

引用格式: 胡云锋, 赵冠华, 张云芝. 北京城市绿化的时空动态分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 332-339. [Hu Y F, Zhao G H, Zhang Y Z. Analysis of spatial and temporal dynamics of green coverage and vegetation greenness in Beijing[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(3): 332-339.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.170080

北京城市绿化的时空动态分析

胡云锋¹, 赵冠华^{1,2}, 张云芝^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

Analysis of Spatial and Temporal Dynamics of Green Coverage and Vegetation Greenness in Beijing

HU Yunfeng^{1*}, ZHAO Guanhua^{1,2}, ZHANG Yunzhi^{1,2}

1. Institute of Geographic Science and Natural Resources, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China;

2. University of Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Urban green coverage is an important part of urban ecosystem. Reasonable green coverage layout can improve urban environment and improve urban human suitability. In this paper, urban residential land in the Land Use/Land Cover (LUC) data in 2005, 2010 and 2015 were chosen as the urban area. Based on Landsat 5 and GF-1 remote sensing images, we used the support vector machine classification method to acquire the urban green coverage data of Beijing in 2005, 2010 and 2015. We also got the normalized difference vegetation index (NDVI) at the same time based on the MODIS and GF-1. Then, the rate of urban area green coverage, uniformity degree of green coverage and normalized difference vegetation index were considered as the evaluation indexes. We analyzed the spatial pattern and dynamic changes of Beijing urban green coverage at the scale of 1km raster and district. This study indicated that: (1) three indexes were consistent in two dimensions of space and time, raster and district. This reflected that the green space layout and the quality of greenness and the actual effect had been improved when green areas increased. (2) From 2005 to 2015 in the past 10 years in Beijing, the urban area of green coverage increased from 518.93 km² to 1405.54 km², the rate of green coverage increased from 39.9% to 49.13%, the uniformity degree of green coverage increased from 0.598 to 0.653, and the vegetation greenness increased from 0.42 to 0.5. (3) There were obvious differences in time and space between urban greenness and overlay construction in Beijing. Greenness of the downtown was slow and the effect was not obvious. The results of major greenness were mainly concentrated in the urban fringe and suburban counties. The improvement process of urban greenness mainly occurred in 2005 – 2010.

Key words: multi-source satellite remote sensing; green coverage; spatial pattern; dynamic changes; Beijing

***Corresponding author:** HU Yunfeng, E-mail: huyf@lreis.ac.cn

摘要 城市绿化覆盖是城市生态系统的重要组成部分, 合理的绿化率和绿化布局可以改善城市环境, 提高城市人居适宜性。

收稿日期 2017-02-27; 修回日期: 2017-10-25.

基金项目 国家重点研发计划项目(2016YFC0503701、2016YFB0501502); 高分专项(00-Y30B14-9001-14/16)。[**Foundation items:** National Key Research and Development Programm of China, No.2016YFC0503701, 2016YFB0501502; Key Project of High-resolution Earth Observation, No.00-Y30B14-9001-14/16.]

作者简介 胡云锋(1974-), 男, 江西赣州人, 博士, 副研究员, 主要从事遥感监测与区域可持续发展评价研究。
E-mail: huyf@lreis.ac.cn

研究中将2005、2010、2015年北京市土地利用(LUC)数据中的城市居民用地作为城区范围,应用Landsat 5、GF-1影像数据和MODIS产品,利用支持向量机的监督分类方法,提取了2005、2010、2015年的北京市城市绿化覆盖数据,并获取了同期的植被指数(NDVI)数据;继而以城市绿化覆盖率、绿化覆盖均匀度和植被指数为评价指标,在公里栅格和行政区2个尺度上探讨了北京市城市绿化覆盖的空间分布格局和时间变化动态特征。研究表明:①3个指标在空间和时间2个维度、区县和栅格2个尺度上都表现一致。这反映北京市过去10年中,在绿化面积增加的同时,绿化的空间布局得到优化改善,绿化的质量得到提高。②2005–2015年,北京市城市绿化覆盖面积由518.93 km²增加到1405.54 km²,绿化覆盖率由39.9%增加到49.13%,绿化覆盖均匀度由0.598增加到0.653,植被指数由0.42增加至0.5。③北京市城市绿化建设存在明显的时空差异。中心城区绿化建设缓慢,成效不明显;重大绿化建设成果主要集中在城市边缘地区和远郊区县。城市绿化改善过程主要发生在2005–2010年。

关键词 多源卫星遥感;绿化覆盖;空间格局;变化动态;北京

1 引言

21世纪以来,区域社会经济的快速发展,使得区域城镇化率和城镇居民生活环境得到了极大的改善。但另一方面,城市化进程的快速发展及能源消耗的不断攀升,加剧了人与自然的矛盾,引发了一系列生态^[1]、社会^[2]、经济^[3]等各方面的的问题。尤其是以大气污染为代表的城市生态环境问题日益严重,如城市气候变化^[4]、热岛效应^[5–6]、雾霾问题^[7–10]、城市噪声污染^[11]等。生态环境问题影响了城镇居民的生活质量,亟待通过科学的规划和建设来解决。

