算,进而通过关于空间位置变化的参数估计量化表征空间变量及其关系的异质性或非平稳性特征[21]。常用地理加权建模技术主要包括GWSS、GWPCA、GWR等技术,在地理国情分析评价中发挥不同的作用。

GWSS技术主要指采用地理加权思想对基础汇总统计量进行计算,如均值、标准差、协方差和相关性系数,其计算式分别为:

$$\mu(x_i)=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}x_j}{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}} \tag{1}$$

$$s(x_i)=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\left(x_j-\mu(x_i)\right)^2}{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}}} \tag{2}$$

$$c(x_i,y_i)=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\left(x_j-\mu(x_i)\right)\left(y_j-\mu(y_i)\right)}{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}} \tag{3}$$

$$\rho(x_i,y_i)=\frac{c(x_i,y_i)}{s(x_i)s(y_i)} \tag{4}$$

式中,x_i、y_i分别为位置i处的自变量和因变量取值;w_{ij}为空间权重[21];$\mu(x_i)$为变量x的地理加权均值;$s(x_i)$、$s(y_i)$分别为变量x和y的地理加权标准差;$c(x_i,y_i)$、$\rho(x_i,y_i)$分别为变量x和y的地理加权协方差和地理加权协相关系数。GWSS技术聚焦于一元或二元空间变量关系分析,可用于地理国情指标及其影响因素的探索性分析过程。

相比于传统的主成分分析技术,GWPCA技术对关于位置的地理加权方差-协方差矩阵进行正交分解,以计算对应位置的特征值与特征向量,其计算式分别为:

$$\boldsymbol{\Sigma}_i = \boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_i\boldsymbol{X} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{L}_i\boldsymbol{V}_i\boldsymbol{L}_i^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{\Sigma}_i \tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{W}_i$为空间权重矩阵;$\boldsymbol{\Sigma}_i$为位置i处变量矩阵$\boldsymbol{X}$的地理加权方差-协方差矩阵;$\boldsymbol{V}_i$为由$\boldsymbol{\Sigma}_i$特征值构成的对角矩阵;$\boldsymbol{L}_i$为特征向量矩阵。GWPCA技术可以识别变量空间各个主成分载荷的局部空间变化,更好地体现关于位置的横截面属性数据异质性构成,能够进行更加准确的综合评价指标计算。

基础GWR模型一般可表达为:

$$y_i = \beta_{0i} + \sum_{k=1}^{m}\beta_{ki}x_{ik} + \varepsilon_i \tag{7}$$

式中,β_{0i}为截距项;$\beta_{ki}(k=1,2,\cdots,m)$为回归分析系数。GWR技术通过关于位置的求解,量化估计一元或多元自变量与因变量之间的关系,契合多样、复杂的评价指标分析评价场景,尤其能够在针对特定指标变量的影响要素或成因分析过程中发挥重要作用。

综上,GWSS、GWPCA和GWR技术覆盖了不同层次的空间数据分析需求,提供了随着空间位置而变化的量化分析视角,能够较好地满足日趋多元、精细、准确的地理国情分析评价需要,随着地理加权建模技术的不断丰富与拓展,这个技术体系的优势与特点将得到进一步凸显。

2 城市土地资源承载力评价

本文以2019年武汉市主城建成区范围内的土地承载力评价为例,采用基于地理加权建模的方法流程评价主建成区街道级土地承载压力状况,并结合相关要素进行成因分析。本文所采用的评价流程如图1所示,其中AHP(analytic hierarchy process)为层次分析法。

如图1所示,本文采用武汉市地理国情监测数据、统计数据、专项调查数据以及新的时空大数据等多源数据,从人口、经济、建设和交通4个方面对城市土地资源承载力进行评价。这四类要素通常被认为是城市系统研究的核心元素,其分布大体上能够反映城市空间利用情况。人口和经济是地理国情监测中常见的社会经济专题数据,建设和交通要素与城市化、存量土地利用等专题相关,基于这4个方面进行土地承载力分析评价基本能够满足地理国情监测中资源环境承载力和国土空间开发适宜性评价的需求。

