

2000—2016 年中国地级以上城市高精度城区边界遥感提取及时空扩展分析

宁晓刚^{1,3} 王 浩¹ 张翰超^{1,2,3} 刘娅菲¹ 庞 博¹ 郝铭辉¹

1 中国测绘科学研究院,北京,100830
2 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079
3 城市空间信息工程北京市重点实验室,北京,100038

摘 要:城区边界和城区面积是城镇化的重要表征和扩展分析的基础。然而城区边界存在概念和提取标准不统一、精度较低、可比性较差等问题。为此,提出了基于高分辨率影像和地理信息资料辅助的城区半自动化提取方法,充分利用高分辨率影像上的城市景观特征、先验地理信息知识和一系列标准规则,以得到精度高、一致性强的数据。以中国 337 个地级以上城市为研究区,采用该方法得到了 2000 年、2005 年、2010 年、2016 年 4 期城区边界成果,并开展了城区时空扩展及用地效率等相关分析。结果表明:①16 年间城区扩展迅速,城区主要集中在东部和中部,东西部地区差异大;②城市用地效率与城镇化发展水平显著相关,城区扩展以外延型为主;③大多城市城区扩展超前于人口增长,少量城市城区扩展滞后于人口增长;④城区扩展以占用耕地为主。

关键词:城区边界;城市扩展;高分辨率遥感影像;地级以上城市
中图分类号:P237 **文献标志码:**A

随着城镇化发展,城镇人口不断增多,伴随而来的是城市区域的迅速扩张。特别是 2000 年以来,中国的城镇化发展进入了新的阶段。中国“十三五”规划、国家新型城镇化规划(2014—2020)等提出要合理控制城镇开发边界、保护基本农田,通过优化城市内部空间结构,促进城市紧凑集约、高效绿色发展,以解决城市盲目扩张,土地城镇化快于人口城镇化,建设用地粗放低效,城镇化与工业化不匹配,城镇空间分布和规模结构不合理,资源环境承载力不足,生态环境问题突出等诸多问题。合理控制城镇增长边界,优化城市内部空间结构,促进城市紧凑发展已经成为城市可持续发展的内在要求^[1-2]。开展城镇化监测与分析,对于准确把握城镇化进程,科学开展城市规划和建设,促进城市可持续发展有着极为重要的作用。

城镇化可从人口城镇化和土地城镇化两方面进行度量。人口城镇化可采用城市化率(城市人口与总人口的比率)表示,土地城镇化可采用非农化的城区面积表示^[3]。相比于人口城镇化产生的人

口转移这一难以度量的指标,土地城镇化即城市空间扩展是城镇化作用于地理空间的直接结果^[4],更容易被客观度量。遥感技术具有真实、客观、现势性强、成本低等优势,已成为土地城镇化监测的重要手段^[5-9]。城镇化监测首要任务即确定城区面积或城区边界,然而城区或城区边界相关概念众多,这些定义有着不同的出发点和特点^[10-16]。许多研究将土地利用分类结果中的建设用地或不透水面作为城区^[17-19]。还有一些研究人员综合考虑城市用地的功能定义城区^[20]。城镇化监测采用的影像数据源众多^[21]。早期,MODIS 影像是城市化监测的主要数据源^[22-25]。随后,Landsat 系列等中分辨率卫星影像被广泛使用^[26-31]。随着越来越多的高分辨率卫星发射升空,许多研究人员尝试利用高分辨率遥感影像开展城区提取^[32-36],但由于其自动化提取的能力限制,多用于单个城市尺度。另外,在获取城区范围的基础上,也有不少学者进行了城市扩展模式和特征的分析^[37-40]。

上述研究为城镇化监测与分析所需的城区边

界提取提供了丰富的方法,但仍存在不足。主要体现在:城区边界提取的方法和标准不统一,导致城市和区域间城区提取精度和面积比较困难;中低分辨率影像得到的城区边界提取精度较低;高分辨率影像的城区边界提取算法难以适应于全国尺度。为解决上述问题,本文提出了一种计算机自动识别和人工解译相结合的标准化城区边界半自动化提取方法,以中国 337 个地级以上城市为监测区,利用高分辨率影像和一致的提取标准,获得了 2000 年、2005 年、2010 年、2016 年 4 期的城区边界;城区面积被用于土地城镇化表征,并结合其他专题数据对全国地级以上城市的时空扩展特征进行分析。

1 城区数据和提取方法

选择中国 337 个地级以上城市(包括地级市、自治州、地区、盟,不含港澳台)作为研究区。选取其市辖区(没有市辖区的选择政府所在地的县)作为城区提取范围,存在行政区划调整的城市以 2016 年市辖区为准。根据中国经济区域划分为东部、中部、西部和东北 4 大地区。根据《第一财经周刊》^[41]提出的城市分级结果,将地级以上城市分为 1 线城市、新 1 线城市、2 线城市、3 线城市、4 线城市、5 线城市(见图 1)。地级以上城市是全国经济、政治和人口集聚中心,其城镇化能够

代表本地区的最高水平。21 世纪初期,地级以上城市经济社会快速发展,城区扩展迅速,在中国城镇化空间扩展监测与分析中具有代表性。

1.1 数据准备和处理

收集高分辨率遥感影像、人口数据、国内生产总值(gross domestic product,GDP)数据、1:10 万比例尺土地利用数据、全国第一次地理国情普查成果数据、2016 年基础性地理国情监测成果数据,用于全国地级以上城市城区边界提取和城市空间扩展分析。其中,高分辨率遥感影像主要采用优于 2 m 分辨率影像,覆盖整个研究区域,具体情况见表 1,表 1 中数据类型按照使用的优先顺序进行排列,影像时相多为当年度 6 月份左右,来源于原国家测绘地理信息局和各省级测绘地理信息部门。坐标系均转化到 CGCS2000 大地坐标系。人口和 GDP 数据来源于各年份的中国统计年鉴;1:10 万比例尺土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,土地利用合并成耕地、建设用地、林草地、水域和未利用地;全国第一次地理国情普查成果数据和 2016 年基础性地理国情监测数据来源于原国家测绘地理信息局,包括地表覆盖、城市道路要素、地名地址、乡镇和县级行政区划界线,为城区边界提取提供了很好的参考。高分辨率遥感影像经过正射纠正、影像融合、影像镶嵌、裁切等处理步骤,所有专题数据经过几何纠正重投影,以保障与影像的匹配。

