

引用格式: Wang Xi, Zhang Yiwen. An Analysis of Change Trend of Fractional Vegetation Cover in Beijing based on Landsat Imagery[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1388-1397. [王曦, 张怡雯. 基于Landsat影像的北京植被覆盖度变化趋势分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1388-1397.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.6.1388

基于Landsat影像的北京植被覆盖度变化趋势分析

王曦^{1,2}, 张怡雯³

(1. 中国自然资源经济研究院, 北京 101149;

2. 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083;

3. 水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心), 北京 100053)

摘要: 植被覆盖状况是决定大城市地区生态环境质量的重要因素之一,但在快速城市化进程下城市内部及周边地区植被覆盖的动态变化状况尚不清晰,需结合遥感数据进行分析。以北京市为研究区,基于Landsat影像获取植被覆盖度的空间分布,计算移动窗口内植被覆盖度的均值和标准差,将其分别作为表征局部植被覆盖水平和植被覆盖度异质性的指标,采用Mann-Kendall检验识别均值和标准差具有显著变化趋势的窗口,并使用Sen's Slope估算变化梯度,进而分析北京植被覆盖度变化趋势。结果表明在1984~2014年间:①植被覆盖水平呈显著上升趋势的区域主要分布在市中心与西部和北部山区,而在市中心外“东北、东、东南、南、西南”方向的近部分布有大量植被覆盖水平显著下降的区域;②植被覆盖度异质性呈显著上升趋势的区域主要分布在平原区,呈显著下降趋势的区域主要集中在北部山区。

关键词: 植被覆盖度;变化趋势;Landsat;北京

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)06-1388-10

1 引言

近几十年中国城市人口快速增长,城市人口比重从1960年的19.75%(1.31亿)上升到2019年的60.60%(8.48亿)^[1]。随着城市人口数量的增长,城市需要更多的土地来满足其日益增长的居住和产业发展需求。城市用地的增长主要通过两种方式:①外向扩张,吞并城市建成区周边的土地;②内部挖潜,提升城市现有建设用地的利用强度。扩张无疑是更为普遍的方式,据国家统计局的年度数据显示,在2004~2018年间,全国城市建设用地面积从30 781 km²增长到56 076 km²^[1],增幅达25 295 km²。城市用地的扩张主要表现为自然的土地覆被(森林、草地等)向人工覆被(沥青、水泥等建筑材料)的转变。

大城市在聚集人口、发展经济的同时也遭受着“城市病”的困扰,热岛效应、空气污染等问题危害居民的身体健康,降低居民的生活质量。城市热岛效应指的是城市区域与临近农村区域的温度差^[2],其强度与地表特征紧密相关。研究表明地表温度与植被覆盖度呈显著的负相关^[3-4],增加城市的植被覆盖面积是缓解城市热岛效应的重要途径^[5-6]。此外,城市森林可明显降低PM_{2.5}、PM₁₀浓度^[7-10],居民区的树木通过遮阳(夏季)挡风(冬季)减少空调的使用进而减少能耗和污染物的排放^[11]。可以说,城市的植被覆盖状况与其居民的生活质量息息相关。

遥感是监测植被时空动态变化的重要方法,依据植被反射率“红—近红外”波段的光谱特征,学者们构建了多种植被指数,如NDVI、EVI、SAVI等,可准确、方便地识别地表植被。基于遥感影像,针

收稿日期:2020-09-28;修订日期:2021-11-10

基金项目:自然资源部部门预算项目“全民所有自然资源资产变动监测”(121102000000190020)。

作者简介:王曦(1987—),男,北京人,博士后,主要从事土地利用与管理研究。E-mail: wangx87@126.com

对城市及其周边区域的植被研究主要通过3种方式获取植被的时空动态变化:①比较多期土地利用/覆被分类结果^[12-14];②通过线性解混的方法在亚像元尺度上获取植被的覆盖度^[15-16],并分析其随时间的变化;③通过NDVI、EVI等植被指数的时间序列数据得到植被覆盖强度的空间分布和变化趋势^[17-22]。

北京是有2000万人口的巨型城市,其人居环境的好坏影响千万人的日常生活,也与其城市形象直接挂钩。城市地区的扩张导致植被空间的缩小,进而引发一系列的生态环境问题,影响居民的身心健康。全面审视北京近些年的植被变化有助于总结过往城市化过程中的不足,为改善北京的城市生态环境提供科学依据。

首先使用Landsat数据提取北京植被覆盖度在1984~2014年间的空间分布,之后计算了移动窗口内植被覆盖度的均值和标准差,分别作为表征局部植被覆盖水平和植被覆盖度异质性的指标。使用Mann-Kendall检验识别植被覆盖度均值和标准差具有显著($p\text{-value}<0.05$)变化趋势的移动窗口,并通过Sen's Slope估算其升/降趋势的梯度。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

选取的研究区域为北京市(图1),北京地形西北高、东南低,土地面积约1.6万 km^2 ,其中平原面积约占三分之一,山地面积约占三分之二。西部山地属太行山脉,山峰高程约1000~1500 m;北部山地属燕山山脉,山地高度约800~1000 m。平原与山地连接部分的海拔约为200~500 m,平原的海拔约为30~50 m。

2019年末,北京市常住人口2153.6万人,其中城镇人口1865万人,全年地区生产总值35371.3亿元,三次产业构成为0.3:16.2:83.5。北京市下辖16个行政区,各行政区在功能定位、产业结构、人口密度等方面有较明显的差异。各行政区位置如图1所示。

2.2 Landsat影像预处理

综合考虑季节、云量等因素,采用了7期Landsat影像,成像时间分别为1984年8月16日、1990年9月18日、1995年9月16日、1999年8月10日、2004年9月8日、2011年7月26日和2014年9月4日,轨道号123/032(033),其中前6期为Landsat 5数据,

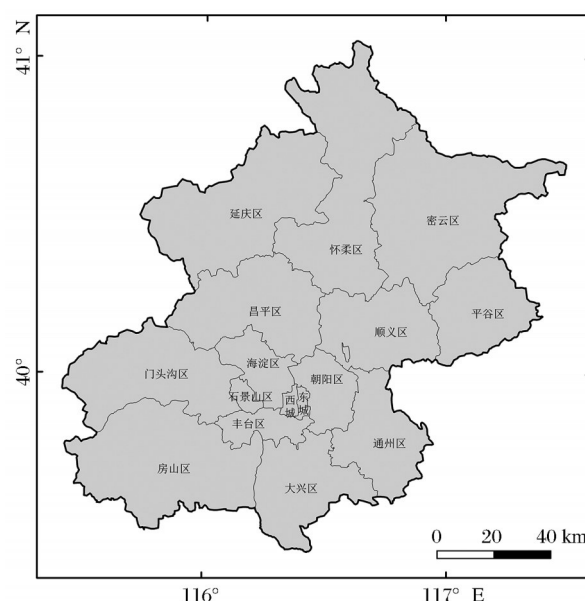


图1 研究区范围

Fig.1 Study area

最后一期为Landsat 8数据。

Landsat数据辐射定标后使用ENVI软件的FLAASH模块进行大气校正,得到地表反射率,之后计算归一化植被指数(NDVI),计算公式如下:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}) \quad (1)$$