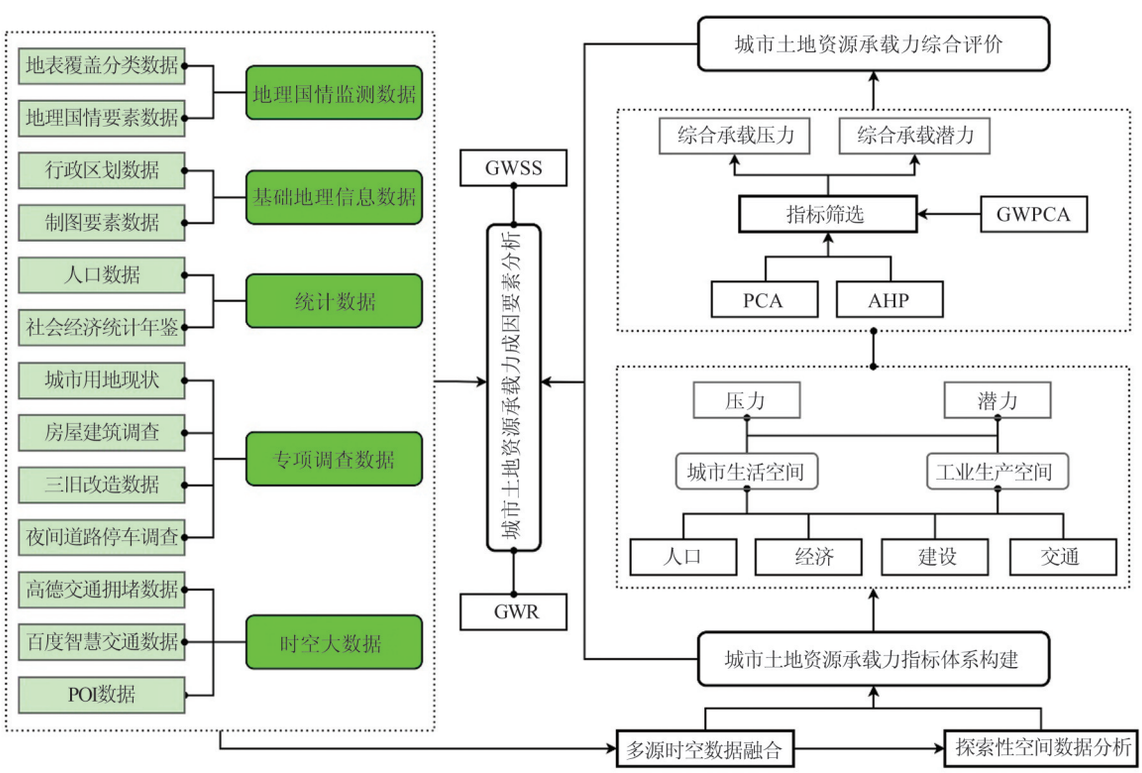


图1 城市土地承载压力评价技术流程图

Fig. 1 Technical Flowchart of Urban Land Resource Carrying Capacity Evaluation

本文各项指标统计以建成区范围内的街道区域为统计单元,因此需要采用尺度上推和下推等技术对多源时空数据进行融合操作,进而完成街道单元的评价指标计算。

以经济指标为例,其数据来源为武汉市统计年鉴数据,需要采用尺度下推技术实现街道单元的经济指标计算[22]。具体来说,本文所需的街道国内生产总值(gross domestic product,GDP)数据可分为每个街道内一产、二产和三产增加值之和,根据每个街道单元内各类产业用地面积占比,对统计年鉴中所提供的区级经济数据进行折算与汇总。街道GDP数据尺度下推规则的计算式为:

$$\mathrm{GDP}_s = P_d\frac{A_{ps}}{A_{pd}} + S_d\frac{A_{ss}}{A_{sd}} + T_d\frac{A_{ts}}{A_{td}} \qquad (8)$$

式中,GDP_s表示街道尺度GDP;P_d为区第一产业增加值;A_{ps}、A_{pd}分别表示街道和区级单元的第一产业用地面积占比;S_d为区第二产业增加值;A_{ss}、A_{sd}分别表示街道和区级单元的第二产业用地面积占比;T_d为区第三产业增加值;A_{ts}、A_{td}分别表示街道和区级单元的第二产业用地面积占比。

本文采用的产业用地数据主要来自于地理国情监测和专项调查数据,其详细说明见表1。

表1　各类产业用地数据说明

Table 1　Land Data Description of Each Industry

产业类型	产业用地数据
第一产业	地表覆盖分类中的耕地、园地
第二产业	工业用地、地理国情城镇功能单元中的工矿企业
第三产业	第三产业增加值包括教育医疗、交通运输仓储和邮政业、批发和零售业、住宿和餐饮业、金融业、房地产业、其他服务业

2.1　土地资源承载压力评价

2.1.1　单项评价

本文从人口、经济、建设和交通四类土地承载对象出发,对城市土地承载压力构建指标体系分别进行单项评价,在此基础上采用PCA和AHP选取典型单项指标,包括常住人口密度、地均GDP、容积率、建筑密度和拥堵里程占比进行土地资源承载压力综合集成评价,其评价指标如表2所示。本文所使用的专题数据时间点统一为2018年12月底。

