

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.06.012

长江中游城市群建设用地的时空演变及驱动机制

王 坤, 贺清云, 梅予健, 莫振淳

(湖南师范大学 地理科学学院, 湖南 长沙 410006)

摘 要: 以城市群为对象研究建设用地的时空演变及其驱动力, 对促进国土空间高质量发展具有重要价值。故以长江中游城市群为例, 利用多期 Landsat TM/ETM 遥感数据, 综合运用扩张强度指数、多元回归分析、地理探测器等方法, 对该城市群建设用地演变的时空特征及其驱动机制进行了分析。结果表明: 2000—2020 年间, 长江中游城市群建设用地持续扩大, 不同时段的增长面积和扩张强度有所不同, 且研究期内城镇主导型、中度开发型和低度开发型斑块数量明显上升, 而自然生态型斑块数量明显下降; 城市群内各地区建设用地演变存在明显差异, 总体呈现出“多中心扩散”的空间格局; 人口密度、GDP 密度、距交通线距离等是城市群建设用地演变的主要驱动力, 多个因子交互的影响大于单个因子的影响。因此, 建议加强中心城市的辐射带动作用, 推动中小城市产业发展和配套建设, 建立大中小城市有效协作的机制和路径, 并促进土地制度及政策的改革与完善, 激活城市存量用地, 推进长江中游城市群国土空间高质量发展。

关键词: 建设用地; 时空演变; 驱动机制; 地理探测器; 长江中游城市群

中图分类号: F301.2; TU984.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2022)06-0079-11

引文格式: 王 坤, 贺清云, 梅予健, 等. 长江中游城市群建设用地的时空演变及驱动机制 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(6): 79-89.

Spatio-Temporal Evolution and Driving Mechanism of Urban Agglomeration Construction Land in the Middle Reaches of the Yangtze River

WANG Kun, HE Qingyun, MEI Yujian, MO Zhenchun

(School of Geography Science, Hunan Normal University, Changsha 410006, China)

Abstract: It is of great value to study the spatio-temporal evolution of construction land with its driving forces in urban agglomeration for the promotion of a high-quality development of territorial space. Taking urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River as an example, an analysis has been made of the spatio-temporal characteristics and driving mechanism of the evolution of urban agglomeration construction land by using multi-stage Landsat TM/ETM data, expansion intensity index, multiple regression and geographic detector. The results show that from 2000 to 2020, the construction land of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River shows a continual expansion trend, with a diversity in the growth area and expansion intensity in different periods. Throughout the study period, the number of urban-dominated, moderately-developed and lowly-developed patches has increased significantly, while the number of natural ecological patches has decreased significantly. There is a significant diversity in the intensity of construction land expansion among different regions within the urban agglomeration, presenting an

收稿日期: 2022-03-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ4277)

作者简介: 王 坤 (1995-), 男, 河南驻马店人, 湖南师范大学硕士生, 主要研究方向为城市与区域规划,

E-mail: wangkun@hunnu.edu.cn

通信作者: 贺清云 (1955-), 女, 湖南湘潭人, 湖南师范大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为区域经济发展,

E-mail: heqingyun@hunnu.edu.cn

overall spatial pattern of “polycentric diffusion”. Population density, GDP density and distance from traffic lines are the main driving forces for the expansion and evolution of construction land in urban agglomeration, with the influence of multiple factor interaction greater than that of a single factor. Therefore, it is suggested to strengthen the radiation and driving role of central cities, seeking the promotion of the industrial development and supporting construction of small and medium-sized cities, establishment of mechanisms and paths for an effective cooperation between large and medium-sized cities, facilitation of the reform and improvement of land systems and policies, activation of the urban stock land, and acceleration of the high-quality development of land and space of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River.

Keywords: construction land; spatiotemporal evolution; driving mechanism; geodetector; urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

0 引言

新时代国土空间规划体系的建立,要求以高质量发展理念为指引,做好国土空间开发的顶层设计,科学合理布局不同功能空间,为国家发展提供空间保障。建设用地是城镇空间及乡村聚落的基本空间载体,中国40a来的快速城镇化和工业化历程,使得以土地快速非农化为主要表现的建设用地扩张日益加剧^[1-2]。在此过程中,产生了建设用地无序蔓延、用地效率低下、生态环境污损等问题^[3]。城市群是国家城镇化和工业化发展到高级阶段的产物^[4],是城镇体系的主体形态和生产格局的增长极点^[5],也是建设用地扩张最为活跃的区域,面临着更加严峻的用地空间矛盾^[6]。在高质量推进国土空间开发的背景下,识别城市群地区建设用地时空演变的特征和规律,探究其背后的动力因子和驱动机制,对城市群国土空间发展规划和决策具有重要作用。

建设用地扩张的时空演变和驱动机制,是土地利用变化(land-use and land-cover change, LUCC)研究的重要内容,也是当前空间城镇化研究的热点之一^[2]。学者们运用密度指数^[7]、扩张强度指数^[8]、景观扩张系数^[9]等方法,从国家^[10]、区域^[11]、省域^[12]、城市^[13]等不同尺度,对建设用地的时空演变进行了研究,积累了丰富成果。同时,不少学者运用关联分析、回归分析等模型,探讨了建设用地演变的影响因素^[14-15],发现自然环境、经济密度、人口密度、居民生活水平以及政策等是其中主要的影响因素^[16-17]。随着城市群在新型城镇化发展和国土空间组织中的地位和作用不断上升^[18-19],学术界对城市群建设用地的关注日益增强,在城市群建设用地的扩张模式^[20]、空间特征^[21]、与经济社会因子的关系^[22]等方面进行了有益探索。然而,目前关于城市群建设用地的研究多以东部地区发育较好的城市群为研究对象,且在驱

动机制的分析中缺少对政策约束、城市群内部相互作用等因素的考虑。

鉴于此,本文以长江中游城市群为研究对象,利用Landsat TM/ETM遥感数据,采用扩张强度指数对建设用地的时空演变特征进行研究,并综合运用最小二乘法(ordinary least squares, OLS)和地理探测器模型(geodetector model),从自然环境、经济社会、交通区位、政策约束、空间溢出等综合视角出发,对建设用地时空演变的驱动机制进行分析,以期对现有文献进行补充,同时为长江中游城市群国土空间高质量发展提供参考。

