

引用格式: 杨双姝玛, 黄庆旭, 何春阳, 等. 中国建设用地空间格局分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(2): 178-189. [ Yang S S M, Huang Q X, He C Y, et al. Quantifying spatial pattern of built-up areas in China[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(2): 178-189. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180438

# 中国建设用地空间格局分析

杨双姝玛<sup>1,2</sup>, 黄庆旭<sup>1,2,\*</sup>, 何春阳<sup>1,2</sup>, 刘紫玟<sup>1,2</sup>

1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室人与环境可持续研究中心, 北京 100875;
2. 北京师范大学 地理科学学部资源学院土地资源与区域发展研究中心, 北京 100875

## Quantifying Spatial Pattern of Built-up Areas in China

YANG Shuangshuma<sup>1,2</sup>, HUANG Qingxu<sup>1,2,\*</sup>, HE Chunyang<sup>1,2</sup>, LIU Ziwen<sup>1,2</sup>

1. Center for Human-Environment System Sustainability, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Accurately quantifying spatial pattern of built-up areas is of great significance to analyzing the ecological and environmental impacts of the built-up landscape and planning for regional development. In this paper, we used the Global Urban Footprint (GUF) data with 12 m spatial resolution in 2012 to analyze the spatial pattern of built-up areas in China at three scales, i.e., the national, economic zone and urban agglomeration scales. Specifically, we chose six landscape metrics, i.e., total area of the built-up area, percentage of the built-up area of the landscape, number of patches, patch density, landscape shape index and mean Euclidean nearest-neighbor distance to measure spatial pattern of the built-up areas. Then, we explored the relationship between spatial pattern of built-up area and socioeconomic variable at different scales. The results showed the 12 m GUF dataset can delineate the built-up area in China with higher accuracy and more details, compared to previous coarse resolution datasets. The built-up areas reached  $1.73 \times 10^5 \text{ km}^2$  in 2012, accounting for 1.81% of the total land area in China. At the economic zone scale, more than half of built-up areas concentrated in three economic zones, the Northern Coastal region, the Middle Reaches of the Yellow River and the Eastern Coastal region. From the perspective of the spatial pattern of the built-up areas, the fragmentation of built-up areas was highest at the urban agglomeration scale. The mean patch density at the urban agglomeration scale were 3.66 and 1.62 times as large as those at the national and economic zone scales. The results of correlation analysis indicated that population and economic level played important roles in influencing the spatial pattern of built-up areas. The number of patches and the degree of fragmentation for built-up areas increased with the amount of urban residents, gross domestic product and investment in the fixed assets. The correlation coefficients between these two sets of measurements ranged from 0.55 to 0.94 ( $P < 0.05$ ). In the future, we should make place-based plans to solve the fragmentation of the built-up areas and to promote a rational development of built-up areas in China.

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2018-11-26.

基金项目: 北京市科技新星项目(Z181100006218049). [ **Foundation items:** Beijing Nova Program, No.Z181100006218049. ]

作者简介: 杨双姝玛(1994-), 女, 广东佛山人, 硕士生, 主要从事为城市景观过程及其影响。

E-mail: shuangshumayang@mail.bnu.edu.cn

\*通讯作者: 黄庆旭(1984-), 男, 四川成都人, 副教授, 主要从事城市景观过程和城市可持续研究。E-mail: qxhuang@bnu.edu.cn

**Key words:** built-up areas; spatial pattern; Global Urban Footprint; multi-scale analysis; urban sustainability

**\*Corresponding author:** HUANG Qingxu, E-mail: qxhuang@bnu.edu.cn

**摘要:**全面准确地分析中国建设用地空间格局,是衡量城市景观的生态环境效应和制定区域发展战略的重要依据。为此,本文基于空间分辨率为12 m的2012年的全球城市足迹数据,分别在国家、经济区和城市群量化了中国建设用地空间格局。结果表明,12 m分辨率的数据能更细致和准确地刻画中国建设用地的特征。2012年中国建设用地面积为 $1.73 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占中国陆地总面积的1.81%。从建设用地的空间格局来看,城市群尺度的建设用地破碎度最高,其建设用地平均斑块密度分别是国家和经济区平均水平的3.66倍和1.62倍。进一步分析表明,社会经济和地形因素共同影响建设用地空间格局。今后,应针对建设用地空间格局破碎问题,因地制宜地制定合理的措施,推动中国建设用地的合理发展。

**关键词:**建设用地;空间格局;全球城市足迹;多尺度分析;城市可持续性

## 1 引言

建设用地是指以人工建筑为主,且较少有植被覆盖的区域<sup>[1]</sup>。通常,人工建筑的覆盖率超过50%被认为是建设用地,如道路、建筑物、跑道以及工业设施等。近年来,中国经历了快速大规模的建设用地扩展过程<sup>[2]</sup>。据统计,中国城市建设用地面积从1981年的 $0.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加到了2016年的 $5.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,增长了7.4倍<sup>[3]</sup>。中国大规模的建设用地扩展不但改变了建设用地的空间结构,并且对区域的能量和水分传输,以及区域原有的气候和水热条件产生了深刻影响<sup>[4-5]</sup>。已有研究表明,由于中国建设用地空间格局的剧烈变化,空间结构正朝着更分散、更破碎和更复杂的方向发展<sup>[6-8]</sup>。建设用地的空间格局和动态作为人类活动的重要衡量指标,是研究区域景观过程及其生态环境影响的基础<sup>[9]</sup>。因此,准确全面地分析中国建设用地空间格局是制定区域发展战略的重要基础。

中国建设用地空间格局研究受到众多学者的关注,但大部分研究是基于中低空间分辨率的数据开展的。例如,Xu等<sup>[10]</sup>基于夜间灯光、植被指数和地表温度数据提取了中国1992–2015年1 km空间分辨率的城市建设用地信息;Sharma等<sup>[11]</sup>基于MODIS多光谱数据和VIIRS夜间灯光数据,绘制了2014年500 m空间分辨率的城市建设用地数据。Kuang等<sup>[12]</sup>基于30 m空间分辨率的Landsat TM和HJ-1A卫星数据提取了中国1990–2010年的城市和工业建设用地变化;Wang等<sup>[13]</sup>基于1990–2010年的Landsat TM/ETM+数据分析城市建设用地扩展;Chen等<sup>[14]</sup>同样基于Landsat TM和HJ-1A卫星影像中获取全球2000年和2010年30 m空间分辨率的城市建设用地信息。然而,在全国尺度上,已有研究

获取的建设用地空间分辨率较低,无法精细地描绘农村建设用地的空间格局,且大多研究依靠的是光学传感器数据提取的,受极端天气的影响较大。因此,亟需基于更高分辨率建设用地数据,对中国建设用地空间格局进行更精细的分析。