本文使用的常住人口和流动人口来源于武汉市公安局提供的街道级统计数据,就业人口数据来源于百度地图慧眼数据平台(https://huiyan.baidu.com)就业人口50 m格网数据。图2(a)展示了武汉市建成区常住人口密度,其平均值为11.42×10^3人/km^2,常住人口明显聚集在中心城区,且由中心城区向外逐渐下降,最大值位于江汉区前进街,达到105.99×10^3人/km^2,密度较小的街道包括黄陂区的天河街、青山区(化工区)的武钢集团公司等街道,常住人口则相对较为稀疏。

表2　土地承载压力指标

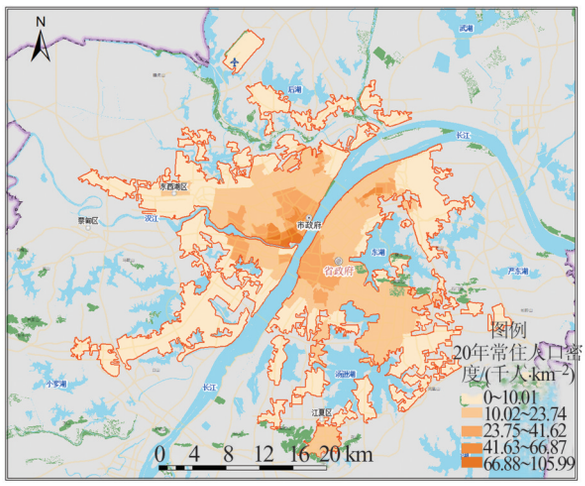
Table 2　Indices of Land Resource Carrying Pressure

评价指标	城市生活空间	工业生产空间
人口	常住人口密度	
	就业(三产)人口密度	就业(二产)人口密度
	流动人口密度	
经济	地均GDP(三产为主)	地均GDP(二产为主)
	地均财政收入	
	地均固定资产投资额	
建设	容积率	
	建筑密度	
	地均公园绿地面积	—
交通	道路网密度	
	公交、轨道交通线路密度	
	夜间道路停车密度	
	拥堵指数	

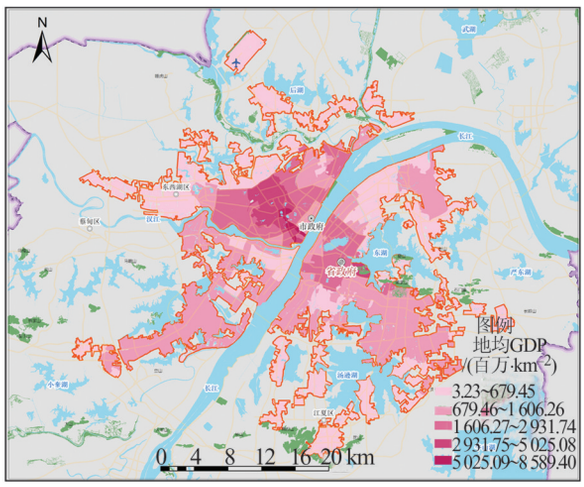
图2(b)展示了武汉市街道地均GDP分布,显示值较高的街道主要分布于江汉区、江岸区、硚口区和武昌区长江南岸区域的街道。这些街道经济结构以第三产业为主,人口聚集且街道面积相对较小,如地均GDP最高的新华街,街道GDP共100.64亿元,其中第三产业增加值100.12亿元,第二产业增加值仅为0.52亿元,但其街道面积仅1.17 km^2。地均GDP较低的街道主要位于青山区(化工区)、蔡甸区、黄陂区等建成区边缘,人口密度相对较低,街道GDP较小或街道面积很大,从而导致地均GDP值较小。

容积率指街道内建筑面积总和除以建筑用地面积总和,其街道级分布如图2(c)所示。容积率较高的街道主要集中在长江北岸、汉江西北部的汉口区域,如江汉区、江岸区、硚口区,这些区域多为商业或居住中心;容积率较小的街道主要分布在青山区、东湖生态风景区、经济技术开发区和黄陂区西南部等建成区边缘以及汉江西南部位于汉阳区的部分街道,这些街道主要以工业企业用地或大型公共设施用地为主。