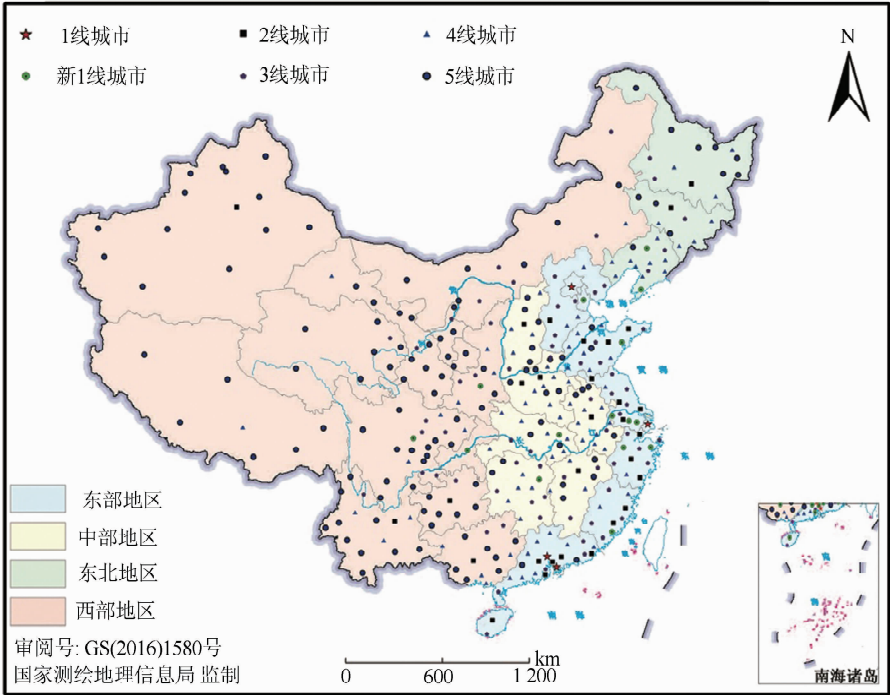


图 1 全国 337 个地级以上城市及地域分布

Fig. 1 337 Prefectural Cities and the Spatial Distribution of China

表 1 本文用到的主要遥感影像数据

Tab. 1 Main Remote Sensing Images Used in This Paper

序号	时相	主要数据类型(分辨率: m)
1	2000 年	航空影像(1)、IKONOS(1)
2	2005 年	Quickbird(0.61)、航空影像(1)、IKONOS(1)、SPOT5(2.5)
3	2010 年	Worldview-1(0.5)、Worldview-2(0.5)、Quickbird(0.61)、航空影像(1)、SPOT5(2.5)、ALOS(2.5)、CIRS-P5(2.2)
4	2016 年	航空影像(0.5)、高景一号(0.5)、Pleiades(0.5)、北京二号(0.8)、高分二号(1)、SPOT-6(1.5)、SPOT-7(1.5)、天绘一号(2)、ZY-3(2.1)
覆盖面积占比		Worldview-1/2 占 23.14%, 航空影像占 20.06%, IKONOS 占 17.75%, 其他占 39.05%

1.2 城区边界提取

城区边界采用计算机自动提取和人工解译修正相结合的提取方法。采用融合直角点和直角边特征对高分辨率遥感影像自动提取居民点多边形^[35-36];将居民点多边形与区政府所在地叠加,区政府所在地落到的集中连片居民点多边形作为初始城区边界;参照地理国情监测的分类体系和标准,按照城区边界提取原则和规则对初始城区边界人工目视解译修正和编辑,以获取最终的城区边界(见图 2)。最终的城区边界包括了中心城区和飞地型城区。初始城区边界的修正原则和规则如下。

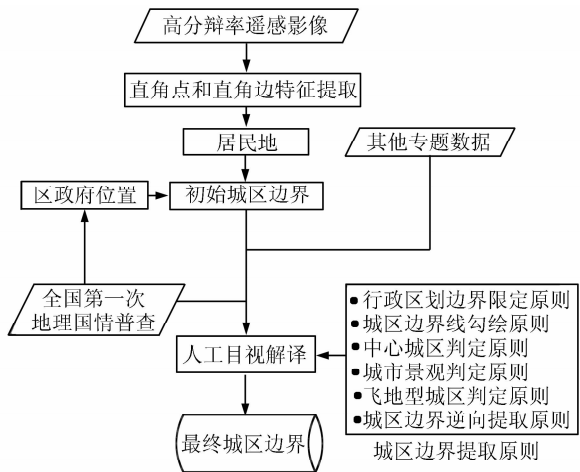


图 2 城区边界提取流程图

Fig. 2 Workflow of Urban Boundary Extraction

- 1)行政区划边界限定原则。城区必须位于城市行政区划范围内,不能超过行政区划边界。
- 2)城区边界线勾绘原则。城区边界线优先沿道路、河流等线性地物的边界勾绘,不能跨越房屋建筑(区)和构筑物。城区边界线内侧不能有耕地存在。当城区边界落到河岸时,如果河岸周边为城市建设用地绿化景观,则城区边界线沿河流的高水位线勾绘,连同绿化部分归入城区;否则沿河岸附近的道路勾绘。线性地物界线不明显时,城区边界优先沿具有明显界线的完整地块勾绘,如院落或围墙。若地块边界不明显或整个地块内未建成面积比例较大,可按实际建设用地边界勾绘。

3)中心城区判定原则。中心城区即中心集中连片区,通过道路一直向外延伸,直到具有城市景观的建设用地与中心集中连片区边缘的距离超过 50 m 或不再具有城市景观。

4)城市景观判定原则。城市景观主要包括城市房屋建筑区、城市道路、城市绿地、城市广场、停车场、体育场等景观^[42-43],其中由城市道路围成的街区是最主要的城市景观特征。

