

近30年中国城市群城市建设用地扩张遥感监测与时空变化特征分析

张涛, 王光辉, 郑利娟, 戴海伦, 何宇华, 刘婷

自然资源部 国土卫星遥感应用中心, 北京 100048

摘要: 开展城市群建设用地扩张时空变化特征分析, 对优化城市群空间格局、促进区域协调发展具有重要意义。本文以全国19个城市群为研究对象, 基于1990年—2020年全国中等尺度分辨率的遥感影像数据, 进行城市群集中建设区提取, 并从城市群扩张进程、城市群发展阶段、城市群扩张模式以及城市群重心迁移规律等方面开展了研究。结果发现: (1) 近30年全国19个城市群城市规模变化曲线总体呈现“S”型, 城市群扩张进程大致可分为缓慢扩张、快速扩张和平稳扩张3个时期; 东部城市群进入快速扩张期比西部早10年左右; 多数城市群在2015年之后进入平稳扩张期。(2) 至2020年, 19个城市群均处于较高级别发展阶段, 内部中心城市与外围城市之间的空间扩张协调度不断提高; 东部城市群整体处于更高级别的城市群发展阶段。(3) 基于城市群在不同方向的扩张规模, 全国19个城市群的空间扩张模式可以分为环状扩张、扇状扩张、轴状扩张, 空间扩张模式与城市群内部核心城市的数量、位置和影响力密切相关。(4) 从城市群重心位置变化来看, 84%的城市群的重心位置在30年间相对稳定, 基本位于核心城市或邻近核心城市的同一地市内, 城市群的核心城市吸引力强, 外围城市建设规模扩张较为平均。长时序、高精度的城市建设规模监测能够全面地反映城市群发展进程与模式, 为城市群空间高质量发展规划与决策提供信息支撑与科学依据。

关键词: 城市群, 扩张进程, 扩张模式, 时空特征分析

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 张涛, 王光辉, 郑利娟, 戴海伦, 何宇华, 刘婷. 2024. 近30年中国城市群城市建设用地扩张遥感监测与时空变化特征分析. 遥感学报, 28(11): 2838–2849

Zhang T, Wang G H, Zheng L J, Dai H L, He Y H and Liu T. 2024. Remote sensing monitoring and spatiotemporal characteristic analysis of urban construction land expansion in the urban agglomerations of China in the past 30 years. National Remote Sensing Bulletin, 28(11): 2838–2849 [DOI: 10.11834/jrs.20243399]

1 引言

城市建设用地扩张情况的监测与分析可以科学地反映国家城镇化建设进程, 更好地服务国土空间规划实施、新型城镇化决策和管理 (Marziales 等, 2023; 李晓燕 等, 2018; 张敏 等, 2022)。作为新型城镇化主体形态, 城市群是实施区域协调发展战略的重要抓手。建立以中心城市引领城市群发展、城市群带动区域发展新模式, 是推动区域板块之间融合互动发展的区域战略统筹机制 (卢奕帆和林锦耀, 2023; 王济干和杨亚平, 2023; 张广海和苏喆, 2023)。然而中国区域发展不平衡

不充分问题依然突出, 大中小城市发展协调性不足, 城市群内部、城市群之间的发展机制仍不完善 (杨亮洁 等, 2023; 钟章奇 等, 2023)。把握长期以来城市群发展时空特征规律对于深入探讨区域发展模式、破解区域分化难题具有重要意义。

城市群是促进城市化发展的重要地区, 在当前城镇化快速发展的背景下, 开展城市群扩张特征研究, 对推进城镇化高质量发展、优化城镇化空间格局十分重要 (冯一凡 等, 2023; 魏伟和尹力, 2023; 许金花 等, 2024; 朱从谋 等, 2023)。卫星遥感具有大区域、客观性、周期性等优势, 是自然资源和国土空间动态监测中重要的数据源

收稿日期: 2023-09-25; 预印本: 2024-01-03

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2022YFF1303401)

第一作者简介: 张涛, 研究方向为卫星遥感综合监测与分析应用。E-mail: zhangt@lasac.cn

通信作者简介: 王光辉, 研究方向为卫星遥感智能解译提取。E-mail: wanggh@lasac.cn

之一,在城市扩张监测方面已经得到了广泛应用(Bakshi和Esraz-Ul-Zannat, 2023; He等, 2023; Liu等, 2019, 2021; Zhang等, 2018; 胡苗苗等, 2024; 黄昕等, 2021; 李桂华等, 2020; 王晗等, 2022; 吴冠秋等, 2021; 余柏菘等, 2021; 张增祥, 2006)。国内外关于城市扩张的研究,主要包括时空动态特征分析(Bagan和Yamagata, 2014; Li等, 2019; Romano等, 2017; 王雪微等, 2015)、驱动力分析(Pour和Oja, 2021; Basu等, 2023; 李益敏等, 2021; 张娜等, 2022)、生态环境影响分析(Maimaiti等, 2022; Mohammadyari等, 2023; Yao等, 2022; 段维利等, 2023; 杨超, 2023)等方面。关于时空动态特征的研究,主要集中在扩张强度、扩张模式、扩张方向、空间结构特征的分析。其中, Dietzel等(2005)结合以往研究提出了一种城市扩张理论,将城市扩张过程分为了扩散和集聚两个阶段(Blumenfeld, 1954);基于Dietzel等(2005)提出的理论, Bagan和Yamagata(2014)与Estoque和Murayama(2014)对东南亚的城市开展了城市扩张强度与扩张方向的研究。Xu等(2019)开展了非洲城市用地密度的时空分析,对非洲城市的扩张强度和形态特征进行了研究。Sahana等(2018)基于城市蔓延矩阵,对印度加尔各答城市群的城市扩张强度、扩张模式、扩张方向以及城市空间格局展开了研究。国内单个城市群扩张时空动态特征的研究非常丰富(李桂华等, 2020; 刘艳军等, 2018; 王海军等, 2016; 郑文升等, 2022),特别是关于京津冀、珠三角、长三角这3大城市群的研究,宁晓刚等(2018)开展了京津冀城市群1990年—2015年时空监测与分析,从时空扩展过程、城区空间形态及结构变化、城区扩展协调性、城区扩展占用土地类型等方面对京津冀城市群城镇化过程进行了统计分析;胡盼盼等(2021)开展了珠三角城市群1980年—2015年城市扩张强度、扩张速率以及景观格局指数的定量分析,对珠三角城市群城市扩张的时空变化特征进行了研究;季杨和蒋金豹(2021)对长三角城市群2001年—2013年的城市扩张模式、扩张驱动因素进行了分析;其他城市群的研究,如朱政等(2021)开展了长江中游城市群1990年—2019年的空间结构演变历程及特征研究,并对2025年、2030年的发展态势进行了情景分析;王晗等(2022)对成渝城市群2000年—2018年扩张

速度、扩张方向、扩张的空间集聚程度进行了分析。然而,在现有的相关研究中,很少有全国范围内长时序的城市群扩张分析,欧阳晓和朱翔(2020)虽然开展了不同城市群的城市用地扩张时空动态特征研究,但是只选择了10个城市群,缺少全国性系统性的分析和研究。

综上,本文以“十四五”新型城镇化实施方案中涉及的全国19个城市群为研究对象,利用国产卫星北京一号、美国陆地卫星Landsat与高分一号等中等尺度分辨率遥感影像数据,基于人机交互的方法,运用GIS手段提取19个城市群1990年—2020年城市建设用地信息,并同其他研究的类似提取成果进行对比分析,最后从城市群扩张时间变化特征、城市群发展阶段、城市群空间扩张模式、城市群内部建设重心转移等角度进行了综合分析,揭示了城市群历史发展演变规律及空间形态特征。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域

研究区域为全国19个城市群,分别为京津冀城市群、长三角城市群、珠三角城市群、山东半岛城市群、海峡西岸城市群、哈长城市群、辽中南城市群、中原城市群、山西中部城市群、长江中游城市群、成渝城市群、关中平原城市群、北部湾城市群、宁夏沿黄城市群、呼包鄂榆城市群、黔中城市群、滇中城市群、兰州—西宁城市群、天山北坡城市群。城市群范围参考对应城市群发展规划中的规划范围确定。