全球城市足迹(Global Urban Footprint)数据提供了全球2012年12 m空间分辨率的建设用地数据,为更精细地分析中国建设用地的空间格局提供了数据保障<sup>[15]</sup>。同时,为避免以往光学遥感数据受地形、光照和阴影等的影响,全球城市足迹数据在基于TerraSAR-X和TanDEM-X 2种雷达数据的基础上,采用支撑向量数据描述的非监督分类方法获取,确保数据更加准确和稳定。这套数据主要是测量了城市和农村中具有一定高度的建筑物分布<sup>[15]</sup>,并且可以免费从网站上获取,开源性较强。已有相关的研究开始利用全球城市足迹数据来用于验证城市数据精度分析。例如,Minghini等<sup>[16]</sup>在意大利米兰,通过将全球城市足迹数据和全球人类居住地数据相比较,发现二者相似性较高,并且与欧盟使用的城市数据集一致性较好,整体精度达到72%~87%。Esch等<sup>[17]</sup>通过对比全球城市足迹数据、全球人类居住地数据和地面真实数据,发现全球城市足迹数据的平均Kappa系数达到0.69,是空间分辨率500 m的MOD500数据Kappa系数的2倍。

因此,本文首先基于2012年城市足迹数据提取了中国的建设用地信息;然后,利用建设用地面积、建设用地占比、斑块数量、斑块密度、景观形状指数和平均最近邻距离6个景观格局指数,分别在国家、经济区和城市群量化了2012年中国建设用地的空间格局;最后,探讨了社会经济因素以及地理区位要素与建设用地空间格局的关系,并提出了相应的政策思考和建议。

## 2 数据源和研究方法

### 2.1 数据源

研究数据主要分为3类,分别是2012年全球城市足迹数据、社会经济数据和地理辅助数据。

2012年的全球城市足迹数据由德国航天航空中心和德国遥感数据中心在2016年发布<sup>[15,17]</sup>,通过城市专题应用平台(Urban Thematic Exploitation)免费获取,具有较强的开源性。该平台一共提供了12、30和84 m共3种不同空间分辨率的全球城市足迹数据<sup>[15]</sup>。本文使用的是12 m空间分辨率的建设用地数据,是覆盖中国分辨率较高的、发布时间较新和最能体现城市与农村建设用地分布的数据集。以2011–2012年3 m空间分辨率的TerraSAR-X数据和TanDEM数据为基础数据,用182 249张雷达影像数据来覆盖全球范围。然后,依赖垂直建筑物的双重反射和后向散射特征,采用支撑向量数据描述的非监督分类方法提取建设用地。因此,本文的建设用地是指具有一定高度的人工建筑用地,它以城镇建设用地和农村居民点为主<sup>[18]</sup>。相比于低空间分辨率的建设用地数据,全球城市足迹数据在提取小规模 and 分散的农村建设用地方面具有较强的优势。与地面真实数据相比,全球城市足迹数据的建设用地总体精度约为85%,Kappa系数达到69%<sup>[17]</sup>。国内已有学者选择北京市验证了建设用地的准确度,总体精度为87.35%,Kappa系数为0.68,二者分别比全球人类居住地数据、全球30 m土地覆盖数据和MODIS 500 m土地数据高了3.3%~14.0%

和0.1~0.4<sup>[17]</sup>。此外,该平台计划在2018年年底将发布2015年10 m空间分辨率的全球城市足迹数据。

社会经济数据包括经济数据和人口数据,其中全国、经济区和城市群的经济数据主要来自2013年的《中国区域统计年鉴》,人口数据来源于2013年的《中国人口和就业统计年鉴》。地理辅助数据主要包括中国经济区、城市群、地级市和县级尺度的行政边界数据,均来源于国家测绘地理信息局发布的1:100万数据。90 m高程数据和1:400万的河流、公路、铁路、地级市和县级中心矢量数据来自国家地理信息公共服务平台<sup>[19]</sup>。1992–2015年的多年平均气温和降水数据<sup>[20–21]</sup>来自中国气象站。本文在获取所有数据之后,将数据全部转换为Albers等积投影。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 量化2012年中国建设用地的景观格局特征

由于景观指数能够高度浓缩景观格局信息,反映其空间组成和空间配置等方面特征,所以本文利用景观指数量化建设用地的景观格局特征<sup>[22]</sup>。参考Wu等<sup>[23]</sup>的研究,同时考虑建设用地的空间组成和空间配置,本文选用了建设用地面积、建设用地占比、斑块数量、斑块密度、景观形状指数和平均最近邻距离6个指标来量化中国建设用地的空间格局特征。其中,建设用地面积和建设用地占比表示建设用地空间组成特征;斑块数量、斑块密度、景观形状指数和平均最近邻距离表示建设用地的空间配置特征。本文所使用的景观指数均使用ArcGIS中的Patch Analysis模块进行计算(表1)。

表1 研究中选取的景观指数

Tab. 1 The landscape metrics used in this study

指数类型	指数名称	计算公式	取值范围	含义
空间组成	建设用地面积(CA) /10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \times 10^{-10}$	CA>0	表征区域中的建设用地斑块面积(a <sub>ij</sub> )的总和
	建设用地占比(PLAND) /%	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100$	0<PLAND≤100	描述了区域中建设用地面积占区域面积(A)的比例
空间配置	斑块数量(NP)/个	NP=N	NP≥1	反映了区域中建设用地斑块的个数(N)
	斑块密度(PD) /(个/km <sup>2</sup> )	$PD = \frac{N}{A}$	PD>0	反映了单位面积上的建设用地斑块数量。其值越高,建设用地斑块越破碎
	景观形状指数(LSI)	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	LSI≥1	用来衡量建设用地形状的规则程度。E为建设用地斑块总边长。LSI值越高,建设用地形状越趋向不规则
	平均最近邻距离(ENN_MN) /m	$ENN\_MN = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}}{N'}$	ENN_MN>0	反映了不同建设用地斑块之间的平均最短欧氏距离。h <sub>ij</sub> 为区域内每一个建设用地斑块与其最近邻体的距离, N'为具有邻体的建设用地斑块总数

注:表中内容根据Fragstats 4.2用户手册修改<sup>[24]</sup>。



### 2.2.2 多尺度分析中国建设用地的空间格局

为了全面认识中国建设用地的空间格局,本文分别在国家、经济区和城市群分析了2012年中国建设用地的空间格局(图1)。选择经济区和城市群,由于经济区和城市群是相对独立和完整的城市系统,可以逐层深入理解建设用地格局的区域差异。具体而言,根据国务院发展研究中心在2005年发布的《地区协调发展的战略和政策》<sup>[25]</sup>,将中国划分为东北、北部沿海、南部沿海、东部沿海、黄河中游、长江中游、西南和西北8个经济区。在城市群尺度上,参考Fang等<sup>[26]</sup>的研究和国务院在2016年发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年(2016–2020)规划纲要》<sup>[27]</sup>,选取了京津冀、长江三角洲、长江中游、珠江三角洲、山东半岛、成渝、辽中南、哈长、海峡西岸、关中、中原、广西北部湾、江淮和天山北坡14个城市群。

## 3 结果及分析

### 3.1 2012年中国建设用地的空间组成特征

2012年中国建设用地面积为 $1.73 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占中国陆地总面积的1.8%。经济区中,建设用地集中在北部沿海、黄河中游和东部沿海经济区(图2(a))。这3个经济区的建设用地面积分别为 $3.9 \times 10^4$ 、 $2.9 \times 10^4$ 和 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 共占中国建设用地面积的54.1%。