5)飞地型城区判定原则。飞地型城区即飞地型集中连片区,是城区的重要组成部分。其具有以下特征:①通过道路与中心城区联系紧密;②具有城市景观特征;③面积大于 60 ha 且至少包含以下地理单元:城市级的街道办事处、行政部门、工矿区、开发区、科研单位、大专院校等。

6)城区边界逆向提取原则。首先,完成最新时相的城区边界提取;其次,按现势性从新到旧的顺序,采用逆增量更新技术获得城区边界变化部分;最后,将后时相边界与城区边界变化部分融合得到前时相的城区边界,以保证多期边界之间的拓扑准确。

计算机自动提取和人工解译修正相结合的提取方法大大节省了人工目视和手工勾绘获得初始城区的效率。经测试,自动识别获取初始城区边界相比人工目视手工解译效率提升近 2 倍。连同初始城区边界解译修正这一环节,综合提升效率 30%。图 3 为本研究的城区内部典型地物示例。

1.3 城市空间扩展分析指标

采用城区扩展速度、扩展强度、地均 GDP、城市用地增长弹性系数 4 个指标,从城区时空扩展过程、城区土地利用效率变化、城区扩展协调性、城区扩展区域土地利用变化 4 个方面对城区时空扩展进行分析。

1)城区扩展速度。城区扩展速度 V_i 为某一时间段内某城市的城区面积年增长速度,反映了单位时间内不同城区扩展快慢的绝对差异。

$$V_i = (\Delta U_{i,j} / \Delta t_j) \times 100\% \quad (1)$$

式中, $\Delta U_{i,j}$ 为 j 时段 i 单元的城区扩展面积; Δt_j 为 j 时段的时间跨度。

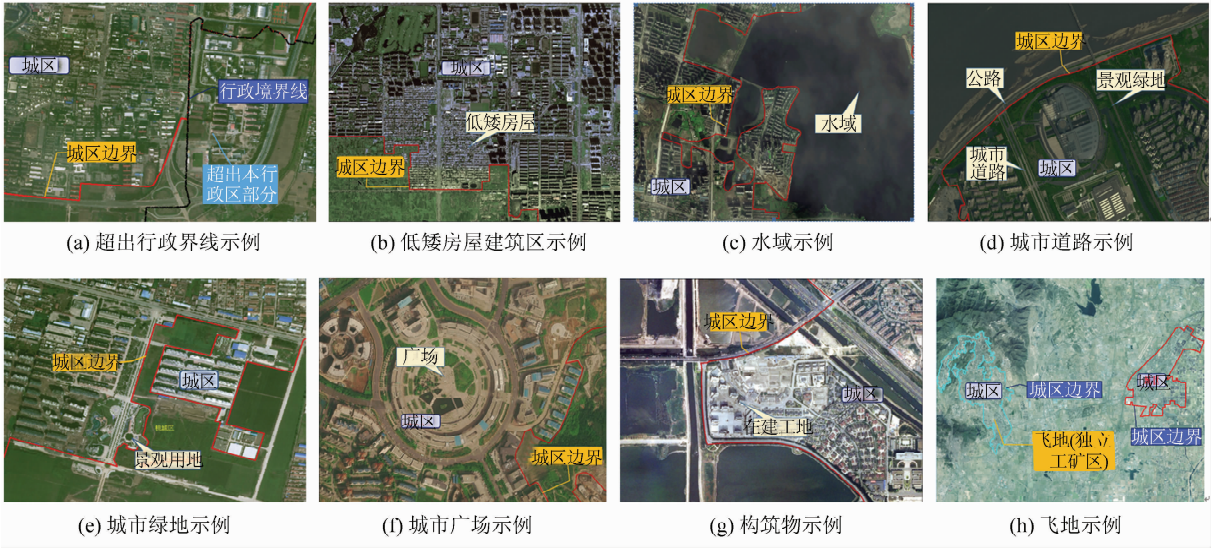


图 3 城区地物解译标志示例

Fig. 3 Examples of Urban Feature Interpretation Symbol

2) 城区扩展强度。扩展强度 N_i 为某一时间段内某城市城区面积相对于基期城区的年扩展比例,反映了单位时间内不同城区扩展快慢的相对差异。

$$N_i = [\Delta U_{i,j} / (\Delta t_j \times M_i)] \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\Delta U_{i,j}$ 为 j 时段 i 单元的城区扩展面积; Δt_j 为 j 时段的时间跨度; M_i 为基期 i 单元的城区面积。

3) 地均 GDP。地均 GDP 反映单位城区面积上产出的 GDP 效益。

4) 城市用地增长弹性系数。城市用地增长弹性系数 K 是某时期内城区面积增长率与城区人口增长率之比,是测定城区扩展是否协调的重要指标。国内学者通常用城市用地增长弹性系数来衡量城市扩张与人口增长之间的协调关系,认为城市用地增长弹性系数为 1.12 比较合理^[44-45]。

$$\begin{cases} K = (R_G / R_P) \times 100\% \\ R_G = \frac{\Delta A_i / A_0}{\Delta t} \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_G 为城区面积年均增长率; R_P 为城市人口年均增长率; A_i 表示某时期末的城区面积; A_0 表示某时期初的城区面积; Δt 表示时间跨度。

2 城区边界提取精度分析

本研究提取了全国 337 个地级以上城市的城区边界矢量成果,其可靠性和高精度主要体现在以下 3 个方面。

1) 技术方法保障提取结果的高精度。本研究提取城区边界首先采用融合直角点和直角边特征的居民点自动提取方法,保证了提取结果的一致性。另外,提取原则和标准严格、规范,可操作性