1 数据来源和研究方法

1.1 研究区概况

长江中游城市群是长江经济带的重要组成部分,地理区位上承东启西、连南接北。城市群内部不同地区发育水平不同,在建设用地的扩张过程中具有各自特点,因此更具典型性。2021年7月发布的《中共中央国务院关于新时代推动中部地区高质量发展的指导意见》中明确指出,要促进长江中游城市群高质量发展。2022年2月国家发展改革委员会印发的《长江中游城市群发展“十四五”实施方案》中,强调要优化城市群空间结构,全力打造全国高质量发展的重要增长极。在此背景下,研究建设用地的时空演变和驱动机制是长江中游城市群国土空间优化开发和高质量发展面临的重要课题。根据国务院2015年批准实施的《长江中游城市群发展规划》,长江中游城市群包括武汉城市群、环长株潭城市群和环鄱阳湖城市群3个子城市群,范围涵盖湖北省13市、湖南省8市、江西省10市,国土面积约为 $31.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2020年末,长江中游城市群的常住人口为12 652.32万人,GDP为94 134.11亿元,研究区的地理位置如图1所示。

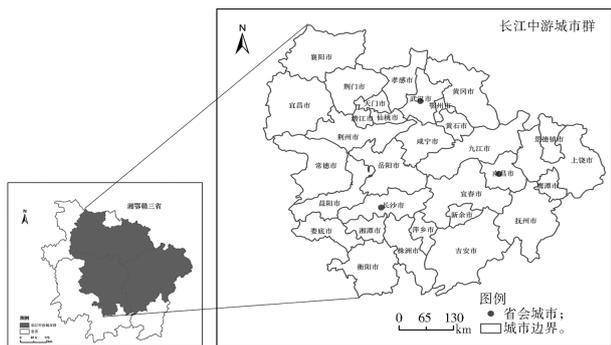


图 1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Geographical location of the targeted area

1.2 数据来源和处理

土地利用数据是基于 Landsat TM/ETM 遥感影像解译得到的, Landsat TM/ETM 数据来源于中科院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。高程和坡度的原始数据来自国家地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn/>), 然后借助 ArcGIS 10.8 中的 Zonal Statistics tool 和 Slope Analysis tool 工具计算, 得到各研究单元的高程和坡度平均值。人口密度和 GDP 密度数据由中国资源环境科学数据中心提供 (<http://www.resdc.cn/>)。交通线路数据来源于全球路网开放平台 (<https://www.openstreetmap.org/>), 距交通线的距离利用 ArcGIS 10.8 中的 Euclidean Distance Analysis 工具计算得到。政策性约束数据由湖北省、湖南省、江西省的自然资源厅提供。空间溢出效应所涉及的经济社会统计数据来源于前述 3 省的统计年鉴, 然后在 ArcGIS 10.8 中运用 Block Statistics tool 工具对其邻域作用进行计算。

1.3 研究方法

1.3.1 影响因素的选取

本文设计的建设用地扩张及空间分异影响因素指标体系见表 1。

表 1 建设用地扩张及空间分异影响因素指标体系

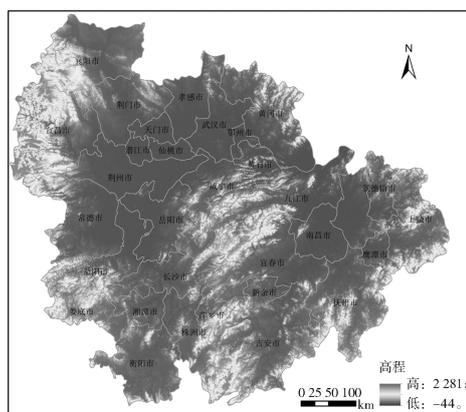
Table 1 Indicator system of driving factor of construction land expansion and spatial differentiation

因子类型	影响因子	符号
自然环境	高程	X_1
	坡度	X_2
经济社会	人口密度	X_3
	GDP 密度	X_4
交通区位	距铁路线距离	X_5
	距主要公路距离	X_6
政策约束	是否自然保护区	X_7
溢出效应	邻域作用	X_8

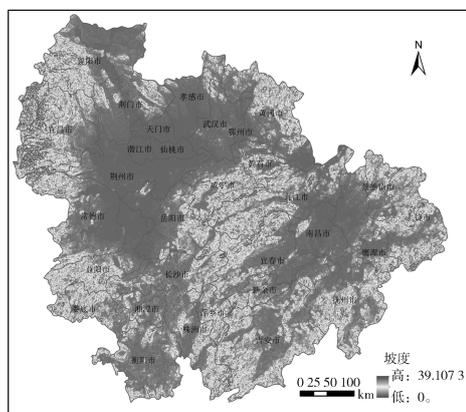
关于建设用地演变的驱动力研究, 现已受到科研工作者的广泛关注, 但是目前学术界尚未建立统一

的标准化指标体系和分析框架。本文参考有关研究成果^[12, 21], 首先选取自然环境(高程、坡度)、经济社会(人口密度、GDP 密度)、交通区位(距铁路线距离、距主要公路距离)3 方面因素, 在此基础上加入政策约束性因素和空间溢出效应因素, 对驱动机制的分析框架进行优化和完善。

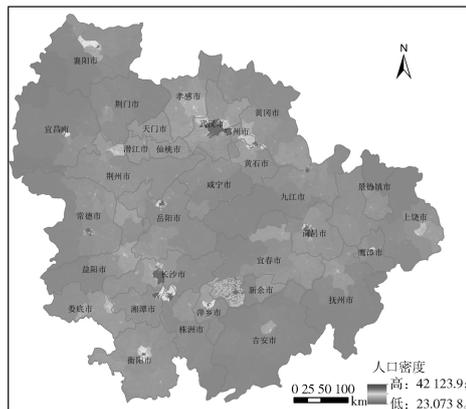
同时, 为了更加直观地展现各影响因素在空间上的分布情况, 更加深刻地了解各影响因素的空间分布对建设用地时空演变差异的影响, 本文对各影响因素的空间分布情况进行了可视化表现, 具体的分布情况如图 2 所示。