西北经济区的建设用地面积最小,为 $0.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 仅占中国建设用地面积的4.2%。从建设用地占比来看,东部沿海经济区的建设用地占比最高,为12.3%,高出国家平均水平的5.8倍。西北经济区的建设用地占比最低,为0.2%,仅为国家尺度建设用地占比的十分之一。

中国建设用地面积的一半以上分布在14个城市群中。2012年中国城市群的建设用地总面积为 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占中国建设用地总面积的55.9%。这14个城市群的建设用地面积在 $0.1 \times 10^4 \sim 1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 之间(图3(a))。其中,建设用地面积排在前三位的城市群是长江三角洲、京津冀和山东半岛城市群,建设用地面积分别为 $1.7 \times 10^4$ 、 $1.5 \times 10^4$ 和 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 分别占中国城市群建设用地总面积的17.9%、15.4%和12.5%。天山北坡城市群的建设用地面积最小,为 $0.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占中国城市群建设用地总面积的1%。

从建设用地占比来看,14个城市群的建设用地占比平均值为7.6%,是国家尺度建设用地占比的4.2倍。14个城市群的建设用地占比在1.1%~16.4%之间(图3(b))。其中,建设用地占比最高的是长江三角洲城市群,为16.4%,比国家平均水平高8.1倍;最低的是天山北坡城市群,建设用地占比为1.1%,仅为国家尺度建设用地占比的60%。

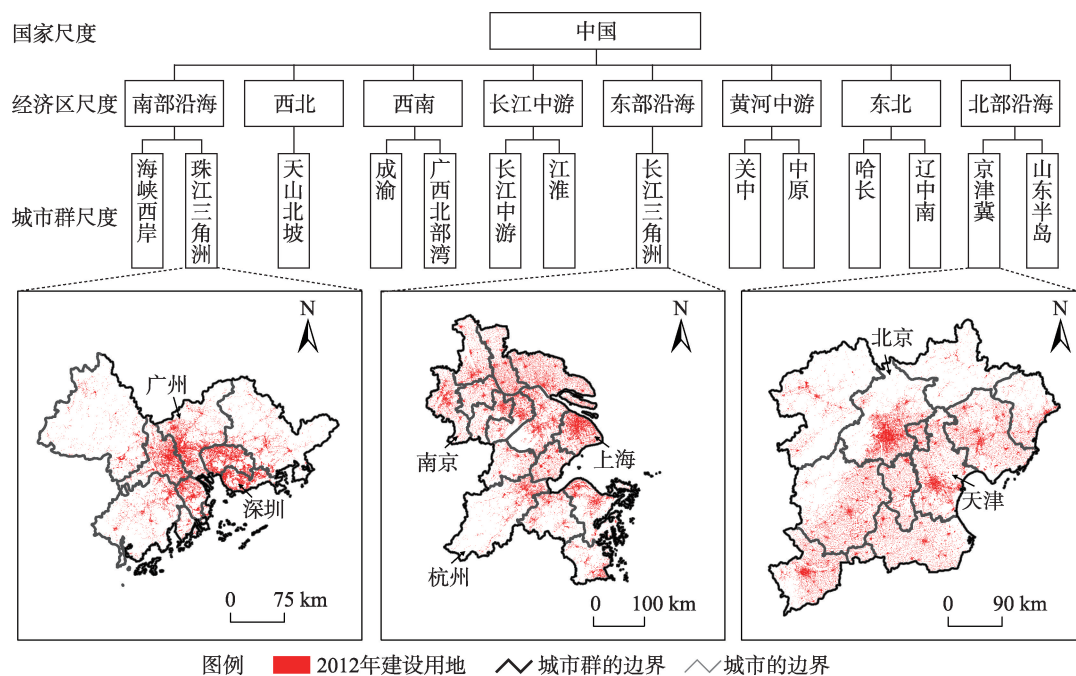


图1 2012年中国建设用地的等级分布

Fig. 1 The hierarchy of the built-up areas in China in 2012



3.2 2012年中国建设用地的空间配置特征

2012年中国建设用地的斑块数量为 $6.8\times 10^6$ 个,斑块密度为 $0.7$ 个/ $\text{km}^2$ ,景观形状指数 $3994.3$ ,平均最近邻体距离为 $145.9\text{ m}$ (表2)。

相较于国家尺度上的结果,经济区尺度的建设用地空间格局更加破碎(表2)。经济区尺度的建设用地平均斑块密度为 $1.6$ 个/ $\text{km}^2$ ,是国家尺度平均值的 $2.3$ 倍,其中东部沿海经济区的建设用地空间

破碎化程度最高。东部沿海经济区的建设用地斑块密度指数最高,为 $4.7$ 个/ $\text{km}^2$ ,是国家平均水平的 $6.6$ 倍(图4(b)),且其建设用地的平均最近邻距离指数在8个经济区中也是最小,为 $121.2\text{ m}$ ,比国家平均水平低了 $17\%$ (图4(d))。东部沿海经济区的建设用地斑块数量在8个经济区中排第二,为 $1.0\times 10^6$ ,占中国建设用地斑块总量的 $14.3\%$ (图4(a))。此外,经济区尺度的建设用地形状比国

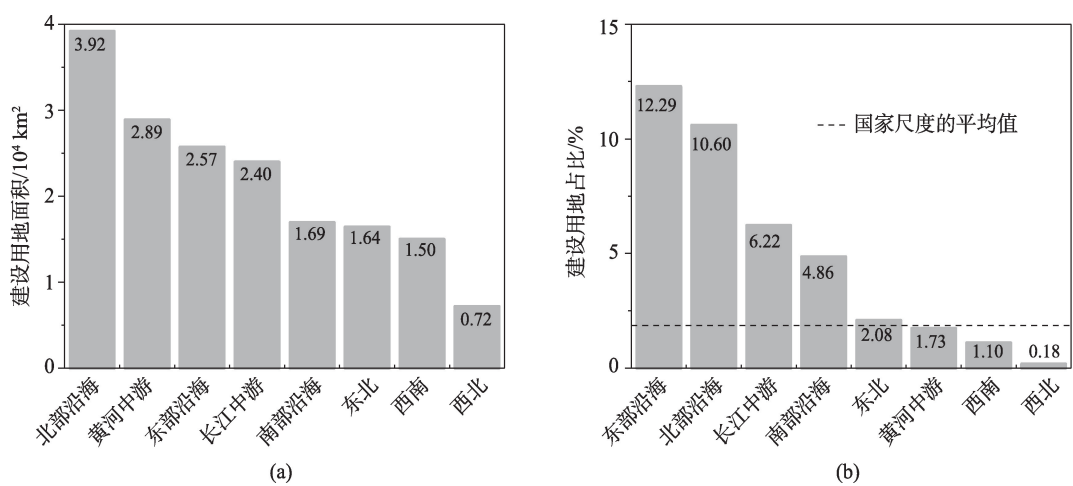


图2 2012年中国八大经济区的建设用地空间组成

Fig. 2 The comparison of the built-up areas among China's eight economic zones in 2012