强。解译人员需严格按照 6 项规范化的提取原则和具体技术规定操作,能够保证城区边界提取结果的可靠性。

2) 高分辨率遥感影像作为主体数据保障提取结果的高精度。采用的遥感影像分辨率高,能够有效避免误分、漏分现象。已有研究表明,分辨率对于城区边界提取精度具有重要的影响,高分辨率影像相比 MODIS 和 Landsat 影像,能够有效避免城区边界的误分、漏分,且能够将城区与城乡结合部、乡镇建设用地等区分开来^[46]。

3) 高质量的辅助数据保障提取结果的高精度。难点区域有真实可靠的辅助数据支持,保障提取成果的准确性。城区边界提取最大的难点在于集中连片、城市景观和飞地型城区的判断。本研究通过参考全国第一次地理国情普查成果和 2016 年基础性地理国情监测成果数据中的城镇功能单元数据、开发区数据、保税区数据、城市道路数据等,很好地解决了上述城区 3 大特征的判断。

3 城区时空扩展分析

3.1 城区时空扩展过程

2016 年全国地级以上城市的城区总面积达到了 35 637.2 km²,占全国行政辖区总面积的 2.0%,相比于 2000 年增长了 122.6%。从城市、省份、城市群、经济区 4 个尺度对全国地级以上城市的城区面积时空扩展过程进行分析。

按城市级别分析,城区平均面积由高到低依次为 1 线城市、新 1 线城市、2 线城市、3 线城市、4 线城市、5 线城市。扩展面积最大的 3 个城市依

次是上海、深圳、天津。从城区面积占比分析,上海市的城区面积占比最大,其次是天津市。2000—2016 年,新 1 线城市扩展面积最大,达

4 820.0 km²,2 线城市与 3 线城市次之。1 线城市 16 年间扩展速度为 119.9 km²/a,5 线城市扩展速度为 140.0 km²/a(见图 4)。

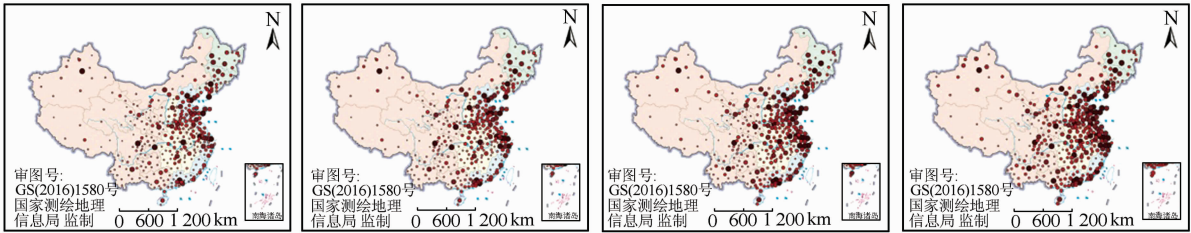


图 4 全国地级以上城市 2000—2016 年城区面积空间分布图
Fig. 4 Spatial Distribution Map of Urban Area of China's Prefectural Cities 2000—2016

按省份分析,2016 年城市城区面积最大的前三甲省份分别是江苏、山东和广东,城区面积最小的 3 个省份是西藏、青海和海南。海南省城区面积小,但其城区面积占比高。2000—2016 年时间段中,城市扩展面积和扩展速度最大的前三甲省份分别是江苏、山东、广东,扩展面积和扩展速度最小的 3 个省份分别为西藏、青海、海南。扩展面积最大的江苏和扩展面积最小的西藏两者扩展速度相差 50 余倍。扩展强度最大的前三甲省份依次为宁夏、云南、江西,扩展强度分别为 16.0%、14.8%、14.0%。扩展强度较小的后 3 个省市为北京、黑龙江、西藏,扩展强度分别为 2.1%、3.1%、3.6%。

按不同城市群分析,长三角、珠三角、京津冀、哈长、成渝 5 大城市群地级以上城市的城区面积呈阶段递增。长三角城市群城区面积在 5 大城市群中增长最为迅速,且城区面积占比涨幅较大。珠三角城市群与长三角城市群类似,城区面积增长迅速且城区面积占比涨幅大。长三角和珠三角

城市群城区面积占比远高于其他城市群,表明这两个城市群的城镇化程度远高于其他地区。京津冀地区的城区面积增长最为缓慢,城区面积占比几乎保持不变,且在 5 大城市群中最低,表明京津冀城市群土地城镇化综合水平低,且城镇化发展不足,亟需京津冀协同发展战略来带动。哈长城市群的城区面积增长速度和城区面积占比仅高于京津冀城市群,其城区总面积在 5 个城市群中最少。

按不同经济区分析,东北、东部、中部、西部 4 个地区的城区面积均呈阶段递增。2016 年,东部地区的城市城区面积最大,东北地区城区面积最小。城区面积占比方面,2016 年东部地区最大为 3.83%,西部地区最小为 0.94%,表明西部地区的土地城镇化水平在全国 4 大区域仍处于最低。2000—2016 年,各地区扩展面积与扩展速率从高到低依次为东部地区、西部地区、中部地区、东北地区(见图 5)。东部地区扩展面积为 10 224.5 km²,东北地区扩展面积为 1 617.7 km²。2000—

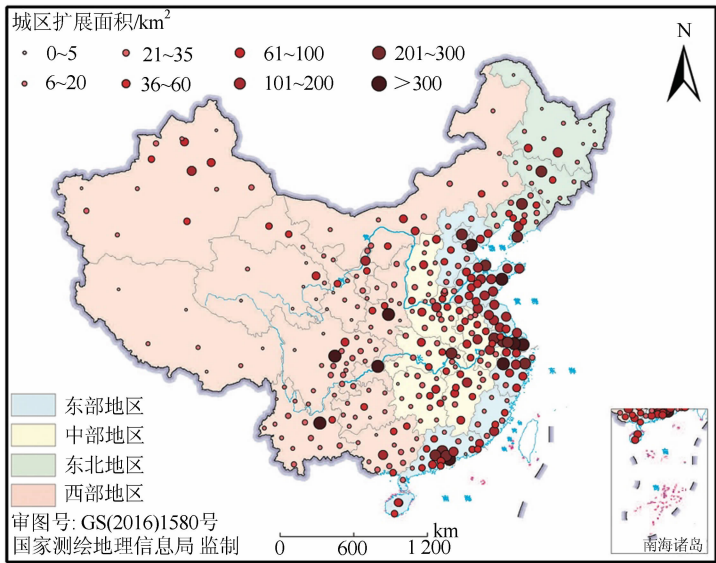


图 5 全国地级以上城市 2000—2016 年城区扩展面积空间分布图
Fig. 5 Spatial Distribution Map of Urban Sprawl Area of China's Prefectural Cities 2000—2016