城市绿化覆盖是城市生态系统的重要组成部分^[12]。城市绿化覆盖不仅具有吸收二氧化碳、制造氧气、吸收有毒气体、杀菌除尘等净化环境的作用,同时还有降低噪音、遮阳、降温增湿和改善局地小气候等多种功能,对于调节局部地表空气温度,改善城市生态环境质量,优化人居环境具有重要作用^[13–14]。此外,城市绿化也具有多样性、舒适度、协调性等美学价值^[15]。合理的规划和增加绿化覆盖是缓解城市热岛的有效手段,客观准确地掌握城市绿化覆盖分布现状与变化情况,可以为城市生态规划提供科学支撑。

当前,卫星遥感技术是获取大尺度、长时序城市绿化覆盖信息的基本手段。特别是近10年来高分辨率卫星遥感技术的快速发展和产业化应用,为城市监测提供了丰富的数据源。选择合适的卫星数据源和针对性的信息提取技术,可以快速精确地获取城市绿化覆盖时空动态信息。传统的目视解译提取城市绿化覆盖信息的方法虽然精度较高,但是耗时耗力,非监督和监督分类方法适用于中低分辨率遥感数据源,如TM、ETM+影像,而面向对象的分类方法则更适用于高空间分辨的遥感数据源,如GF-2、SPOT5、IKONOS等。此外,考虑到植被的长势和健康状况对于植被生态系统正常发挥作用具有重要影响,植物的叶片受病虫害或污染气体伤害

将会大大降低植物的环境调节功能^[16]。因此,通过一些重要的生态参数反演分析^[17–18],也可以凝练城市绿化覆盖质量变化特征。

本研究采用TM、GF-1、MODIS等多源卫星遥感数据源,以土地利用数据作为辅助数据,利用支持向量机(SVM)的监督分类方法,提取北京市2005、2010、2015年城市绿化覆盖信息,同时使用了MODIS NDVI产品和自主计算的GF-1 NDVI产品,选择绿化覆盖率、绿化覆盖均匀度和植被指数等3个因子为评价指标,在区县和公里栅格2个尺度上分析北京城市绿化覆盖空间分布和时间变化情况。

2 研究区和数据

2.1 研究区

北京市总面积约1.6万km²,辖东城、西城、海淀、朝阳、丰台、门头沟、石景山、房山、通州、顺义、昌平、大兴、怀柔、平谷、延庆、密云16个区县。北京及其周边地区是中国快速发展的3大城市群落之

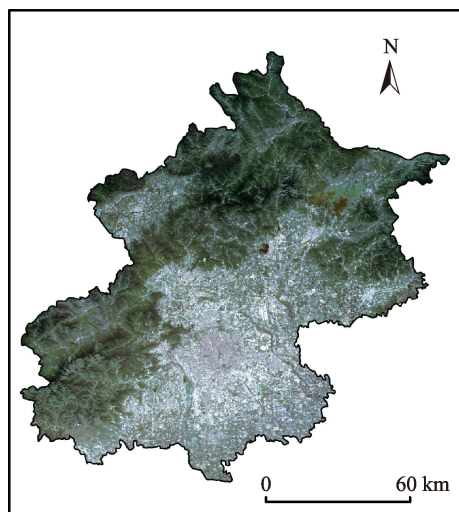


图1 北京市的位置及研究区GF-1遥感影像

Fig. 1 The location and the GF-1 remote sensing images of Beijing

一。2015年,北京市常住人口达到2152万人。大量人口的涌入对区域资源环境承载能力、城市治理等带来了巨大挑战。

2.2 数据源和数据预处理

土地利用(Land Use / Land Cover, LUC)数据分别为2005、2010、2015年。其中2005年、2010年LUC数据来自于中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远团队^[19];2015年数据则是在2013年LUC基础上,应用GF-1数据、采用目视解译动态变化,最后叠加更新而成。具体的技术路线可以参见文献[20]。本研究中,将LUC产品中代码为51(即城市居民用地)作为城区范围,并在此范围内提取绿化覆盖信息。

遥感数据:包括2种卫星遥感影像产品(Landsat5、GF-1)和一种遥感参数产品(MODIS NDVI)。卫星遥感具体参数如表1所示。其中,Landsat 5是选用的30 m多光谱影像影,时间为2005年和2010年。研究选用的GF-1的16 m多光谱分辨率影像,其时间是2015年。3种卫星影像都是选取当年7-8月内的无云/少云、清晰影像,以保证提取的城市绿化覆盖信息的准确性。植被归一化数据(NDVI)是在下载得到的2005年、2010年的MODIS MOD13A3月值产品基础上,通过最大值合成法(Maximum Value Composites, MVC)^[21-22]得到年际产品。2015年NDVI产品则由GF-1 WFV影像计算得到。NDVI的年最大值合成如下:

$$NDVI_{\max} = \max(NDVI_1, NDVI_2, \dots, NDVI_{12}) \quad (1)$$

在应用上述卫星遥感数据提取城市绿化覆盖信息、反演NDVI指数之前,对原始数据依次进行辐射校正、大气校正^[23]、正射校正、镶嵌、裁剪等处理,各项操作均在ENVI 5.1中实现。