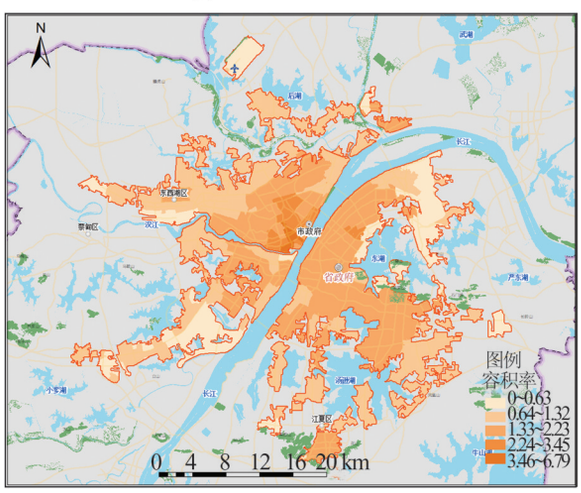
图2(d)展示了武汉市建成区建筑密度分布。建筑密度较高的街道主要分布在汉口和武昌老



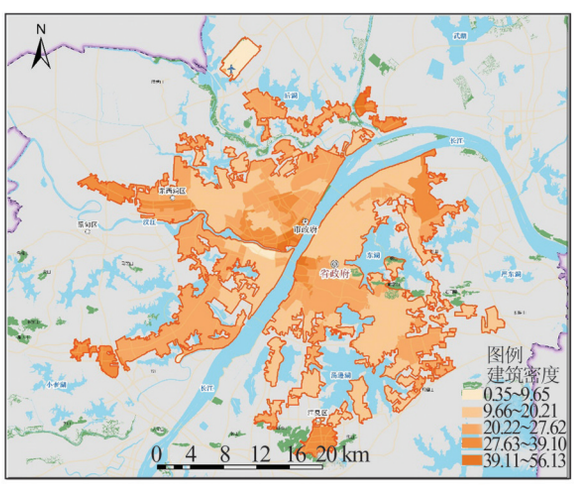
(a) 常住人口密度



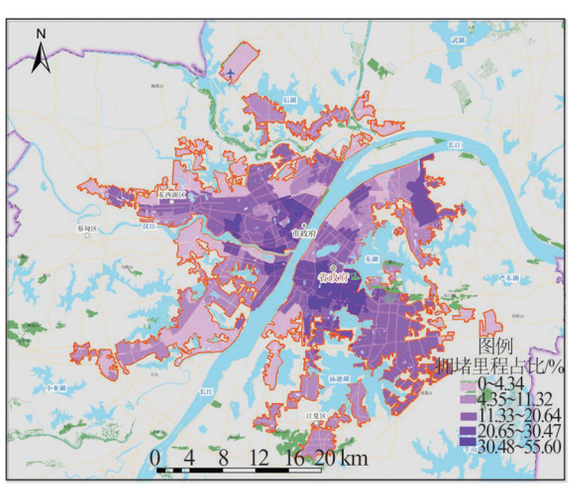
(b) 街道地均GDP



(c) 容积率



(d) 建筑密度



(e) 拥堵里程占比

图2 武汉市建成区土地承载压力典型单项指标

Fig. 2 Typical Indicators of Land Carrying Capacity Pressure in Built-up Area of Wuhan City

城区,以江汉区最为密集,其次部分街道分布于武昌区,这些区域建设时间较早,主要为居民生活空间,居民建筑密集,土地承载压力较大。此外,高建筑密度区域出现在研究区边缘,如黄陂区的三里屯街、青山区原武钢集团区域,多为工业空间,但以低层建筑为主。建筑密度较低的街道主要分布在汉阳区、洪山区、东湖技术开发区等,以外围区域为主。

如图2(e)所示,拥堵里程占比在空间上呈现出内高外低的分布形态。拥堵程度较为严重的

街道主要集中分布在东湖新技术开发区、武昌区和洪山区,由于处于或接近城市中心,且街道学校、居民楼和商业中心分布较多,交通流量大,容易出现高峰时期拥堵的现象,如武昌区的珞珈山街道和洪山区的卓刀泉街道,拥堵里程占比分别达到了 0.56 和 0.39。拥堵程度较轻的街道主要集中在蔡甸区、汉阳区、青山区和江夏区等区域,常住人口较少,交通压力相对较小,拥堵里程占比多数位于 0.1 以下。

2.1.2　土地承载压力集成评价

基于单项评价的指标结果,采用 GWPCA 方法对 4 个维度的指标进行集成评价,综合分析武汉市主城建成区的土地承载压力状况。

首先,为了消除不同单项指标度量单位、量纲以及数量级的影响,分别对其进行标准化和无符号化处理,具体可采用最小-最大标准化方法,对正向指标和负向指标分别进行标准化,计算式分别为:

$$\text{正向指标}:r_{ij}=\frac{p_{ij}-\min(p_{ij})}{\max(p_{ij})-\min(p_{ij})} \tag{9}$$

$$\text{负向指标}:r_{ij}=\frac{\max(n_{ij})-n_{ij}}{\max(n_{ij})-\min(n_{ij})} \tag{10}$$