2016 年,从不同经济区分析,各地区扩展强度由高到低依次为西部地区、东部地区、东北地区、中部地区。西部地区扩展强度达 9.01%,中部地区扩展强度仅为 1.21%,面积占比增长最为缓慢。

3.2 城区土地利用效率变化

对城区土地利用的经济效率进行分析。2000—2016 年,全国各省份地均 GDP,即单位城区面积 GDP 呈持续增长趋势。2016 年,地均 GDP 排名前三甲的省市依次为北京、广东、吉林,排名后三位的省份依次是青海、西藏、海南。排名第一的北京和排名最后的青海地均 GDP 相差近 200 倍。

按经济区分析,2000—2016 年各地区地均 GDP 呈递增趋势。中部地区的地均 GDP 由 2000 年 4 大地区中的最后一位攀升至 2016 年的第二位。东部地区在各阶段地均 GDP 均处于全国领先。

按城市级别分析,1 线城市的地均 GDP 在各

阶段均领先全国其他城市,5 线城市的地均 GDP 在各阶段均落后于全国其他城市,这与其实际城镇化发展水平一致。

采用凸壳原理对 337 个地级以上城市的扩展类型进行判断并分析^[47]。如图 6 所示,2000—2016 年,填充型城市数量占比为 26.7%,包括太原市、佳木斯市、宜昌市、白山市、盘锦市、延边朝鲜族自治州、十堰市、辽阳市、兰州市、枣庄市、大同市、锦州市、宝鸡市、洛阳市等 90 个城市。外延型城市数量占比为 73.3%,包括吐鲁番地区、阜阳市、博尔塔拉蒙古自治州、北京市、天津市、惠州市、防城港市、吴忠市、六安市、鹤壁市、清远市、厦门市、中卫市等 247 个城市。2000—2016 年,全国地级以上城市空间扩展以外延型为主,城区形态趋于分散,城区土地利用效率有所下降(见图 7,其中新疆的城市用地增长弹性系数真实值是 112.77,因显示原因表示为 16.00)。

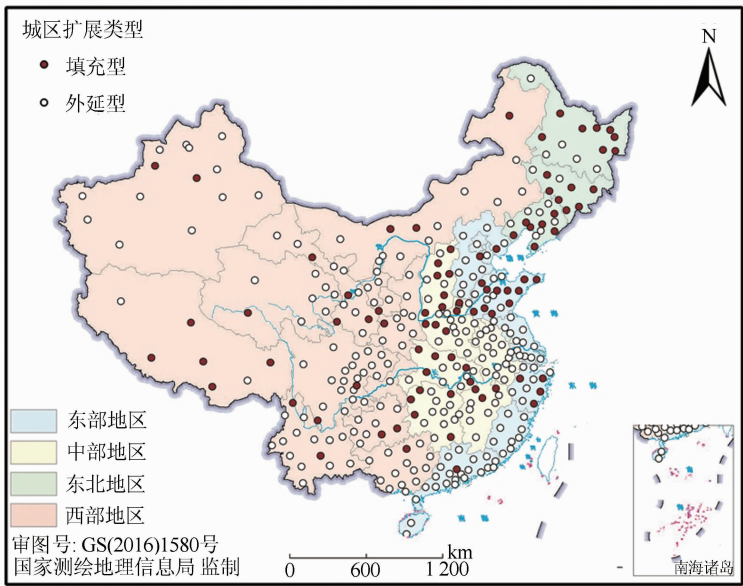


图 6 2000—2016 年全国地级以上城市扩展类型空间分布图
Fig. 6 Spatial Distribution Map of Urban Sprawl Types of China's Prefectural Cities 2000—2016

3.3 城区扩展协调性

2000—2016 年,新疆、重庆、浙江、江苏、湖北、上海、辽宁、天津、安徽、江西、云南、宁夏、福建、内蒙、广西、甘肃、山西、贵州、湖南、四川、陕西、黑龙江、河南、吉林共 24 个省份的城市用地增长弹性系数远高于最优值 1.12,表明这些省市城区扩展超前于人口增长。海南、青海、河北、西藏、北京共 5 个省市的城市用地增长弹性系数远低于最优值 1.12,表明这些省市城区扩展滞后于人口增长。仅广东、山东两个省市的城市用地增长弹性系数接近最优值 1.12。新疆、重庆的城市用地

增长弹性系数分别为 112.77 和 12.33,表明这两个省市 16 年间城区扩展远远高于人口增长速度。

3.4 城区扩展区域土地利用变化

2000—2016 年,全国地级以上城市空间扩展占用最多的是耕地,占扩展总面积的 56.4%。其次是建设用地,占扩展总面积的 23.9%;水域及未利用地占用面积最少,占比为 9.7%。全国城区扩展以占用耕地为主的省份达 28 个。剩余的 3 个省市中,北京占用建设用地比例为 50.8%,比占用耕地面积略高 6.6%,表明北京近 16 年的扩展以合并农村居民点等建设用地和占用耕地并