表1 研究所用卫星的主要参数

Tab. 1 Major parameters of satellites in this study

年份	卫星	传感器	影像类型	波段	分辨率/m
2005	Landsat 5	TM	多光谱影像	7	30
2010	Landsat 5	TM	多光谱影像	7	30
2015	GF-1	WFV	多光谱影像	4	16

2.3 信息提取和精度评估

采用了支持向量机的监督分类方法来提取城市绿化覆盖信息。具体方法是:首先在经过预处理的影像上选择样本,计算样本可分离性;然后进行支持向量机的监督分类,并对得到的分类结果进行

后处理。后处理主要包括破碎斑块的合并和人工目视解译修改。绿化覆盖信息的提取是在ENVI5.1的支持下完成的。为了评估上述绿化覆盖信息的精度,本文开展了样点尺度和区域尺度的精度分析。基于高分二号1 m分辨率融合影像,随机选择了312个点状目标开展目视判读和混淆矩阵分析,表明本文所得绿化覆盖信息的总体精度为86%。与统计年鉴数据对比也表明,本文所得的2005、2010和2015年北京城市绿化覆盖率(39.9%, 47.74%, 49.13%)与官方统计(35.7%, 45.6%, 49.1%)^[28]极为接近。

3 研究方法

3.1 绿化覆盖率

根据住建部相关规范定义:城市绿化覆盖是指由乔木、灌木、草坪等所有植被的垂直投影面积,包括屋顶绿化植物的垂直投影面积以及零星树木的垂直投影面积,乔木树冠下的灌木和草本植物不能重复计算^[24]。城市绿化覆盖率(Urban Green-covered Rate, UGR),则是指区域内各类绿化覆盖垂直投影面积之和占该区域总面积的比率。城市绿化覆盖率的计算方法如下:

$$UGR = \frac{GPA}{TOT} \times 100\% \quad (2)$$

式中:UGR(Urban Green-covered Rate)表示城市绿化覆盖率;GPA(Green-covered Projection Area)表示绿化覆盖面积;TOT(total area)表示城市区域总面积。

3.2 绿化覆盖均匀度

城市绿化覆盖的生态服务功能和休憩空间服务能力不仅依赖于绿化覆盖面积的总量,更与绿化覆盖的空间配置直接相关^[25-26]。长期以来,中国一直以城市绿化覆盖面积、城市绿化覆盖率、人均绿化覆盖面积等总量指标、比率指标来规划和评价城市绿化覆盖系统建设,为了进一步体现其空间布局上的科学性,探索城市绿化覆盖为城市居民提供休闲服务、为城市生态系统提供水热调节功能的能力在此,本研究专门设置了城市绿化覆盖均匀度指标(Urban Green-covered Uniformity Degree, UGUD)。

城市绿化覆盖均匀度,可以通过标准化最邻近点指数(Nearest Neighbor Indicator, NNI)来衡量^[27]。具体算法是:首先将得到的绿化覆盖栅格数据,转化为点数据,建立1 km格网,然后计算每个格网内

点的最邻近指数,然后将其归一化的值作为绿化覆盖均匀度指数。具体计算方法如下:

$$UGUD = \frac{NNI}{2.15} \quad (3)$$

$$NNI = 2D_{ave} \sqrt{\frac{N}{A}} \quad (4)$$

式中: NNI 是最邻近指数。由于 NNI 的取值范围在0(高度集聚)–2.15(均匀分布)之间,因此,对 NNI 进行标准化后,绿化覆盖均匀度指数的值域范围即变为 $[0, 1]$ 。 D_{ave} 为每一点与其最近邻点的距离的算数平均值; A 为片区总面积; N 为点个数。 D_{ave} 和 NNI 可以利用空间分析工具 Average Nearest Neighbor 计算得到。

3.3 植被指数

归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI),是衡量陆地植被生长状况的基本指标。MODIS13A3 NDVI产品是全球植被状况

监测和土地覆盖和土地覆盖变化监测的基础产品。NDVI产品的具体算法如下:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5)$$

式中: NIR 为近红外波段; R 为红波段。

4 结果分析

4.1 城市绿化覆盖空间分布

北京市绿化覆盖空间分布特点:中心城区绿化覆盖斑块少而小,城市边缘绿化覆盖斑块多且大(图2)。统计表明:2015年,中心城区(具体为东城、西城、朝阳、丰台、石景山、海淀区)绿化覆盖斑块数量为5900个,斑块平均面积约为0.83 hm²;而边缘城区(具体为门头沟、房山、通州、顺义、昌平、大兴、怀柔、平谷、密云、延庆)绿化覆盖斑块数量为6474个,斑块平均面积约为1.41 hm²。