式中,r_{ij} 为评价指标的标准化值;p_{ij} 为正向指标值;n_{ij} 为负向指标值。

通过 GWPCA 技术计算标准化指标的局部特征向量矩阵 $\boldsymbol{L}_i$,进而计算 i 位置的局部主成分得分 $\boldsymbol{T}_i$,计算式为:

$$\boldsymbol{T}_i=\boldsymbol{X}\boldsymbol{L}_i \tag{11}$$

根据 $\boldsymbol{T}_i$,取第一主成分向量对应得分作为单项指标相对集成评价结果。

根据 GWPCA 计算结果,各街道第一主成分的方差贡献率均在 65% 以上,可表征原始数据变量主要特征,因此可将第一主成分的得分视为土地综合承载压力的评价结果,如图 3 所示。建成区土地综合承载压力呈现出由环线向外递减的趋势,压力高的地区集中在江汉区、江岸区、武昌区和硚口区,且压力最大值位于长江与汉江交汇处;黄陂区、东湖高新区、青山区等综合承载压力相对较小,这与武汉市建成区开发程度与社会经济发展情况较为相符。

GWPCA 第一主成分的各指标变量对应的载荷值分布如表 3 所示,可看出每个变量在不同街道呈现了典型的异质性分布特点。其中,人口密度和容积率指标对第一主成分的载荷值明显高于其他指标,说明对综合压力指标贡献最大,但对应的标准差值较小,说明在研究区各个街道均呈现了较大影响,而建筑密度和拥堵里程占比指标载荷有较大的标准差,也如图 2(d)和图 2(e)所示,呈现出较为明显的分异性特征。

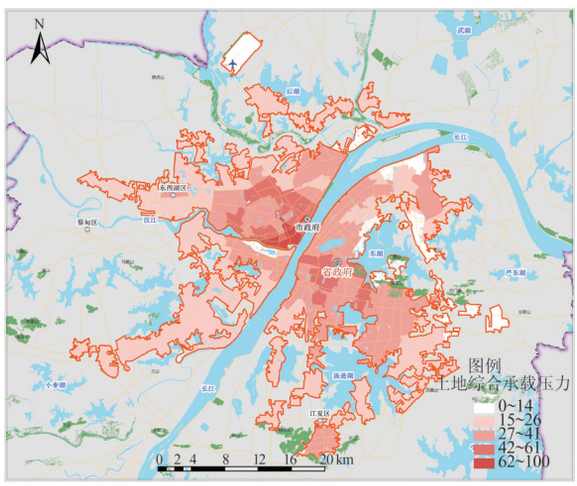


图 3　武汉市建成区土地综合承载压力指标

Fig. 3　Comprehensive Indicator of Land Carrying Capacity in Built-up Area of Wuhan City

表 3　GWPCA 第一主成分载荷量

Table 3　Loadings of the First Principal Component from GWPCA Results

统计指标	人口密度	地均 GDP	容积率	建筑密度	拥堵里程占比
最小值	0.548	0.327	0.468	0.369	0.094
最大值	0.627	0.377	0.503	0.502	0.411
平均值	0.592	0.358	0.482	0.435	0.292
标准差	0.024	0.011	0.009	0.046	0.106

通过对第一主成分的各指标载荷分布情况进行聚类分析,如图 4 所示。各街道的聚类结果从城市中心向外围呈现较为明显的圈层分布差异,人口密度、地均 GDP 和容积率均呈现较大的载荷值,拥堵里程占比在城市中心载荷值较低,在外围城区街道呈现较大的载荷值,而建筑密度与之相反,呈现中心载荷高、四周载荷低的特点。

由此可见,武汉市建成区的土地综合承载压力主要表现为建设用地使用强度和人口聚集所带来的压力,而建筑密度和交通拥堵对土地综合承载压力的贡献在中心城区街道和周边区域呈现出较大差异。人口与经济要素对综合承载压力在整个城区呈现了均质化的较大影响,也凸显了其重要性程度;而建筑和交通要素在城市中心城区与周边区域呈现了较大区别,这也体现了不同区域间建设过程与发展阶段的差异。