2.2 研究数据

研究数据为中分辨率遥感影像数据,数据来源主要分为两个阶段。其中,1990年—2015年间城市群遥感数据来源于国产卫星北京一号、美国陆地卫星Landsat,空间分辨率为30 m;2016年—2020年数据来源为高分一号多光谱遥感影像,空间分辨率为16 m。

2.2.1 北京一号影像数据

北京一号卫星于2005年10月27日成功发射,是中国具有自主知识产权、独立运营、管理和控制的天地一体化遥感卫星系统。北京一号具有高、中分辨率双传感器,中分辨率传感器为32 m多光

谱,幅宽 600 km,重访周期 3—5 d,高分辨率传感器为 4 m 全色,幅宽 24 km,重访周期 5—7 d。

2.2.2 Landsat 系列影像数据

Landsat 是美国 1967 年启动的陆地卫星计划,第一颗 Landsat 卫星于 1972 年 7 月 23 日发射成功,命名为 Landsat 1。此后,美国共发射了 8 颗 Landsat 系列卫星,整个系列卫星连续观测地球近 50 年,为地球观测领域提供了多年的中高分辨率卫星数据。

2.2.3 高分一号影像数据

高分一号 (GF-1) 卫星作为中国高分辨率对地观测系统的首发星,于 2013 年 4 月 26 日成功发射。特点为单星上同时实现了高分辨率与大幅宽的结合,2 m 高分辨率实现大于 60 km 成像幅宽,16 m 分辨率实现大于 800 km 成像幅宽。全色多光谱相机重访周期 4 d,多光谱 GF-1 WFV 数据重访周期 2 d。

3 研究方法

3.1 城市集中建设区提取

在城市扩张遥感监测相关研究中,对城区范围没有明确的定义,不同研究对城区范围的理解不同,提取标准也不一致(宁晓刚等,2018)。根据城市实际情况与对城区范围的理解,本研究以城市集中建设区作为监测对象,即城市内建设用地集中连片区域,包括城市建设用地及区县城镇建设用地,并制定了提取标准。1990 年—2015 年,监测间隔为 5 a,监测图斑的上图面积为 0.5 km²;为增加监测时序的连续性,同时观察城市集中建设区范围年度变化情况,2016 年—2020 年监测间隔设定为 1 a,上图面积减少至 0.1 km²。城市建设用地主要包括城市主建成区、距主建成区边缘小于等于 5 km 的集中连片建设用地(包括距主建成区边缘较近、路网基本成型的工业园区)、距离城市主建成区边缘大于 5 km 且面积大于 1 km² 的集中连片建设用地。区县城镇建设用地在 2015 年(含)之前主要包括区、县政府所在地建设用地以及面积大于 0.5 km² 的集中连片乡镇建设用地和工业园区;2016 年—2020 年区县城镇建设用地主要包括区、县政府所在地建设用地以及面积大于 0.1 km² 的集中连片乡镇建设用地和工业园区。

根据上述城市集中建设区的提取标准,首先

对遥感影像数据进行辐射定标、几何校正、图像优化等预处理,然后采用人机交互的方法,通过图斑位置、面积、形态的区分和目视解译,使用 GIS 软件来提取城市集中建设区边界矢量。本文以 1990 年的城市集中建设区边界数据为基期数据,以 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年—2020 等年份为时间节点,形成城市集中建设区扩展监测信息。图 1 为本研究城市集中建设区提取结果示例与其他研究的提取成果对比情况。其中, Dataset-1 (He 等, 2014; 何春阳等, 2022) 主要是基于夜间灯光数据,使用支持向量机分类的方法对城市建成区的提取结果,空间分辨率为 100 m; Dataset-2 (孙洁等, 2022) 是采用 Sentinel 数据,基于 Google Earth Engine 云平台对不透水面的提取结果,空间分辨率为 10 m。对比结果显示,本文提取成果更能反映城市区域的真实情况,与 Dataset-1 数据相比,本研究所使用影像分辨率更高,提取的城区边界更加贴近于真实城区边界; Dataset-2 使用不透水面作为城区范围,与之相比,本研究更多的考虑到了城市绿地、城市水域等具有城市功能的景观特征。

3.2 城市群扩张进程曲线

城市的扩张进程可通过城市群建设规模(城市集中建设区面积)的变化展示。本文采用不同年份与 2020 年规模的比值作为城市群建设规模比例来衡量城市群扩张进程:

$$UEP_i = \frac{Ar_i}{Ar_{2020}} \quad (1)$$

式中, Ar_i 与 Ar_{2020} 分别为 i 年与 2020 年的城市群建设规模, UEP_i 为 i 年城市群扩张进程。根据不同年份城市群的扩张进程,可形成城市群建设规模比例随时间变化曲线图。

3.3 位序规模法则与捷夫指数

位序规模法则与捷夫指数 (Haggett, 1967; Zhu 等, 2018) 是城市地理研究中常用的分析城市规模分布的方法与指标。使用城市建设规模计算各城市群不同年份的捷夫指数,用以定量表征城市群内部各城市的分布特征,解析城市群发展阶段及变化情况。捷夫指数公式如下:

$$\ln P_i = \ln P_1 - qnr_i \quad (2)$$

式中, P_i 为城市群内部按建设规模从大到小排序后第 i 位城市的建设规模, P_1 为排序第一位的建设规模, q 为常数, r_i 为第 i 位城市的位序。本文根据 q

值的大小及变化趋势来判断城市群的发展阶段。当 $q < 1$ 且变大时表示处于趋向集聚阶段,城市群内部各城市分工体系尚未建立,中心城市与外围城市的协调度低; $q > 1$ 且变大时,表示处于集聚加速阶段,中心城市已具备一定的规模优势,但中心城市对外围城市的产业转移、技术外溢等扩散效应尚不明显,两者协调度较低; $q > 1$ 且变小时,表示处于集聚衰减阶段,中心城市的规模优势已达

到较高水平,开始从外延式发展向内涵式提升转变,地域分工体系初步建立,中心城市与外围城市之间协调度提升; $q < 1$ 且变小时,表示处于趋向分散阶段,中心城市形成以资本密集型产业和技术密集型产业为主导的内涵式发展模式,中心城市的用地扩张速度变缓,而外围城市空间扩张速度加快,造成中心城市的规模优势变弱、中心城市与外围城市之间的协调度持续提升。

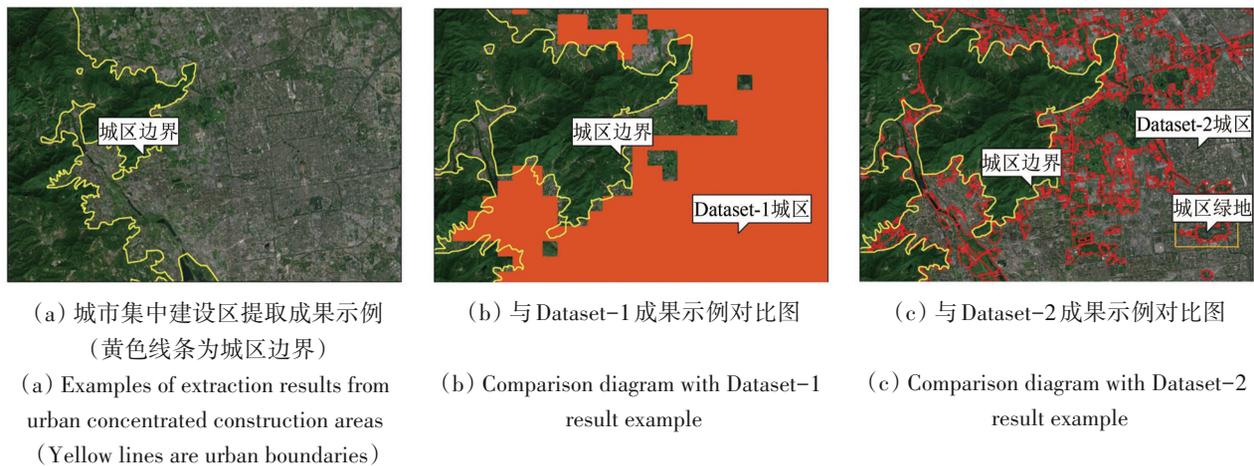


图1 城市集中建设区提取成果示例及与 Dataset-1、Dataset-2 成果示例对比图

Fig. 1 The extraction result examples of urban centralized construction areas and the comparison diagram with the result examples of Dataset 1 and Dataset 2