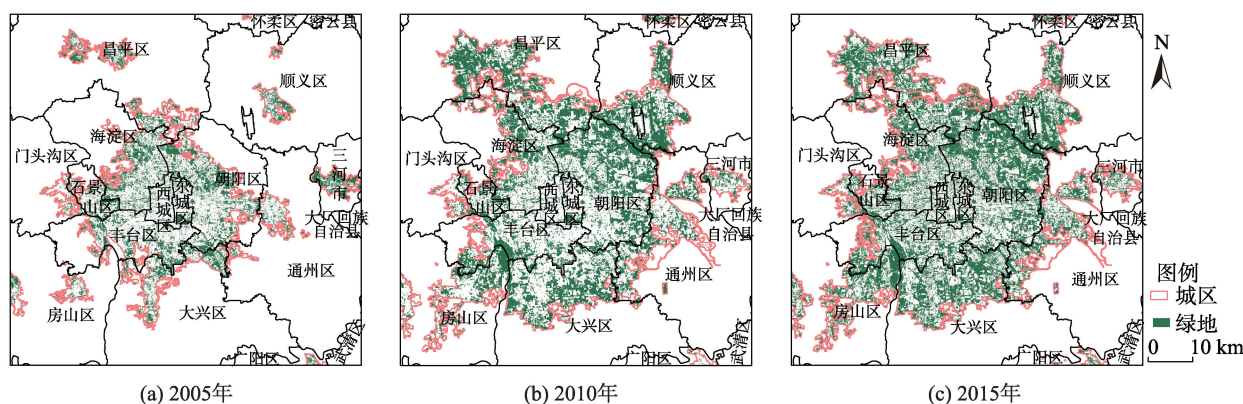


图2 2005、2010、2015年北京市主城区绿化覆盖信息空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of green coverage information of the urban area in Beijing in 2005, 2010, and 2015

2005–2015年,北京市城市绿化覆盖总面积逐渐增加(图3),面积增加地区主要是城市边缘地区,面积增长主要发生在2005–2010年。具体来说:2005–2010年,北京市绿化覆盖总面积从518.9 km²增加到1229.7 km²,面积增长了137%;2010–2015年,绿化覆盖总面积从1229.7 km²提高至1405.5 km²,增幅为12.5%,增长速度明显下降。从行政区角度看:2005–2015年,朝阳区绿化覆盖面积增加最大(107.28 km²),且主要发生在2005–2010年,究其原因是为筹办2008年北京奥运会,政府加大了这一地区的绿化建设。城市核心区(东城区、西城区)绿化覆盖面积几乎没有变化(分别是0.3和0.69 km²)。

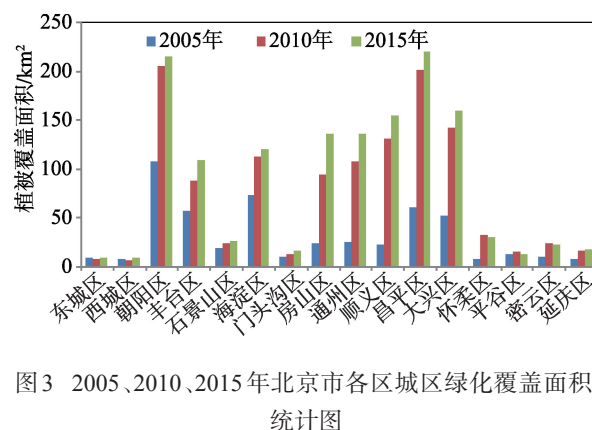


图3 2005、2010、2015年北京市各区城区绿化覆盖面积统计图

Fig. 3 The statistics of green coverage area of different districts of Beijing in 2005, 2010 and 2015

总结来看,各区县城市绿化覆盖面积的大小及其增加面积绝对值,主要受行政区自身大小、地理位置以及发展定位的影响。

4.2 绿化覆盖率

不管是在公里格网尺度、还是在行政区尺度上,北京市绿化覆盖率空间分布特点都体现为(图4、5):中心城区绿化覆盖率低,城市边缘区绿化覆盖率高。其中,东城区、西城区的绿化覆盖率最低,2005–2015年一直处于25%以下,西城区到2015年绿化覆盖率仅为19.18%;朝阳区和海淀区绿化覆盖率较高,均在在40%以上;顺义区、昌平区绿化覆盖率最高,历年均高于50%。

从时间上看,2005–2015年,北京市城市绿化覆盖率不断提高(图5),从2005年的39.9%增加到2015年的49.13%。相比于2005年,到2015年北京除顺义、平谷、密云以外其他各区城市绿化覆盖率均都有所增加,平谷、顺义和密云3个地区绿化覆盖率分别降低了22.91%、2.42%、0.43%。2005–2015年,朝阳、丰台、石景山、门头沟、房山、大兴6个区城市绿化覆盖率呈现持续增加的趋势;东城、西城、延庆3个区城市绿化覆盖率呈现先减少后增加的趋势;海淀、通州、顺义、昌平、怀柔、密云6个区城市绿化覆盖率呈现先增加后减少的趋势;平谷区城市绿化覆盖率呈现出持续减少的趋势。

