

太原市城区植被覆盖变化地形分异效应

陈学兄^{1,2}, 毕如田^{1,2}, 张小军³, 韩伟宏⁴

(1. 山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西农业大学 农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801; 3. 山西农业大学 园艺学院, 山西 太谷 030801; 4. 山西农业大学 经济管理学院/农业资源与经济研究所, 太原 030006)

摘要: [目的] 分析山西省太原市城区植被覆盖变化在高程、坡向、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度上的分异效应, 为该市生态环境保护提供基础信息。[方法] 基于 2004 年 8 月、2007 年 8 月、2011 年 8 月、2014 年 9 月、2016 年 9 月的 Landsat 系列影像和 ASTER GDEM 数据, 采用像元二分模型法估算太原市城区 5 个时期的植被覆盖度, 对其时空动态变化特征进行分析, 并结合地形面积差异修正系数分析植被覆盖变化在不同地形因子上的分异性及变化趋势。[结果] ① 2004—2016 年植被覆盖度以中高度覆盖度和高度覆盖度为主, 二者占总面积的 65% 以上, 总体呈显著上升趋势, 植被覆盖度显著下降区主要分布在小店区和尖草坪区, 而中东部和西部植被覆盖度上升较快; 2007—2011 年植被覆盖度减少面积为 852.70 km², 增加面积为 601.62 km², 总体呈退化趋势, 而 2004—2007, 2011—2014, 2014—2016 年植被覆盖度增加面积超过研究区面积的 1/2, 植被恢复效果较好; ② 不同坡向上, 在平地区域不同植被覆盖变化类型的分布差异较显著, 其余坡向上的差异不明显; 不同植被覆盖变化类型在不同高程、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度上的空间分布差异明显。[结论] 坡向对植被生长变化的影响不明显, 而高程、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度对植被覆盖变化的地形效应较明显。

关键词: 植被覆盖度; 地形因子; 像元二分模型; 地形面积差异修正系数; 太原市城区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0299-11

中图分类号: S157.1, TP79

文献参数: 陈学兄, 毕如田, 张小军, 等. 太原市城区植被覆盖变化地形分异效应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 299-309. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20200818.001; Chen Xuexiong, Bi Rutian, Zhang Xiaojun, et al. Topographic differentiation effect on vegetation cover change in urban districts of Taiyuan City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 299-309.

Topographic Differentiation Effect on Vegetation Cover Change in Urban Districts of Taiyuan City

Chen Xuexiong^{1,2}, Bi Rutian^{1,2}, Zhang Xiaojun³, Han Weihong⁴

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment, Taigu, Shanxi 030801,

China; 3. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 4. College of Economics & Management, Shanxi Agricultural University/Institute of Agricultural Resources and Economics, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: [Objective] The differentiation effects of vegetation cover change based on elevation, aspect, slope, slope change rate, terrain niche, and relief amplitude were analyzed to provide basic information for ecological environment protection in Taiyuan City, Shanxi Province. [Methods] Based on advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) global digital elevation model (GDEM) data and remote sensing data in August 2004, August 2007, August 2011, September 2014, and September 2016, the dimidiate pixel mode was used to estimate the vegetation cover in urban districts of Taiyuan City in different periods. The differentiation and changing trend of vegetation cover in terms of elevation, aspect, slope, slope change rate, terrain niche, and relief amplitude were analyzed using the correction coefficient for topographic areas.

收稿日期: 2020-06-19

修回日期: 2020-07-30

资助项目: 山西省高等学校科技创新项目“基于高光谱的核桃叶片氮素营养诊断研究”(2020L0136); 国土资源部公益性行业科研专项资助项目(2014111007); 山西省重点研发计划重点项目(201703D211002-1-2); 山西农业大学引进人才博士科研启动项目(2014YJ02)

第一作者: 陈学兄(1986—), 女(汉族), 青海省乐都区人, 博士, 讲师, 主要从事 3S 技术及应用研究、基于 GIS 的水土流失评价研究。Email: chenxx0505@126.com.

通讯作者: 毕如田(1963—), 男(汉族), 山西省阳泉市人, 博士, 教授, 博导, 主要从事 3S 技术及应用等方面的研究。Email: brt@sxau.edu.cn.

[Results] ① The vegetation coverage was mainly medium height coverage and high coverage, which accounted for more than 65% of the total area. The overall vegetation cover increased significantly from 2004 to 2016. The areas with a significant decrease in vegetation cover were mainly distributed in Xiaodian and Jiancaoping Districts, while the vegetation cover in the west and middle east areas increased rapidly. The area of vegetation coverage decreased by 852.70 km². However, it increased by 601.62 km² during 2007—2011, showing a general trend of degradation, while the area of vegetation coverage increased by more than one half of the study area in 2004—2007, 2011—2014, and 2014—2016, and the vegetation restoration effect was better. ② In the different aspects of the slopes, there were no obvious distribution differences in the different vegetation cover change types except in the flat land area. The spatial distribution of various vegetation cover change types for different elevations, slopes, slope change rates, terrain niches, and relief amplitudes differed obviously. [Conclusion] The effect of aspect on vegetation growth change is not obvious. However, the effects of the other topographic factors (elevation, slope, slope change rate, terrain niche, and relief amplitude) on vegetation cover change are obvious.

Keywords: vegetation coverage; topographic factors; dimidiate pixel mode; correction coefficient for topographic areas; urban districts of Taiyuan City

植被因子作为抑制水土流失的重要因素,以植被类型和植被覆盖度对土壤侵蚀的影响最大^[1],其中植被覆盖度为土壤侵蚀模型、生态系统模型等的重要参数^[2]。植被覆盖变化为生态环境变化研究领域的核心内容^[3]。基于植被指数的混合像元二分模型法是最实用的估算植被覆盖度的方法^[4]。地形为影响植被空间分布最主要的生境因子,在一定程度上影响人类活动、气候条件的空间差异,进而影响植被空间分布格局^[5]。因此对植被覆盖变化与地形因子的关系进行分析可揭示植被的地域分布特征。