值得注意的是,采用 GWPCA 技术进行集成评价,其效果很大程度上取决于所选取的要素合

理性,可通过观察其局部方差贡献率和主成分载荷量进行辅助判断。

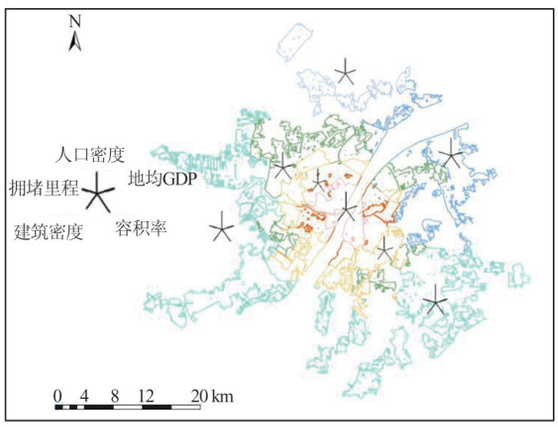


图4 地理加权主成分评价指标第一主成分载荷图

Fig. 4 Glyph Plot of Loadings of the First Principal Component from GWPCA Results

2.2 影响要素与成因分析

2.2.1 基于GWSS的相关性分析

本文选取兴趣点(point of interest,POI)混合度、房价、通勤指数、公交线路重复度、轨道交通站点数等要素对上述建成区土地承载压力综合评价指标进行影响要素分析与成因探索,探究城市空间功能和建成区间的关联关系与影响作用差异。

首先采用GWSS方法对上述影响要素和土地承载压力综合评价指标进行相关性分析。以房价为例,其与综合承载压力的地理加权相关系数分布如图5所示。各街道房价均价和土地承载压力的相关系数均为正,表明房屋价格与土地承载压力之间存在不同程度正向关系,整体的相关性分布呈现近似环状分布,外围高、中心低。武昌区和江汉区、江岸区等沿江街道的房价与土地承载压力指标相关性相对较弱,而周边新开发的街道,如江北东西湖区、汉南区等区域系数值较高,房价与对土地承载压力综合指标之间关联性较强,体现了城市新开发区与中心城区土地承载压力的不同特点。

2.2.2 基于GWR的成因分析

在相关性分析基础上,本文分别采用线性回归分析和GWR技术分析影响变量对建成区土地综合承载压力的影响。表4给出了全局线性回归的求解结果。总体来说,POI混合度和通勤指数表现为较强的负向影响,而房价则呈现了明显的正向作用,且系数估计的绝对值最大。公交线路重复度对土地承载压力表现出一定程度的正向影响,而轨道交通点数分布的作用不明显。

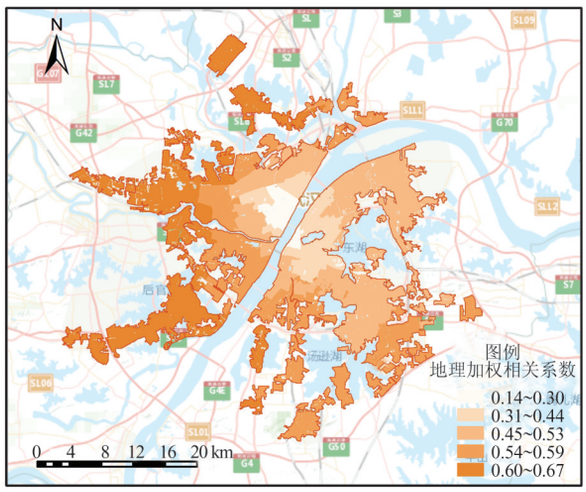


图5 房价与土地承载压力综合评价指标地理加权相关系数空间分布图

Fig. 5 Geographically Weighted Correlation Coefficients Between Comprehensive Indicator of Land Carrying Capacity and House Price

表4 线性回归分析结果

Table 4 Results of Linear Regression

解释变量	估计值
POI混合度	−0.13
通勤指数	−0.17
房价均价	0.27
公交线路重复度	0.015
轨道交通站点数	−0.004

线性回归分析结果体现了全局意义下的影响因子系数,但部分参数估计值难以进行合理解释,如公交线路重复度和轨道交通站点数。本文采用GWR技术对上述模型进行求解,得到调整R^2值为0.69,在拟合优度方面有明显改善与提升。

仍然以GWR模型房价系数估计为例,其空间分布如图6所示。其估计结果与全局线性回归分析的结果符号一致,保持正向影响。与图5中展示的分布类似,整体上,建成区房价均价对土地综合承载压力的作用强度由东北向西南呈增加趋势。汉阳区的江堤街、洲头街、龙阳街、五里墩街等以及洪山区的张家湾街和武汉经济技术开发区的沌阳街等街道,其房价对土地综合承载压力具有较强的影响,而位于建成区中心区域的江岸区台北街、大智街、球场街、四维街、西马街等街道,房价系数的估计值较小。由于中心区域的开发建设时间较早且程度较高,新房开发多以城市空间改造为主,且房价高低与周边已开发的小区紧密相关;而汉阳区、洪山区和武汉经济技术开发区等区域内多以新增空间开发为主,房价