与国内其它一线城市相比(2014年天津绿化覆

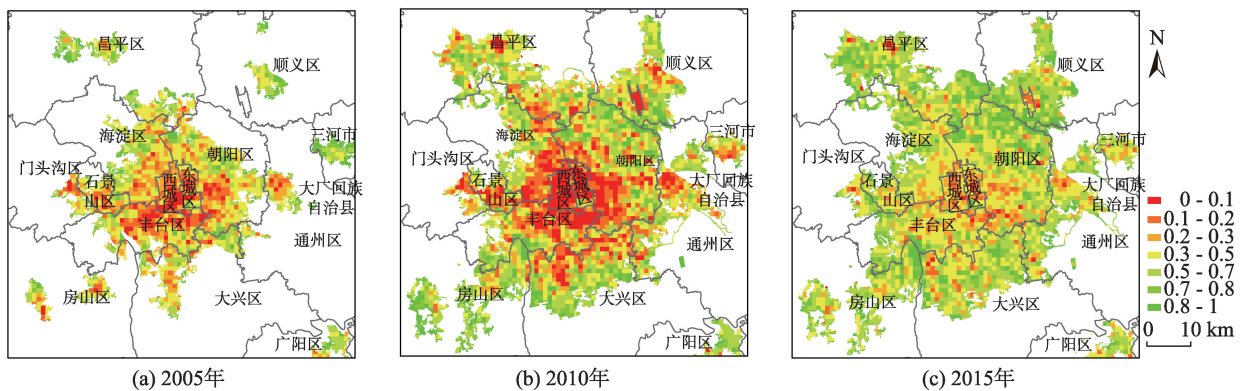


图4 2005、2010、2015年北京市主城区绿化覆盖率公里栅格图

Fig. 4 1 km raster of green coverage rates of the urban area of Beijing in 2005, 2010 and 2015

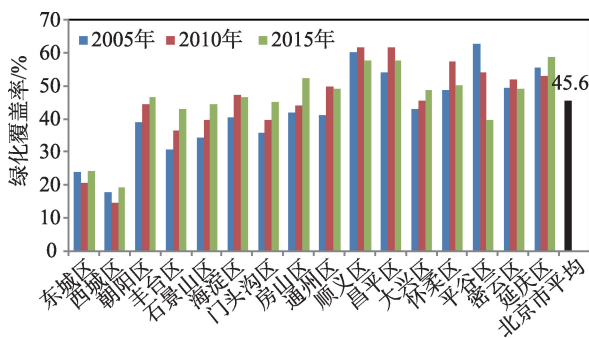


图5 2005、2010、2015年北京市各区城市绿化覆盖率统计图

Fig. 5 The statistics of green coverage rates of districts in Beijing in 2005, 2010 and 2015

盖率34.65%、上海绿化覆盖率38.4%、2013年广州绿化覆盖率41%、深圳绿化覆盖率45%^[28],特别是与温带地区、相对缺水的北方城市相比,北京市城市绿化覆盖率明显较高。究其原因是北京市作为中国

的政治文化中心,在以建设宜居城市为总体要求下,城市绿化建设受到高度重视,在对世界自然文化遗产、自然保护区、森林公园等区域实施严格保护措施的同时,努力营造了数量众多的城市内部绿色空间。

4.3 绿化覆盖均匀度

北京市城市绿化覆盖均匀度空间分布特点为(图6):中心城区绿化覆盖分布均匀度较低,城市边缘地区绿化覆盖分布均匀度较高。其中,东城市、西城市绿化覆盖均匀度最低,延庆、朝阳等地区的绿化覆盖均匀度最高。

从时间上看,绿化覆盖均匀度整体上呈现增长的趋势(图7)。整体上,北京市城市绿化覆盖均匀度从2005年的0.598增加到2015年的0.653。有7个区的绿化覆盖均匀度有所下降,其中,平谷区城市绿化覆盖均匀度有降低最为明显,2005–2015年降低了0.146,东城区、西城区、顺义区、怀柔区、密

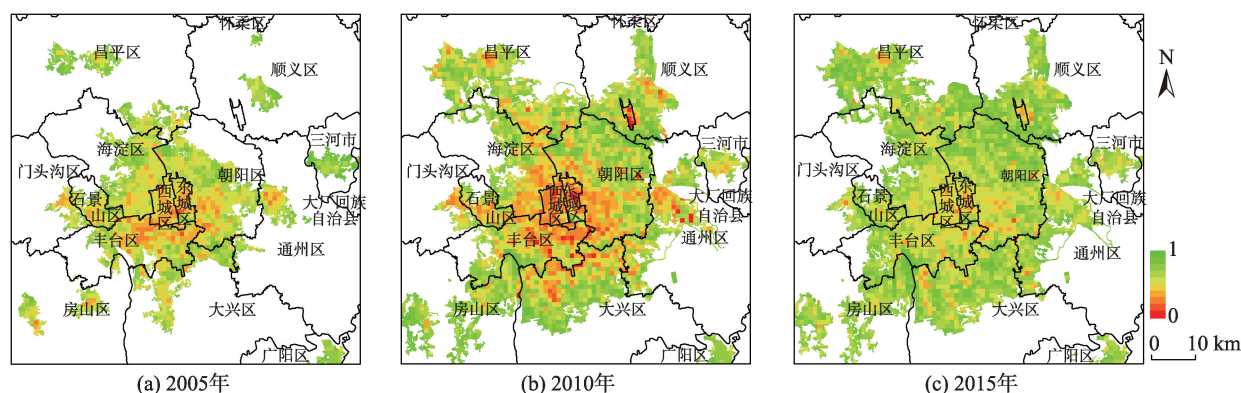


图6 2005、2010、2015年北京市主城区绿化覆盖均匀度栅格图

Fig. 6 1 km raster of green coverage rates of urban area in Beijing in 2005, 2010 and 2015