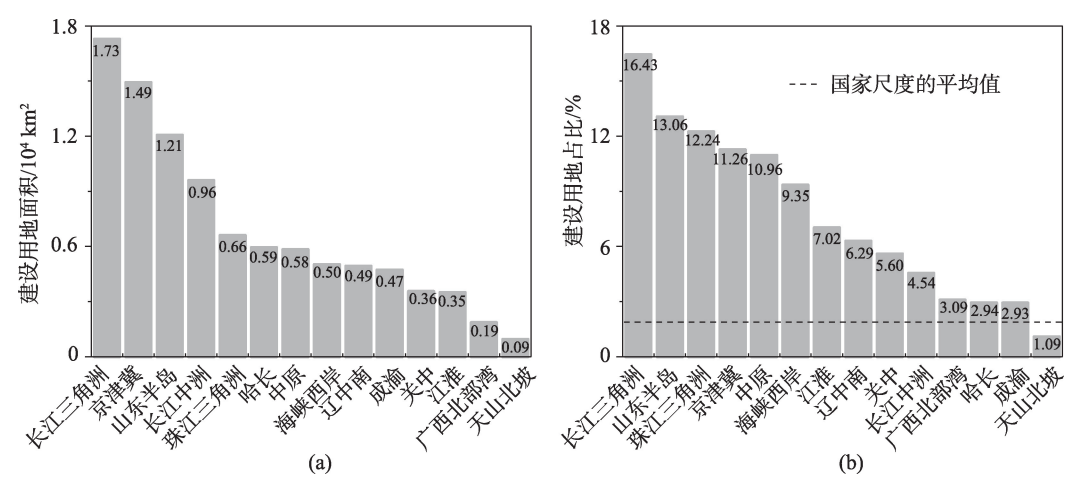


图3 2012年中国14个城市群的建设用地面积及占比

Fig. 3 Construction land area and proportion of 14 urban agglomerations in China in 2012

表2 2012年中国建设用地的空间配置

Tab. 2 The spatial configuration of the built-up areas in China in 2012

类型	斑块数量/ $10^6$ 个	斑块密度/(个/ $\text{km}^2$ )	景观形状指数	平均最近邻体距离/m
国家尺度	6.8	0.71	3994.25	145.87
经济区尺度均值	0.9	1.62	1417.47	156.48
城市群尺度均值	0.2	2.46	699.48	150.22

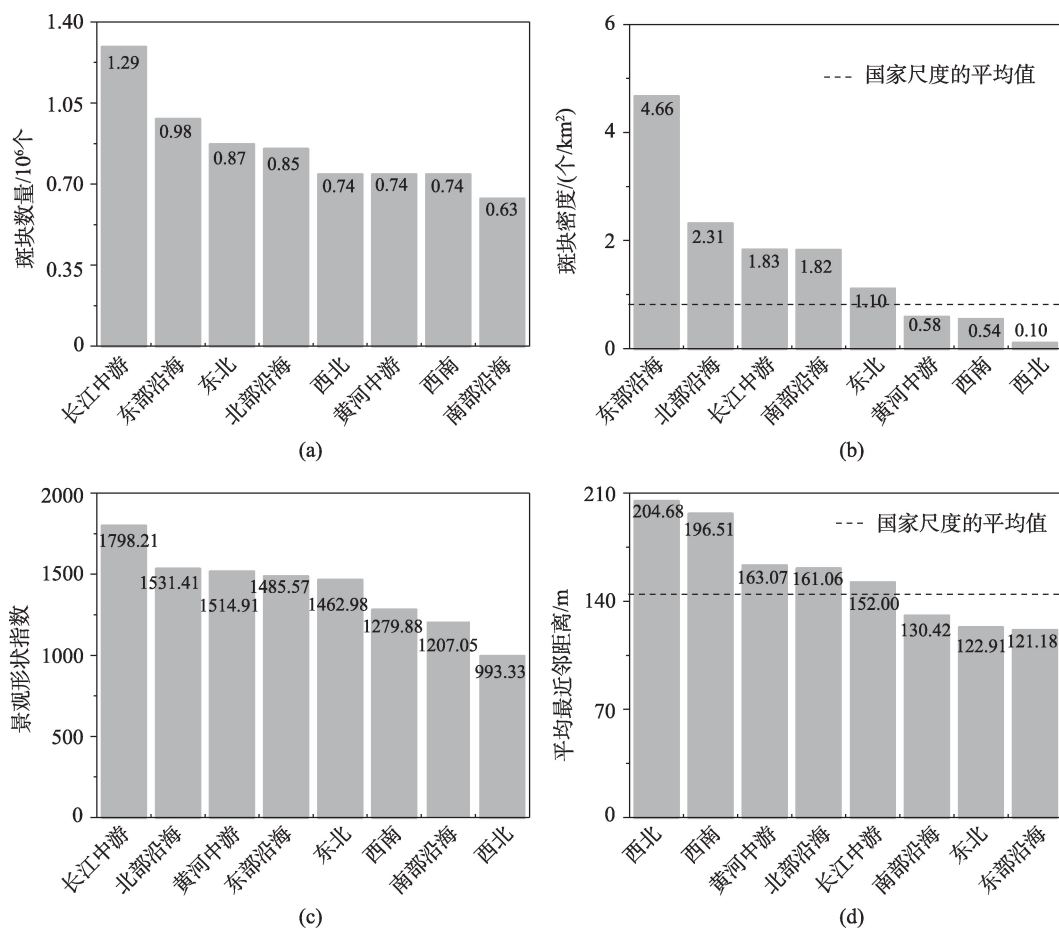


图4 2012年中国八大经济区的建设用地空间配置

Fig. 4 The spatial configuration of the built-up areas among China's eight economic zones in 2012

家尺度更加简单。八大经济区的建设用地景观形状指数均值为1417.5,仅为国家尺度均值的42%(图4(c))。

在3个尺度中,城市群尺度上的建设用地空间格局最破碎(表2)。城市群尺度的建设用地平均斑块密度是2.5个/km<sup>2</sup>,高出国家尺度平均值的2.5倍,其中长江三角洲城市群的空间破碎化程度最高。长江三角洲城市群的建设用地斑块数量在14个城市群中排第一,为0.6×10<sup>6</sup>,占中国建设用地斑块总量的8.8%(图5(a));其建设用地斑块密度为5.7个/km<sup>2</sup>,高出国家尺度平均值7.0倍(图5(b));其建设用地平均最近邻距离也在14个城市群中排最后,为107.7 m,为国家尺度均值的73.85%(图5(d))。从景观形状指数上来看,城市群的建设用地形状比国家尺度更加规则。城市群建设用地的平均景观形状指数仅仅为699.5,是国家尺度对应指数的17.5%(图5(c))。