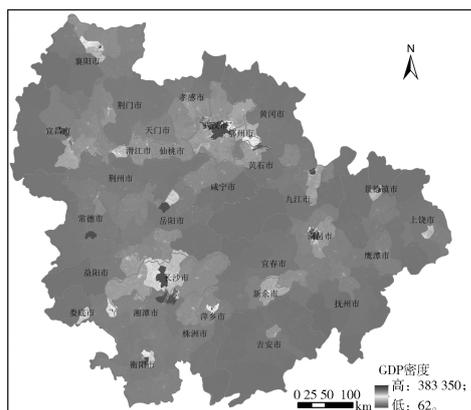
a) 高程



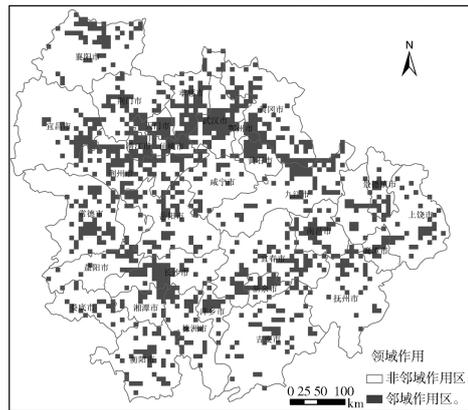
b) 坡度



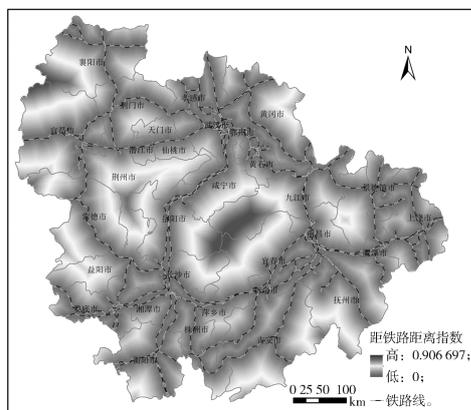
c) 人口密度



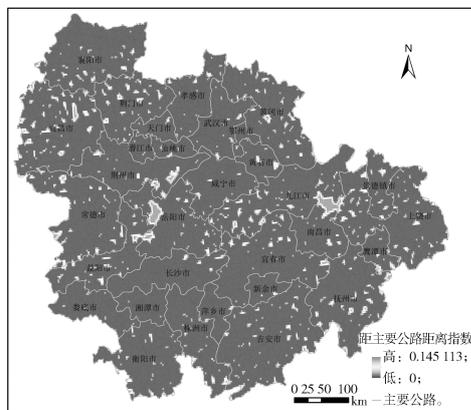
d) GDP 密度



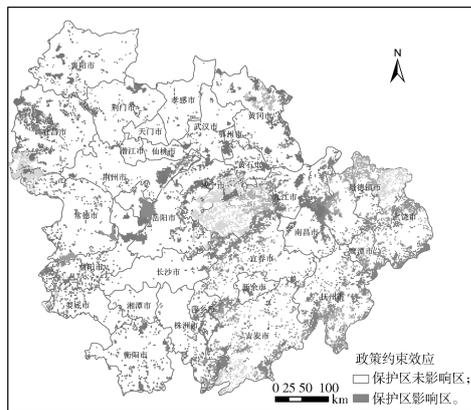
h) 邻域作用



e) 距铁路距离指数



f) 距主要公路距离指数



g) 政策约束效应

图2 长江中游城市群建设用地扩张影响因素的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of influencing factors of construction land expansion in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

需要指出的是,新时期国土空间规划特别重视对生态安全和粮食安全的保障,强调要处理好开发与保护的关系,已经设立的各种生态保护区以及生态保护红线、永久基本农田、城市开发边界的划定形成土地规划开发的底线管控,进而对建设用地扩张演变形成政策约束力。但是目前研究区最新的国土空间规划成果尚未公布,且“三区三线”的划定更多地是对未来建设用地扩张产生约束,因此本文暂未将“三区三线”的规划指标纳入驱动因素指标中,而是选取了地质公园、国家公园、自然风景名胜区等生态保护性区域作为政策约束性因素,以解释政策的空间约束性对建设用地过去 20 a 演变的影响。与此同时,根据地理学第一定律,城市群内部不同城市之间,特别是相邻城市之间存在多样化的相互作用,这种作用会推动中心城市或大城市土地用地变化向周边扩散,从而对区域建设用地演变产生影响,因此,本文将邻域作用作为空间溢出效应因素。

1.3.2 建设用地扩张强度指数

建设用地扩张强度指数 (construction land expansion intensity index, CEI) 表示某一地域单元建设用地面积在一个间隔时期内变化的相对强度特征,可以直观地反映某地域单元建设用地在一定时期内变化的速率和强度^[20, 23],其计算公式为

$$I_{CEi} = \frac{A_i^2 - A_i^1}{A_i^1 \times \Delta t} \quad (1)$$

式中: I_{CEi} 为第 i 个地域单元建设用地扩张强度指数;
 A_i^1 和 A_i^2 分别为 t_1 、 t_2 时刻第 i 个单元的建设用地面积;

Δt 为 t_1 到 t_2 的间隔时间。

1.3.3 地理探测器

空间分异是各种地理现象的基本属性和空间表现,地理探测器是测定地理现象的空间分异性并揭示其背后驱动力的一种有效工具。此外,它还能探测两因子相互作用对被解释变量产生的合力^[24]。地理探测器最开始被应用于疾病成因的解析方面^[25],现已被应用至土地利用、环境问题、区域经济、旅游发展等领域^[26-27]。地理探测器主要包括分异和因子探测、交互作用探测、风险区探测及生态探测4种,探测值 q 的表达式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$, 为因子的分层;

N_h 和 N 分别为分区 h 和全区的单元数;