山西省为内陆资源型省区的典型代表,其中太原市是省内发展水平和集聚程度最高的地区^[6]。随着人口增长和社会经济的发展,人类进一步加大土地资源的开发力度,对土地资源无科学指导的利用或过度利用,导致太原市生态环境恶化,引起水土流失、植被退化等问题^[7]。目前,有关植被变化的研究主要在植被覆盖度变化及其生态效应评估^[2],植被覆盖度时空变化研究^[3-4,8],植被覆盖变化与地形^[5,9-17],气候^[10,12,18-20],城市化^[20]等的关系研究,植被覆盖变化的人口效应研究^[16]等方面。其中,有关植被覆盖变化与地形关系研究中只是选择高程和坡度 2 个因子^[9-11]或者高程、坡度和坡向 3 个因子^[5,12-17]进行分析,大多并未考虑不同地形因子绝对面积差异的影响,且有关太原市城区的相关研究尚未见报道。鉴于此,本研究以内陆资源型城市太原市城区为研究对象,以 Landsat 系列影像和 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 为基础数据,选取高程、坡向、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度 6 个地形因子,利用像元二分模型法和地形面积差异修正法,对太原市城区不同时期植被覆盖度的时空变化特征进行分析,探讨不同

时段不同植被覆盖变化类型在不同地形因子上的变化趋势及地形分异效应,以期为该区城市化过程中的生态环境保护等方面提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

太原市辖区位于山西省中部,辖 6 区(尖草坪区、杏花岭区、万柏林区、迎泽区、晋源区和小店区)。尖草坪区地处太原市北端,总面积为 285.6 km²,其中城区面积 32.4 km²,东西北三面环山,海拔 780~1 775 m,该区地貌类型主要有土石山区、黄土丘陵、冲积扇、冲积平原和沟洼谷地,属北温带大陆性气候,年均降雨量 450 mm 左右,年均气温 7~10 ℃;杏花岭区地处太原市东北部,为太原市中心城区,总面积为 170.2 km²,地势西南部低,东北部高,海拔 800~1 670 m,年均气温 9.8 ℃;万柏林区是太原的西大门,总面积为 304.8 km²,地势西高东低,海拔 780~1 400 m,年均降雨量 480~500 mm,年均气温 9.5~11 ℃;迎泽区与杏花岭区同为太原市中心城区,俗称大南门,属晋中盆地的北端,总面积为 117 km²,其中城区面积 23.1 km²,地势北高南低,海拔 800 m 左右,年均气温 10 ℃左右;晋源区位于太原市西南部,总面积为 287 km²,中部为向南呈开放形的广阔河谷平原,东西两山对峙,平川、丘陵和山区面积分别占 57.33%, 8.23% 和 34.44%,境内最高山峰为庙前山,主峰海拔为 1 865.8 m,年均降雨量约 460 mm,年均气温 9 ℃;小店区地处晋中盆地的北端,太原市的东南部,总面积为 295 km²,其中城区面积 35 km²,地势北高南低,以南部平川为主,东部为山区和丘陵区,平均海拔 763~780 m,年均降雨量 495 mm 左右,年均

气温 9.6 ℃,该区为晋中市与太原市联合开发的前沿地带,是太原市城市发展战略的主要扩张区。

1.2 数据来源与处理

基础数据包括:2004 年 8 月 05 日、2007 年 8 月 14 日、2011 年 8 月 9 日的 Landsat 5TM,2014 年 9 月 18 日和 2016 年 9 月 7 日的 Landsat 8OLI_TIRS,空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM 数据及太原市城区行政边界;5 期遥感影像的成像时间接近,是植被覆盖度最好的时期,植被覆盖度变化在空间和时间上均有较好的可比性。使用遥感软件 ENVI 对 5 期影像数据分别进行辐射校正和大气校正等预处理。

1.3 研究方法

1.3.1 地形因子提取方法 使用 ASTER GDEM 数据提取高程、坡向、坡度、坡度变率(坡度之坡度)、地形位指数和地形起伏度 6 个地形因子:

(1) 高程为影响植被分布的重要因素之一,可反映人类活动的频率,气温、大气湿度等随高程的增加也会发生变化,导致植被覆盖度分布发生一定规律的变化^[15]。高程由 ASTER GDEM 数据直接提取。

(2) 坡向影响局部地面接收阳光和重新分配太阳辐射量,影响局部地区气候特征差异、作物生长适宜程度、土壤水分的再分布等^[21],对植被空间分布具

有重要意义。使用 ArcGIS 表面分析工具 Aspect 提取,其范围为 0°~360°,正北方向为起点 0°,坡向为 -1 的区域是平地,表示该区无坡向。

(3) 坡度影响地表径流及水分的再分配,进而影响土壤分布和特性,对植被分布具有重要作用^[5]。使用 ArcGIS 表面分析工具 slope 提取,一般情况下其范围为 0°~90°。

(4) 坡度变率,即在所提取的坡度基础上再求一次坡度,它在一定程度上可很好反映地形的剖面曲率信息^[21]。

(5) 地形位指数是高程和坡度的组合,公式如下^[21-24]:

$$T = \lg[(E/\bar{E} + 1) \times (S/\bar{S} + 1)] \quad (1)$$

式中: T 为地形位指数; E 为表示某点的高程(m); S 为表示某点的坡度(°); \bar{E} 是该点所在区域内的平均高程值(m); \bar{S} 是该点所在区域内的平均坡度(°)。若坡度(S)越大,高程(E)越高,则地形位(T)的值就越大,反之则越小。