与土地开发活动紧密相关,故对土地承载压力的估计系数较大。

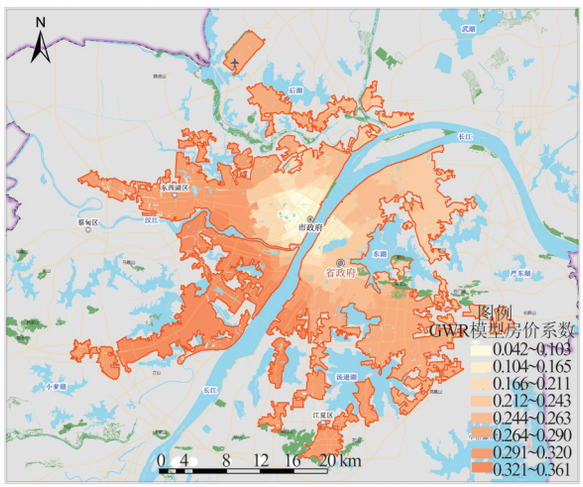


图 6　GWR模型房价系数估计空间分布图

Fig. 6　Coefficient Estimates of House Price of GWR Model

为了进一步展示GWR模型的解释效果,图7展示了GWR模型的局部R^2值分布,R^2值普遍高于0.7,而且高值集中在中心城区,表明GWR模型在该区域拟合优度更好,分析结论的解释效果也更为可靠。

总体来说,GWR技术能够提供精细尺度视角下的多元成因要素关系分析方案,量化估计不同要素在研究区域内呈现的分异性影响。

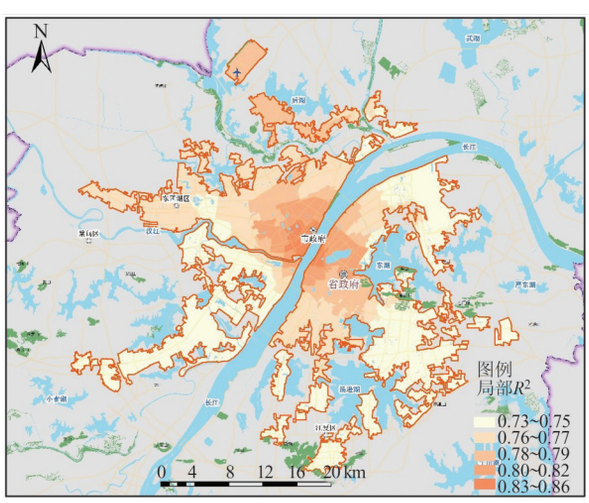


图 7　GWR模型局部R^2值空间分布图

Fig. 7　Local R^2 Values of GWR Model

3　结　语

本文基于GWSS、GWPCA和GWR等地理加权建模技术对武汉市建成区土地资源承载力进行分析评价,从精细尺度视角进行城市级土地资源承载力评价分析,也在复合应用场景下,实现对不同地理加权建模技术的集成应用,充分挖掘其互补性特征与综合应用效果。随着地理加权建模技术的不断拓展,如多尺度GWR技术[16]、地理加权人工神经网络[23]以及其时空拓展[17]等可被更多用于此分析评价框架,而GWmodelS、GWmodel等软件[24-25]的开发将为此技术框架在更多内容与领域的常态化分析评价提供便捷的工具支撑。

参　考　文　献

[1] 张超,杨艳昭,封志明,等. 基于人粮关系的“一带一路”沿线国家土地资源承载力时空格局研究[J]. 自然资源学报,2022,37(3):616-626.
ZHANG Chao, YANG Yanzhao, FENG Zhiming, et al. Spatio-temporal Patterns of the Land Carrying Capacity in the Belt and Road Region Based on Human-Cereals Relationship [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(3): 616-626.

[2] 周侃,樊杰,孙勇. 长江经济带农村相对贫困格局及区域承载力约束机理[J]. 农业工程学报,2021,37(11):249-258.
ZHOU Kan, FAN Jie, SUN Yong. Spatial Pattern of Rural Relative Poverty and Constraint Mechanism of Regional Carrying Capacity in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11): 249-258.

[3] YANG N N, LI J S, LU B B, et al. Exploring the Spatial Pattern and Influencing Factors of Land Carrying Capacity in Wuhan[J]. *Sustainability*, 2019, 11(10): 2786.