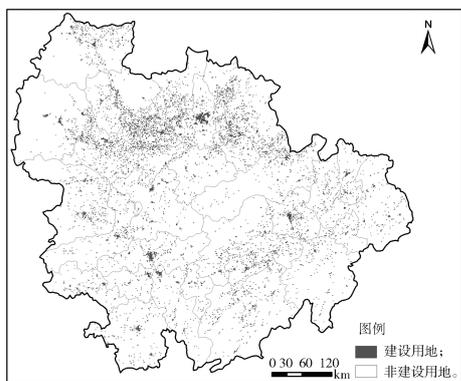
σ_h^2 和 σ^2 分别为分区 h 和全区的因变量的方差。

探测值 q 的取值范围为 $[0, 1]$, 其大小说明自变量对因变量作用分异性的解释力: 值越接近 1, 解释力越强; 反之则越弱。

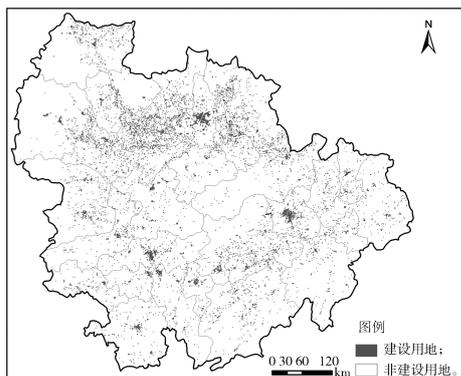
2 建设用地时空演变分析

2.1 建设用地演变的时序特征分析

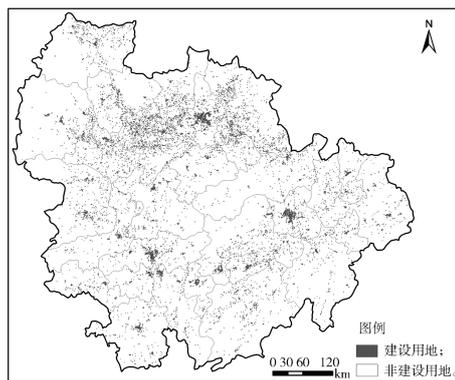
2000—2020年长江中游城市群建设用地扩张过程如图3所示。



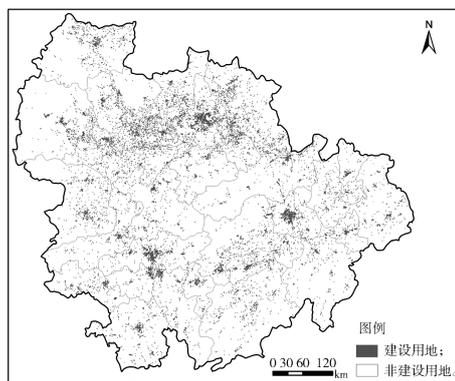
a) 2000年



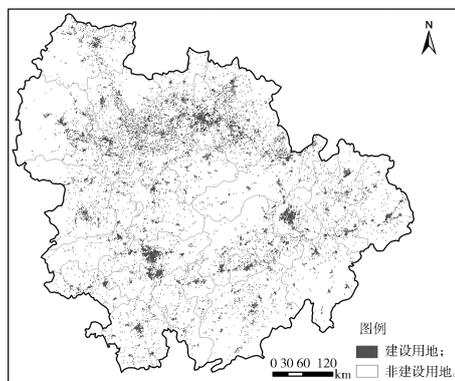
b) 2005年



c) 2010年



d) 2015年



e) 2020年

图3 2000—2020年长江中游城市群建设用地扩张过程

Fig. 3 Construction land expansion process of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2020

由图3所示长江中游城市群建设用地扩张过程可以得知,选定的研究期内,长江中游城市群的建设用地持续扩大,建设用地面积由2000年的8 454.52 km²增加至2020年的15 098.49 km²,每年平均增长了约332.20 km²。

在不同时段,建设用地增长面积和扩张强度有所不同,2000—2020年各时段建设用地增长面积及扩张强度对比如图4所示。

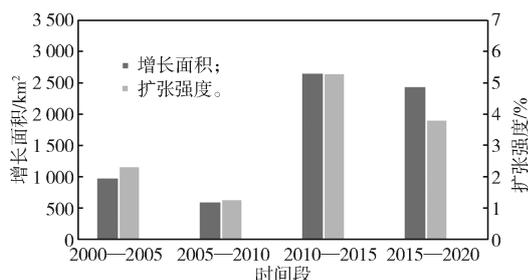


图4 2000—2020年各时段长江中游城市群建设用地增长面积及扩张强度对比

Fig. 4 Comparison of construction land growth area and expansion intensity of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2020

由图4可以得知,4个时段内长江中游城市群建设用地的增长面积分别为979.28, 596.09, 2 654.16, 2 439.44 km², 扩张强度分别为2.32%, 1.26%, 5.29%, 3.81%。2000—2010年间,长江中游城市群建设用地整体扩张强度相对较低,且在2005—2010年间出现一定的下降之势,这一定程度上受2007年提出的“两型社会”的影响;2010—2015年间,建设用地扩张规模和扩张强度较大,扩张强度超过5%,这一阶段是城市群快速发育时期;2015—2020年间,受新型城镇化、高质量发展等战略和理念的影响,建设用地扩张强度有所下降,扩张速度逐渐减缓。

为了深化对长江中游城市群建设用地演变过程的认识,本文以每个网格单元建设用地面积所占比例变化进一步表征其时序特征。基于各网格单元建设用地面积所占比例的计算结果,参考相关研究成果^[28],将所有网格单元划分为如下4种类型:自然生态型(0~1%)、低度开发型(>1%~20%)、中度开发型(>20%~60%)、城镇主导型(>60%~100%)。2000—2020年长江中游城市群建设用地不同类型所占比例的变化情况见图5。

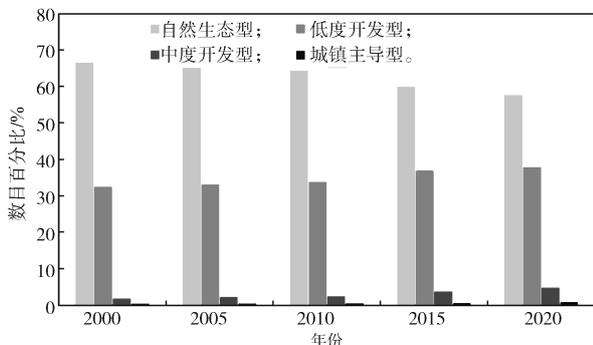


图5 2000—2020年长江中游城市群建设用地不同类型所占比例的变化情况

Fig. 5 Changes in the proportion of different types of construction land in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2020

由图5可以看出,研究期间长江中游城市群自然生态型单元的比例呈现出不断下降的变化趋势,数目百分比由66.19%下降至57.38%;低度开发型、中度开发型以及城镇主导型单元的比例呈现出不断上升的变化趋势,其数目百分比分别由32.17%, 1.53%, 0.17%上升至37.57%, 4.49%, 0.55%。其中,城镇主导型单元的数量由17个增加至80个。以上结果表明,在2000—2020年间,城镇主导型斑块、中度开发型斑块和低度开发型斑块的数量明显上升,而自然生态型斑块的数量明显下降,这与长江中游城市群城镇化发展的实际情况相符。

2.2 建设用地演变的空间格局分析

图6所示为2000—2020年长江中游城市群建设用地扩张的空间变化情况。

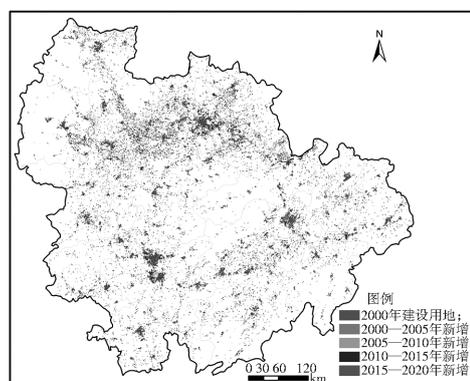


图6 2000—2020年长江中游城市群建设用地扩张的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of construction land expansion with urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River during 2000—2020