(6) 地形起伏度为描述一个区域地形特征的宏观性指标,可使用邻域分析法提取^[25-26]。

利用 ArcGIS 对不同地形因子进行分级,得到不同地形因子空间分布(见图 1)。

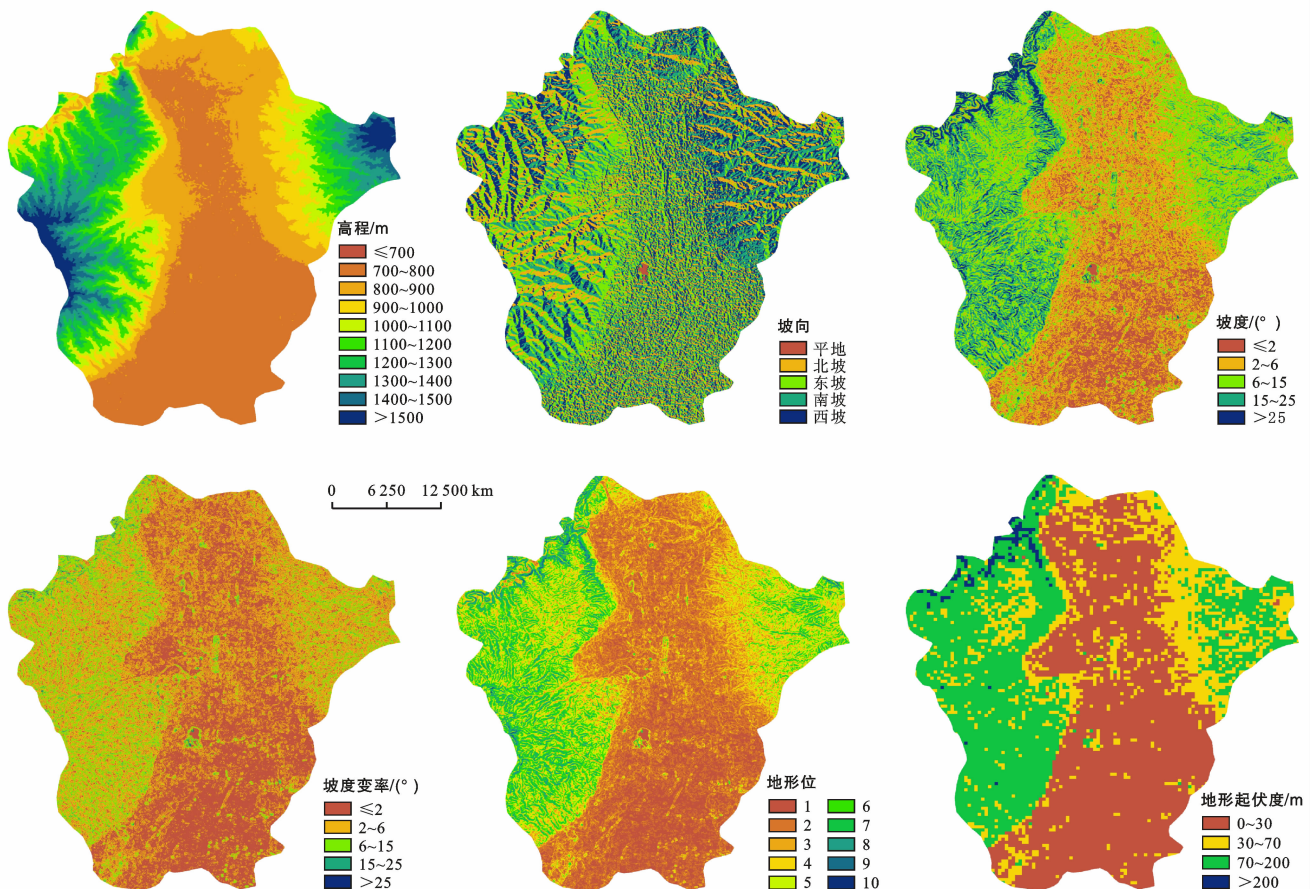


图 1 太原市城区不同地形因子的空间分布

高程数据以 100 m 为间距划分为 10 级;依据已有研究^[13],将坡向划分为 5 类:平地($-1\sim 0^\circ$)、北坡($315^\circ\sim 45^\circ$)、东坡($45^\circ\sim 135^\circ$)、南坡($135^\circ\sim 225^\circ$)和西坡($225^\circ\sim 315^\circ$);依据中华人民共和国自然资源部发布的《第三次全国国土调查技术规程》^[27],将坡度分为 5 级,分别为: $\leq 2^\circ$, $2^\circ\sim 6^\circ$, $6^\circ\sim 15^\circ$, $15^\circ\sim 25^\circ$ 和 $>25^\circ$,对坡度变率也采用了该分级方法;地形位(0.563~3.007)采用等数量重分类法进行分级,分为 10 级;依据《中国 1:100 万地貌制图规范(试行)中的地貌基本形态划分体系》^[28]结合研究区实际情况,将地形起伏度分为 4 级,分别为平原(<30 m)、台地(30—70 m)、丘陵(70—200 m)、小起伏山地(200~500 m)。

1.3.2 植被指数与植被覆盖度计算方法 归一化差值植被指数(NDVI)为应用最广泛的一种指数^[8,29],NDVI 计算公式为^[17,30]:

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}})}{(\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}})} \quad (2)$$

式中: ρ_{red} 为红光波段的表观反射率; ρ_{nir} 为近红外波段的表观反射率。

采用像元二分模型估算植被覆盖度,其计算公式为^[3-4,9,17]:

$$\text{FVC} = (S - S_{\text{soil}}) / (S_{\text{veg}} - S_{\text{soil}}) \quad (3)$$

式中:FVC 为植被覆盖度; S 为像元的植被指数; S_{soil} 为全裸土地表的植被指数信息; S_{veg} 为完全由植被覆盖地表的植被指数信息; S_{soil} , S_{veg} 取置信度为 0.5% 和 99.5% 所对应的 NDVI 值。

1.3.3 地形面积差异修正 地形面积差异修正系数(k)可消除不同地形因子条件下因地形绝对面积不同而引起的植被恢复评价的不确定性,其计算公式为^[5,11-13]:

$$k = \frac{S_e / S_c}{S_i / S} \quad (4)$$

式中: i 为第 i 种植被覆盖变化类型; e 为第 e 级地形; S_e 为第 i 种植被覆盖变化类型在第 e 级地形区的分布面积; S_c 为第 e 级地形区的土地总面积; S_i 为第 i 种植被覆盖变化类型的总面积; S 为研究区总面积。若 $k > 1$,表明第 i 种植被覆盖变化类型在第 e 级地形上的分布属于优势分布; $k = 1$,表明第 i 种植被覆盖变化类型在第 e 级地形上的分布平稳; $k < 1$,表明第 i 种植被覆盖变化类型在第 e 级地形上的分布属于非优势分布。

2 结果分析

2.1 太原市城区植被覆盖度空间分布特征

参照胡玉福等^[3]的研究,将太原市城区 2004 年 8

月、2007 年 8 月、2011 年 8 月、2014 年 9 月和 2016 年 9 月的植被覆盖度(FVC)分为 5 个等级:0~10%(低度),10%~30%(中低度),30%~50%(中度),50%~70%(中高度), $\geq 70%$ (高度),并统计各级植被覆盖度所占面积(如图 2 所示)。