[4] 王晟. 杭州市水资源承载力评价及提升路径[J]. 水土保持通报,2018,38(3):307-311.
WANG Sheng. Evaluation and Improvement Approaches of Water Resources Carrying Capacity in Hangzhou City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(3): 307-311.

[5] 张静,曾维华,吴舜泽,等. 一种新的区域环境承载力评价预警方法及应用[J]. 生态经济,2016,32(2):19-22.
ZHANG Jing, ZENG Weihua, WU Shunze, et al. Potential Assessment on Development and Utilization of Regional Environment Carrying Capacity[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(2): 19-22.

[6] 纪学朋,白永平,杜海波,等. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性[J]. 生态学报,2017,37(17):5861-5870.
JI Xuepeng, BAI Yongping, DU Haibo, et al. Research on the Spatial Quantitative Evaluation and

Coupling Coordination Degree of Ecological Carrying Capacity in Gansu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 5861-5870.

[7] 徐勇, 张雪飞, 李丽娟, 等. 我国资源环境承载约束地域分异及类型划分[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(1): 34-43.
XU Yong, ZHANG Xuefei, LI Lijuan, et al. Regional Differentiation and Classification for Constraints of National Resources and Environment Carrying[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(1): 34-43.

[8] 陆大道. 我国的城镇化进程与空间扩张[J]. 城市规划学刊, 2007(4): 47-52.
LU Dadao. Urbanization Process and Spatial Sprawl in China[J]. *Urban Planning Forum*, 2007(4): 47-52.

[9] 罗名海, 蒋子龙, 程琦, 等. 地理国情在武汉市土地资源承载力评价中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2317-2324.
LUO Minghai, JIANG Zilong, CHENG Qi, et al. Carrying Capacity Evaluation of Land Resources in Wuhan Based on the Geographical Condition Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2317-2324.

[10] GOODCHILD M F. The Validity and Usefulness of Laws in Geographic Information Science and Geography[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004, 94(2): 300-303.

[11] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity[J]. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.

[12] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M, Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships [M]. Chichester: Wiley, 2002.

[13] NAKAYA T, FOTHERINGHAM A S, BRUNSDON C, et al. Geographically Weighted Poisson Regression for Disease Association Mapping [J]. *Statistics in Medicine*, 2005, 24(17): 2695-2717.

[14] DONG G P, NAKAYA T, BRUNSDON C. Geographically Weighted Regression Models for Ordinal Categorical Response Variables: An Application to Geo-Referenced Life Satisfaction Data [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018, 70: 35-42.

[15] FOTHERINGHAM A S, YANG W B, KANG W. Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR)[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(6): 1247-1265.

[16] LU B B, BRUNSDON C, CHARLTON M, et al. Geographically Weighted Regression with Parameter-Specific Distance Metrics[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(5): 982-998.

[17] HUANG B, WU B, BARRY M. Geographically and Temporally Weighted Regression for Modeling Spatiotemporal Variation in House Prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3): 383-401.

[18] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARLTON M. Geographically Weighted Summary Statistics—A Framework for Localised Exploratory Data Analysis[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2002, 26(6): 501-524.

[19] HARRIS P, BRUNSDON C, CHARLTON M. Geographically Weighted Principal Components Analysis[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(10): 1717-1736.

[20] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARLTON M. Geographically Weighted Discriminant Analysis[J]. *Geographical Analysis*, 2007, 39(4): 376-396.

[21] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1356-1366.
LU Binbin, GE Yong, QIN Kun, et al. A Review on Geographically Weighted Regression [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1356-1366.

[22] 程琦, 秦思娴, 李建松, 等. 面向城市级资源环境承载力评价的要素尺度下推技术研究[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(5): 69-72.
CHENG Qi, QIN Sixian, LI Jiansong, et al. Scale-Down Techniques of Factors for Evaluation of City-Level Resource and Environment Carrying Capacity [J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(5): 69-72.

[23] DU Z H, WANG Z Y, WU S S, et al. Geographically Neural Network Weighted Regression for the Accurate Estimation of Spatial Non-Stationarity[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2020, 34(7): 1353-1377.

[24] LU B B, HU Y G, YANG D Y, et al. GWmodelS: A Software for Geographically Weighted Models [J]. *SoftwareX*, 2023, 21: 101291.

[25] LU B B, HARRIS P, CHARLTON M, et al. The GWmodel R Package: Further Topics for Exploring Spatial Heterogeneity Using Geographically Weighted Models[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2014, 17(2): 85-101.