## 4 结果与分析

### 4.1 12 m分辨率的数据能更细致地刻画建设用地空间特征

相较30~1000 m分辨率的建设用地数据,12 m分辨率的建设用地数据具有以下优势:① 12 m分辨率的建设用地数据可以捕捉一些被30~1000 m分辨率数据忽略的小型建设用地<sup>[28-30]</sup>。在遥感影像中,一直存在混合像元的问题<sup>[31]</sup>。在中低分辨率的建设用地数据中,许多非建设用地像元也包含建设用地,但由于建设用地在像元中的比例未达到一定的阈值,最终被划分为非建设用地;② 12 m分辨率的建设用地数据可以捕捉更多建设用地的空间结构的细节<sup>[32-34]</sup>。在更高分辨率建设用地数据中,建设用地的空间形态更加清晰可辨,为计算建设用地景观指数提供了更好的数据源。例如,Li等<sup>[35]</sup>分别基于2.44、10和30 m分辨率数据分析了城市绿地空间

格局,结果显示在更高分辨率的数据下,城市绿地空间格局越细致,与地表温度数据的负相关性越强。

为了进一步验证 12 m 分辨率建设用地数据的优势,将本研究结果分别与 Kuang 等<sup>[12]</sup> 和 Xu 等<sup>[10]</sup> 提取的 2010 年中国 30 m 和 1 km 分辨率的城市土地数据进行对比。值得注意的是,Kuang<sup>[12]</sup>等和 Xu 等<sup>[10]</sup>的城市土地数据只包括城市区域中的建设用地,而全球城市足迹数据同时包括了城市和乡村的建设用地。结果表明,基于 12 m 分辨率获取的建设用地面积远高于其他 2 套数据的城市土地面积(表 3)。国家尺度上,基于 12 m 分辨率数据提取的建设用地面积分别比 30 m 和 1 km 分辨率数

据高出了  $8.3\times 10^4\text{ km}^2$  和  $1.1\times 10^5\text{ km}^2$ , 高出的比例达 47.6%和 62.6%。

此外,12 m 分辨率数据在提取小规模 and 分散的农村建设用地方面具有较强的优势(图 6)。选择了 3 个城市郊区,采用目视解译的方法在 Google Earth 影像上勾画建设用地范围,并对比了不同分辨率数据的精度和空间格局。结果显示,基于 12 m 空间分辨率数据提取到的建设用地面积最大,范围最准确,建筑用地格局特征更精细,而基于 1 km 分辨率数据会有明显的漏分现象。从空间组成来看,基于 12 m 空间分辨率的建设用地面积比其他 2 种分辨率的城市土地面积高出了 19.1%~234.5%(表 4)。

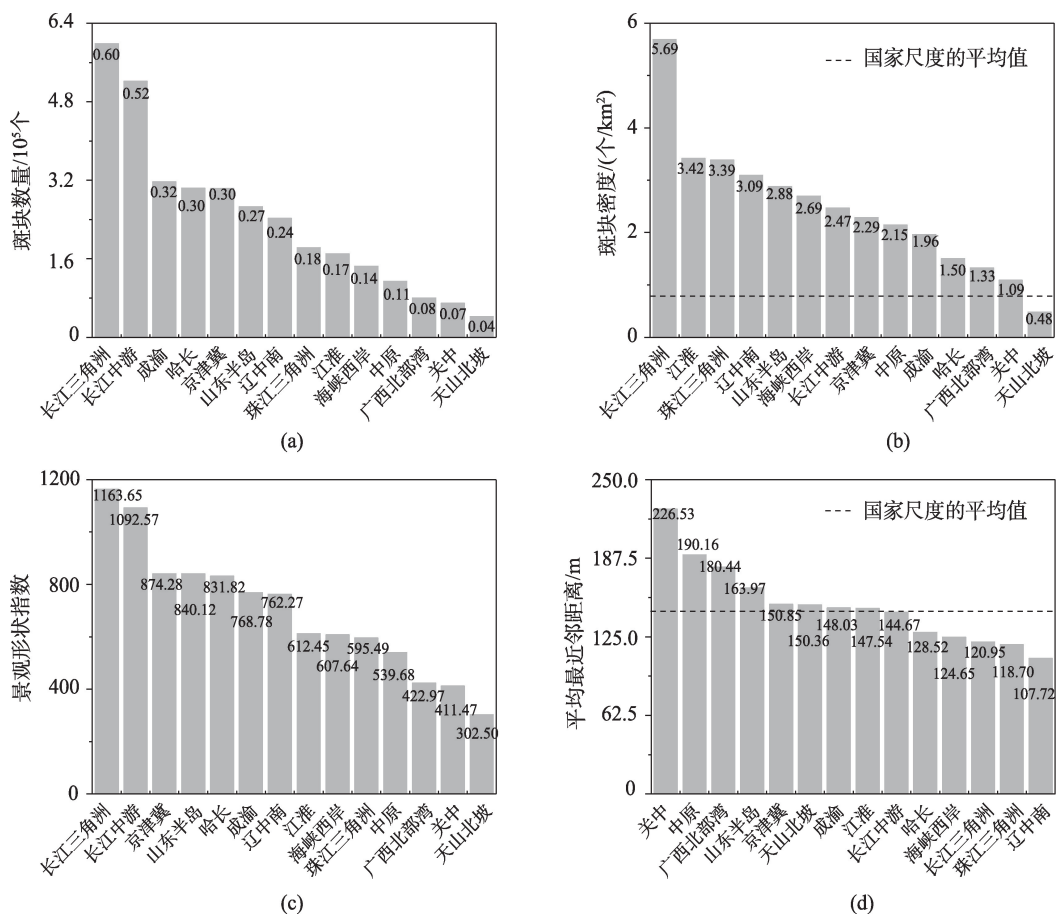


图5 2012年中国14个城市群的建设用地空间配置

Fig. 5 The spatial configuration of the built-up areas among China's fourteen urban agglomerations in 2012

表3 不同空间分辨率数据提取建设用地和城市土地的对比

Tab. 3 Comparison of the built-up areas and urban areas derived from datasets with different spatial resolutions (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )			
尺度	12 m分辨率的建设用地面积	30 m分辨率的城市土地面积	1 km分辨率的城市土地面积
国家	17.33	9.08	6.48
经济区	2.20	1.14	0.81
城市群	0.69	0.22	0.32



从提取精度来看,12 m空间分辨率的建设用地平均Kappa为0.6,比其他2种分辨率的数据的Kappa高出30.9%~212.5%(图6)。从空间配置来看,基于12 m空间分辨率的建设用地斑块密度和景观形状指数最高,分别比其他2种分辨率数据提取结果高出4.5~245.0倍和1.3~14.8倍(表4)。

4.2 社会经济发展和区位要素是影响建设用地空间格局的重要因素

建设用地空间格局的形成既受社会经济发展

等要素的驱动,也受地理区位因素的制约<sup>[36]</sup>。

参考Huang等的研究<sup>[37]</sup>,本文利用皮尔森相关分析方法,分析了城市群建设用地空间格局与社会经济指标的关系。考虑到数据的可获得性,选择的人口指标有3个,分别是年末常住总人口数量、年末城市人口数量和城镇化率;选取的经济指标有4个,分别是国内生产总值、第二产业生产总值、第三产业生产总值和固定资产投资金额。分析表明,城市人口越多、国内生产总值和固定资产投资越高,建设用地斑块数量越多、破碎度越大、形状