其中: ρ_{NIR} 为近红外波段反射率; ρ_{RED} 为红光波段反射率,NDVI取值在-1到1之间。

2.3 研究方法

2.3.1 植被覆盖度计算

NDVI能够有效反映植被特征信息,本研究利用NDVI计算植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC),公式如下:

$$\text{FVC} = (\text{NDVI}_p - \text{NDVI}_s) / (\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s) \quad (2)$$

其中:FVC为植被覆盖度,NDVI_p是像元NDVI值,NDVI_v是植被丰富区域的NDVI值,NDVI_s是裸地的NDVI值。

本研究中,统一将NDVI_v设为0.7,NDVI_s设为0.05,像元NDVI大于0.7则FVC=1,像元NDVI小于0.05则FVC=0,像元NDVI在0.05和0.7之间,则按公式(2)计算FVC。

2.3.2 移动窗口处理

研究使用了5个不同大小(7×7、11×11、21×21、31×31、41×41像元)的移动窗口,计算窗口内像元植被覆盖度的均值和标准差,并将计算结果赋予窗口中心像元。

移动窗口均值显示了局部植被覆盖水平,窗口均值越大表明窗口内植被覆盖水平越高。移动窗

口标准差是局部植被覆盖度异质性的指标,显示了局部植被覆盖度的差异程度。窗口标准差较大说明窗口内各像元的植被覆盖度差异较大,异质性较高;标准差较小则说明窗口内的植被分布相对均匀,异质性较低。

在使用移动窗口处理各年份植被覆盖度空间分布数据后,每一年份均生成了5个移动窗口的均值和标准差的空间分布。

2.3.3 变化趋势

使用 Mann-Kendall 检验确定窗口均值和标准差是否具有显著的变化趋势^[15],当 $p\text{-value} < 0.05$ 时将该窗口均值/标准差的变化视为显著的。之后,使用 Sen's Slope 估算变化梯度,计算公式如下:

$$s_k = (x_j - x_i) / (j - i) \quad (3)$$

其中: i 和 $j(i < j)$ 分别为前后两个年份; x_i 和 x_j 分别为前后两个年份的移动窗口处理结果。若总共有 n

个时间点的数据,则共有 $n(n-1)/2$ 个 s_k ,其中值即为 Sen's Slope^[23]。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度空间分布与分区差异

图2(a)是北京在1984、1990、1995、1999、2004、2011、2014年的植被覆盖度空间分布,图中将植被覆盖度分为5个级别: $0 \leq FVC < 0.3$ 、 $0.3 \leq FVC < 0.5$ 、 $0.5 \leq FVC < 0.65$ 、 $0.65 \leq FVC < 0.8$ 、 $0.8 \leq FVC \leq 1$ 。图2(a)比较直观的显示出低植被覆盖区域($0 \leq FVC < 0.3$)逐步由市中心向外扩张的过程。图2(b)显示了1984~2014年不同级别植被覆盖度面积比重的变化。结果表明,低植被覆盖区域的比重逐渐增大,从1984年的2.76%增长到2014年的9.08%,最大增长幅度出现在1999~2004年,从1999年的3.95%增长到2004年的6.90%。

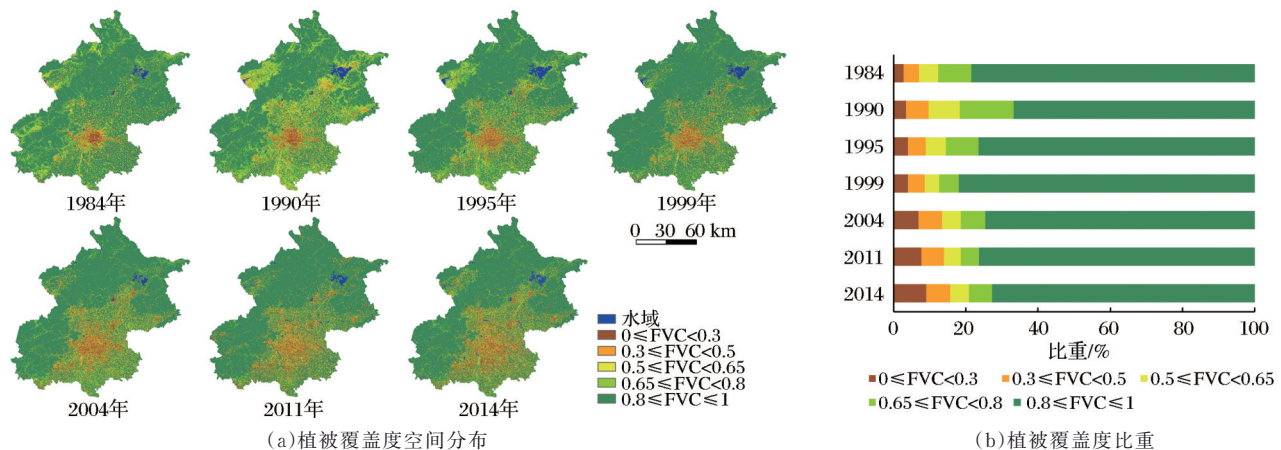


图2 北京植被覆盖度空间分布与变化

Fig.2 Spatial distribution and change of FVC in Beijing

在1984年,各区植被覆盖度均值在0.24~0.94之间(图3(a)),平均植被覆盖度最低的是东城区和西城区,属于北京的城市核心功能区,城市化水平很高;平均植被覆盖度最高的是平谷区和怀柔区,分别位于北京北部和东北部,区内有较大比例的山区。朝阳区、丰台区、石景山区和海淀区环绕东城区和西城区,平均植被覆盖度处于中等水平。此外,在1984年16个区的植被覆盖度均值表现为明显的3个层次,东城区和西城区的平均植被覆盖度低(< 0.27),朝阳区、海淀区、丰台区、石景山区的平均植被覆盖度中等($0.64 \sim 0.72$),其他10个区平均植被覆盖度高(> 0.86)(图3(a))。2014年各区的植被覆盖度均值在0.34~0.94之间,平均植被覆盖度最低的仍是东城区和西城区,平均植被覆盖度最