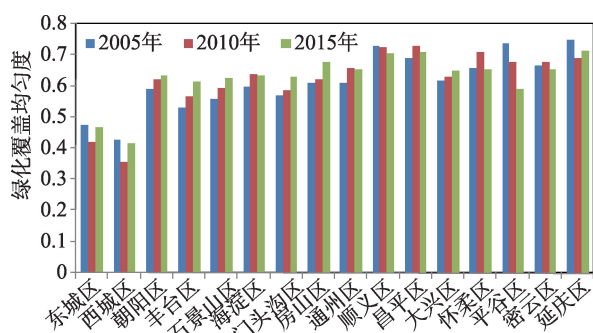


图7 2005、2010、2015年北京市各区城市绿化覆盖均匀度统计图

Fig. 7 The statistics of uniformity degree of green coverage in Beijing in 2005, 2010 and 2015

云县、延庆县也有所降低,但降低不明显;其余各区县(朝阳、丰台、石景山、海淀、门头沟、房山、通州、昌平、大兴)绿化覆盖均匀度则呈现增加的趋势。

北京市绿化覆盖均匀度的提升,体现了北京市近年来对城市绿化覆盖和休憩空间科学规划的重视,表明城市居民能够越来越公平地享受到城市发展的益处,全市居民能够以大致相近的空间距离达到城市绿化覆盖空间。未来需要重点改善的地区应当集中在东城区、西城区、以及海淀、朝阳四环以内的区域,重点是在既有楼宇空间布局状态下,开展屋顶绿化覆盖和“插花式”的各种小型公园建设,提高区域绿化覆盖空间分布的均匀性。此外,鉴于平谷区、顺义区、怀柔区、密云县、延庆县的城市绿化覆盖均匀度在2005-2015年还有所下降,这需要引起城市建设部门的重视,其重点是要在科学规划城市楼盘建设布局,稳定现有高水平的绿化覆盖均匀度水平。

4.4 植被指数

北京市植被指数的时空变化特点是(图8):城市中心地区NDVI低,城市边缘地区NDVI高;从时间上来看,中心城区NDVI变化不大,城区边缘区NDVI增长较明显。

北京市城市植被指数均呈现持续增加的趋势(图9)。对于北京市整体来说,2005年,城市植被指数为0.42,到2015年增加至0.5。对于各区县来说,北京市周边区县植被指数要高于城六区,到2015年,除城六区以外的北京周边区县植被指数均能达到0.5以上,表明北京市周边区县植被长势情况相对较良好。其中东城区、西城区植被指数最小,且变化不大,到2015年时,均不超过0.32,房山区和通州区植被指数最大,到2015年时均达到0.56。

本研究所得到的植被指数(NDVI)在3个时段的空间分布特点以及时间变化动态规律,与前述关于城市绿化覆盖面积、绿化覆盖率的研究结果吻合,这也验证了本研究在研究路线、数据分析和产品分析方面的准确性。

5 结论与展望

城市绿化覆盖是城市环境和城市居民生活质量的重要标志,是自然和人文等多种因素共同作用的结果。本研究以北京市为例,结合GIS和遥感技术,从绿化覆盖率、绿化覆盖均匀度、植被指数3个方面,对城市绿化覆盖现状进行了评价。研究表明:

(1)3个指标在空间和时间2个维度、区县和栅格2个尺度上都表现一致。绿化覆盖率增加的同

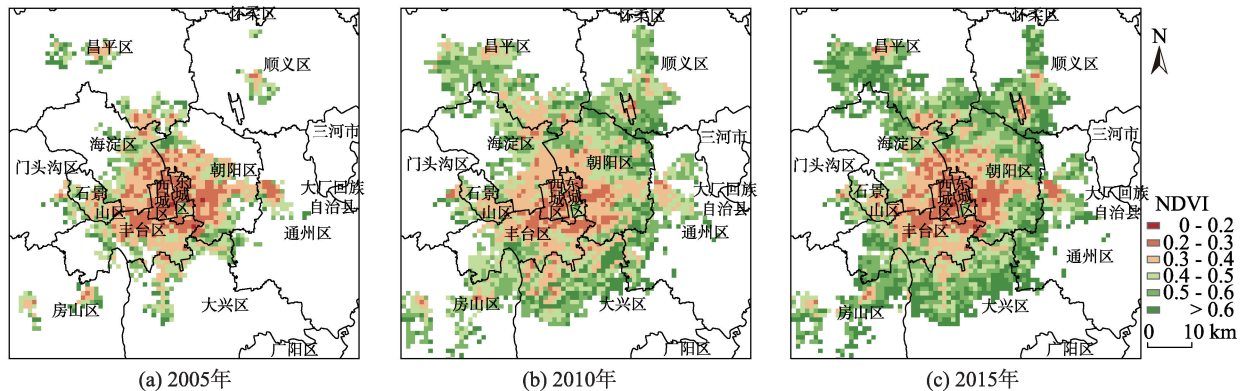


图8 2005、2010、2015年北京市主城区植被指数公里栅格图

Fig. 8 1 km raster of NDVI of the urban in Beijing in 2005, 2010 and 2015

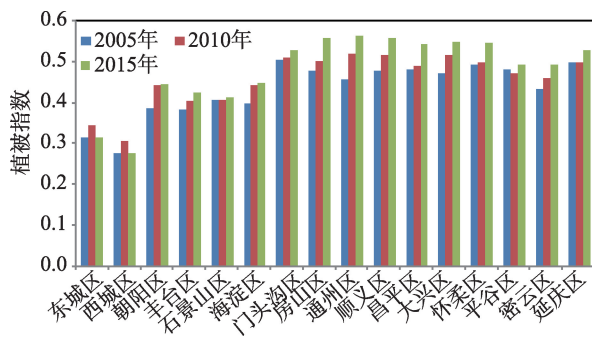


图9 2005、2010、2015年北京市各区城市植被指数平均值统计图

Fig. 9 The statistics of average NDVI in Beijing in 2005, 2010 and 2015

时,均匀度也相应得到增加,植被指数(NDVI)也相应提高。这表明在北京市过去10余年的建设中,在绿化面积增加的同时,绿化的空间布局得到优化改善,绿化的质量得到提高。

(2)2005–2015年,北京市城市绿化覆盖面积由518.9 km²增加到1405.5 km²,绿化覆盖率由39.9%增加到49.13%,绿化覆盖均匀度由0.598增加到0.653,植被指数由0.42增加至0.5。北京市城市绿化覆盖情况持续改善,改善过程主要发生在2005–2010年,这可能与筹备2008年奥运会有密切关系;而在2010–2015年,各项指标增加不明显,表明城市绿化建设工作有所放缓。

(3)北京市城市绿化覆盖建设在空间上存在明显差异。中心城区绿化建设难度较大,绿化成效不明显;重大绿化建设成果主要集中在城市边缘地区和远郊区县。未来中心城区重点要开展屋顶绿化覆盖和“插花式”小型公园建设,逐步提高绿化覆盖

率和绿化覆盖均匀度;远郊区县则要在科学规划城市楼盘建设,稳定现有高水平的绿化覆盖率和绿化覆盖均匀度。

准确提取城市绿化覆盖数据,是准确评价和科学规划城市绿化建设的基础。本研究考虑到数据供给情况,使用了30 m的Landsat 5和16 m的GF-1 WFV影像,采用了支持向量机方法提取城市绿化覆盖信息。未来研究可以考虑使用1 m分辨率的GF-2影像数据,利用面向对象多尺度分割的方法,以便更精准、更细致地提取城市不同类型、不同形状、不同尺度的城市绿化覆盖信息,以达到更加准确评价城市绿化成果、科学规划城市绿化建设的目的。

参考文献(References):

- [1] 郭强,戴文远,苏木兰,等.快速城镇化地区建设用地扩张对生态用地及生态服务价值的影响——以福建省晋江市为例[J].福建师范大学学报(自然科学版),2015,31(5): 91-98. [Guo Q, Dai W Y, Su M L, et al. Construction land expansion and its impact on ecological land use in rapid urbanization area: A case study of Fujian Jinjiang county[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2015,31(5):91-98.]
- [2] Bruekner J K, Largey A G. Social interaction and urban sprawl[J]. Journal of Urban Economics, 2008,64(1):18-34.
- [3] 戴均良,高晓路,杜守帅.城镇化进程中的空间扩张和土地利用控制[J].地理研究,2010,29(10):1822-1832. [Dai J L, Gao X L, Du S S. Expansion of urban space and land use control in the process of urbanization[J]. Geographical Research, 2010,29(10):1822-1832.]
- [4] Shepherd J M. Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes[J]. Journal of Arid Environments, 2006,67(4):607-628.
- [5] 张昌顺,谢高地,鲁春霞,等.北京城市绿地对热岛效应的影响