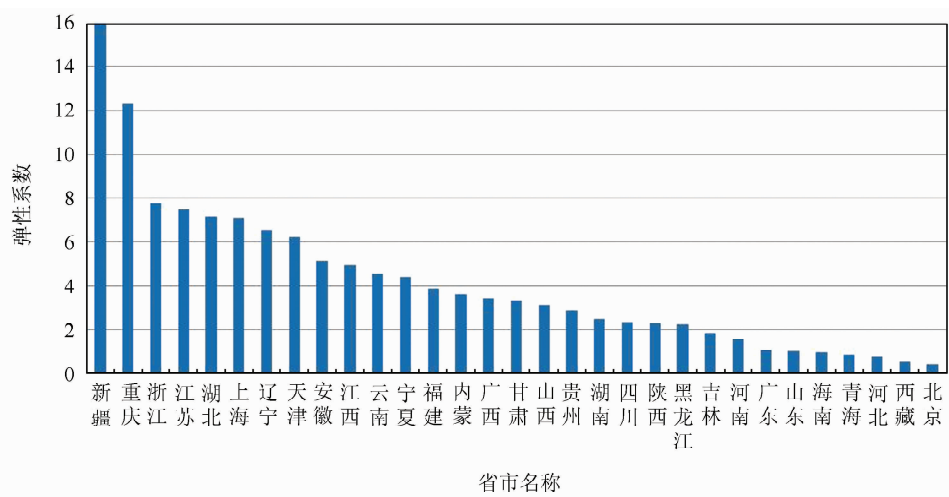
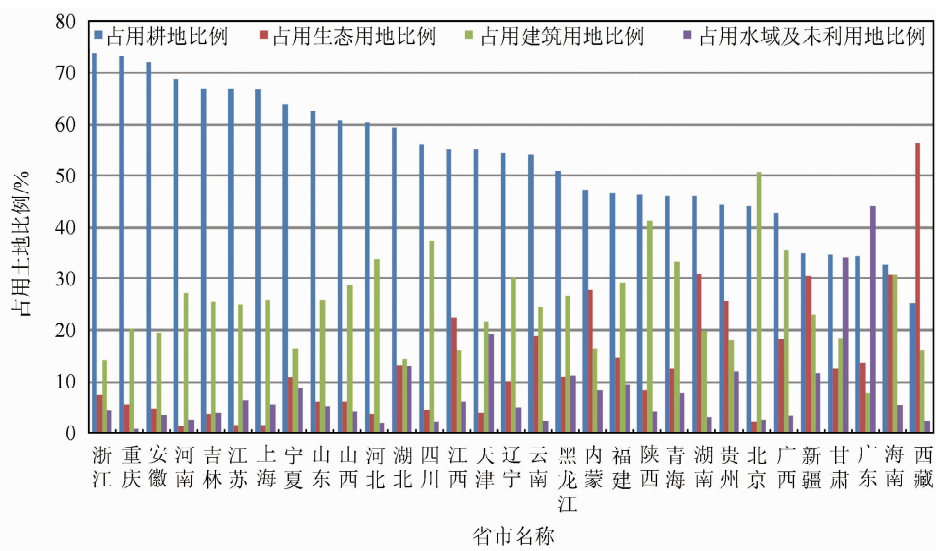


图 7 全国各省市 2000—2016 年地级以上城市用地增长弹性系数图

Fig. 7 Map of Urban Sprawl Coordination Coefficient of China's Prefectural Cities 2000—2016

存;广东以占用水域及未利用地为主,占比为 44.1%;西藏以占用林草地为主,占比达 56.1%。2000—2016 年,城区扩展占用耕地面积排前 10 的省市为浙江、重庆、安徽、河南、吉林、江苏、上海、宁夏、山东、山西;占用林草地面积排名前 10 的省市为西藏、湖南、海南、新疆、内蒙、贵州、江

西、云南、广西、福建;占用建设用地面积排名前 10 的省市为北京、陕西、四川、广西、河北、青海、海南、辽宁、福建、山西;占用水域及未利用地面积排名前 10 的省市有广东、甘肃、天津、湖北、贵州、新疆、黑龙江、福建、宁夏、内蒙(见图 8)。



取算法,将人工解译规则转化为机器学习算法,以提升城区边界提取效率。②探讨中国地级以上城市的城区边界数据应用于政府部门和民众的途径和方法。

参 考 文 献

[1] Long Ying, Han Haoying, Mao Qizhi. Establishing Urban Growth Boundaries Using Constrained CA [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 999-1 008(龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性 CA 制定城市增长边界[J]. 地理学报, 2009, 64(8): 999-1 008)

[2] Zou Deci. Urban Planning in Progress [J]. *City Planning Review*, 2010, 34(1): 24-28 (邹德慈. 发展中的城市规划[J]. 城市规划, 2010, 34(1): 24-28)

[3] Li Xin, Wen Jing, Lin Jian. Review of Research on Land Urbanization and Related Studies [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(8): 1 042-1 049 (李昕, 文婧, 林坚. 土地城镇化及相关问题研究综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(8): 1 042-1 049)

[4] Che Qianjin, Duan Xuejun, Guo Yao, et al. Urban Spatial Expansion Process, Pattern and Mechanism in the Yangtze River Delta [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(4): 446-456(车前进, 段学军, 郭垚, 等. 长江三角洲地区城镇空间扩展特征及机制[J]. 地理学报, 2011, 66(4): 446-456)

[5] Mou Fengyun, Zhang Zengxiang, Chi Yaobin, et al. Dynamic Monitoring of Built-up Area in Beijing Du-ring 1973—2005 Based on Multi-original Remote Sensed Images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2): 257-268(牟风云, 张增祥, 迟耀斌, 等. 基于多源遥感数据的北京市 1973—2005 年间城市建成区的动态监测与驱动力分析[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 257-268)

[6] Hu Deyong, Li Jing, Chen Yunhao, et al. An Analysis of Urban Expansion and Its Dynamics Based on Multi-temporal Landsat Data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2006, 18(4): 46-49(胡德勇, 李京, 陈云浩, 等. 基于多时相 Landsat 数据的城市扩张及其驱动力分析[J]. 国土资源遥感, 2006, 18(4): 46-49)

[7] Gong Jianya, Peng Feifei, Wang Le, et al. Built-up Area Detection from a Stereo Pair Using Disparity Information[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 427-433 (龚健雅, 彭飞飞, 王乐, 等. 利用视差进行立体像对的建成区检测方法[J]. 武汉大学学报·信息科

学版, 2016, 41(4): 427-433)