高的是怀柔区和门头沟区;朝阳区、丰台区、海淀区、通州区、顺义区、大兴区的植被覆盖度均值相较于1984年有明显的下降,这6个区也是北京近几十年城市化最显著的地区。总体来说,1984~2014年间,东城区和西城区的平均植被覆盖度表现为前期低而后期高;朝阳区、丰台区、海淀区、通州区、顺义区和大兴区的平均植被覆盖度表现为前期高而后期低;门头沟区、房山区、昌平区、怀柔区、平谷区、密云区和延庆区的植被覆盖度均值处于较高水平(> 0.78);石景山区植被覆盖度均值在0.60~0.65之间,变化幅度较小。

各区的植被覆盖度标准差代表了区内植被覆盖度的异质性水平,标准差越大则表明区内植被覆盖度的空间差异越大。总体来说,在1984~2014年

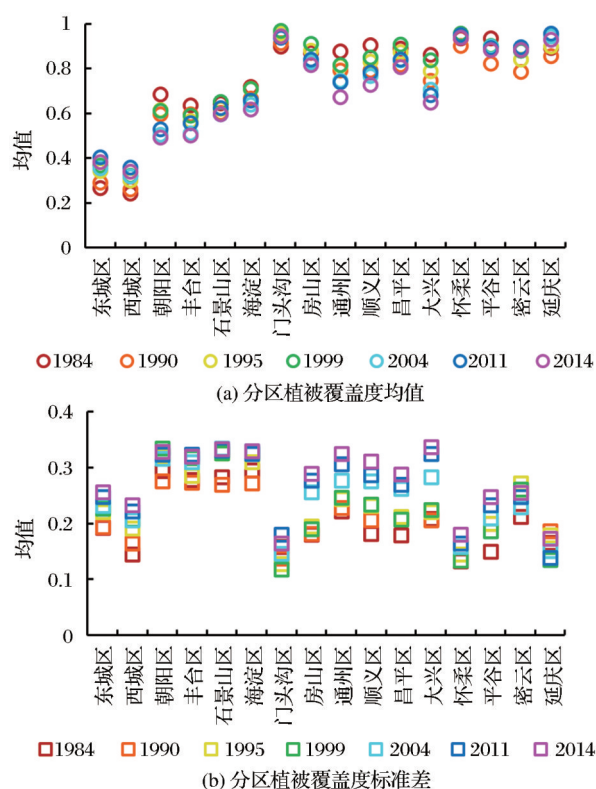


图3 北京分区的植被覆盖度特征

Fig. 3 FVC features of different districts

间,门头沟区植被覆盖度标准差表现为初期和末期高而中期低的特点;怀柔区、密云区和延庆区植被覆盖度标准差无明显变化特征;其余12个区的植被覆盖度标准差均表现为前期低而后期高(图3(b))。东城区和西城区的植被覆盖度初期低而后期高,其内部部分位置植被条件的改善会产生均值和标准差均增大的情况。对于植被覆盖度有较大下降的区,如通州区、顺义区、大兴区等,其标准差的增加是由于区内局部植被覆盖的下降,提升了植被覆盖度的空间差异。对于植被覆盖一直处于高水平的区,如延庆区、密云区、怀柔区,其标准差的变化是区内局部植被覆盖度变化导致的。

3.2 植被覆盖水平的变化趋势

图4是移动窗口内植被覆盖度均值变化梯度的空间分布。当Mann-Kendall检验的 p -value <0.05 时,将该窗口的植被覆盖度均值的变化趋势视为显著的,图4中灰色部分为变化趋势不显著的部分。随窗口的增大,一些孤立的有显著变化趋势的区域消失或合并,使整体的分布趋于集中连片。

如图4所示,在1984~2014年间,北京植被覆盖度窗口均值呈显著上升趋势的区域主要是:北部山区、西部山区和市中心区域。在北部山区,窗口均

值呈显著上升趋势的区域表现为连片分布的特征,而其在西部山区的分布则相对零散。这两部分属于北京的生态涵养区。同期,北京植被覆盖度窗口均值呈显著下降趋势的区域主要分布在城市核心区外的北、东北、东、东南、南和西南侧,几乎构成一个半圆围绕市中心。其中,南(大兴区)和东南(通州区)方位的植被下降最为明显,这是城市建成区的主要扩张方向。

就北京全市而言,随着窗口的增大,植被覆盖度窗口均值有显著上升趋势的面积比重逐渐降低,而有显著下降趋势的面积比重逐渐上升(表1)。东城区和西城区的窗口均值显著上升的面积比重高于其他区(表1),一方面是因为这两个区面积较小,另一方面是因为区内的植被条件有所改善,这一点从它们平均植被覆盖度的上升可以看出来。朝阳区、通州区、顺义区、大兴区的窗口均值显著下降的面积比重较高(表1),这是城市化过程导致的。窗口大小对怀柔区、密云区和延庆区的影响较小,这是因为在这3个区内窗口均值显著变化区域的空间分布较为连续;此外,从位置上看,这3个区是远郊区,受建成区扩张的影响很小,且自身面积较大,因此区内窗口均值显著下降的面积比重很低。

图5(a)和图5(b)分别是以天安门广场为中心,1 km为间隔的同心环形区域内植被覆盖度窗口均值显著上升、下降的面积比重。在距中心约10~50 km的范围内,窗口均值显著下降的面积比重(图5(b))高于显著上升的面积比重(图5(a))。图5(a)中的曲线在8~9 km处存在明显的“断层”,在距中心小于8 km的区域内窗口均值显著上升的面积比重很高,这表明市中心的植被覆盖水平有较好的提升。图5(c)显示的是1 km间隔的同心圆环内窗口均值变化梯度的中值,在8~9 km处数值由正转负,在约44~53 km的区间内数值由负转正。综合来看,距中心10~40 km的区域内植被覆盖水平降低最为明显,是北京城市扩张和改造导致土地覆被变化最显著的区域。

将植被覆盖度窗口均值变化梯度的空间分布围绕中心分成360份,每度一份,提取每一份中变化梯度的中值,生成图5(d)。在图5(d)中的左上侧,数值大于0的点构成了一个接近“半圆”的形状,而在右下侧,所有的点均在小于0的位置上,这表明“东北、东、东南、南、西南”是北京植被覆盖度减少较为明显的方向,也是北京城市化和建成区扩