由图 2 可知,2004—2016 年太原市城区植被主要为中高度覆盖度和高度覆盖度,二者占总面积的 65% 以上,其中 2016 年的高度覆盖度所占面积最大,为 60.71%,植被覆盖度总体为上升趋势;低和中低度覆盖度呈先上升后下降趋势,主要分布在杏花岭区和迎泽区西部、尖草坪区南部、万柏林区东部等地区;中度覆盖度整体呈上升趋势,由 2004 年的 11.77% 上升至 2016 年的 18.79%。2011 年低度和中低度覆盖度所占面积比最大,分别为 3.66%,15.86%,而高度覆盖度所占比例最小,为 38.46%,总体植被覆盖度较其他年份明显下降。

2.2 太原市城区植被覆盖度时段变化特征

2004—2016 年太原市城区植被覆盖度变化整体呈显著上升的趋势(如图 3 所示)。

由图 3 可知,2004—2007 年尖草坪区、万柏林区、杏花岭区以北植被覆盖度空间分布主要为显著上升,而小店区和晋源区显著下降和轻微下降明显。2007—2011 年太原市城区中部、南部地区显著下降范围较大,在万柏林区的西部有小范围的显著上升区。2011—2014 年太原市城区植被覆盖度以显著上升为主,显著下降区范围很小,主要分布在尖草坪区和小店区。2014—2016 年植被覆盖度以轻微上升区为主,显著上升区集中分布在尖草坪区,而显著下降区主要分布在小店区。从整个阶段(2004—2016 年)来看,太原市城区植被覆盖度整体呈现显著上升,植被覆盖度显著下降区主要分布在南部的小店区和北部的尖草坪区,太原市城区的西部和中东部植被覆盖度上升较快,尤其是 2011—2014 年,而小店区植被覆盖度有所下降,主要由交通建设及城市化所致。

统计不同时段不同植被覆盖变化类型所占面积,分析得出:2004—2007 年城区植被覆盖呈好转趋势,其中植被覆盖度显著减少面积为 216.90 km²,显著增加了 281.14 km²;2007—2011 年植被覆盖度减少面积为 852.70 km²,而增加面积为 601.62 km²,期间处于植被退化阶段;2011—2014 年植被覆盖度减少面积远低于其增加面积,植被覆盖度增加面积为 1 174.15 km²,说明该期间植被恢复较好;2014—2016 年较 2011—2014 年植被覆盖度虽然稍有下降,但仍处于较好水平。2004—2016 年整个阶段变化趋势为显著上升,植被覆盖度显著增加了 871.99 km²,轻微增加了 220.21 km²,

累计增加1 092.20 km²,增加区占比为 75%以上。有 3 个阶段(2004—2007,2011—2014,2014—2016 年)