[8] Zou Jingui, Chen Yanhua, Ding Ge, et al. A Clustered Threshold Method for Extracting Urban Built-up Area Using the DMSP/OLS Nighttime Light Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(2): 196-201(邹进贵, 陈艳华, 丁鸽, 等. 利用 DMSP/OLS 灯光影像提取城镇建成区的聚类阈值法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(2): 196-201)

[9] Chen Jiwei, Han Xuepei. Semiautomatic Extraction of Floor Area Ratio Based on Construction Shadow in High Resolution Remote Sensing Image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(7): 580-582(陈基伟, 韩雪培. 高分辨率遥感影像建筑容积率提取方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(7): 580-582)

[10] Duan Degang, Huang Boyan. Differentiation and Analysis of the Concept of Central City Region [J]. *Modern Urban Research*, 2008, 23(10): 20-24(段德罡, 黄博燕. 中心城区概念辨析[J]. 现代城市研究, 2008, 23(10): 20-24)

[11] Xu Zening, Gao Xiaolu. A Novel Method for Identifying the Boundary of Urban Built-up Areas with POI Data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(6): 928-939(许泽宁, 高晓路. 基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法[J]. 地理学报, 2016, 71(6): 928-939)

[12] Schneider A, Friedl M A, Potere D. Mapping Global Urban Areas Using MODIS 500-m Data: New Methods and Datasets Based on ‘Urban Ecoregions’ [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1 733-1 746

[13] Wang Fenglong, Liu Yungang. Panel Granger Test on Urban Land Expansion and Fiscal Revenue Growth in China’s Prefecture-Level Cities [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(12): 1 595-1 606 (王丰龙, 刘云刚. 中国城市建设用地扩张与财政收入增长的面板格兰杰因果检验[J]. 地理学报, 2013, 68(12): 1 595-1 606)

[14] Bagan H, Yamagata Y. Landsat Analysis of Urban Growth: How Tokyo Became the World’s Largest Megacity During the Last 40 Years [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127(1): 210-222

[15] Xu Weicheng. Encyclopedia of China [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2002 (徐惟诚. 中国大百科全书-精粹本[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2002)

[16] Ministry of Housing and Urban-Rural Development

- of P. R. C. Standard for a Basic Terminology of Urban Planning; Gb/T 50280-98 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999 (中华人民共和国建设部. 城市规划基本术语标准: Gb/T 50280-98[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999)
- [17] Li X, Gong P, Liang L. A 30-year (1984—2013) Record of Annual Urban Dynamics of Beijing City Derived from Landsat Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166(1): 78-90
- [18] Li Miao, Zang Shuying, Wu Changshan, et al. Spatial and Temporal Variation and Its Driving Forces of Urban Impervious Surface in Urban-Rural Continuum of Harbin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 105-115 (李苗, 臧淑英, 吴长山, 等. 哈尔滨市城乡结合部不透水面时空变化及驱动力分析[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 105-115)
- [19] Zhang Tian, Wang Yanglin, Liu Yanxu, et al. Multi-temporal Detection of Landscape Evolution in Western Shenzhen City During 1987—2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2 170-2 184 (张甜, 王仰麟, 刘焱序, 等. 1987—2015年深圳市主城区景观演变过程多时相识别[J]. 地理学报, 2016, 71(12): 2 170-2 184)
- [20] Schneider A, Woodcock C E. Compact, Dispersed, Fragmented, Extensive? A Comparison of Urban Growth in Twenty-five Global Cities Using Remotely Sensed Data, Pattern Metrics and Census Information [J]. *Urban Studies*, 2008, 45(3): 659-692
- [21] Griffiths P, Hostert P. Mapping Megacity Growth with Multi-sensor Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 426-439
- [22] Friedl M A, Mciver D K, Hodges J C F, et al. Global Land Cover Mapping from MODIS: Algorithms and Early Results[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 287-302
- [23] Wan B, Guo Q, Fang F, et al. Mapping US Urban Extents from MODIS Data Using One-Class Classification Method [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10 143-10 163
- [24] Bartholome E M, Belward A S. GLC2000: A New Approach to Global Land Cover Mapping from Earth Observation Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(9): 1 959-1 977
- [25] Costa J N D, Bielecka E, Calka B, et al. Uncertainty Quantification of the Global Rural-Urban Mapping Project over Polish Census Data[C]. The 10th International Conference Environmental Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 2017
- [26] Guindon B, Zhang Y, Dillabaugh C. Landsat Urban Mapping Based on a Combined Spectral-Spatial Methodology [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(2): 218-232
- [27] Gao F, de Colstoun E B, Ma R, et al. Mapping Impervious Surface Expansion Using Medium-Resolution Satellite Image Time Series: A Case Study in the Yangtze River Delta, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(24): 7 609-7 628
- [28] Sun Z, Wang C, Guo H, et al. A Modified Normalized Difference Impervious Surface Index (MNDI-SI) for Automatic Urban Mapping from Landsat Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 942-959
- [29] Son N T, Chen C R. Urban Growth Mapping from Landsat Data Using Linear Mixture Model in Ho Chi Minh City, Vietnam [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 100-106
- [30] Angiuli E, Trianni G. Urban Mapping in Landsat Images Based on Normalized Difference Spectral Vector [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2013, 11(3): 661-665
- [31] Wang L, Li C C, Ying Q, et al. China's Urban Expansion from 1990 to 2010 Determined with Satellite Remote Sensing [J]. *Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2 802-2 812
- [32] Chen Hong, Tao Chao, Zou Zhengrong, et al. Automatic Urban Area Extraction Using a Gabor Filter and High-Resolution Remote Sensing Imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(9): 1 063-1 067 (陈洪, 陶超, 邹峥嵘, 等. 一种新的高分辨率遥感影像城区提取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(9): 1 063-1 067)
- [33] Tao Chao, Tan Yihua, Cai Huajie, et al. Object-Oriented Method of Hierarchical Urban Building Extraction from High-Resolution Remote-Sensing Imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 39-45 (陶超, 谭毅华, 蔡华杰, 等. 面向对象的高分辨率遥感影像城区建筑物分级提取方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 39-45)
- [34] Ni Huan, Lin Xiangguo, Ning Xiaogang. A Method for Extracting Human Settlements from Remote Sensing Image Using Right Angle Corners Features [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5): 648-655 (倪欢, 林祥国,