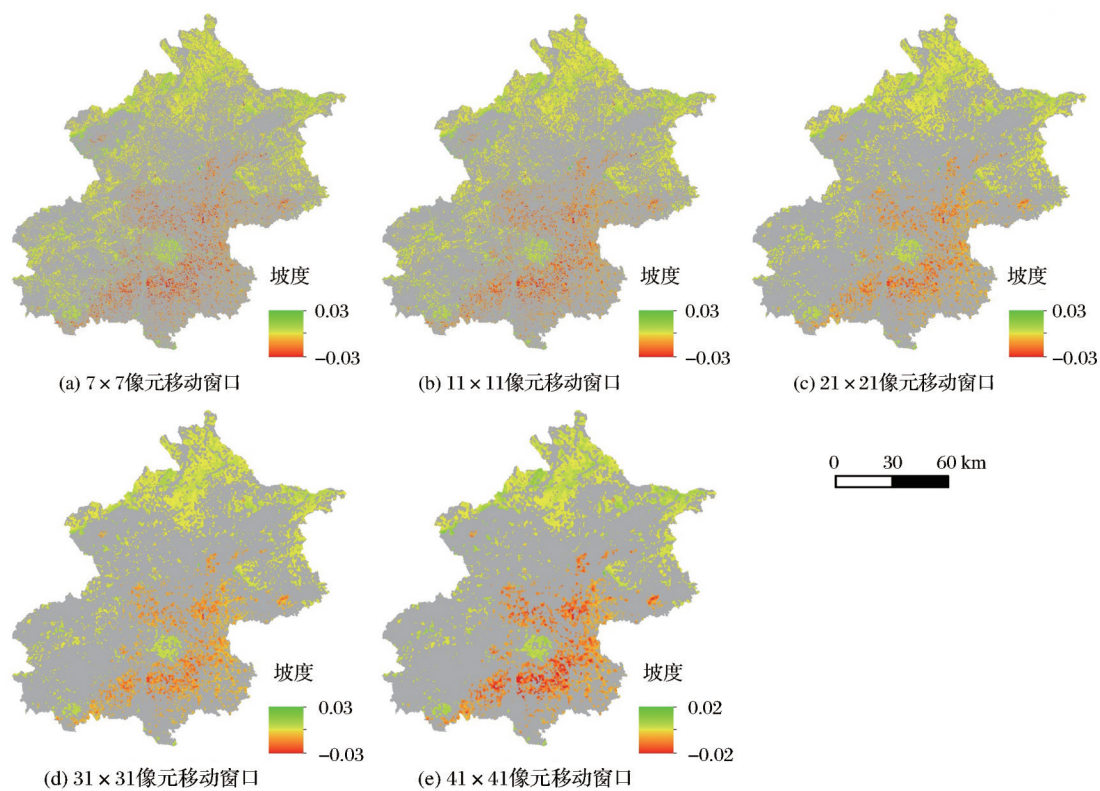


图 4 北京植被覆盖度窗口均值变化梯度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of trend slope of moving window mean value of FVC in Beijing

表 1 植被覆盖度窗口均值呈显著(p-value<0.05)上升/下降趋势的面积比重

| Table 1 | Proportion of significant (p-value<0.05) increasing / decreasing trends of moving window mean value of FVC | | | | |
|---------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 7×7 窗口 | 11×11 窗口 | 21×21 窗口 | 31×31 窗口 | 41×41 窗口 |
| 北京全市 | 17.33%/6.05% | 17.43%/6.77% | 16.14%/8.09% | 14.92%/9.02% | 13.94%/9.71% |
| 东城区 | 38.06%/0.67% | 42.49%/0.33% | 49.38%/0.01% | 56.03%/0.00% | 63.98%/0.00% |
| 西城区 | 37.40%/0.51% | 43.13%/0.23% | 53.34%/0.06% | 59.39%/0.00% | 63.22%/0.00% |
| 朝阳区 | 4.92%/16.24% | 4.72%/19.03% | 4.55%/24.50% | 4.48%/28.71% | 4.29%/31.48% |
| 丰台区 | 5.42%/12.14% | 4.57%/13.59% | 3.06%/16.02% | 2.20%/17.84% | 1.55%/19.88% |
| 石景山区 | 10.23%/7.08% | 7.11%/7.98% | 2.33%/10.29% | 0.97%/12.07% | 0.25%/12.31% |
| 海淀区 | 9.40%/9.74% | 8.78%/11.31% | 7.87%/13.36% | 7.46%/14.50% | 7.30%/15.86% |
| 门头沟区 | 18.42%/0.73% | 16.81%/0.79% | 12.57%/1.01% | 9.36%/1.12% | 7.16%/1.17% |
| 房山区 | 10.53%/6.56% | 8.44%/7.46% | 5.42%/9.05% | 4.08%/10.04% | 3.27%/10.65% |
| 通州区 | 0.94%/17.80% | 0.61%/20.85% | 0.26%/27.46% | 0.11%/32.72% | 0.08%/36.71% |
| 顺义区 | 3.42%/15.49% | 3.10%/18.08% | 2.70%/22.95% | 2.54%/26.15% | 2.48%/28.47% |
| 昌平区 | 14.71%/5.47% | 13.56%/6.07% | 9.78%/6.97% | 6.97%/7.46% | 5.12%/7.79% |
| 大兴区 | 1.78%/14.90% | 1.52%/16.45% | 1.09%/19.78% | 0.96%/22.21% | 0.85%/23.81% |
| 怀柔区 | 31.38%/1.94% | 33.79%/2.03% | 34.48%/2.01% | 33.90%/1.93% | 33.39%/1.93% |
| 平谷区 | 18.13%/5.63% | 18.48%/5.66% | 15.91%/5.16% | 12.85%/4.59% | 10.25%/4.21% |
| 密云区 | 25.23%/1.90% | 26.01%/1.71% | 24.93%/1.29% | 23.80%/1.08% | 22.48%/1.00% |
| 延庆区 | 29.43%/0.55% | 31.21%/0.47% | 31.71%/0.41% | 30.69%/0.35% | 29.54%/0.34% |

张的主要方向。

3.3 植被覆盖度异质性的变化趋势

图 6 是移动窗口内植被覆盖度标准差变化梯度的空间分布。与之前相同,当 Mann-Kendall 检验的 p-value<0.05 时,将该窗口的植被覆盖度标准差的