3.4 极坐标分析法

基于极坐标分析法,统计城市群在不同方向的扩张规模,分析城市扩张模式。本文以各城市群1990年基期的几何中心为圆心,建立极坐标,将城市群划分为16个相等的扇面,以各扇面方向上的扩张规模表征各方向扩张量,统计城市群的空间在不同方向上的扩张面积,最终得到环状扩张、扇状扩张、轴状扩张等不同扩张模式。其中,环状扩张指城市群从中心向外,在各方向上均存在一定程度的扩张;扇状扩张指城市群从中心向外,在3个及3个以上方向,或在几个方向之间有较大扩张,城市群增长呈现扇面形态;轴状扩张指城市群在两个方向上扩张,整个城市群呈线性轴状增长。

3.5 重心转移规律

重心转移是研究城市群时空变化特征的常用方法(侯景新,2007),基于城市集中建设用地信息,计算各年份的城市群重心,以1990年城市群重心为起点,绘制不同城市群的重心迁移轨迹可

用于研究各城市群的重心转移规律。

$$\bar{X}^j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k^j \quad (3)$$

$$\bar{Y}^j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k^j \quad (4)$$

式中, X_k^j 与 Y_k^j 分别为 j 年份城市群的第 k 个城市的中心坐标, \bar{X}^j 与 \bar{Y}^j 为 j 年份城市群重心坐标。

4 结果分析

4.1 城市群发展时间变化特征分析

4.1.1 城市群扩张进程分析

近30年城市群建设规模比例变化曲线总体呈“S”型。根据曲线斜率先增加再减小的变化趋势,1990年—2020年城市群建设规模比例变化曲线可分为3段,分别为缓慢扩张期、快速扩张期和平稳扩张期3个阶段(图2)。不同城市群的扩张进程的变化略有差异,表1中统计了不同城市群进入快速扩张期的时间。在2000年与2010年进入快速扩张期的城市群数量占总城市群数量的89%;

其中,成渝、滇中、关中平原等11个城市群在2000年进入快速扩张期;兰州—西宁、辽中南、宁夏沿黄等6个城市群在2010年进入快速扩张期;呼包鄂榆和北部湾城市群分别在2005年和2015年进入快速扩张期。从空间分布上看,整体上东部城市群进入快速扩张期比西部早10年,不同城市群进入快速扩张期的时间的空间分布如图3所示。东部地区80%的城市群进入快速扩张期的年份为

2000年,西部地区56%的城市群进入快速扩张期的年份为2010年。

不同城市群进入平稳扩张期的时间也不同。其中,滇中、哈长、呼包鄂榆等11个城市群在2015年后进入平稳扩张期,占城市群总量的58%;截至2020年,北部湾、成渝、关中平原等8个城市群建设规模比例增长没有明显减缓的趋势,仍未进入平稳扩张期。

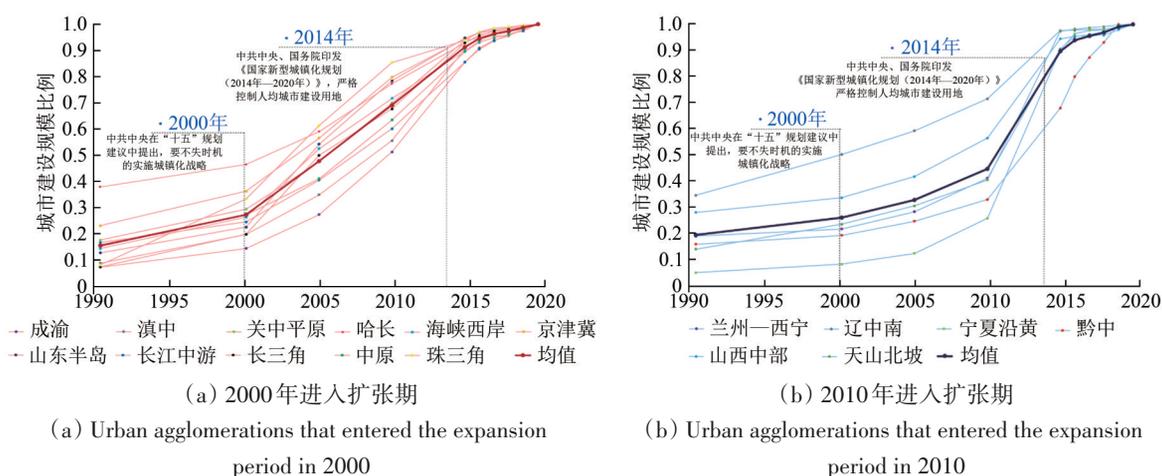


图2 城市群建设规模比例变化曲线

Fig. 2 Change curve of urban agglomeration construction scale ratio

表1 19个城市群进入快速扩张期年份表

Table 1 The years of rapid expansion in 19 urban agglomerations

年份	城市群
2000年	成渝城市群、滇中城市群、关中平原城市群、哈长城市群、海峡西岸城市群、京津冀城市群、山东半岛城市群、长江中游城市群、长三角城市群、中原城市群、珠三角城市群
2005年	呼包鄂榆城市群
2010年	兰州—西宁城市群、辽中南城市群、宁夏沿黄城市群、黔中城市群、山西中部城市群、天山北坡城市群
2015年	北部湾城市群

4.1.2 城市群发展阶段分析

基于捷夫指数的大小及变化趋势,城市群的发展阶段可分为趋向集聚、集聚加速、集聚衰减、趋向分散等4个阶段。至2020年,兰州—西宁、关中平原、滇中、天山北坡、北部湾、成渝、京津冀、辽中南共8个城市群处于集聚衰减阶段, q 值分别为1.698、1.26、1.201、1.151、1.13、1.083、1.033、1.002,城市群的中心城市规模优势较高,开始从外延式发展向内涵式提升转变,中心城市与外围城市之间空间扩张协调度提升;黔中、长三角、哈长、珠三角、海峡西岸、长江中游、宁夏沿黄、中原、山东半岛、呼包鄂榆、山西中部共11个城市群处于趋向分散阶段, q 值分别为0.848、0.826、0.813、0.779、0.749、0.737、

0.662、0.571、0.569、0.496、0.494,城市群的外围城市扩张速度加快,中心城市规模优势变弱,中心城市与外围城市建设规模差异变小,相互之间的空间扩张协调度较高;处于两个阶段城市群数量比例约为4:6。总体而言,全国19个城市群的 q 值均不断变小,各城市群中心城市与外围城市之间的空间扩张协调度在不断提高。

从处于集聚衰减和趋向分散阶段的城市群的空间分布上看,除京津冀、辽中南等少数城市群外,东部地区城市群有70%处于趋向分散阶段,分别为哈长、海峡西岸、山东半岛、长江中游、长三角、中原、珠三角;西部地区56%的城市群处于集聚衰减阶段,分别为成渝、滇中、关中平原、兰州—西宁、天山北坡;东部城市群整体处