- 缓解作用[J].资源科学,2015,37(6):1156-1165. [Zhang C S, Xie G D, Lu C X, et al. The mitigation effects of different urban green lands on the heat island effect in Beijing [J]. Resources Science, 2015,37(6):1156-1165.]
- [6] Karlessi T, Santamouris M, Synnefa A, et al. Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings[J]. Building and Environment, 2011,46(3):570-576.
- [7] 王占山,李云婷,陈添,等.2013年北京市PM_{2.5}的时空分布[J].地理学报,2015,70(1):110-120. [Wang Z S, Li Y T, Chen T, et al. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing in 2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(1):110-120.]
- [8] 戴昭鑫,张云芝,胡云锋,等.基于地面监测数据的2013-2015年长三角地区PM_{2.5}时空特征[J].长江流域资源与环境,2016,25(5):813-821. [Dai Z X, Zhang Y Z, Hu Y F, et al. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Yangtze River Delta(YRD) region based on the ground monitoring data during 2013-2015[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016,25(5):813-821.]
- [9] 张云芝,阿拉腾·图娅,戴昭鑫,等.基于地面监测数据的2014年京津冀地区PM_{2.5}时空分布研究[J].环境污染与防治,2016,38(12):31-37. [Zhang Y Z, TuYa A, Dai Z X, et al. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the ground monitoring data in 2014[J]. Environment Pollution and Control, 2016,38(12):31-37.]
- [10] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, et al. Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2005,39(22):3967-3976.
- [11] 樊风雷,林文枫.城市交通噪声垂直空间分布规律GIS分析[J].测绘与空间地理信息,2013,36(8):4-7. [Fan F L, Lin W F. Analysis of the vertical space discipline of urban noise based on GIS[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2013,36(8):4-7.]
- [12] 郑光,田庆久,李明诗.基于ETM+遥感影像的南京市城市绿地的动态监测[J].遥感信息,2005:22-24,44-70. [Zhen G, Tian Q J, Li M S. The Greenbelt dynamic monitoring of Nanjing based on ETM images[J]. Remote Sensing Information, 2005:22-24,44-70.]
- [13] 陈龙,谢高地,盖力强,等.道路绿地消减噪声服务功能研究——以北京市为例[J].自然资源学报,2011,26(9):1526-1534. [Chen L, Xie G D, Gai L Q, et al. Research on noise reduction service of road green spaces: A case study of Beijing[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(9):1526-1534.]
- [14] 李吉跃,常金宝.新世纪的城市林业:回顾与展望[J].世界林业研究,2001,14(3):1-9. [Li J Y, Chang J B. Urban forestry in the new century: Review and prospects[J]. World Forestry Research, 2001,14(3):1-9.]
- [15] 刘远程,黄义雄,李伟伟,等.福州市城区绿地系统生态及美学价值评估[J].福建林业科技,2010,37(1):59-64. [Liu Y C, Huang Y X, Li W W, et al. Ecological and aesthetic value assessment of urban greenland systems in Fuzhou city[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2010,37(1):59-64.]
- [16] 吕妙儿,蒲英霞,黄杏元.城市绿地监测遥感应用[J].中国园林,2000(5):41-44. [Lv M E, Pu Y X, Huang X Y. Application of remote sensing on monitoring of urban greenland[J]. Chinese Landscape Architecture, 2000(5):41-44.]
- [17] 张雪艳,胡云锋,庄大方,等.蒙古高原NDVI的空间格局及空间分异[J].地理研究,2009,28(1):10-18,274. [Zhang X Y, Hu Y F, Zhuang D F, et al. The spatial pattern and differentiation of NDVI in Mongolia Plateau[J]. Geographical Research, 2009,28(1):10-18,274.]
- [18] 徐芝英,胡云锋,甄霖,等.基于小波的浙江省NDVI与自然——人文因子多尺度空间关联分析[J].地理研究,2015,34(3):567-577. [Xu Z Y, Hu Y F, Zhen L, et al. Wavelet-based multi-scale analysis of NDVI and background factors in Zhejiang province[J]. Geographical Research, 2015,34(3):567-577.]
- [19] Liu J, Kuang W, Zhang Z, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(2):195-210.
- [20] Liu J, Liu M, Zhuang D, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003,46(4):373-384.
- [21] 宋富强,邢开雄,刘阳,等.基于MODIS/NDVI的陕北地区植被动态监测与评价[J].生态学报,2011,31(2):354-363. [Song F Q, Xing K X, Liu Y et al., Monitoring and evaluation of vegetation dynamics of Northern Shanxi based on MODIS/NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(2):354-363.]
- [22] Fabio M. Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,89(4):423-433.
- [23] 郭云开,曾繁.基于FLAASH与QUAC模型的SPOT 5影像大气校正比较[J].测绘通报,2012(11):21-23,41. [Guo Y K, Zeng F. Comparison of atmospheric correction of SPOT 5 images based on FLAASH and QUAC models [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012 (11):21-23,41.]
- [24] GB/T 50563-2010,城市园林绿化评价标准[S].2010. [GB/T 50563-2010,Urban Landscaping evaluation standard[S]. 2010.]
- [25] Georgi J N, Dimitriou D. The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece[J]. Building and Environment, 2010,45(6):1401-1414.
- [26] Seeland K, Dubendorfer S, Hansmann R. Making friends in Zurich's urban forests and parks: The role of public green space for social inclusion of youths from different cultures[J]. Forest Policy and Economics, 2009,11(1):10-17.
- [27] 桂昆鹏,徐建刚,张翔.基于供需分析的城市绿地空间布局优化——以南京市为例[J].应用生态学报,2013,24(5):1215-1223. [Gui K P, Xu J G, Zhang X. Optimization of spatial arrangement of urban green space based on supply-demand analysis: A case study of Nanjing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(5):1215-1223.]
- [28] 国家统计局.国家统计年鉴[Z],2014,2015. [National Bureau of Statistics, National Statistical Yearbook[Z], 2014, 2015.]