从图6所示建设用地扩张的空间分布图可以看出,长江中游城市群不同地区建设用地的扩张存在明显的空间差异。扩张规模和扩张强度较大的城市主要分布在大城市及其周边地区,呈现出多中心的特征,其中长沙、武汉、南昌、衡阳、襄阳、九江等地扩张明显,扩张面积分别为617.89, 498.72, 419.19, 345.02, 214.36, 313.22 km², 扩张强度分别为10.14%, 3.92%, 7.19%, 8.85%, 2.98%, 5.95%。与此同时,围绕大城市和中心城市向外拓展,是长江中游城市群建设用地空间扩张的一个显著特征,特别是在武汉都市圈、长株潭都市圈和南昌都市圈,建设用地连片向外扩展的特征明显。这主要是因为长沙、武汉、南昌分别是湖南、湖北、江西3省的省会城市,具有政治、经济、文化、交通等方面的优势,人口、经济等生产要素不断集聚,产生强烈的建设用地需求,推动建设用地大幅扩展。但是,由于可用的建设用地总量有限,致使其经济要素向外溢出,其周围地区便成为建设空间溢出效应的

主要承载地。总体上看,长江中游城市群建设用地的空间演变呈现出一种“多中心扩散”的格局。

3 建设用地时空演变的驱动机制分析

3.1 建设用地动态演变的影响因子分析

为揭示长江中游城市群建设用地演变的驱动因素和作用力大小,以建设用地扩张强度为因变量,以

高程、坡度、人口密度、GDP密度、距主要公路距离、距铁路距离、是否自然保护区和邻域作用共8项指标为自变量,首先对数据进行标准化处理,并将各指标数据关联匹配到5 km×5 km的网格上,然后利用ArcGIS 10.8软件中的空间统计分析工具进行OLS模型运算,各变量均通过了5%的显著性检验,运算所得主要结果如表2所示。

表2 OLS回归分析结果
Table 2 OLS regression analysis results

因子	系数	T值	P值	概率稳健性	方差膨胀因子
高程	-0.141 961	-1.074 693	0.007 304	0.016 295	2.067 356
坡度	-0.085 792	-0.775 528	0.013 427	0.104 168	1.749 267
人口密度	0.855 476	11.647 849	0.000 514	0.002 171	1.052 390
GDP密度	0.745 041	7.135 065	0.000 923	0.002 619	1.017 405
距铁路线距离	0.489 327	3.572 587	0.000 041	0.006 706	3.842 609
距主要公路距离	0.534 870	4.090 976	0.000 896	0.008 210	3.240 891
是否自然保护区	-0.496 208	-2.662 389	0.003 659	0.007 354	1.553 376
邻域作用	0.175 570	1.497 956	0.132 058	0.282 126	2.478 215
R^2	0.788 512	-	-	-	-
F	5.655 649	-	-	-	-
K	16.785 975	-	-	-	-
$AICc$	253.734 436	-	-	-	-

由表2可以得知,人口密度、GDP密度、距主要公路距离、距铁路线距离及邻域作用的回归系数为正值,说明其与建设用地扩张强度呈正相关关系。其中,人口密度、GDP密度对建设用地扩张的驱动作用最大,回归系数分别达0.855 476和0.745 041,其次是距主要公路距离、距铁路线距离和邻域作用。这表明长江中游城市群建设用地扩张以人口和经济需求驱动为主;而距交通线的远近很大程度上影响了地方的可达性和区位性,从而吸引建设用地向交通线靠近和增长;邻域作用则在一定程度上促进了城市群地区经济溢出效应的发挥,带动了大城市和都市圈周边地区建设用地的扩张。高程、坡度和是否自然保护区的回归系数为负值,表明其与建设用地扩张强度呈负相关关系,说明其对建设用地扩张具有一定的约束和限制作用。其中,是否为自然保护区对建设用地扩张的限制力较强,回归系数为-0.496 208,高程和坡度次之。这表明政策性的空间限制力对长江中游城市群建设用地扩张产生了较大的负向抑制作用,在长江流域“共抓大保护、不搞大开发”等一系列生态保护战略谋划背景下,生态保护的空間约束性政策发挥了强有力的作用;而高程和坡度作为自然环境的基本形态,在一定程度上限制了建设用地空间蔓延的程度和方向。

3.2 建设用地演变空间差异的驱动因子作用分析

为进一步揭示建设用地空间演变分异性形成的

原因,本研究利用地理探测器对各驱动因子的作用力及交互影响力进行了探测与分析。

3.2.1 单因子分析

首先,对各指标要素的栅格数据依照自然间断点分级法进行重分类,然后对建设用地扩张强度及各要素指标进行采样,最后参照公式(2),利用GeoDetector软件对各因子的作用力进行运算,得到的建设用地空间分异因子探测结果如图7所示。

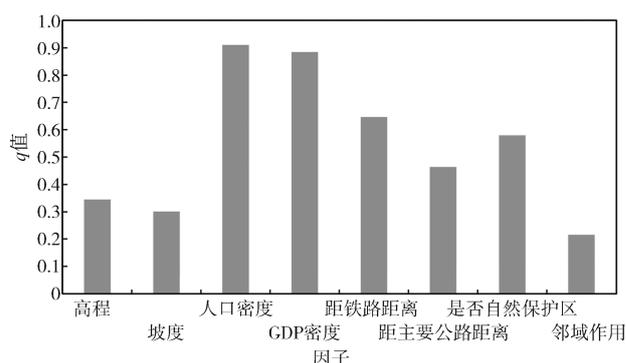


图7 长江中游城市群建设用地空间分异的因子探测结果
Fig. 7 Factor detection results of spatial differentiation of construction land in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

从图7所示探测结果看,各因子探测值 q 由大到小依次为人口密度(0.911 457)、GDP密度(0.885 693)、距铁路线距离(0.647 957)、是否自然保护区(0.580 759)、距主要公路距离(0.464 912)、

高程 (0.345 767)、坡度 (0.301 895)、邻域作用 (0.216 780)。由此可以得知,长江中游城市群建设用地空间演变的分异格局主要受人口密度、GDP 密度、距铁路线距离、是否为自然保护区等因素驱动 (q 值大于 0.5),而距主要公路距离、高程、坡度、邻域作用等对建设用地空间演变的分异格局作用相对较小 (q 值小于 0.5)。

具体来说,建设用地的剧烈扩张区主要集中在长沙、武汉、南昌等大城市及其周边,其经济和产业基础较好,对人口等要素的吸引力较强,加之一系列高等级的开发区、高新区大多布局于此,形成了建设用地巨大的需求驱动力。建设用地的低度扩张区主要集中在经济较为落后的偏远山区、传统农区、生态保育区,如武陵山-雪峰山片区、罗霄山片区等,其面临自然基底和生态保护政策的双重约束,且经济发展水平较低、人口流失较为严重、城镇化带动作用较弱,导致建设用地扩张程度较低。沿主要交通线路