的植被覆盖度增加面积占研究区总面积的 50%以上,植被恢复效果较好。

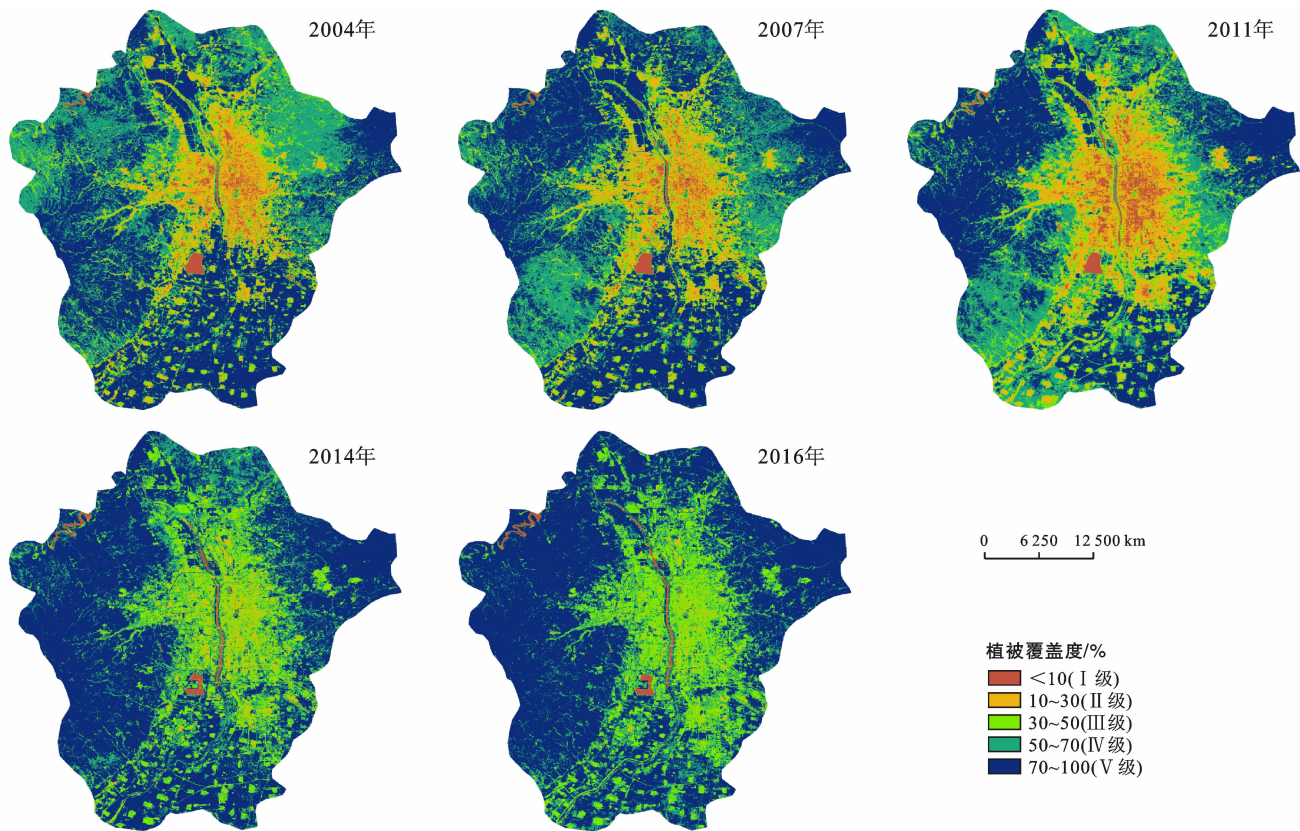


图 2 2004—2016 年间太原市城区植被覆盖度分级

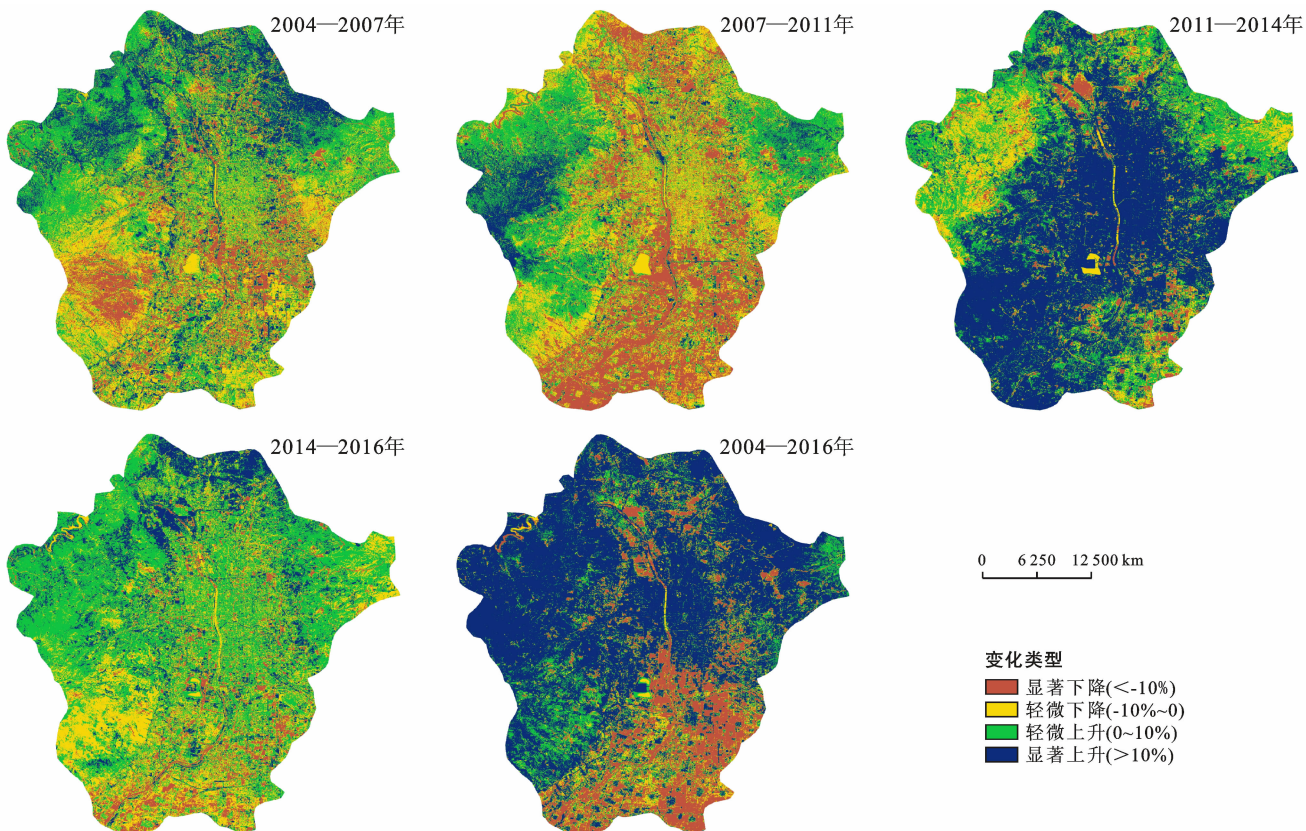


图 3 2004—2016 年太原市城区植被覆盖度时段变化的空间分布

2.3 植被变化对不同地形因子的响应

地形通过控制降水、气温、土壤和光照等条件影响植被的空间分布及其植被生长^[13]。为更好的分析研究太原市城区植被覆盖度的空间变化情况,本研究从太原市城区高程、坡向、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度 6 个方面分析不同地形因子对植被覆盖变化的影响。

2.3.1 高程对植被覆盖变化的影响 将 2004—2007, 2007—2011, 2011—2014, 2014—2016, 2004—2016 年的植被覆盖变化类型数据分别与高程做叠加分析,统计不同植被覆盖变化类型在不同高程上的面积,计算相应的地形面积差异修正系数 k ,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,不同植被覆盖变化类型在不同高程范围内的分布差异较明显。植被覆盖显著减少类型在 700—800 m 的范围内呈趋于增强的分布趋势,而在高程 >900 m 的区域分布较弱,说明研究区植被减少主要是在高程 ≤900 m 的区域;各时段植被覆盖轻微减少类型分布差异明显,2004—2007 年和 2014—2016 年在 <800 m 和 >1 400 m 的区域分布优势明

显,2007—2011 年在 <1 100 m 的区域为优势分布,而 2011—2014 年在 >1 100 m 的区域分布优势明显,尤其在高程 >1 500 m 的区域较显著 ($k=3.27$),2004—2016 年在 700—800 m 的范围内为优势分布,在其他高程范围内分布均较弱;植被覆盖轻微增加类型在高程 <900 m 的区域分布较弱,而在 >1 000 m 的区域分布优势明显(除 2004—2016 年在 1 200—1 400 m 的范围内分布较弱 ($k=0.86$) 外),在 900—1 000 m 范围内 2004—2007, 2007—2011, 2004—2016 年分布均较弱,而 2011—2014, 2014—2016 年分布优势明显, k 值分别为 1.08 和 1.05;对于植被覆盖显著增加类型而言,2004—2007 年在高程 800—1 000 m 和 1 200—1 300 m 的范围内分布优势明显,随着高程的增加 2007—2011 年的 k 值不断增大 ($0\sim 4.39$),在高程 >1 100 m 的区域分布优势明显,尤其在 >1 500 m 的区域分布优势显著 ($k=4.39$),而 2011—2014 年在高程 <1 100 m 的区域分布优势明显,2014—2016 年的优势分布区为 ≤700 m 和 800—1 100 m 的区域,2004—2016 年在高程 >800 m 的区域均为优势分布。