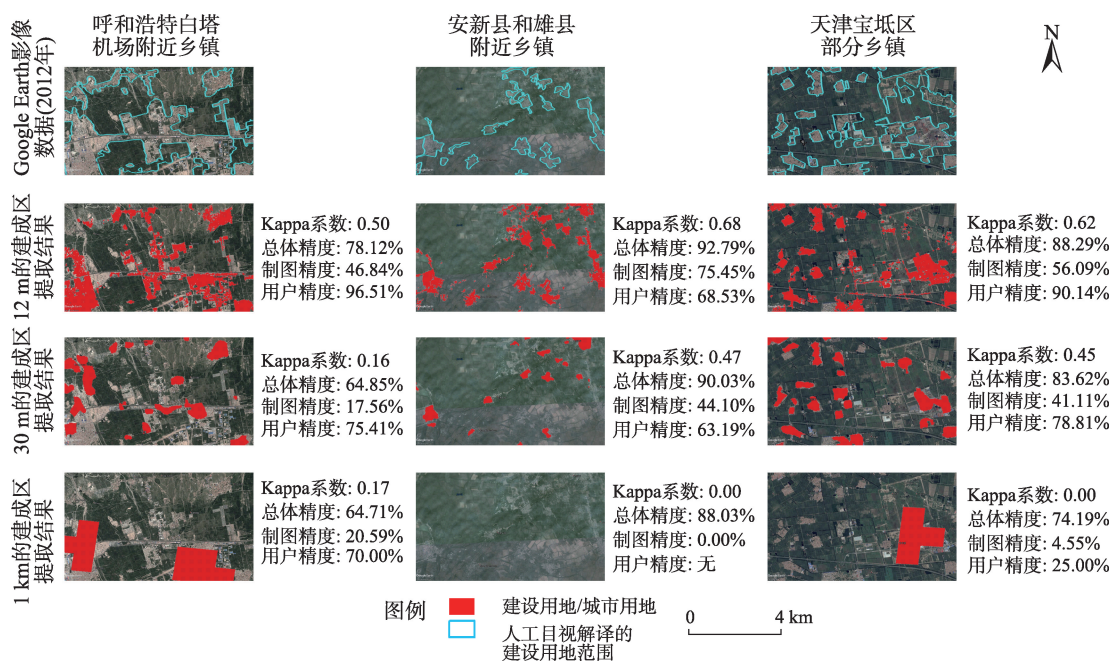


图6 不同空间分辨率数据对小规模和农村建设用地的提取对比

Fig. 6 Extraction of small-scale and rural built-up areas from three datasets with difference spatial resolutions

表4 不同空间分辨率数据提取的建设用地空间格局对比

		空间组成		空间配置			
		建设用地 面积/km <sup>2</sup>	建设用地 占比/%	斑块 数量/个	斑块密度 /(个/km <sup>2</sup> )	景观形状 指数	平均最近 邻距离/m
呼和浩特白塔 机场附近乡镇	目视解译结果	21.51	23.40	33	0.36	10.59	187.14
	12 m空间分辨率	13.38	19.36	156	1.90	26.95	71.78
	30 m空间分辨率	11.23	9.29	26	0.32	6.28	576.18
	1 km空间分辨率	4.00	11.76	3	0.04	1.71	4070.37
安新县和雄县 附近乡镇	目视解译结果	14.48	9.69	22	0.15	9.19	472.65
	12 m空间分辨率	15.53	13.41	302	2.61	29.23	63.49
	30 m空间分辨率	9.88	8.53	28	0.24	6.77	524.46
	1 km空间分辨率	—	—	—	—	—	—
天津宝坻区 部分乡镇	目视解译结果	32.75	39.89	9	0.11	7.04	251.95
	12 m空间分辨率	15.89	14.56	226	2.46	23.98	82.12
	30 m空间分辨率	7.63	12.22	41	0.45	8.90	299.85
	1 km空间分辨率	10.00	4.30	1	0.01	10.59	—

越复杂(表5)。城市人口、国内生产总值和固定资产投资与建设用地面积、建设用地占比、斑块数量、斑块密度和景观形状指数呈显著正相关,相关系数在0.55~0.95之间。其中,固定资产投资金额和建设用地的景观形状指数之间的相关系数最高,达到0.95( $P<0.05$ )。与此同时,国内生产总值与建设用地的平均最近邻距离指数呈较强的负相关,相关系数等于-0.46( $P<0.10$ )。

虽然社会经济发展更好的城市群,建设用地形状更破碎和复杂,但是其建设用地集约程度不一定更高(图7)。以长江三角洲为例,其建设用地最为破碎和复杂,但是其单位建设用地的人口只有 $6.3\times 10^{-3}$ 人/ $\text{m}^2$ ,比城市群均值低32.4%。同时,以天山北坡城市群为例,其建设用地的破碎和复杂程度均最低,但是其单位建设用地的经济产出达到了565.6元/ $\text{m}^2$ ,高出城市群平均值25.3%。建设用地

的集约性值得在未来的研究中进一步关注。

地理区位因素对建设用地的形成和发展产生一定的影响<sup>[38-40]</sup>。进一步通过Logistic回归探讨了建设用地空间格局与地理区位之间的关系。根据已有研究和数据的可获取性<sup>[36, 40-41]</sup>,分别选择了9个指标,包括高程、坡度、距河流的距离、多年平均气温、多年平均降水、距一般公路的距离、距铁路的距离、距市中心的距离和距县中心的距离。首先,我们对这9个指标进行标准化处理。随后,利用Logistics回归结果的让步比对结果分析。当让步比大于1时,指标的增大增大了建设用地出现的概率。而让步比小于1时,指标的增大减小建设用地出现的概率。

区位和地形因素深刻影响了中国建设用地的空间分布。回归结果ROC值为0.92,说明选取的这9种因素对建设用地的解释程度较强(表6)。其中,7个因素的让步比小于1。换句话说,距县中心的距

表5 城市群尺度社会经济要素与建设用地空间格局的关系

Tab. 5 The relationship between the spatial pattern of built-up areas and socio-economic factors at the urban agglomeration scale

		空间组成		空间配置			
		建设用地 面积/ $10^4\text{km}^2$	建设用地 占比/%	斑块 数量/个	斑块密度 /(个/ $\text{km}^2$ )	景观形状 指数	平均最近 邻距离/m
人口 指标	总人口/万人	0.78**	0.42	0.89**	0.55**	0.88**	-0.30
	城市人口/万人	0.76**	0.57**	0.83**	0.70**	0.77**	-0.31
	城镇化率/%	-0.14	0.14	-0.25	0.03	-0.37	0.21
经济 指标	国内生产总值/亿元	0.91**	0.71**	0.85**	0.79**	0.84**	-0.46*
	第二产业生产总值/亿元	0.90**	0.70**	0.89**	0.81**	0.87**	-0.46*
	第三产业生产总值/亿元	0.90**	0.75**	0.77**	0.77**	0.74**	-0.45
	固定资产投资金额(不含农户)/亿元	0.90**	0.55**	0.94**	0.71**	0.95**	-0.40