延伸是建设用地空间演变的一个重要模式,京广通道、沿江通道、沪昆通道、京九通道等已成为长江中游城市群建设用地扩展所依托的主要轴线,特别是围绕一些高铁站、国(省)干道等打造的一批高铁新城、经济开发区等,带动了建设用地的轴线扩张。此外,在武汉都市圈、长株潭都市圈和南昌都市圈周围及一些工业基础较好的大中城市周围,受中心城市的辐射溢出作用明显,很大程度上推动了其建设用地的增长;但邻域作用的探测值相对较小,这也说明长江中游城市群内大城市和都市圈的带动作用不高,各城市间的相互协调作用还较弱。

3.2.2 因子交互分析

与单因子分析类似,利用 GeoDetector 软件对各因子两两交互后的影响力进行运算,得到的各因子两两交互后对长江中游城市群建设用地空间分异作用探测结果见表 3。

表 3 长江中游城市群建设用地空间分异的交互作用探测结果

Table 3 Detection results of interaction of construction land in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River

$q(A \cap B)$	$\max(q(A), q(B))$	$q(A)+q(B)$	比较结果
$q(x_1 \cap x_2) = 0.391\ 128$	$\text{Max}(q(x_1), q(x_2)) = 0.345\ 767$	$q(x_1) + q(x_2) = 0.647\ 662$	线性增强
$q(x_1 \cap x_3) = 0.931\ 144$	$\text{Max}(q(x_1), q(x_3)) = 0.911\ 457$	$q(x_1) + q(x_3) = 1.257\ 224$	线性增强
$q(x_1 \cap x_4) = 0.911\ 283$	$\text{Max}(q(x_1), q(x_4)) = 0.857\ 693$	$q(x_1) + q(x_4) = 1.231\ 462$	线性增强
$q(x_1 \cap x_5) = 0.721\ 819$	$\text{Max}(q(x_1), q(x_5)) = 0.647\ 957$	$q(x_1) + q(x_5) = 0.993\ 724$	线性增强
$q(x_1 \cap x_6) = 0.621\ 895$	$\text{Max}(q(x_1), q(x_6)) = 0.464\ 912$	$q(x_1) + q(x_6) = 0.810\ 679$	线性增强
$q(x_1 \cap x_7) = 0.931\ 855$	$\text{Max}(q(x_1), q(x_7)) = 0.580\ 759$	$q(x_1) + q(x_7) = 0.926\ 526$	非线性增强
$q(x_1 \cap x_8) = 0.590\ 941$	$\text{Max}(q(x_1), q(x_8)) = 0.345\ 767$	$q(x_1) + q(x_8) = 0.562\ 547$	非线性增强
$q(x_2 \cap x_3) = 0.920\ 862$	$\text{Max}(q(x_2), q(x_3)) = 0.911\ 457$	$q(x_2) + q(x_3) = 1.213\ 352$	线性增强
$q(x_2 \cap x_4) = 0.890\ 941$	$\text{Max}(q(x_2), q(x_4)) = 0.885\ 693$	$q(x_2) + q(x_4) = 1.187\ 588$	线性增强
$q(x_2 \cap x_5) = 0.695\ 908$	$\text{Max}(q(x_2), q(x_5)) = 0.647\ 957$	$q(x_2) + q(x_5) = 0.949\ 852$	线性增强
$q(x_2 \cap x_6) = 0.551\ 502$	$\text{Max}(q(x_2), q(x_6)) = 0.464\ 912$	$q(x_2) + q(x_6) = 0.766\ 807$	线性增强
$q(x_2 \cap x_7) = 0.907\ 054$	$\text{Max}(q(x_2), q(x_7)) = 0.580\ 759$	$q(x_2) + q(x_7) = 0.882\ 654$	非线性增强
$q(x_2 \cap x_8) = 0.521\ 968$	$\text{Max}(q(x_2), q(x_8)) = 0.301\ 895$	$q(x_2) + q(x_8) = 0.518\ 675$	非线性增强
$q(x_3 \cap x_4) = 0.980\ 566$	$\text{Max}(q(x_3), q(x_4)) = 0.911\ 457$	$q(x_3) + q(x_4) = 1.797\ 154$	线性增强
$q(x_3 \cap x_5) = 0.973\ 166$	$\text{Max}(q(x_3), q(x_5)) = 0.911\ 457$	$q(x_3) + q(x_5) = 1.559\ 414$	线性增强
$q(x_3 \cap x_6) = 0.941\ 069$	$\text{Max}(q(x_3), q(x_6)) = 0.911\ 457$	$q(x_3) + q(x_6) = 1.376\ 369$	线性增强
$q(x_3 \cap x_7) = 0.961\ 842$	$\text{Max}(q(x_3), q(x_7)) = 0.911\ 457$	$q(x_3) + q(x_7) = 1.492\ 216$	线性增强
$q(x_3 \cap x_8) = 0.930\ 523$	$\text{Max}(q(x_3), q(x_8)) = 0.911\ 457$	$q(x_3) + q(x_8) = 1.128\ 237$	线性增强
$q(x_4 \cap x_5) = 0.971\ 161$	$\text{Max}(q(x_4), q(x_5)) = 0.885\ 693$	$q(x_4) + q(x_5) = 1.533\ 651$	线性增强
$q(x_4 \cap x_6) = 0.901\ 188$	$\text{Max}(q(x_4), q(x_6)) = 0.885\ 693$	$q(x_4) + q(x_6) = 1.350\ 605$	线性增强
$q(x_4 \cap x_7) = 0.942\ 244$	$\text{Max}(q(x_4), q(x_7)) = 0.885\ 693$	$q(x_4) + q(x_7) = 1.466\ 452$	线性增强
$q(x_4 \cap x_8) = 0.935\ 706$	$\text{Max}(q(x_4), q(x_8)) = 0.885\ 693$	$q(x_4) + q(x_8) = 1.102\ 473$	线性增强
$q(x_5 \cap x_6) = 0.701\ 105$	$\text{Max}(q(x_5), q(x_6)) = 0.647\ 957$	$q(x_5) + q(x_6) = 1.112\ 869$	线性增强
$q(x_5 \cap x_7) = 0.833\ 584$	$\text{Max}(q(x_5), q(x_7)) = 0.647\ 957$	$q(x_5) + q(x_7) = 1.228\ 716$	线性增强
$q(x_5 \cap x_8) = 0.794\ 393$	$\text{Max}(q(x_5), q(x_8)) = 0.647\ 957$	$q(x_5) + q(x_8) = 0.864\ 737$	线性增强
$q(x_6 \cap x_7) = 0.753\ 207$	$\text{Max}(q(x_6), q(x_7)) = 0.580\ 759$	$q(x_6) + q(x_7) = 1.045\ 671$	线性增强
$q(x_6 \cap x_8) = 0.660\ 887$	$\text{Max}(q(x_6), q(x_8)) = 0.464\ 912$	$q(x_6) + q(x_8) = 0.681\ 692$	线性增强
$q(x_7 \cap x_8) = 0.614\ 253$	$\text{Max}(q(x_7), q(x_8)) = 0.580\ 759$	$q(x_7) + q(x_8) = 0.797\ 539$	线性增强