表 1 2004—2016 年太原市城区不同植被覆盖变化类型在不同高程范围内的变化趋势

高程/m	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k					高程/m	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k				
		2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年			2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年
≤700	显著减少	2.07	1.09	0.65	0.44	2.69	1 100—1 200	显著减少	0.97	0.20	0.56	0.28	0.28
	轻微减少	1.08	1.01	0.25	1.09	0.44		轻微减少	0.97	0.79	1.02	0.95	0.38
	轻微增加	0.00	0.00	0.24	0.31	0.24		轻微增加	1.14	1.93	1.35	1.25	1.11
	显著增加	0.00	0.00	1.54	3.49	0.82		显著增加	0.81	1.06	0.87	0.64	1.26
700—800	显著减少	1.36	1.78	1.52	1.98	2.23	1 200—1 300	显著减少	0.66	0.11	0.78	0.19	0.12
	轻微减少	1.20	1.03	0.71	1.22	1.76		轻微减少	0.82	0.55	1.92	0.88	0.26
	轻微增加	0.83	0.45	0.67	0.81	0.89		轻微增加	1.21	1.99	1.39	1.23	0.86
	显著增加	0.75	0.44	1.18	0.73	0.58		显著增加	1.11	1.79	0.60	0.85	1.38
800—900	显著减少	0.83	1.29	0.84	0.76	0.62	1 300—1 400	显著减少	0.59	0.09	1.00	0.20	0.11
	轻微减少	0.79	1.27	0.61	0.83	0.89		轻微减少	0.86	0.49	2.11	0.95	0.24
	轻微增加	0.95	0.63	0.74	0.95	0.91		轻微增加	1.37	1.71	1.39	1.24	0.86
	显著增加	1.54	0.53	1.24	1.57	1.14		显著增加	0.81	2.79	0.53	0.72	1.39
900—1 000	显著减少	0.79	0.78	0.56	0.57	0.38	1 400—1 500	显著减少	0.74	0.05	0.40	0.12	0.05
	轻微减少	0.91	1.51	0.51	0.65	0.62		轻微减少	0.97	0.42	1.71	1.04	0.14
	轻微增加	0.94	0.85	1.08	1.05	0.89		轻微增加	1.43	1.72	1.69	1.34	1.11
	显著增加	1.41	0.56	1.12	1.65	1.25		显著增加	0.42	3.07	0.55	0.27	1.35
1 000—1 100	显著减少	0.97	0.29	0.47	0.31	0.20	>1 500	显著减少	0.43	0.05	0.51	0.09	0.05
	轻微减少	0.96	1.22	0.68	0.69	0.44		轻微减少	1.03	0.20	3.27	1.16	0.23
	轻微增加	1.06	1.57	1.28	1.26	1.09		轻微增加	1.53	1.45	1.55	1.30	1.75
	显著增加	0.96	0.61	1.00	1.02	1.27		显著增加	0.36	4.39	0.20	0.18	1.17

2.3.2 坡向对植被覆盖变化的影响 将 2004—2007, 2007—2011, 2011—2014, 2014—2016, 2004—2016 年的

植被覆盖变化类型数据分别与坡向做叠加分析,统计不同植被覆盖变化类型在不同坡向上的面积,计算相应的

地形面积差异修正系数 k , 结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 北坡、东坡、南坡和西坡上不同植被覆盖变化类型的分布差异不明显, 而在平地区域分布差异较显著。在平地区域, 植被覆盖显著减少类型分布优势明显 ($1.11 < k < 1.77$); 2004—2007, 2014—

2016 年和 2004—2016 年的轻微减少类型分布优势, k 值分别为 1.06, 1.09 和 1.59; 除 2011—2014 年显著增加类型为分布平稳外, 其他时段的植被覆盖增加类型分布均较弱, 表明平地区域以植被覆盖减少为主, 因该区易受人类活动干扰而发生退化。

表 2 2004—2016 年太原市城区不同植被覆盖变化类型在不同坡向上的变化趋势

坡向	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k					坡向	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k				
		2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年			2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年
平地	显著减少	1.18	1.48	1.11	1.54	1.77	南坡	显著减少	0.99	1.00	0.96	1.00	0.98
	轻微减少	1.06	0.97	0.83	1.09	1.59		轻微减少	1.02	1.04	0.87	1.05	0.99
	轻微增加	0.76	0.47	0.71	0.76	0.88		轻微增加	0.99	1.00	0.94	0.97	0.92
	显著增加	0.77	0.50	1.00	0.75	0.59		显著增加	1.00	0.88	1.06	1.00	1.03
北坡	显著减少	1.02	0.95	1.04	0.94	1.00	西坡	显著减少	0.94	1.03	1.01	1.05	1.05
	轻微减少	0.98	0.94	1.10	0.89	0.91		轻微减少	0.96	1.00	1.01	0.89	0.96
	轻微增加	1.03	1.09	1.07	1.08	1.00		轻微增加	1.03	1.00	1.03	1.05	0.88
	显著增加	0.97	1.07	0.94	0.95	1.02		显著增加	1.04	0.94	0.98	1.00	1.02
东坡	显著减少	1.01	0.99	0.95	0.91	0.95							
	轻微减少	1.01	1.00	1.00	1.04	0.93							
	轻微增加	1.00	0.98	0.94	1.02	1.00							
	显著增加	0.97	1.08	1.04	0.93	1.03							

2.3.3 坡度对植被覆盖变化的影响 将 2004—2007, 2007—2011, 2011—2014, 2014—2016, 2004—2016 年的植被覆盖变化类型数据分别与坡度做叠加