注:\*表示相关系数在0.10水平显著(双尾检验),\*\*表示相关系数在0.05水平显著(双尾检验)。

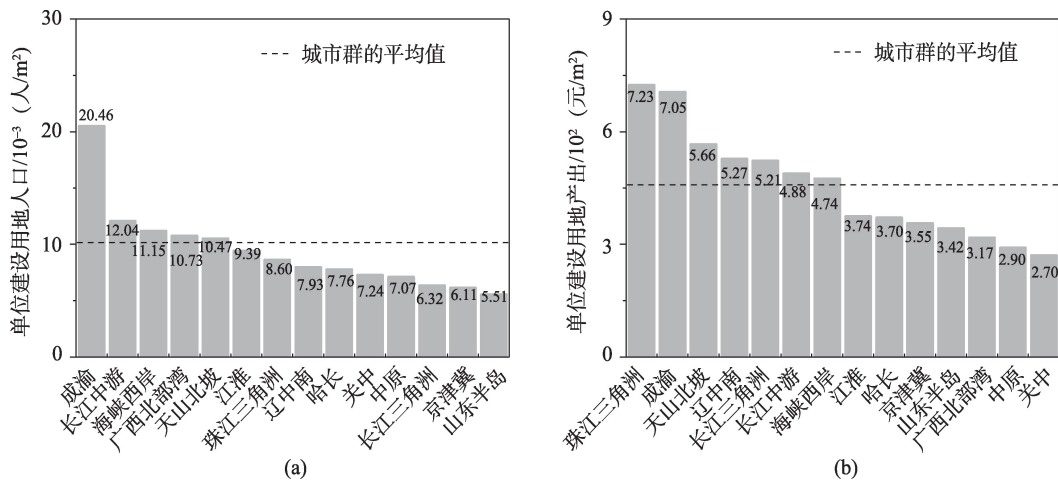


图7 2012年中国城市群建设用地的集约化水平

Fig. 7 The intensification of the built-up land among urban agglomerations in China in 2012

表6 2012年中国建设用地 Logistics 回归结果  
Tab. 6 Logistic regression results of the built-up areas in China in 2012

变量	回归系数	标准差	显著水平	让步比 $\exp(\beta)$	ROC
高程	-6.59	0.06	0.00	$1.40 \times 10^{-3}$	0.92
坡度	-19.71	0.13	0.00	$2.77 \times 10^{-9}$	
距河流的距离	0.63	0.45	0.16	1.87	
多年平均气温	0.33	0.02	0.00	1.39	
多年平均降水	-0.50	0.02	0.00	0.61	
距一般公路的距离	-12.89	0.28	0.00	$3.00 \times 10^{-6}$	
距铁路的距离	-1.49	0.06	0.00	0.22	
距市中心的距离	-18.97	0.16	0.00	$5.79 \times 10^{-9}$	
距县中心的距离	-102.87	0.50	0.00	$2.11 \times 10^{-45}$	
常数	-0.28	0.01	0.00	0.76	

离、距市中心的距离、坡度、距一般公路的距离、高程、距离铁路的距离和多年平均降水的增加减少与建设用地的出现有负相关。与之相反,多年平均气温的让步比大于1,这表明温度的升高与建设用地的出现有正相关。而距河流的距离没有通过显著性检验。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

2012年中国建设用地面积为  $1.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占中国陆地总面积的1.8%。在经济区尺度,建设用地面积主要集中在北部沿海、黄河中游和东部沿海经济区,这3个经济区的建设用地面积共占中国建设用地面积的54.1%。在城市群尺度,中国建设用地面积的一半以上分布在14个城市群之中。2012年中国城市群的建设用地总面积为  $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占中国建设用地总面积的55.9%。

从建设用地的空间格局来看,2012年中国建设用地的斑块数量为  $6.8 \times 10^6$  个,斑块密度为0.7个/ $\text{km}^2$ ,景观形状指数3994.3,平均最近邻体距离为145.9 m。经济区和城市群的建设用地破碎度更高。其中,经济区和城市群建设用地的平均斑块密度分别比国家平均水平高出1.3倍和2.5倍。

社会经济发展和区位要素是影响建设用地空间格局的重要因素。相关分析表明,城市人口、国内生产总值和固定资产投资与建设用地景观指数的相关系数介于0.55~0.94 ( $P < 0.05$ ) 之间。而 Logistic 回归表明,高程和距铁路的距离等区位因素会减少建设用地出现的概率,其让步比在  $1.4 \times 10^{-3}$  和0.6之间。

### 5.2 展望

未来,应该依据不同地区建设用地空间格局存在的问题及其影响因素,制定相应措施,推动中国不同地区建设用地的发展。针对建设用地破碎度高的地区,如西北和长江中游经济区、天山北坡和长江中游城市群,应该避免建设用地无序扩展对自然生境的侵占,保护湿地、森林和草地的连通性。针对未来城市人口和社会经济仍将快速增长的地区,如东部沿海和南部沿海经济区,以及长江三角洲和珠江三角洲城市群,应该对重要的生态用地进行保护,避免建设用地扩展占用重要的生态用地。

另外,本文仅选取了6个景观指数来量化建设用地空间格局主要特征,但是这些指标无法全面反映建设用地空间格局特征;且全球城市足迹数据只有2012年一期,因此无法研究建设用地空间格局的动态。今后可选取更多反映建设用地空间格局特征的景观指数,如聚集度和蔓延度指数,从更多维度衡量建设用地的空间格局。最后,未来可以结合即将发布最新的2015年建设用地数据,实现建设用地空间格局的动态分析。

### 参考文献(References):

- [1] Liu Z F, He C Y, Zhou Y Y, et al. How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion[J]. Landscape Ecology, 2014,29:763-771.
- [2] Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. Landscape and Urban Planning, 2012,106:62-72.
- [3] 国家统计局.中国统计年鉴-2017[M].北京:中国统计出版社,2017. [National Bureau of Statistics of China 2017]