- 宁晓刚. 直角点特征引导的遥感影像居民地提取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(5): 648-655)
- [35] Ning X, Lin X. An Index Based on Joint Density of Corners and Line Segments for Built-up Area Detection from High Resolution Satellite Imagery[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(11): 338-356
- [36] Lin Xiangguo, Ning Xiaogang. Extraction of Human Settlements from High Resolution Remote Sensing Imagery by Fusing Features of Right Angle Corners and Right Angle Sides [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 83-89(林祥国, 宁晓刚. 融合直角点和直角边特征的高分辨率遥感影像居民点提取方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 83-89)
- [37] Jiao Limin, Wu Su. Analyzing the Characteristics of the Expansion of the Metropolises in China from 1990 to 2010 Using Self-organizing Neural Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(12): 1 435-1 440, 1 471(焦利民, 吴苏. 利用自组织网络分析 1990—2010 年中国主要城市扩展特征[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(12): 1 435-1 440, 1471)
- [38] Wu Xiaoqing, Hu Yuanman, He Hongshi, et al. Accuracy Evaluation and Its Application of SLEUTH Urban Growth Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(3): 293-296(吴晓青, 胡远满, 贺红士, 等. SLEUTH 城市扩展模型的应用与准确性评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(3): 293-296)
- [39] Dai Qin, Chen Xue, Ma Jianwen, et al. Analysis of Five Forms of Urban Expansion Identification Model Based on SOFM Classification Results of Remote Sensing Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(6): 525-528(戴芹, 陈雪, 马建文, 等. 基于遥感数据 SOFM 网络分类的五种城市增长方式鉴别方法应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(6): 525-528)
- [40] Liu Yaolin, Liu Yanfang, Ming Dongping. Urban Expansion Model Based on Cellular Automata of Decision-Making with Grey Situation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(1): 7-13(刘耀林, 刘艳芳, 明冬萍. 基于灰色局势决策规则的元胞自动机城市扩展模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(1): 7-13)
- [41] China Business News Weekly. 《Please Don't Say "Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen" in the Future: The Latest Ranking of 1-5 Level Cities in China is Released》[EB/OL]. [2018-04-26]. <https://www.cbnweek.com/articles/normal/20927>
- [42] Gong P, Howarth P J. Land-use Classification of SPOT HRV Data Using a Cover-Frequency Method [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(8): 1 459-1 471
- [43] Gong P, Howarth P J. Frequency-based Contextual Classification and Gray-level Vector Reduction for Land-use Identification [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, 58(4): 423-437
- [44] Yang Yongchun, Yang Xiaojuan. Research on Urban Spatial Expansion and Land Use Inner Structure Transformation of the Large Valley-basin Cities in China from 1949 to 2005—A Case Study of Lanzhou [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 37-49(杨永春, 杨晓娟. 1949—2005 年中国河谷盆地大型城市空间扩展与土地利用结构转型——以兰州市为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 37-49)
- [45] Asiyemu Tuerdi, Alimujiang Kasimu. Analysis of Urban Expansion in Kuitun City Based on Multi-source Remote Sensing Data[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2): 233-237(阿斯耶姆·图尔迪, 阿里木江·卡斯木. 基于多源遥感数据的奎屯市城市扩展分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 233-237)
- [46] Wang H, Ning X, Zhang H, et al. Urban Boundary Extraction and Urban Sprawl Measurement Using High-Resolution Remote Sensing Images: A Case Study of China's Provincial Capital [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-3: 1 713-1 719
- [47] Liu Jiyuan, Wang Xinsheng, Zhuang Dafang, et al. Application of Convex Hull in Identifying the Types of Urban Land Expansion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 885-892(刘纪远, 王新生, 庄大方, 等. 凸壳原理用于城市用地空间扩展类型识别[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 885-892)

High-Precision Urban Boundary Extraction and Urban Sprawl Spatial-Temporal Analysis in China’s Prefectural Cities from 2000 to 2016

NING Xiaogang^{1,3} WANG Hao¹ ZHANG Hanchao^{1, 2, 3} LIU Yafei¹
PANG Bo¹ HAO Minghui¹

1 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China
2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China
3 Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Beijing 100038, China

Abstract: Urban boundary and area is an important indicator for urban sprawl analysis. However, concept and extraction standard of urban boundary were inconsistent, and the resolution of images was coarse, resulting in lower precision and incomparable urban boundary. To solve above problems, a semi-automatic method of urban boundary extraction is proposed by using high-resolution image and geographic information data. Urban landscape and form characteristics, geographical knowledge, and a series of standardized rules are combined to generate high-precision and consistent urban boundary. Urban boundaries of China’s 337 prefectural cities in year 2000, 2005, 2010 and 2016 are extracted with above-mentioned method. Together with other thematic data, urban sprawl is analyzed. Results show that :① China’s prefectural cities has undergone a rapid urbanization from year 2000 to 2015 with a high degree of concentration and regional differences. ②The efficiency of urban land use is significantly related to the development level of urbanization. The sprawl models of most cities are extensive. ③Most cities are faced with the problem that urban expansion is ahead of population growth, while a few cities expansion lag behind population growth. ④Cultivated land is the main source of urban expansion areas.

Key words: urban boundary; urban sprawl; high-resolution images; China’s prefectural cities

First author: NING Xiaogang, PhD, professor, specializes in remote sensing monitoring on urban geographical conditions and land use change. E-mail: ningxg@casm.ac.cn
Foundation support: The National Key R & D Program of China, No. 2016YFE0205300; the National Natural Science Foundation of China, No. 41401513; the Fundamental Research Funds for the Central Public-Interest Scientific Institution, No. 7771803; the Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, No. 2018202; the Youth Academic and Technical Leaders Foundation of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. E1704.