分析, 统计不同植被覆盖变化类型在不同坡度上的面积, 计算相应的地形面积差异修正系数 k , 相关详细结果如表 3 所示。

表 3 2004—2016 年太原市城区不同植被覆盖变化类型在不同坡度上的变化趋势

坡度/ (°)	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k					坡度/ (°)	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k				
		2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年			2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年
0~2	显著减少	1.33	1.69	1.30	1.77	2.03	15~25	显著减少	0.98	0.21	0.44	0.22	0.16
	轻微减少	1.07	0.98	0.71	1.17	1.68		轻微减少	1.03	0.85	1.19	1.09	0.31
	轻微增加	0.83	0.49	0.74	0.81	0.91		轻微增加	1.16	1.66	1.27	1.21	1.13
	显著增加	0.86	0.50	1.13	0.78	0.61		显著增加	0.67	1.59	0.88	0.58	1.29
2~6	显著减少	1.10	1.42	1.19	1.36	1.40	>25	显著减少	0.77	0.16	0.59	0.14	0.13
	轻微减少	1.03	1.09	0.75	1.00	1.26		轻微减少	0.80	1.17	1.21	0.95	0.26
	轻微增加	0.92	0.66	0.76	0.93	0.90		轻微增加	1.36	1.56	1.49	1.22	1.03
	显著增加	1.07	0.64	1.17	1.09	0.88		显著增加	0.69	0.97	0.72	0.72	1.31
6~15	显著减少	0.70	0.61	0.89	0.57	0.47							
	轻微减少	0.92	0.94	1.29	0.79	0.60							
	轻微增加	1.10	1.32	1.20	1.14	0.92							
	显著增加	1.19	1.35	0.86	1.16	1.24							

由表 3 可知, 在不同坡度上不同植被覆盖变化类型的分布差异明显。植被覆盖显著减少类型在 $< 2^\circ$ 和 $2^\circ \sim 6^\circ$ 区间分布优势明显, 在 $\leq 2^\circ$ 范围 $1.30 < k < 2.03$, $2^\circ \sim 6^\circ$ 范围 $1.10 < k < 1.42$, 而在坡度 $> 6^\circ$ 的区域分布较弱; 在 $< 2^\circ$ 和 $2^\circ \sim 6^\circ$ 区域, 植被覆盖轻微减少类型除 2011—2014 年分布较弱外, 其他时段分布优

势明显或分布平稳, 在坡度 $> 6^\circ$ 的区域 2011—2014 年的植被覆盖轻微减少类型分布优势明显; 植被覆盖轻微增加类型在坡度 $> 6^\circ$ 的区域分布优势明显, 在 $< 6^\circ$ 的区域分布较弱; 2004—2007 年和 2014—2016 年植被覆盖显著增加类型的优势分布区域为 $2^\circ \sim 15^\circ$, 2007—2011 年和 2004—2016 年植被覆盖显著增加类

型的优势分布在坡度 $>6^\circ$ 的区域,而 2011—2014 年的优势分布区为坡度 $<6^\circ$ 的区域。

2.3.4 坡度变率对植被覆盖变化的影响 将 2004—2007, 2007—2011, 2011—2014, 2014—2016, 2004—

2016 年的植被覆盖变化类型数据分别与坡度变率做叠加分析,统计不同植被覆盖变化类型在不同坡度变率上的面积,计算相应的地形面积差异修正系数 k ,结果如表 4 所示。

表 4 2004—2016 年太原市城区不同植被覆盖变化类型在不同坡度变率上的变化趋势

坡度变率/ $^\circ$	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k					坡度变率/ $^\circ$	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k				
		2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年			2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年
0~2	显著减少	1.19	1.45	1.15	1.43	1.58	15~25	显著减少	0.53	0.40	0.82	0.43	0.39
	轻微减少	1.02	1.01	0.77	1.06	1.37		轻微减少	0.77	1.15	1.25	0.86	0.51
	轻微增加	0.89	0.66	0.80	0.89	0.91		轻微增加	1.19	1.20	1.29	1.10	0.83
	显著增加	0.97	0.65	1.12	0.94	0.79		显著增加	0.98	0.95	0.69	0.76	1.17
2~6	显著减少	0.89	0.81	0.94	0.78	0.71	>25	显著减少	0.30	0.42	1.07	0.36	0.45
	轻微减少	0.98	1.00	1.09	0.91	0.75		轻微减少	0.97	1.59	2.14	1.00	1.58
	轻微增加	1.06	1.16	1.06	1.09	0.97		轻微增加	1.27	0.97	1.28	1.05	0.68
	显著增加	1.07	1.14	0.98	1.08	1.14		显著增加	1.06	0.94	0.54	1.07	1.13
6~15	显著减少	0.81	0.38	0.72	0.42	0.35							
	轻微减少	0.97	0.93	1.24	0.97	0.49							
	轻微增加	1.17	1.48	1.26	1.17	1.00							
	显著增加	0.85	1.40	0.83	0.77	1.24							

由表 4 可知,在不同坡度变率上不同植被覆盖变化类型的分布差异明显。植被覆盖显著减少类型在坡度变率 $<2^\circ$ 的区域分布优势明显,在 $2^\circ\sim 6^\circ$, $6^\circ\sim 15^\circ$ 和 $15^\circ\sim 25^\circ$ 范围分布均较弱,在 $>25^\circ$ 的区域除 2011—2014 年为优势分布($k=1.07$)外,其他时段的分布均为较弱;对于植被覆盖轻微减少类型而言,2004—2007 年优势分布在坡度变率 $<2^\circ$ 的区域,2007—2011 年优势分布在 $<6^\circ$ 和 $>15^\circ$ 的区域,2011—2014 年优势分布在 $>2^\circ$ 的区域,尤其在 $>25^\circ$ 的区域分布优势显著($k=2.14$),2014—2016 年和 2004—2016 年优势分布在坡度变率为 $<2^\circ$ 和 $>25^\circ$ 的区域;对于植被覆盖轻微增加类型而言,在坡度变率 $<2^\circ$ 区间分布均较弱,在 $>2^\circ$ 的区域 2004—2007, 2007—2011, 2011—2014 年和 2014—2016 年为分布优势明显或分布平稳,2004—2016 年除在 $6^\circ\sim 15^\circ$ 区域分布平稳外,在其他坡度变率范围分布弱,尤其在 $>25^\circ$ 的区域较弱($k=0.68$);对于植被覆盖显著增加类型而言,2004—2007 年和 2014—2016 年在 $2^\circ\sim 6^\circ$ 和 $>25^\circ$ 的区域分布优势明显,2007—2011 年在 $2^\circ\sim 15^\circ$ 区域为优势分布,2011—2014 年在 $<2^\circ$ 的区域分布优势明显,而 2004—2016 年在 $>2^\circ$ 的区域优势分布明显。

2.3.5 地形位对植被覆盖变化的影响 将 2004—2007, 2007—2011, 2011—2014, 2014—2016, 2004—2016 年的植被覆盖变化类型数据分别与地形位做叠