注: 当 $q(A \cap B) > q(A)+q(B)$ 时, 为非线性增强; 当 $\text{Max}(q(A), q(B)) < q(A \cap B) < q(A)+q(B)$ 时, 为线性增强。

从表3所示交互影响力探测结果看,各因子两两交互后对建设用地空间演变的影响格局所产生的影响皆呈现出扩大之势。其中,人口密度和GDP密度因子交互后的影响力最强,两者交互作用后的探测值高达0.980 566;高程、坡度与是否自然保护区因子交互后,对建设用地的空间演变的解释力显著提升,其探测值分别为0.931 855和0.907 054;距主要公路距离、邻域作用与人口密度、GDP密度等因子交互后对空间演变的解释力也出现明显增长。由此可知,交互作用对建设用地空间演变影响格局的影响力,显著高于单个因子的影响力。

4 结论与讨论

本文以长江中游城市群为例,结合2000、2005、2010、2015和2020年Landsat遥感影像提取建设用地数据,利用扩张强度指数、多元回归分析、地理探测器等方法,分析了建设用地20a来的时空演变格局及其驱动机制,主要结论如下:

1) 研究期内,长江中游城市群建设用地持续扩大,不同时段建设用地增长面积和扩张强度有所不同。2000—2010年,长江中游城市群建设用地整体扩张强度相对较低;2010—2015年,长江中游城市群建设用地的整体扩张强度明显提升;2015—2020年,长江中游城市群建设用地的整体扩张强度有所减弱。城镇主导型斑块、中度开发型斑块和低度开发型斑块的数目在研究期内明显上升,而自然生态型斑块的数目则明显下降。

2) 长江中游城市群各地区建设用地演变过程存在明显分异。扩张面积和扩张强度较大的主要分布在大城市及其周边,长沙、武汉、南昌、衡阳、襄阳、九江等城市扩张明显;在武汉都市圈、长株潭都市圈和南昌都市圈周围,建设用地连片向外扩展明显,总体呈现出“多中心扩散”的空间格局。

3) 长江中游城市群建设用地演变以人口和经济需求驱动为主,距主要公路距离、距铁路线距离和邻域作用也具有一定的正向促进作用,而高程、坡度和是否自然保护区与建设用地扩张呈负相关关系。地理探测结果表明,建设用地空间演变的影响格局受人口密度、GDP密度、距铁路线距离、是否自然保护区等因素的影响较大,而距主要公路距离、高程、坡度、邻域作用等因素的作用相对较小,且各因子两两交互所产生的影响呈扩大之势,其对建设用地空间演变影响的解释力显著高于单个因子的解释力。

综上所述,长江中游城市群仍处于快速城镇化阶

段,建设用地演变表现出明显的时序阶段性和空间差异性。人口、产业等要素不断向城市聚集,对建设用地的增长产生了较强的驱动作用,而长江经济带战略的实施对国土空间开发提出了更高要求,政策性空间约束对建设用地扩张产生了不小的抑制作用,成为国土空间有效管控和优化布局的重要手段。同时,中心城市及大城市的辐射溢出效应表现不佳,使邻域作用影响较小,中小城市发展的活力不足,难以有效吸引人口和要素集聚。因此,为推进长江中游城市群国土空间高质量发展,提出以下建议:

1) 积极加强中心城市及大城市的辐射带动作用,加快经济发展方式转变和产业结构优化升级,着力推动中小城市产业发展和配套建设,提升要素集聚吸引力,建立大中小城市及小城镇产业、技术、资金、信息等有效协作的机制和路径,完善交通等基础设施配置,以人口、产业、要素为依托推动国土空间集约、高效、均衡发展;

2) 加快促进土地制度及政策的改革与完善,激活城市存量用地,推进农村宅基地有效退出,强化生态保护和耕地保护政策对空间开发的管控,以新发展理念引导城市群建设用地合理布局,实现地域空间结构有序、功能协调、管控有效。

需要指明的是,新一轮国土空间规划重视空间的高质量发展,如何处理好开发与保护的关系,协调好经济建设与生态保护、粮食生产之间的关系,是国土空间未来高质量发展过程中的重要内容,并且对建设用地未来的变化具有重要影响。但是,由于篇幅所限和目前最新国土空间规划相关数据的获取存在难度,本文没有将“三区三线”指标纳入分析中,对城市群建设用地未来演变的预测模拟缺乏深入分析。因此,后续将基于国土空间规划最新成果,采用相关的空间模型,进一步研究城市群建设用地的动态模拟预测。

参考文献:

- [1] 刘彦随,严 斌,王艳飞.新时期中国城乡发展的主要问题与转型对策[J].经济地理,2016,36(7):1-8. LIU Yansui, YAN Bin, WANG Yanfei. Urban-Rural Development Problems and Transformation Countermeasures in the New Period in China[J]. Economic Geography, 2016, 36(7): 1-8.
- [2] 吕 晓,黄贤金.建设用地扩张的研究进展及展望[J].地理与地理信息科学,2013,29(6):51-58. LÜ Xiao, HUANG Xianjin. Research Progress and Prospect of Construction Land Expansion[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(6): 51-58.