- China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. ]
- [ 4 ] Aronson M F, La Sorte F A, Nilon C H, et al. A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2014,281(1780):20133330.
- [ 5 ] Zhou Y Y, Wang Y Q, Gold A J, et al. Assessing impact of urban impervious surface on watershed hydrology using distributed object-oriented simulation and spatial regression[J]. *GeoJournal*, 2013,79:155-66.
- [ 6 ] 方创琳.中国快速城市化过程中的资源环境保障问题与对策建议[J]. *中国科学院院刊*,2009,24(5):468-474. [ Fang C L. Issues of resources and environment protection in China's rapid urbanization process and suggestions on countermeasures[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2009,24(5):468-474. ]
- [ 7 ] 周春山,叶昌东.中国特大城市空间增长特征及其原因分析[J]. *地理学报*,2013,68(6):728-738. [ Zhou C S, Ye C D. Features and causes of urban spatial growth in Chinese metropolises[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013,68(6): 728-738. ]
- [ 8 ] 丁俊,王开泳.珠三角城市群工业生产空间的时空演化及驱动机制[J]. *地理研究*,2018,37(1):53-66. [ Ding J, Wang K Y. Spatio-temporal evolution of industrial production space and its driving mechanisms in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. *Geographical Research*, 2018,37 (1):53-66. ]
- [ 9 ] Hu Z W, Li Q Q, Zhang Q, et al. Representation of block-based image features in a multi-scale framework for built-up area detection[J]. *Remote Sensing*, 2016,8:155.
- [ 10 ] Xu M, He C Y, Liu Z F, et al. How did urban land expand in China between 1992 and 2015? A multi-scale landscape analysis[J]. *PLoS One*, 2016,11:e0154839.
- [ 11 ] Sharma R C, Tateishi R, Hara K, et al. Global mapping of urban built-up areas of year 2014 by combining MODIS multispectral data with VIIRS nighttime light data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016,9(10):1004-1020.
- [ 12 ] Kuang W H, Liu J Y, Dong J W, et al. The rapid and massive urban and industrial land expansions in China between 1990 and 2010: A CLUD-based analysis of their trajectories, patterns, and drivers[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016,145:21-33.
- [ 13 ] Wang L, Li C C, Ying Q, et al. China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012,57(22):2802-2812.
- [ 14 ] Chen X H, Cao X, Liao A P, et al. Global mapping of artificial surfaces at 30-m resolution[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016,59(12):2295-2306.
- [ 15 ] Esch T, Asamer H, Boettcher M, et al. Earth observation-supported service platform for the development and provision of thematic information on the built environment - the Tep-Urban Project[C]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016,XLI-B8:1379-1384.
- [ 16 ] Minghini M, Molinari M B, See L, et al. Preliminary assessment of the global urban footprint and the global human settlement layer for the city of Milan[C]. 20<sup>th</sup> Agile Conference on Geographic Information Science, 2017.
- [ 17 ] Esch T, Wieke H, Andreas H, et al. Breaking new ground in mapping human settlements from space: The global urban footprint[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017,134:30-42.
- [ 18 ] 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 J Y, Liu W C, Kuang W H, 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. ]
- [ 19 ] 赵雪,黄庆旭,何春阳.城市扩展过程对湿地影响的情景模拟研究——以河北怀来为例[J]. *自然资源学报*,2017, 32(9):1469-1481. [ Zhao X, Huang Q X, He C Y. Scenarios simulation of the spatial stress on wetlands by urban expansion: A case study of Huailai County[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017,32(9):1469-1481. ]
- [ 20 ] Xu Y, Gao X J, Shen Y et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009,26(4): 763-772.
- [ 21 ] 吴佳,高学杰.一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*,2013,56(4):1102-1111. [ Wu J, Gao X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013,56(4):1102-1111. ]
- [ 22 ] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2007. [ Wu J G. *Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy*(Second Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. ]
- [ 23 ] Wu J G. Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research[J]. *Landscape Ecology*, 2010,25:1-4.
- [ 24 ] McGarigal K, Cushman S A, Ene E. *Fragstats v4: Spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps*[CP]. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, 2012. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.

- [25] 中共中央国务院. 国家新型城镇化规划(2014-2020年) [R]. 北京: 新华社, 2014. [ The CPC Central Committee TSC. National New-type Urbanization Plan (2014-2020) [R]. Beijing: Xinhua News Agency, 2014. ]
- [26] Fang C L, Ma H T, Wang J. A Regional Categorization for "New- Type Urbanization" in China[J]. PloS One, 2015,10(8):e0134253.
- [27] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年 (2016-2020年) 规划纲要[R]. 北京, 2016-03-17. [ The State Council of PRC. The 13<sup>th</sup> Five-Year Plan for Economic and Social Development of the People's Republic of China (2016-2020) [R]. Beijing, 2016-03-17. ]
- [28] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. [ Xu X Q, Zhou Y X, Ning Y M. Urban geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. ]
- [29] Xia N, Wang Y J, Xu H, et al. Demarcation of prime farmland protection areas around a metropolis based on high-resolution satellite imagery[J]. Scientific Reports, 2016,6: 37634.
- [30] Jayasekare A S, Wickramasuriya R, Namazi-Rad M, et al. Hybrid method for building extraction in vegetation-rich urban areas from very high-resolution satellite imagery [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017,11(3): 036017-1-036017-12.
- [31] 刘珍环, 王仰麟, 彭建. 深圳市不透水表面的遥感监测与时空格局[J]. 地理研究, 2012,31(8):1535-1545. [ Liu Z H, Wang Y L, Peng J. Quantifying spatiotemporal patterns dynamics of impervious surface in Shenzhen[J]. Geographical Research, 2012,31(8):1535-1545. ]
- [32] Chen Y X, Qin K, Gan S Z, et al. Structural feature modeling of high-resolution remote sensing images using directional spatial correlation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014,11(10):1727-1731.
- [33] Zhang L B, Li A X, Zhang Z J, et al. Global and local saliency analysis for the extraction of residential areas in high-spatial-resolution remote sensing image[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54:3750-3763.
- [34] 汪权方, 许纪承, 陈媛媛等. 遥感影像空间分辨率对居民地信息提取的影响[J]. 资源科学, 2012,34(1):159-165. [ Wang Q F, Xu J C, Chen Y Y, et al. Influence of the varied spatial resolution of remote sensing images on urban and rural residential information extraction[J]. Resources Science, 2012,34(1):159-165. ]
- [35] Li X M, Zhou W Q, Ouyang Z Y. Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: What are the effects of spatial resolution?[J]. Landscape and Urban Planning, 2013,114(8):1-8.
- [36] 黄庆旭, 何春阳, 史培军等. 城市扩展多尺度驱动机制分析——以北京为例[J]. 经济地理, 2009,29(5):714-721. [ Huang Q X, He C Y, Shi P J, et al. Understanding multi-scale urban expansion driving forces: In the case study of Beijing[J]. Economic Geography, 2009,29(5):714-721. ]
- [37] Huang J N, Lu X X, Sellers J M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing[J]. Landscape and Urban Planning, 2007,82:184-97.
- [38] Clarke K C, Hoppen S, Gaydos L. A self-modifying cellular automation model of historical urbanization in the San Francisco bay area[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997,24:247 - 261.
- [39] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J]. 地理科学进展, 2015,34(8):976-986. [ Han H R, Yang C F, Song J P. Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios[J]. Progress in Geography, 2015,34(8):976-986. ]
- [40] 刘纪远, 张增祥, 徐新良等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009,64(12): 1411-1420. [ Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21<sup>st</sup> century[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12):1411-1420. ]
- [41] 任志远, 李冬玉, 杨勇. 关中地区土地利用格局模拟与驱动力分析[J]. 测绘科学, 2011,36(1):105-108. [ Ren Z Y, Li D Y, Yang Y. Simulation and driving force analysis of land use pattern in Guanzhong region, Shaanxi Province[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011,36(1):105-108. ]