变化趋势视为显著的。窗口标准差呈显著上升趋势的区域大部分分布于平原区,包括城市核心区和郊区;而呈显著下降趋势的区域则主要集中在北部山区(图 6)。

随着窗口的增大,窗口标准差显著上升的面积

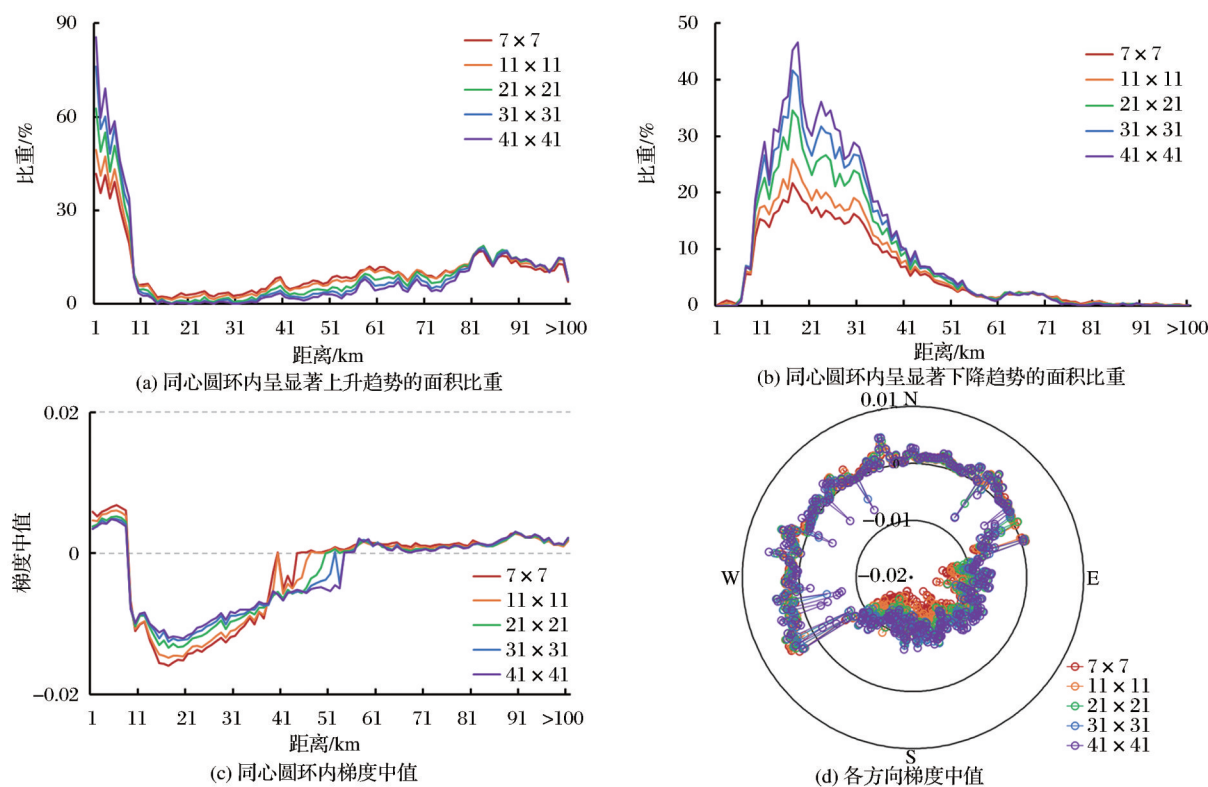


图 5 植被覆盖度窗口均值变化的空间特征

Fig.5 Spatial characteristics of trend of moving window mean value of FVC

比重逐渐提高,而显著下降的面积比重逐渐降低(表 2)。相比之下,东城区和西城区窗口标准差显著上升的面积比重远高于其它区。

图 7(a)和图 7(b)分别是以天安门广场为中心,1 km 为间隔的同心环形区域内植被覆盖度窗口标准差显著上升、下降的面积比重。在距中心小于约 46 km 的范围内,窗口标准差显著上升的面积比重(图 7(a))高于显著下降的面积比重(图 7(b));而在距中心大于约 50 km 的范围内,窗口标准差显著下降的面积比重高于显著上升的面积比重。图 7(c)

表 2 植被覆盖度窗口标准差呈显著 ($p\text{-value}<0.05$) 上升/下降趋势的面积比重

| | 7×7 窗口 | 11×11 窗口 | 21×21 窗口 | 31×31 窗口 | 41×41 窗口 |
|------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 北京全市 | 8.6%/14.6% | 11.2%/14.5% | 16.2%/12.6% | 20.1%/10.8% | 23.2%/9.5% |
| 东城区 | 53.43%/0.86% | 62.79%/0.77% | 70.78%/0.65% | 75.54%/0.32% | 77.30%/0.21% |
| 西城区 | 55.44%/0.13% | 67.88%/0.04% | 80.27%/0.02% | 85.73%/0.00% | 88.55%/0.00% |
| 朝阳区 | 18.24%/1.68% | 21.97%/1.63% | 29.91%/1.24% | 36.44%/0.92% | 41.86%/0.82% |
| 丰台区 | 14.34%/1.83% | 17.94%/1.38% | 26.05%/1.18% | 32.78%/1.18% | 36.55%/1.09% |
| 石景山区 | 11.69%/6.17% | 13.65%/4.29% | 18.17%/1.84% | 20.31%/0.85% | 21.38%/0.86% |
| 海淀区 | 19.60%/3.74% | 24.38%/2.81% | 34.29%/1.83% | 41.16%/1.48% | 46.46%/1.31% |
| 门头沟区 | 1.88%/16.16% | 2.50%/14.81% | 3.75%/11.06% | 4.62%/8.09% | 5.23%/6.05% |
| 房山区 | 9.14%/8.22% | 12.24%/6.19% | 18.67%/3.13% | 23.32%/1.66% | 26.68%/0.86% |
| 通州区 | 16.42%/1.11% | 20.19%/0.73% | 29.16%/0.36% | 37.82%/0.32% | 44.76%/0.31% |
| 顺义区 | 17.08%/2.71% | 22.93%/2.40% | 35.65%/1.90% | 46.35%/1.64% | 55.07%/1.50% |
| 昌平区 | 8.23%/13.35% | 11.24%/12.22% | 18.09%/8.85% | 23.74%/6.41% | 28.04%/4.94% |
| 大兴区 | 17.50%/1.18% | 21.51%/0.89% | 29.37%/0.49% | 35.28%/0.25% | 39.99%/0.13% |
| 怀柔区 | 3.67%/27.72% | 4.98%/29.66% | 7.45%/28.58% | 9.13%/26.09% | 10.48%/23.77% |
| 平谷区 | 9.75%/16.10% | 13.54%/15.71% | 20.89%/11.88% | 26.05%/8.10% | 30.44%/5.46% |
| 密云区 | 4.67%/21.87% | 6.00%/21.84% | 8.08%/18.61% | 9.27%/15.59% | 10.14%/13.34% |
| 延庆区 | 2.57%/25.15% | 3.24%/27.08% | 4.34%/27.40% | 5.10%/26.02% | 5.55%/24.77% |