- [3] LIU Y S, FANG F, LI Y H. Key Issues of Land Use in China and Implications for Policy Making[J]. *Land Use Policy*, 2014, 40(4): 6-12.
- [4] 姚士谋, 周春山, 王德, 等. 中国城市群新论 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-6, 150-155.
YAO Shimou, ZHOU Chunshan, WANG De, et al. *New Perspectives on Urban Agglomerations in China*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 1-6, 150-155.
- [5] 方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向 [J]. *地理学报*, 2014, 69(8): 1130-1144.
FANG Chuanglin. Progress and the Future Direction of Research into Urban Agglomeration in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1130-1144.
- [6] LIU Y Q, SONG W, DENG X Z. Understanding the Spatiotemporal Variation of Urban Land Expansion in Oasis Cities by Integrating Remote Sensing and Multi-Dimensional DPSIR-Based Indicators[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 23-37.
- [7] 焦利民, 张欣. 基于圈层建设用地密度分析的中国主要城市扩张的时空特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(10): 1721-1728.
JIAO Limin, ZHANG Xin. Characterizing Urban Expansion of Main Metropolises in China Based on Built-up Densities in Concentric Rings[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(10): 1721-1728.
- [8] JIAO L M, LIU J F, XU G, et al. Proximity Expansion Index: an Improved Approach to Characterize Evolution Process of Urban Expansion[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018, 70: 102-112.
- [9] KANG S J, CHOI J, YOON H, et al. Changes in the Extent and Distribution of Urban Land Cover in the Democratic People's Republic of Korea (North Korea) Between 1987 and 2010[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(16): 2009-2017.
- [10] 方创琳, 李广东, 张蓄. 中国城市建设用地的动态变化态势与调控 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 363-376.
FANG Chuanglin, LI Guangdong, ZHANG Qiang. The Variation Characteristics and Control Measures of the Urban Construction Land in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 363-376.
- [11] 王少剑, 王泽宏. 经济转型背景下长三角城市用地扩张及影响因素的时空差异 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(4): 993-1007.
WANG Shaojian, WANG Zehong. The Spatial-Temporal Differentiation of Urban Land Expansion and Its Influencing Factors in the Yangtze River Delta in the Economic Transition Context[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 993-1007.
- [12] 王雅竹, 段学军, 杨清可, 等. 近30年江苏省建设用地扩张的时空特征、模式与驱动因素研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7): 1531-1540.
WANG Yazhu, DUAN Xuejun, YANG Qingke, et al. Spatial-Temporal Characteristics and Driving Factors of Urban Construction Land in Jiangsu Province in the Last 30 Years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(7): 1531-1540.
- [13] 张永彬, 汲姣, 郭力娜, 等. 1978—2014年唐山市中心建设用地扩展时空分析 [J]. *测绘科学*, 2019, 44(7): 59-66.
ZHANG Yongbin, JI Jiao, GUO Lina, et al. Spatial Analysis of Expansion of Construction Land in Tangshan Downtown from 1978 to 2014[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(7): 59-66.
- [14] 王涛, 李贝贝, 何亮, 等. 西安城市扩展时空特征与驱动因素分析 [J]. *测绘科学*, 2017, 42(4): 75-79, 118.
WANG Tao, LI Beibei, HE Liang, et al. Analysis of Spatial-Temporal Characteristics of Urban Expansion and Driving Forces in Xi'an[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(4): 75-79, 118.
- [15] WU R, LI Z G, WANG S J. The Varying Driving Forces of Urban Land Expansion in China: Insights from a Spatial-Temporal Analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 142591.
- [16] 车通, 李成, 罗云建. 城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力 [J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3283-3294.
CHE Tong, LI Cheng, LUO Yunjian. Changes in Landscape Pattern of Built-up Land and Its Driving Factors During Urban Sprawl[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3283-3294.
- [17] 胡银根, 蔡国立, 廖成泉, 等. 基于供需视角的城乡建设用地扩张与配置的驱动力 [J]. *经济地理*, 2016, 36(6): 161-167.
HU Yingen, CAI Guoli, LIAO Chengquan, et al. The Driving Forces of Sprawl and Allocation on Urban and Rural Construction Land[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(6): 161-167.
- [18] 方创琳, 周成虎, 王振波. 长江经济带城市群可持续发展战略问题与分级梯度发展重点 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(11): 1398-1408.
FANG Chuanglin, ZHOU Chenghu, WANG Zhenbo. Sustainable Development Strategy and Priorities of Spatially Differentiated Development of Urban Agglomerations Along the Yangtze River Economic Belt[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(11): 1398-1408.
- [19] 王曼曼, 焦新颖, 张璐璐, 等. 中国城市群研究进展与热点的可视化分析 [J]. *世界地理研究*, 2019, 28(3): 63-74.

- WANG Manman, JIAO Xinying, ZHANG Lulu, et al. Visualization Analysis on the Research Progress and Hotspots of Urban Agglomeration in China[J]. *World Regional Studies*, 2019, 28(3): 63-74.
- [20] 欧阳晓, 朱 翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征 [J]. *地理学报*, 2020, 75(3): 571-588.
OUYANG Xiao, ZHU Xiang. Spatio-Temporal Characteristics of Urban Land Expansion in Chinese Urban Agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 571-588.
- [21] 欧阳晓, 朱 翔, 贺清云. 城市群城市用地扩张时空特征及驱动机制研究: 以长株潭城市群为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(6): 1298-1309.
OUYANG Xiao, ZHU Xiang, HE Qingyun. Study of Spatio-Temporal Pattern and Driving Mechanism of Urban Land Expansion in Urban Agglomeration: a Case Study of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(6): 1298-1309.
- [22] 牛 强, 沈英杰, 周 焱, 等. 基于滞后变量模型的城市群建设用地增长对经济增长的滞后期和效应分析: 以京津冀城市群为例 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1656-1666.
NIU Qiang, SHEN Yingjie, ZHOU Yi, et al. Effect and Lag Period of Urban Agglomeration Construction Land Growth on Economic Growth Based on Lagged Variable Model: A Case Study of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1656-1666.
- [23] 王海军, 张 彬, 刘耀林, 等. 基于重心-GTWR模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析 [J]. *地理学报*, 2018, 73(6): 1076-1092.
WANG Haijun, ZHANG Bin, LIU Yaolin, et al. Multi-Dimensional Analysis of Urban Expansion Patterns and Driving Forces Based on the Center of Gravity-GTWR Model: A Case Study of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1076-1092.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and Prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical Detectors-Based Health Risk Assessment and Its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [26] 王少剑, 王 洋, 蔺雪芹, 等. 中国县域住宅价格的空间差异特征与影响机制 [J]. *地理学报*, 2016, 71(8): 1329-1342.
WANG Shaojian, WANG Yang, LIN Xueqin, et al. Spatial Differentiation Patterns and Influencing Mechanism of Housing Prices in China: Based on Data of 2872 Counties[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8): 1329-1342.
- [27] ZHU H, LIU J M, CHEN C, et al. A Spatial-Temporal Analysis of Urban Recreational Business Districts: A Case Study in Beijing, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(12): 1521-1536.
- [28] 刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析 [J]. *地理学报*, 2016, 71(3): 355-369.
LIU Jiyuan, LIU Wenchao, KUANG Wenhui, et al. Remote Sensing-Based Analysis of the Spatiotemporal Characteristics of Built-up Area Across China Based on the Plan for Major Function-Oriented Zones[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 355-369.

(责任编辑: 廖友媛)