于更高级别的城市群发展阶段。

4.2 城市群发展空间形态特征分析

4.2.1 城市群扩张模式分析

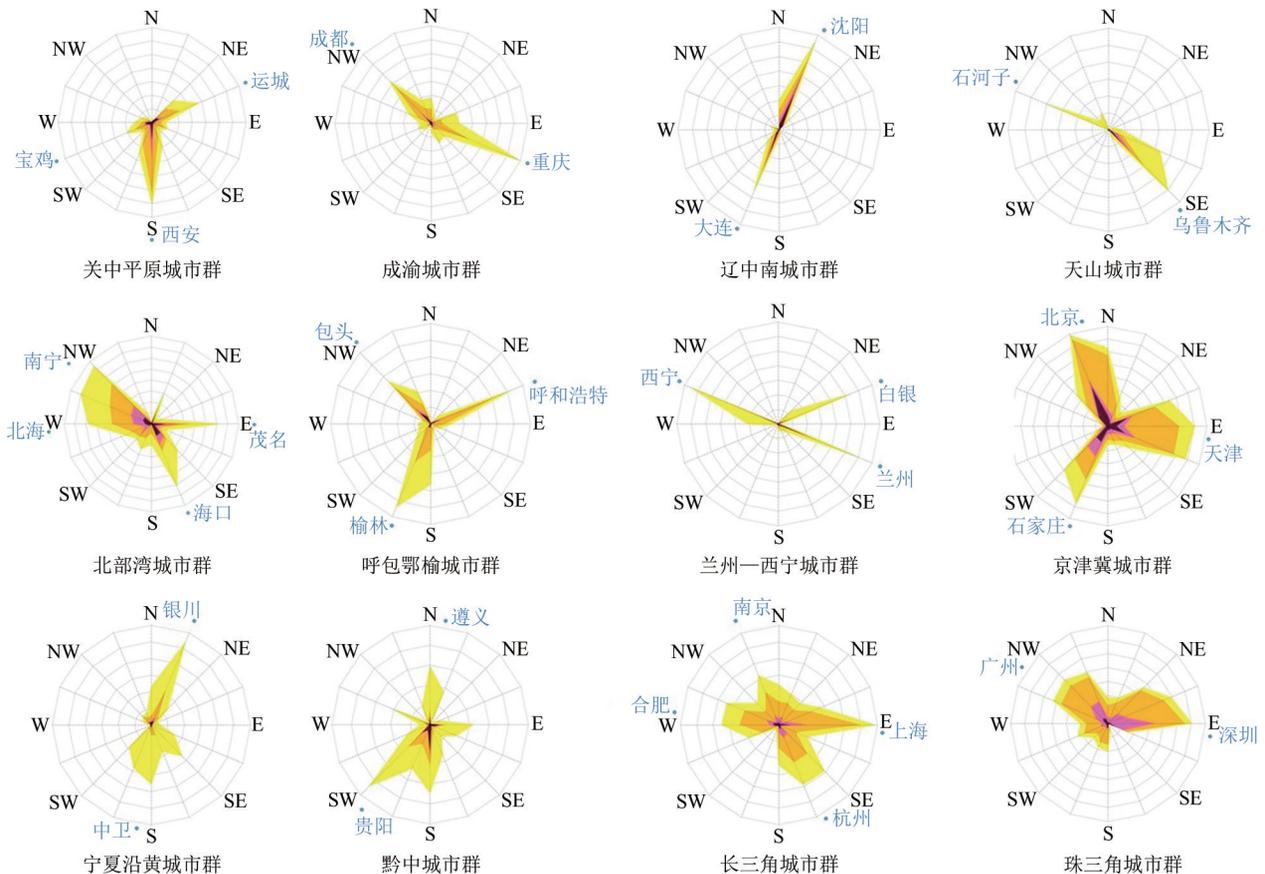
基于不同城市群在不同方向的扩张规模, 19个城市群空间扩张模式见表2。其中, 山东半岛城市群、海峡西岸城市群、哈长城市群等7个城市群为环状扩张; 京津冀城市群、珠三角城市群、北部湾城市群等8个城市群为扇状扩张; 辽中南城市群、成渝城市群、关中平原城市群等4个城市群为轴状扩张。从近30年全国城市群空间扩张方向图3可知, 城市群的空间扩张方向明显指向城市群内部核心城市所在方位, 城市群空间扩张模式与核心城市的数量、位置、对周边城市扩张的吸引力密切相关。如成渝城市群的轴状扩张, 主要在西北

和东南两个方向上, 以成都—重庆为轴向扩张; 京津冀城市群在西北、东南和西南方向上扩张较为显著, 主要体现为向北京、天津、石家庄3个核心城市方向的扩张; 长江中游城市群的环状扩张是以东北方向的武汉市、西南方向的长沙市为主要扩张方向, 南昌方向(东偏南方向)为次要扩张方向, 在西北方向上也有一定规模扩张。除去核心城市的影响, 地形条件对城市群空间扩张的影响也非常明显, 沿海城市群如长三角城市群空间扩张受到陆地范围条件的限制, 而海峡西岸、珠三角城市群的空间扩张不仅受陆地范围条件的限制, 还受到其西部与北部山脉的阻隔; 兰州—西宁、天山北坡等城市群位处山地之间, 空间扩张受到地形条件的影响较大, 扩张方向与山地走势保持一致。

表2 19个城市群的扩张模式

Table 2 Expansion modes of 19 urban agglomerations

扩张模式	城市群
环状扩张	山东半岛城市群、海峡西岸城市群、哈长城市群、中原城市群、长江中游城市群、滇中城市群、山西中部城市群
扇状扩张	京津冀城市群、珠三角城市群、北部湾城市群、呼包鄂榆城市群、黔中城市群、兰州—西宁城市群、宁夏沿黄城市群、长三角城市群
轴状扩张	辽中南城市群、成渝城市群、关中平原城市群、天山北坡城市群



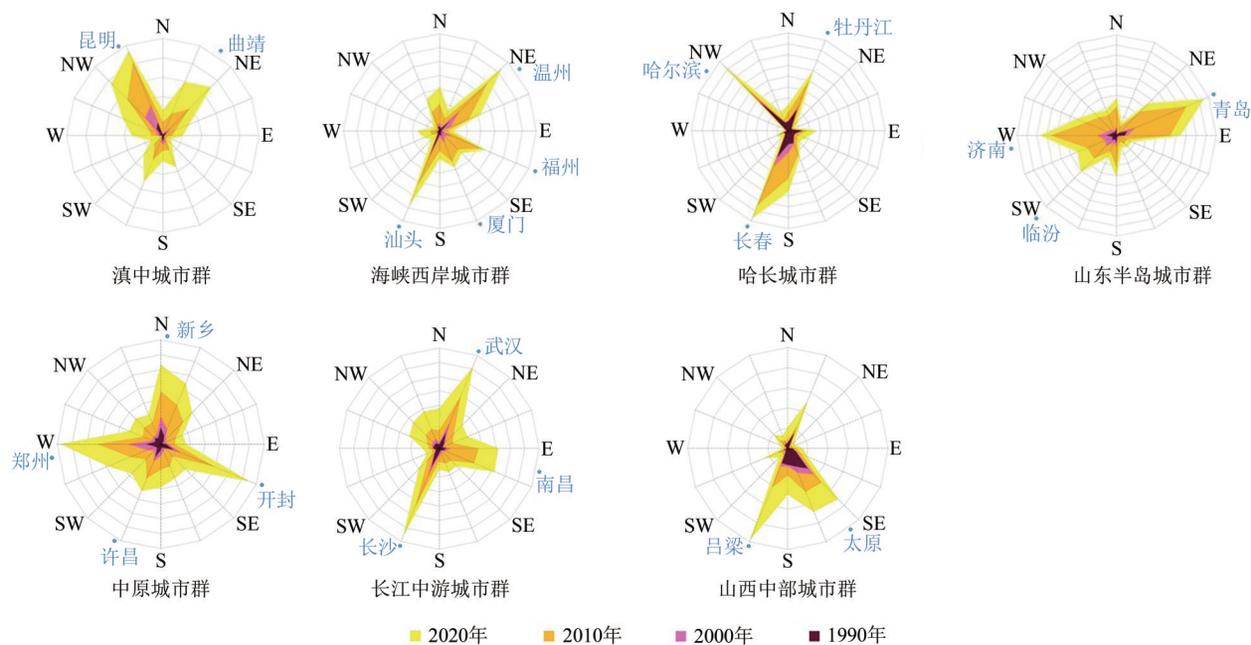
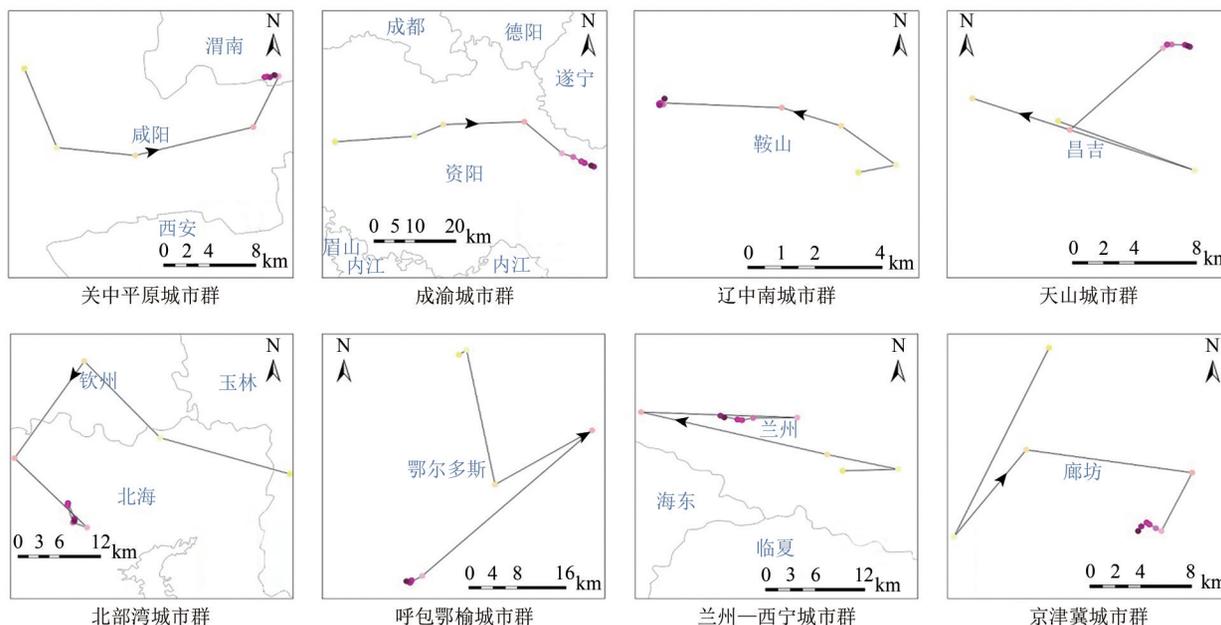