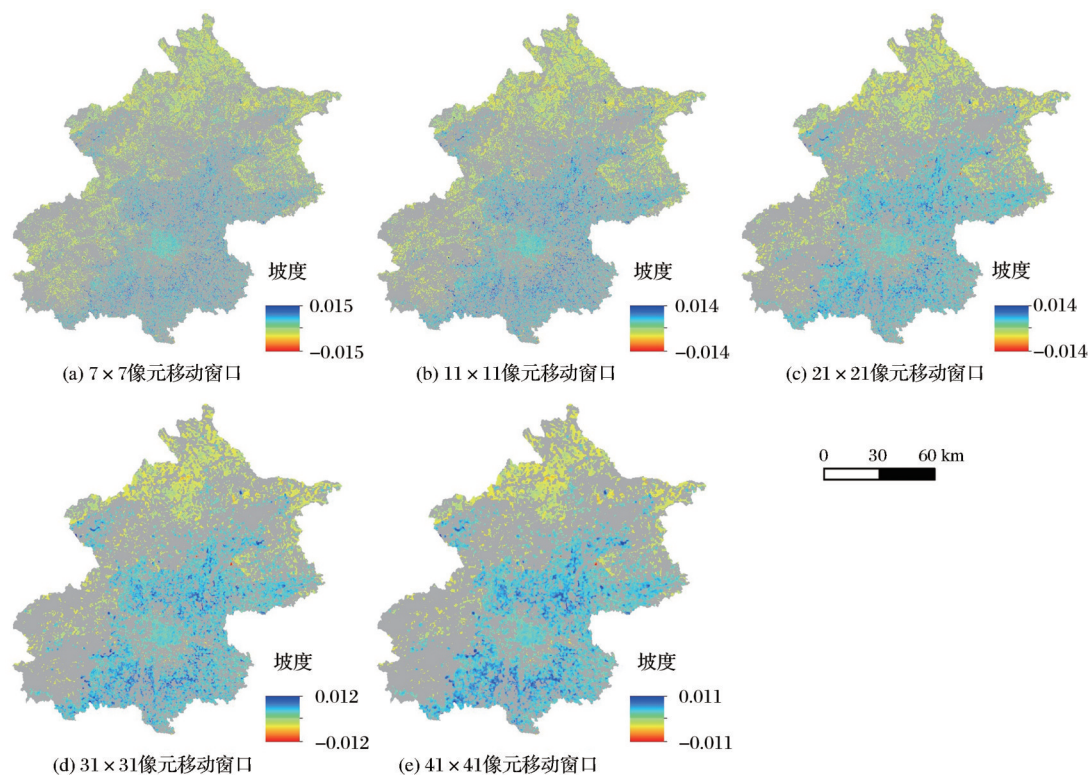


图 6 北京植被覆盖度窗口标准差变化梯度的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of trend slope of moving window standard deviation of FVC in Beijing

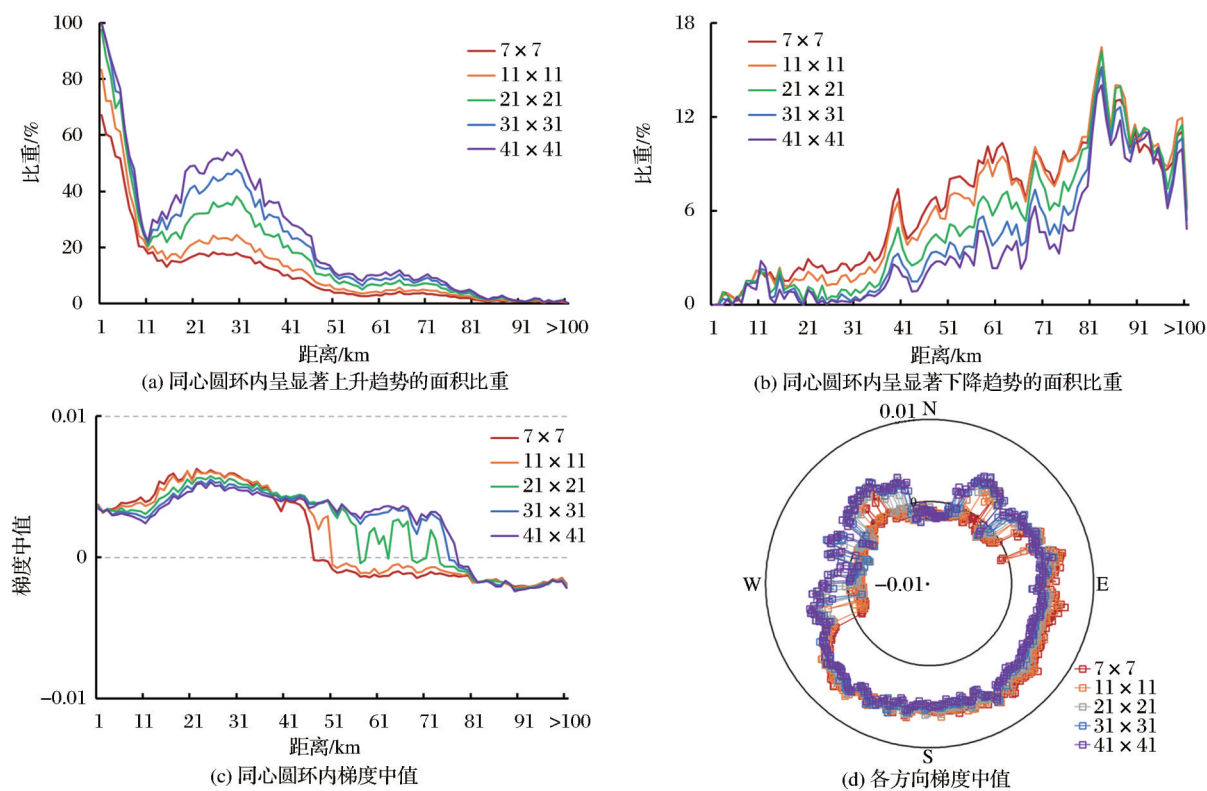


图 7 植被覆盖度窗口标准差变化的空间特征

Fig. 7 Spatial characteristics of trend of moving window standard deviation of FVC

显示的是 1 km 间隔的同心圆环内窗口标准差变化梯度的中值。综合来看,距中心小于 46 km 的区域

内窗口标准差的变化梯度为正值,也就是在这个范围内植被覆盖度异质性是升高的。

与图5(d)类似,图7(d)是植被覆盖度窗口标准差在各方向上的变化梯度的中值。在“东北、东、东南、南、西南”的方向上,标准差的变化梯度大于0,表明这个方向上植被覆盖度异质性有上升趋势。与图5(d)对比,可以看出北京植被在“东北、东、东南、南、西南”方向上存在覆盖度下降且异质性上升的情况,这可以看作城乡边缘地区经历城市用地扩张时地表植被所展示出来的变化特征。

4 讨论

4.1 窗口尺寸

研究使用了5个不同大小的窗口,最小的为 7×7 像元($210 \text{ m} \times 210 \text{ m}$),最大的为 41×41 像元($1\,230 \text{ m} \times 1\,230 \text{ m}$);不同尺寸的窗口对于地表局部植被特征的“捕捉”能力不同。受城市化影响的植被减少是比较快速的过程,居住、商业用地的开发会在短时间内将小范围的植被抹除。因此,在城市扩张区域,逐像元的分析很难提供植被变化趋势的相关信息,更多的是“有或无”的判断。使用移动窗口处理植被覆盖度的空间分布数据时,中心像元记录的是窗口范围内的植被特征;若窗口尺寸合适,则植被覆盖度窗口均值的下降趋势刻画了局部的“植被向其他覆被类别”的转换过程。

北京北部山区植被丰富且分布较为广泛和连续,受人类活动影响较小,植被覆盖度长期处于较高水平,且变化趋势的结果受窗口尺寸的影响较弱;而平原区受城市化的影响,城乡边缘部分的植被变化较快,只有较大的移动窗口才能捕捉到局部植被覆盖度变化的趋势。因此,窗口尺寸的选取受地表植被覆盖度及其变化等因素的影响,对于植被覆盖度高且变化幅度小的区域,窗口尺寸的差异对植被覆盖度变化趋势的结果影响较小,而对于植被覆盖度变化较快的区域,需使用较大尺寸的窗口获取植被覆盖度变化趋势。

4.2 植被覆盖度窗口均值和标准差变化的比较

对比窗口内植被覆盖度的均值和标准差,可以发现北京植被覆盖的变化趋势有3种情况(忽略变化趋势不显著的部分):①窗口均值有显著上升趋势,而窗口标准差有显著下降趋势,如北部山区的部分区域;②窗口均值和标准差均有显著上升趋势,如市中心;③窗口均值有显著下降趋势,而窗口标准差有显著上升趋势,如临近市中心的东北、东、东南、南、西南方位。

若移动窗口内植被覆盖度均值和标准差分别呈显著上升和下降的趋势,则意味着窗口内的植被随时间变得更为丰富,且分布趋于均匀。这种情况比较集中的出现在有高植被覆盖度的生态用地区域。

若移动窗口内植被覆盖度均值和标准差均呈显著上升的趋势,则表明局部的植被覆盖状况有所改善,且窗口范围内植被覆盖度的差异增大了。这种情况主要出现在低植被覆盖区域,以北京的中心城区最为明显。在城市建设比较稳定的城市核心区域,建筑物、道路的密度较高,植被覆盖度较低,植被状况的改善只能出现在少数位置,如河道两侧、公路隔离带等,这导致窗口内部分像元的植被覆盖度升高而其它像元的植被覆盖度保持在低水平,从而使窗口内的植被覆盖度均值上升且标准差增大。这符合城区植被空间改善的客观情况。

若移动窗口内植被覆盖度均值和标准差分别呈下降和上升的趋势,则意味着原先较为丰富的植被随时间变得稀疏。这种情况主要出现在北京中心城区的外围。受建成区域扩张的影响,原属农村的区域逐渐转变成城市用地,土地利用方式的转变导致植被覆盖度的降低。在建成区域逐步扩张的过程中,移动窗口内部分像元的植被覆盖度降低而其它像元则保持原有水平,从而使窗口内植被覆盖度均值降低而标准差增大。

4.3 植被覆盖变化驱动因素

随着城市化进程的加深,北京市经济发展水平和常住人口数量均有较大幅度的增长。统计数据显示^[24]:1984~2014年,北京市常住人口从965.0万增长到2 151.6万,年均增长率为2.71%;城镇人口从570.0万增长到1 859.0万,年均增长率为4.02%;GDP从216.6亿元增长到21 944.1亿元,按可比价格计算,年均增长率达到10.29%。北京常住人口的增加直接导致了对住房及基础设施需求的增长;城市经济水平的提升带动了家庭收入的增长,间接提升了居民对住房的需求;地铁、轻轨等高效交通工具提升了城乡边缘地区的可达性,降低了工作对居住地点的约束,使原本区位优势明显的郊区因价格优势受到企业、居民和开发商的青睐。需求的增长促进了房地产的开发,但受限于城市核心区有限的建设空间和高昂的地价,新开发的住宅及其配套设施多位于城乡边缘地区,这导致了在该区域不透水地表扩张且植被覆盖度降低。

5 结 论

实验基于 Landsat 数据提取植被覆盖度,使用 Man-Kendall 检验和 Sen's Slope 分析了北京局部植被覆盖水平及植被覆盖度异质性的变化趋势。结果显示:

(1)就北京全市而言,植被覆盖度窗口均值呈显著上升趋势的面积比重大于呈显著下降趋势的面积比重,但随窗口的增大,前者逐渐减小,后者逐渐增大。窗口均值显著上升的区域主要分布在市中心与西部和北部山区,且较为连续。这表明市中心的植被覆盖水平有着较好的改善,西部和北部山区生态用地的植被状况有一定程度的提升。植被覆盖度窗口均值显著下降的区域主要分布在市中心“东北、东、东南、南、西南”侧的外围区域。这些方向上受到城市扩张的影响,植被转为其他类型的覆被,导致了植被覆盖度的下降。

(2)随着移动窗口的增大,植被覆盖度窗口标准差呈显著上升趋势的面积比重逐渐增大,而呈显著下降趋势的面积比重逐渐减小。窗口标准差呈显著上升趋势的区域主要分布在平原区,但市中心和近郊的变化有所不同。市中心由于初期植被覆盖度较低,后期植被条件的局部改善使其异质性增加;而近郊初期植被覆盖度较高,后期植被的局部减少使其异质性增加。窗口标准差呈显著下降趋势的区域主要集中在北部山区。该地区植被覆盖度一直处于较高水平,且随时间变化有所提升,植被分布趋于均匀,异质性降低。

参考文献(Reference):