图3 近30年全国主要城市群空间扩张方向图
 Fig. 3 Spatial expansion directions of major urban agglomerations in China in the past 30 years

4.2.2 城市群重心迁移规律

图4为19个城市群的重心迁移轨迹图。从城市群重心位置变化来看，84%的城市群的重心位置在30年间相对稳定，基本位于核心城市或邻近核心城市的同一地市内，城市群的核心城市吸引力强，外围城市建设规模扩张较为平均。从重心的迁移距离来看，2015年以前，各城市群的重心年均最大迁移距离达到3823 m，19个城市群年均迁移距离标准差为935 m，且多数重心变化方向杂

乱，城市群扩张面积较大，且不同城市群扩张面积差异明显，扩张方向性不强；2015年之后，年均最大迁移距离为2097 m，19个城市群的重心年均迁移距离标准差为594 m，且重心变化多近似直线，城市群扩张面积明显减小，不同城市群之间扩张的差异也极大缩小，城市群扩张方向比较明确。城市群的重心迁移轨迹各有差异，扩张方向可能受到核心城市区位、新区建设、交通条件、地形条件等各种因素的影响。



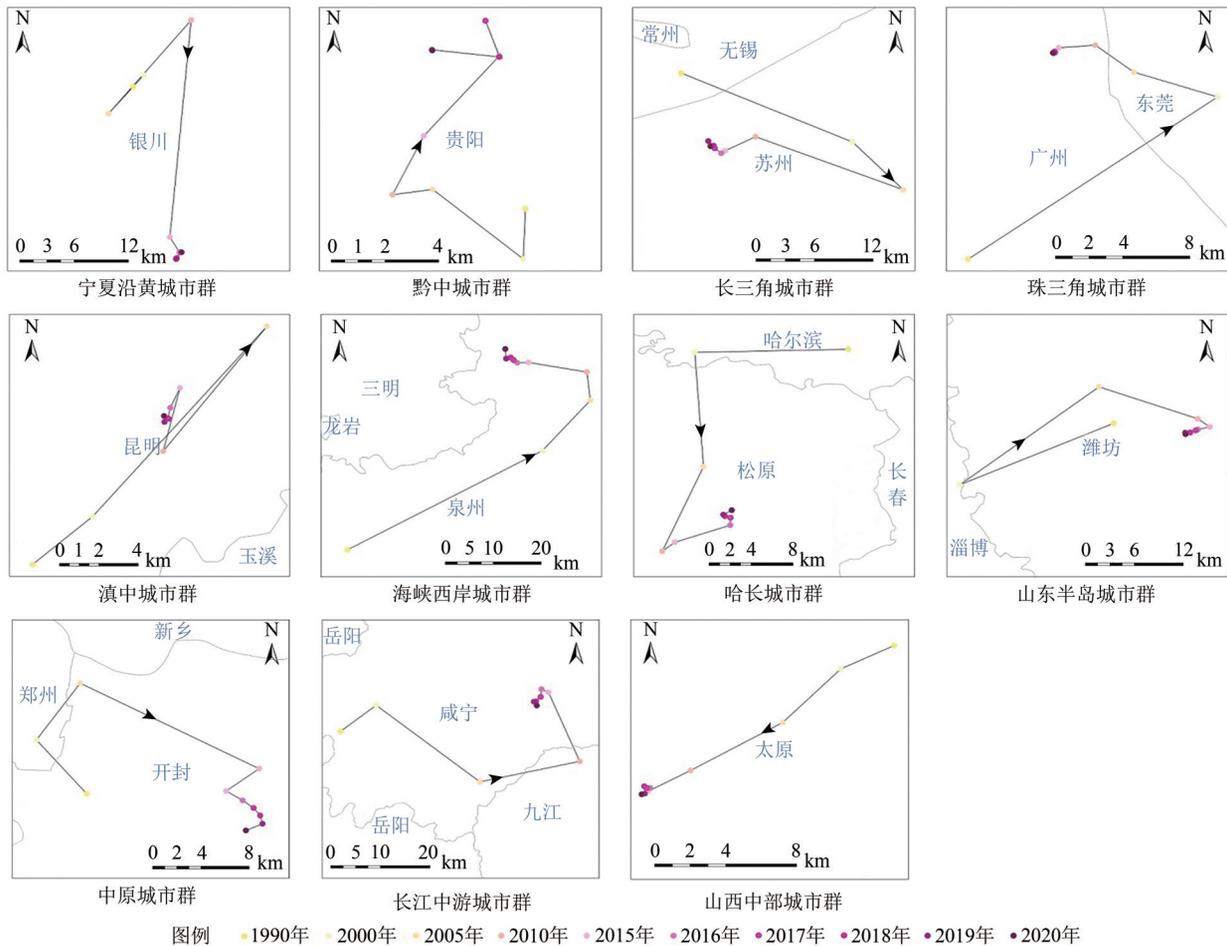


图4 近30年19个城市群重心变化轨迹图
 Fig. 4 Locus of change of center of gravity of 19 urban agglomerations in recent 30 years

5 结论

基于1990年—2020年长时序卫星遥感影像数据,对中国19个城市群的扩张进程、发展阶段、扩张模式、重心转移等方面进行了监测与分析,主要结论如下:

(1) 近30年全国19个城市群城市规模变化曲线总体呈现“S”型,东部城市群进入快速扩张期比西部早10年左右;多数城市群在2015年之后进入平稳扩张期。

(2) 至2020年,19个城市群均处于较高级别发展阶段,内部中心城市与外围城市之间的空间扩张协调度不断提高;但东西部差异明显,东部整体处于更高级别的城市群发展阶段。