- [1] 国家统计局. 年度数据[DB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2020年8月1日.
- [2] Johnson D, Wilson J. The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: the case of heat-related deaths in Philadelphia[J]. *Applied Geography*, 2009, 29(3): 419-434. DOI: 10.1016/j.apgeog.2008.11.004.
- [3] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 467-483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
- [4] Chen X, Zhao H, Li P, *et al.* Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 133-146. DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.016.
- [5] Chen Y, Wong N. Thermal impact of strategic landscaping in cities: a review[J]. *Advances in Building Energy Research*, 2009, 3(1): 237-260. DOI: 10.3763/aber.2009.0309.
- [6] Wang Wenjie, Shen Wenming, Liu Xiaoman, *et al.* Research on the relation of the urbanization and urban heat island effect changes in Beijing based on remote sensing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(2): 44-48. [王文杰, 申文明, 刘晓曼, 等. 基于遥感的北京市城市化发展与城市热岛效应变化关系研究[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(2): 44-48.]
- [7] Xiao Yu, Wang Shuo, Li Na, *et al.* Atmospheric PM_{2.5} removal by green spaces in Beijing[J]. *Resources Science*, 2015, 37(6): 1149-1155. [肖玉, 王硕, 李娜, 等. 北京城市绿地对大气 PM_{2.5} 的削减作用[J]. *资源科学*, 2015, 37(6): 1149-1155.]
- [8] Li Shaoning, Kong Lingwei, Liu Bin, *et al.* Spatial and temporal variation of PM_{2.5} concentration in urban forest vegetation region[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 39(7): 164-173. [李少宁, 孔令伟, 刘斌, 等. 城市森林植被区空气 PM_{2.5} 质量浓度时空变化[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(7): 164-173.]
- [9] Wang Yanran, Zhang Xuexia, Zhao Jingyao, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and its relationship with vegetation coverage in Beijing during the period of 2013~2014[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 103-111. [王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 等. 2013~2014年北京地区 PM_{2.5} 时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 103-111.]
- [10] Tallis M, Taylor G, Sinnott D, *et al.* Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 129-138. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.07.003.
- [11] Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas[J]. *Solar Energy*, 2001, 70(3): 295-310. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00089-X.
- [12] Li Chao, Zhao Shuqing, Fang Jingyun. Vegetation cover change and driving factors in Fujian province between 1975 and 2014[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(2): 157-164. [李超, 赵淑清, 方精云. 1975~2014年福建省植被覆盖变化及其驱动因素[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(2), 157-164.]
- [13] Enaruvbe G, Atafo O. Land cover transition and fragmentation of river ogba catchment in Benin City, Nigeria[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 45: 70-78. DOI: 10.1016/j.scs.2018.11.022.
- [14] Shi Shushu, Kuang Wenhui, Dong Siqi. Spatiotemporal pattern of urban-rural gradient land cover changes and their impact on urban heat island in Xi'an city since the 21st century[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(3): 537-547. [史姝姝, 匡文慧, 董斯齐. 21世纪以来西安城乡梯度土地覆盖变化及对城市热岛影响时空特征[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(3): 537-547.]
- [15] Lu Y, Coops N C, Hermosilla T. Estimating urban vegetation fraction across 25 cities in Pan-Pacific using Landsat time series data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 126: 11-23. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.12.014.

- [16] Xie Miaomiao, Wang Yanglin, Li Guicai. Spatial variation of impervious surface area and vegetation cover based on subpixel model in Shenzhen[J]. Resources Science, 2009, 31(2): 257-264.[谢苗苗, 王仰麟, 李贵才. 基于亚像元分解的不透水表面与植被覆盖空间分异测度—以深圳市为例[J]. 资源科学, 2009, 31(2): 257-264.]
- [17] Zhou D, Zhao S, Zhang L, *et al.* Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 272-281. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.010.
- [18] Li Zhuo, Sun Ranhao, Zhang Jichao, *et al.* Temporal-spatial analysis of vegetation coverage dynamics in Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7418-7426.[李卓, 孙然好, 张继超, 等. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7418-7426.]
- [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): 2170-2184.[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): 2170-2184.]
- [20] Hu Shunshi, Peng Yulong, Qin Jianxin, *et al.* Research on the vegetation index dynamic changes and the impact of urban expansion on It for Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2019, 39(12): 178-186.[胡顺石, 彭雨龙, 秦建新, 等. 长株潭城市群植被指数动态变化及城市扩展对其影响分析[J]. 经济地理, 2019, 39(12): 178-186.]
- [21] Wen Z, Wu S, Chen J, *et al.* NDVI indicated long-term interannual changes in vegetation activities and their responses to climatic and anthropogenic factors in the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 947-959. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.049.
- [22] Zhang Tao, Tang Hong. Vegetation cover change and urban expansion in Beijing-Tianjin-Hebei during 2001~2015 based on Google Earth Engine[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(4): 593-599.[张滔, 唐宏. 基于Google Earth Engine的京津冀2001~2015年植被覆盖变化与城镇扩张研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 593-599.]
- [23] Sen P. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- [24] 北京统计局. 北京统计年鉴2019[DB/OL]. <http://nj.tjj.beijing.gov.cn/nj/main/2019-tjnj/zk/indexch.htm>, 2020年9月15日.

An Analysis of Change Trend of Fractional Vegetation Cover in Beijing based on Landsat Imagery

Wang Xi^{1,2}, Zhang Yiwen³

(1.Chinese Academy of Natural Resources Economics, Beijing 101149, China;

2.School of Economics and Management, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3.Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: Vegetation cover is a crucial determinant of ecological environment in big cities. But the spatial-temporal dynamics of vegetation cover in the inner city and peri-urban areas in the process of rapid urbanization are still unclear and need to be researched in combination with remote sensing data. This study estimated the distribution of Fraction Vegetation Cover (FVC) of Beijing by using Landsat images, and calculated moving window mean value and standard deviation of FVC, which were respectively used as proxies for local vegetation coverage and FVC heterogeneity. Then the moving windows with significant change trend were identified by Mann-Kendall test and the slope of change was estimated by Sen's Slope. And on this basis, we analyzed the change trend of FVC of Beijing. The results showed that during 1984~2014 the areas with significant increasing trends of vegetation coverage were mainly distributed in the urban center and the north and the west mountainous areas, and the areas with significant decreasing trends of vegetation coverage were mainly distributed in the northeast, east, southeast, south and southwest suburbs. Besides, the areas with significant increasing trends of FVC heterogeneity were mainly in flatlands while the areas with significant decreasing trends of FVC heterogeneity were mainly in the north mountainous areas.

Key words: Fractional Vegetation Cover; Change trend; Landsat; Beijing