(3) 从城市群扩张模式来看,全国19个城市群的空间扩张模式可以分为环状扩张、扇状扩张、轴状扩张3种;空间扩张模式与城市群内部核心城市的数量、位置和影响力密切相关。

(4) 近30年,城市群重心位置相对稳定,基

本位于核心城市或邻近核心城市的同一地市内;不同城市群的重心迁移轨迹各有差异,迁移方向与核心城市区位、新区建设、交通条件、地形条件等各种因素密切相关。

本研究从宏观的角度对中国城市群扩张的时空特征展开了研究,但缺乏对于社会、经济、生态等要素的分析,在后续的研究中将进一步从更深层次研究城市群的扩张特征,为优化城市群空间格局,促进城国土空间高质量发展提供科学依据。

参考文献(References)

- Bagan H and Yamagata Y. 2014. Land-cover change analysis in 50 global cities by using a combination of Landsat data and analysis of grid cells. *Environmental Research Letters*, 9(6): 064015 [DOI: 10.1088/1748-9326/9/6/064015]
- Bakshi A and Esraz-UI-Zannat M. 2023. Application of urban growth boundary delineation based on a neural network approach and landscape metrics for Khulna City, Bangladesh. *Heliyon*, 9(6): e16272 [DOI: 10.1016/J.HELIYON.2023.E16272]

- Basu T, Das A and Pereira P. 2023. Exploring the drivers of urban expansion in a medium-class urban agglomeration in India using the remote sensing techniques and geographically weighted models. *Geography and Sustainability*, 4(2): 150-160 [DOI: 10.1016/J.GEOSUS.2023.03.002]
- Blumenfeld H. 1954. The tidal wave of metropolitan expansion. *Journal of the American Institute of Planners*, 20(1): 3-14. [DOI: 10.1080/01944365408979167]
- Dietzel C, Herold M, Hemphill J J and Clarke K C. 2005. Spatio-temporal dynamics in California's central valley: empirical links to urban theory. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2): 175-195 [DOI: 10.1080/13658810410001713407]
- Duan W L, Yu X X, Chen L H, Jia G D and Cao Y X. 2023. Impact of urbanization and ecological construction on the ecosystem services value in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Research of Soil and Water Conservation*, 30(4): 404-411 (段维利, 余新晓, 陈丽华, 贾国栋, 曹永翔. 2023. 京津冀城市群城镇化与生态建设对生态系统服务价值的影响. *水土保持研究*, 30(4): 404-411) [DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.013]
- Estoque R C and Murayama Y. 2014. Measuring sustainability based upon various perspectives: a case study of a hill station in southeast Asia. *AMBIO*, 43(7): 943-956. [DOI: 10.1007/s13280-014-0498-7]
- Feng Y F, Li C, Li Y, Ma J J and Feng J M. 2023. Characteristics of urban land expansion and its mechanism of cities and towns around the floodplain of the lower Yellow River. *Geographical Research*, 42(4): 955-976 (冯一凡, 李翹, 李宇, 马俊杰, 冯君明. 2023. 黄河下游滩区周边城镇空间扩展特征与驱动机制. *地理研究*, 42(4): 955-976) [DOI: 10.11821/dljy020221277]
- Haggett P. 1967. Three pioneers in locational theory: review. *The Geographical Journal*, 133(3): 357-359 [DOI: 10.2307/1793549]
- He C Y, Liu Z F, Tian J and Ma Q. 2014. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: a multiscale landscape perspective. *Global Change Biology*, 20(9): 2886-2902 [DOI: 10.1111/gcb.12553]
- He C Y, Liu Z F, Xu M and Lu W L. 2022. Dataset of urban built-up area in China (1992-2020) v1.0[EB/OL]. (2022-10-19). <https://ctr.cn/18406.11.HumanNat.tpcd.272851> (何春阳, 刘志锋, 许敏, 卢文路. 2022. 中国城市建成区数据集(1992-2020)v1.0)[EB/OL]. (2022-10-19). <https://ctr.cn/18406.11.HumanNat.tpcd.272851>
- He T T, Wang K C, Xiao W, Xu S C, Li M M, Yang R J and Yue W Z. 2023. Global 30 meters spatiotemporal 3d urban expansion dataset from 1990 to 2010. *Scientific Data*, 10(1): 321 [DOI: 10.1038/S41597-023-02240-W]
- Hou J X. 2007. The shifting pattern of a city center——taking Beijing as an example. *Social Science of Beijing*, (5): 46-53 (侯景新. 2007. 论城市重心转移规律——以北京市为例. *北京社会科学*, (5): 46-53) [DOI: 10.13262/j.bjsshkxy.bjshkx.2007.05.010]
- Hu M M, Yan Q W and Li J H. 2024. Analyzing the spatio-temporal evolution of urban expansion in the central plains urban agglomeration and its driving force based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light images. *Remote Sensing for Natural Resources*, 36(1): 189-199 (胡苗苗, 闫庆武, 李建辉. 2024. 基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜光影像的中原城市群城市扩张的时空演变及驱动力分析. *自然资源遥感*, 36(1): 189-199) [DOI: 10.6046/zrzyyg.2022410]
- Hu P P, Li F, Hu D, Sun X, Liu Y L and Chen X C. 2021. Spatial and temporal characteristics of urban expansion in Pearl River Delta urban agglomeration from 1980 to 2015. *Acta Ecologica Sinica*, 41(17): 7063-7072 (胡盼盼, 李锋, 胡聃, 孙晓, 刘雅莉, 陈新闻. 2021. 1980—2015年珠三角城市群城市扩张的时空特征分析. *生态学报*, 41(17): 7063-7072) [DOI: 10.5846/stxb201908141694]
- Huang X, Li J Y, Yang J, Zhang Z, Li D R and Liu X P. 2021. 30 m global impervious surface area dynamics and urban expansion pattern observed by Landsat satellites: from 1972 to 2019. *Science China Earth Sciences*, 64(11): 1922-1933 (黄昕, 李家艺, 杨杰, 张震, 李冬瑞, 刘小平. 2021. Landsat卫星观测下的30 m全球不透水面年度动态与城市扩张模式(1972—2019). *中国科学: 地球科学*, 51(11): 1894-1906 [DOI: 10.1360/N072020-0370]
- Ji Y and Jiang J P. 2021. Remote sensing analysis of environmental change in urban expansion area of Yangtze River Delta urban agglomeration. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(5): 1131-1146 (季杨, 蒋金豹. 2021. 长三角城市群城市扩张区环境质量变化遥感评价. *遥感技术与应用*, 36(5): 1131-1146) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323]
- Li G H, Fan J F, Zhou Y K and Zhang Y. 2020. Development characteristics estimation of Shandong Peninsula urban agglomeration using VIIRS night light data. *Remote Sensing Technology and Application*, 35(6): 1348-1359 (李桂华, 范俊甫, 周玉科, 张悦. 2020. 基于viirs夜间灯光数据的山东半岛城市群发展特征研究. *遥感技术与应用*, 35(6): 1348-1359) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1348]
- Li X Y, Li H Y, Man W D, Mao D H and Wang Z M. 2018. Process and driving factors of urban land expansion in Harbin-Changchun City cluster. *Scientia Geographica Sinica*, 38(8): 1273-1282 (李晓燕, 李慧颖, 满卫东, 毛德华, 王宗明. 2018. 哈长城市群城镇用地扩展进程及其驱动因素研究. *地理科学*, 38(8): 1273-1282) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.08.009]
- Liu Y M, Wang D C, Liu X Z, Yuan J and Zhao Z F. 2021. Remote sensing dynamic monitoring and driving force analysis of typical urban expansion along the China-Myanmar border. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(5): 1155-1167 (李益敏, 王东驰, 刘心知, 袁静, 赵志芳. 2021. 中缅边境典型城市扩张遥感动态监测及驱动力分析. *遥感技术与应用*, 36(5): 1155-1167) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.11]
- Li Z, Jiang W G, Wang W J, Lei X and Deng Y. 2019. Exploring spatial-temporal change and gravity center movement of construction land in the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration. *Journal of Geographical Sciences*, 29(8): 1363-1380. [DOI: 10.1007/s11442-019-1664-5]
- Liu F, Zhang Z X, Zhao X L, Liu B, Wang X, Yi L, Zuo L J, Xu J Y, Hu S G, Sun F F and Wang Y F. 2021. Urban expansion of China from the 1970s to 2020 based on remote sensing technology. *Chinese Geographical Science*, 31(5): 765-781 [DOI: 10.1007/S11769-021-1225-5]
- Liu F, Zhang Z X, Zhao X L, Wang X, Zuo L J, Wen Q K, Yi L, Xu J Y, Hu S G and Liu B. 2019. Chinese cropland losses due to urban expansion in the past four decades. *Science of the Total Environment*, 650: 847-857 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.091]

- Liu Y J, Yu H S, Liu D G and Zhu L Y. 2018. Spatial differentiation mechanisms of the pattern evolution of construction land development intensity in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 818-831 (刘艳军, 于会胜, 刘德刚, 祝丽媛. 2018. 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*, 73(5): 818-831) [DOI: 10.11821/dlxb201805003]
- Lu Y F and Lin J Y. 2023. Predicting the impact of urban agglomeration development on grain production regions: a case study of Pearl River Delta. *Journal of Natural Resources*, 38(6): 1532-1549 (卢奕帆, 林锦耀. 2023. 城市协同发展对粮食生产区域的影响预测——以珠三角城市群为例. *自然资源学报*, 38(6): 1532-1549) [DOI: 10.31497/zrzyxb.20230610]
- Maimaiti B, Chen S S, Kasimu A, Mamat A, Aierken N and Chen Q L. 2022. Coupling and coordination relationships between urban expansion and ecosystem service value in Kashgar City. *Remote Sensing*, 14(11): 2557 [DOI: 10.3390/RS14112557]
- Marzialetti F, Gamba P, Sorriso A and Carranza M L. 2023. Monitoring urban expansion by coupling multi-temporal active remote sensing and landscape analysis: changes in the metropolitan area of Cordoba (Argentina) from 2010 to 2021. *Remote Sensing*, 15(2): 336 [DOI: 10.3390/RS15020336]
- Mohammadyari F, Zarandian A, Mirsanjari M M, Suziedelyte Visockiene J and Tumeliene E. 2023. Modelling impact of urban expansion on ecosystem services: a scenario-based approach in a mixed natural/urbanised landscape. *Land*, 12(2): 291 [DOI: 10.3390/LAND12020291]
- Ning X G, Wang H, Lin X G, Cao Y X and Du J. 2018. Spatio-temporal urban sprawl monitoring and analysis over Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration during 1990 — 2015. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 47(9): 1207-1215 (宁晓刚, 王浩, 林祥国, 曹银璇, 杜军. 2018. 京津冀城市群1990—2015年城区时空扩展监测与分析. *测绘学报*, 47(9): 1207-1215) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20170414]
- Ouyang X and Zhu X. 2020. Spatio-temporal characteristics of urban land expansion in Chinese urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 75(3): 571-588 (欧阳晓, 朱翔. 2020. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征. *地理学报*, 75(3): 571-588) [DOI: 10.11821/dlxb202003010]
- Pour N M and Oja T. 2021. Prediction power of logistic regression (LR) and multi-layer perceptron (MLP) models in exploring driving forces of urban expansion to be sustainable in Estonia. *Sustainability*, 14(1): 160 [DOI: 10.3390/SU14010160]
- Romano B, Zullo F, Fiorini L, Ciabò S and Marucci A. 2017. Sprinkling: an approach to describe urbanization dynamics in Italy. *Sustainability*, 9(1): 97 [DOI: 10.3390/su9010097]
- Sahana M, Hong H Y and Sajjad H. 2018. Analyzing urban spatial patterns and trend of urban growth using urban sprawl matrix: a study on Kolkata urban agglomeration, India. *Science of the Total Environment*, 628-629: 1557-1566. [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.170]
- Sun J, Sun Z C, Guo H D, Wang J B, Jiang H P and Gao J. 2022. A dataset of built-up areas of Chinese cities in 2020. *China Scientific Data*, 7(1): 184-198 (孙洁, 孙中昶, 郭华东, 王建波, 蒋会平, 高建. 2022. 中国城市2020年建成区数据集. *中国科学数据*, 7(1): 184-198) [DOI: 10.11922/sciencedb.j00001.00332]
- Wang H, Hu Z Y, Li F G and Zhou Y K. 2022. Research on the spatial-temporal process of urbanization in Chengdu-Chongqing region based on nighttime light from 2000 to 2018. *Remote Sensing Technology and Application*, 37(4): 897-907 (王晗, 胡自远, 李付全, 周玉科. 2022. 基于夜间灯光的2000—2018年成渝地区城市化过程研究. *遥感技术与应用*, 37(4): 897-907) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.4.0897]
- Wang H J, Xia C, Zhang A Q, Liu Y L and He S W. 2016. Space syntax expand intensity index and its applications to quantitative analysis of urban expansion. *Acta Geographica Sinica*, 71(8): 1302-1314 (王海军, 夏畅, 张安琪, 刘耀林, 贺三维. 2016. 基于空间句法的扩张强度指数及其在城镇扩展分析中的应用. *地理学报*, 71(8): 1302-1314) [DOI: 10.11821/dlxb201608002]
- Wang J Q and Yang Y P. 2023. Research on evaluation and driving factors of green development efficiency of urban agglomeration in Yangtze River Delta under the background of regional integration. *Journal of Economics of Water Resources*, 41(3): 1-7, 15 (王济干, 杨亚平. 2023. 区域一体化背景下长三角城市群绿色发展效率评价及驱动因素研究. *水利经济*, 41(3): 1-7, 15) [DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511.2023.03.001]
- Wang X W, Wang S J, Song Y and Hu H F. 2015. Space recognition and influence mechanism of urban construction land evolution of Changchun City. *Scientia Geographica Sinica*, 35(7): 873-881 (王雪微, 王士君, 宋颀, 胡海峰. 2015. 长春市城市建设用地演进的空间识别及影响机制研究. *地理科学*, 35(7): 873-881) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.07.010]
- Wei W and Yin L. 2023. Evolution characteristics and driving mechanism of spatial pattern of “three-zone space” in Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 43(2): 324-336 (魏伟, 尹力. 2023. 东北地区“三区空间”格局演化特征及驱动机制. *地理科学*, 43(2): 324-336) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.02.014]
- Wu G Q, Dang A R, Tian Y and Kan C C. 2021. Study on the urban agglomerations structure of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on spatiotemporal big data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 665-676 (吴冠秋, 党安荣, 田颖, 阚长城. 2021. 基于时空大数据的粤港澳大湾区城镇群结构研究. *遥感学报*, 25(2): 665-676) [DOI: 10.11834/jrs.20210590]
- Xu G, Dong T, Cobbinah P B, Jiao L M, Sumari N S, Chai B H and Liu Y L. 2019. Urban expansion and form changes across African cities with a global outlook: spatiotemporal analysis of urban land densities. *Journal of Cleaner Production*, 224: 802-810. [DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.276]
- Xu J H, Alimujiang K, Rukeya R and Wei B H. 2024. Identification of the spatial pattern and analysis of spatial and temporal changes in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains. *Journal of Northwest Forestry University*, 39(1): 237-246 (许金花, 阿里木江·卡斯木, 如克亚·热合曼, 魏柏浩. 2024. 天山北坡城市群国土空间格局识别与时空变化分析. *西北林学院学报*, 39(1): 237-246) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2024.01.32]
- Yang C. 2023. Urbanization process and eco-environmental quality

- evolution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: a remote sensing perspective. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(2): 343 (杨超. 2023. 遥感视角下的粤港澳大湾区城市化进程及其生态质量演变. *测绘学报*, 52(2): 343) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20210279]
- Yang L J, Qin L S, Yang Y C and Pan J H. 2023. Interaction between high-quality of urban development and ecological environment in urban agglomeration areas: taking the Chengdu-Chongqing urban agglomeration as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 43(17): 7035-7046 (杨亮洁, 秦丽双, 杨永春, 潘竞虎. 2023. 城市群地区城市高质量发展与生态环境的交互协同作用——以成渝城市群为例. *生态学报*, 43(17): 7035-7046) [DOI: 10.20103/j.stxb.202207282159]
- Yao X M, Chen Y Y, Zhang Q Y, Mou Z Q, Yao X J and Ou C. 2022. Assessment of the urban expansion and its impact on the eco-environment—a case study of Hefei municipal area. *Sustainability*, 14(17): 10613 [DOI: 10.3390/SU141710613]
- Yu B L, Wang C X, Gong W K, Chen Z Q, Shi K F, Wu B, Hong Y C, Li Q X and Wu J P. 2021. Nighttime light remote sensing and urban studies: data, methods, applications, and prospects. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 342-364 (余柏菡, 王丛笑, 宫文康, 陈佐旗, 施开放, 吴宾, 洪宇辰, 李乔玄, 吴健平. 2021. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望. *遥感学报*, 25(1): 342-364) [DOI: 10.11834/jrs.20211018]
- Zhang G H and Su Z. 2023. The impact of the coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration on regional tourism economy: direct effects and spillover effects. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences Edition)*, (4): 36-48 (张广海, 苏喆. 2023. 京津冀城市群协同发展对区域旅游经济的影响: 直接效应与溢出效应. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, (4): 36-48) [DOI: 10.16497/j.cnki.1672-335X.202304004]
- Zhang M, Zheng L J and He Y H. 2022. Characteristics and influencing factors of urban expansion in the Yangtze River Economic Belt in recent 30 years. *Science of Surveying and Mapping*, 47(8): 186-196, 203 (张敏, 郑利娟, 何宇华. 2022. 近30年长江经济带城镇扩张特征及影响因素. *测绘科学*, 47(8): 186-196, 203) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.08.021]
- Zhang N, Zhang H X and Li Y Q. 2022. Analysis of urban expansion characteristics and driving force analysis of Taiyuan City based on night light images. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 11: 79-83, 105 (张娜, 张会霞, 李艾琴. 2022. 基于夜间灯光影像的太原市城市扩张特征及驱动力分析. *测绘通报*, (11): 79-83, 105) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0329]
- Zhang Z X. 2006. *Remote Sensing Monitoring of Urban Expansion in China*. Beijing: Star Map Press (张增祥. 2006. *中国城市扩展遥感监测*. 北京: 星球地图出版社)
- Zhang Z X, Liu F, Zhao X L, Wang X, Shi L F, Xu J Y, Yu S S, Wen Q K, Zuo L J, Yi L, Hu S G and Liu B. 2018. Urban expansion in China based on remote sensing technology: a review. *Chinese Geographical Science*, 28(5): 727-743 [DOI: 10.1007/s11769-018-0988-9]
- Zheng W H, Du N Q, Yang Y, Wang X F and Xiong Z F. 2022. Multi-fractal characteristics of spatial structure of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. *Acta Geographica Sinica*, 77(4): 947-959 (郑文升, 杜南乔, 杨瑶, 王晓芳, 熊志飞. 2022. 长江中游城市群空间结构的分形特征. *地理学报*, 77(4): 947-959) [DOI: 10.11821/dlxb202204012]
- Zhong Z Q, Lu Y and Liu Z X. 2023. Did the implementation of urban agglomeration development planning policy narrow economic gap between non-central cities and central cities? Evidence from 283 cities in China. *Geographical Research*, 42(4): 1050-1069 (钟章奇, 陆扬, 刘志雄. 2023. 城市群规划政策的实施能否缩小非中心城市与中心城市间的经济差距? ——来自中国283个城市的证据. *地理研究*, 42(4): 1050-1069) [DOI: 10.11821/dlyj020220779]
- Zhu C M, Yuan S F and Yang L X. 2023. Evolution of territorial spatial pattern and associated eco-environmental effects from the perspective of major functional zones: a case study of Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 43(11): 4488-4501 (朱从谋, 苑韶峰, 杨丽霞. 2023. 主体功能区视角下国土空间格局演变及生态环境效应——以浙江省为例. *生态学报*, 43(11): 4488-4501) [DOI: 10.5846/stxb202202240428]
- Zhu Y Y, Zhang B W, Wang Q A, Li W and Cai X. 2018. The principle of least effort and zipf distribution. *Journal of Physics: Conference Series*, 1113(1): 012007 [DOI: 10.1088/1742-6596/1113/1/012007]
- Zhu Z, Zhu X and Li S S. 2021. Evolution process and characteristics of spatial structure of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. *Acta Geographica Sinica*, 76(4): 799-817 (朱政, 朱翔, 李霜霜. 2021. 长江中游城市群空间结构演变历程与特征. *地理学报*, 76(4): 799-817) [DOI: 10.11821/dlxb202104003]

Remote sensing monitoring and spatiotemporal characteristic analysis of urban construction land expansion in the urban agglomerations of China in the past 30 years

ZHANG Tao, WANG Guanghui, ZHENG Lijuan, DAI Hailun, HE Yuhua, LIU Ting

Land Satellite Remote Sensing Application Center, MNR, Beijing 100048, China

Abstract: The analysis of the spatial and temporal changes of urban agglomeration construction land expansion is highly significant for

optimizing the spatial pattern of urban agglomerations and promoting regional coordinated development.

In this study, 19 urban agglomerations in China are selected as the research object. Based on remote sensing image data of medium-scale resolution in China from 1990 to 2020, the boundary vector of urban concentrated construction areas is extracted from the actual construction of a city by using the method of human-computer interaction. Results are compared with those of other related studies, and research is conducted from the aspects of urban agglomeration expansion process, development stage, expansion mode, and center of gravity migration law.

The results show the following. (1) Compared with other research results, the urban boundary of this study exhibits higher accuracy and reliability. It is also closer to the real situation of a city. (2) In the past 30 years, the urban scale change curve of 19 urban agglomerations in China generally presents an “S” type, and the expansion process of urban agglomerations can be divided into three periods: slow, rapid, and stable expansion. Eastern urban agglomerations entered the rapid expansion period about 10 years earlier than western urban agglomerations. Most urban agglomerations entered a period of steady expansion after 2015. (3) By 2020, 19 urban agglomerations were in a high-level development stage, and the coordination degree of spatial expansion between internal central and peripheral cities was continuously improved. From the perspective of spatial distribution, 70% of the urban agglomerations in the eastern region are in the stage of decentralization, 56% of the urban agglomerations in the western region are in the stage of agglomeration attenuation, and eastern urban agglomerations are generally in a higher level of urban agglomeration development stage. (4) Based on the expansion scale of urban agglomerations in different directions, the spatial expansion modes of 19 urban agglomerations in China can be divided into circular, fan-shaped, and axial expansions. The spatial expansion mode is closely related to the number, location, and influence of core cities within an urban agglomeration. In addition, topographic conditions pose certain restrictions on the expansion direction of urban agglomerations. (5) The gravity center migration trajectories of urban agglomerations are different, and expansion direction may be affected by various factors, such as the location of core cities, the construction of new areas, traffic conditions, and terrain conditions. From the perspective of change in the center of gravity of urban agglomerations, the center of gravity of 84% of urban agglomerations was relatively stable in the past 30 years, i.e., basically located in the core city or the same city adjacent to the core city. The core city of urban agglomerations is attractive, and the expansion of the construction scale of a peripheral city is relatively average.

The results of this study provide intuitive and accurate data for the study of urban expansion in China. Long-term and high-precision monitoring of urban construction scale can fully reflect the development process of urban agglomerations.

Key words: urban agglomeration, expansion process, expansion mode, spatiotemporal characteristics

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFF1303401)