加分析,统计不同地形位上不同植被覆盖变化类型的面积,计算相应的地形面积差异修正系数 k ,结果如表 5 所示。由表 5 可知,在不同地形位上不同植被覆盖变化类型的分布差异明显。

各时段植被覆盖显著减少类型在地形位为 1 级和 2 级的区域均为优势分布,除 2004—2007 年在地形位 7 级($k=1.02$),2007—2011 年在地形位 3 级($k=1.17$),2011—2014 年在地形位 3 级($k=1.08$),9 级($k=1.28$)和 10 级($k=3.17$)的区域分布优势明显外,其他区域的分布均较弱;各时段植被覆盖轻微减少类型在不同地形位上的分布各不同,在地形位为 5 级的区域分布均较弱;植被覆盖轻微增加类型在地形位为 1—3 级的区域分布较弱,2004—2007, 2007—2011, 2011—2014, 2014—2016 年在地形位 4—10 级的区域分布优势明显,2004—2016 年在地形位 1—5 级和 8—9 级的区域分布较弱,而在其他地形位区域为优势分布;对于植被覆盖显著增加类型而言,2004—2007 年在地形位 2—5 级区域为优势分布,2007—2011 年在地形位 4—10 级区域分布优势明显,尤其在地形位 10 级的区域分布优势显著($k=3.59$),2011—2014 年在地形位为 1—3 级的区域分布优势明显,2014—2016 年在地形位 2—4 级和 9—10 级区域为优势分布,2004—2016 年在地形位 3—10 级区域分布优势明显。

表 5 2004—2016 年太原市城区不同植被覆盖变化类型在不同地形位上的变化趋势

地形位	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k					地形位	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k				
		2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年			2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年
1 级	显著减少	1.38	1.79	1.36	1.92	2.21	6 级	显著减少	0.85	0.18	0.50	0.21	0.15
	轻微减少	1.10	0.97	0.71	1.22	1.80		轻微减少	0.98	0.78	1.43	1.00	0.30
	轻微增加	0.82	0.45	0.74	0.78	0.91		轻微增加	1.22	1.72	1.32	1.25	1.08
	显著增加	0.82	0.46	1.13	0.73	0.55		显著增加	0.75	1.77	0.79	0.62	1.32
2 级	显著减少	1.18	1.55	1.23	1.49	1.58	7 级	显著减少	1.02	0.12	0.38	0.14	0.10
	轻微减少	1.06	1.12	0.65	1.05	1.36		轻微减少	1.00	0.78	1.29	1.18	0.22
	轻微增加	0.90	0.58	0.68	0.90	0.90		轻微增加	1.23	1.75	1.37	1.21	1.19
	显著增加	1.01	0.52	1.24	1.03	0.84		显著增加	0.53	1.78	0.80	0.44	1.31
3 级	显著减少	0.87	1.17	1.08	0.99	0.88	8 级	显著减少	0.72	0.11	0.57	0.09	0.08
	轻微减少	0.93	1.17	0.78	0.82	0.98		轻微减少	0.79	1.00	1.37	0.96	0.19
	轻微增加	0.93	0.77	0.85	0.96	0.89		轻微增加	1.43	1.58	1.62	1.23	0.97
	显著增加	1.30	0.70	1.11	1.40	1.05		显著增加	0.62	1.50	0.61	0.68	1.34
4 级	显著减少	0.67	0.68	0.93	0.61	0.48	9 级	显著减少	0.21	0.09	1.28	0.09	0.18
	轻微减少	0.89	1.04	1.16	0.70	0.63		轻微减少	0.52	1.23	1.82	0.65	0.29
	轻微增加	1.02	1.19	1.17	1.09	0.88		轻微增加	1.71	1.43	1.92	1.27	0.77
	显著增加	1.34	1.14	0.87	1.38	1.21		显著增加	0.83	1.27	0.27	1.03	1.34
5 级	显著减少	0.68	0.33	0.78	0.35	0.26	10 级	显著减少	0.29	0.00	3.17	0.00	0.26
	轻微减少	0.92	0.86	0.47	0.80	0.43		轻微减少	0.91	0.71	2.52	1.16	1.04
	轻微增加	1.17	1.59	1.29	1.23	0.98		轻微增加	1.29	1.14	1.15	0.95	1.15
	显著增加	1.07	1.55	0.77	0.97	1.30		显著增加	0.67	3.59	0.16	1.15	1.01

2.3.6 地形起伏度对植被覆盖变化的影响 将 2004—2007, 2007—2011, 2011—2014, 2014—2016, 2004—2016 年的植被覆盖变化类型数据分别与地形

起伏度做叠加分析,统计不同植被覆盖变化类型在不同地形起伏度上的面积,计算相应的地形面积差异修正系数 k ,结果如表 6 所示。

表 6 2004—2016 年太原市城区不同植被覆盖变化类型在不同地形起伏度上的变化趋势

地形起伏度/m	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k					地形起伏度/m	植被覆盖变化类型	地形面积差异修正系数 k				
		2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年			2004—2007 年	2007—2011 年	2011—2014 年	2014—2016 年	2004—2016 年
0~30	显著减少	1.28	1.66	1.34	1.68	1.86	70~200	显著减少	0.90	0.24	0.56	0.25	0.17
	轻微减少	1.09	1.07	0.65	1.12	1.54		轻微减少	1.00	0.84	1.26	1.00	0.36
	轻微增加	0.86	0.51	0.67	0.86	0.90		轻微增加	1.15	1.63	1.28	1.20	1.09
	显著增加	0.91	0.47	1.21	0.89	0.71		显著增加	0.78	1.66	0.84	0.71	1.29
30~70	显著减少	0.62	0.86	0.93	0.73	0.59	>200	显著减少	0.11	0.25	0.93	0.09	0.20
	轻微减少	0.84	1.06	1.23	0.69	0.76		轻微减少	0.24	1.51	1.41	0.40	0.24
	轻微增加	1.03	1.06	1.12	1.05	0.87		轻微增加	1.83	1.39	2.05	1.47	0.53
	显著增加	1.46	1.02	0.89	1.51	1.18		显著增加	1.21	0.39	0.39	0.94	1.44

由表 6 可知,植被覆盖显著减少类型除在地形起伏度 <30 m 的区域分布优势明显 ($1.28 < k < 1.86$) 外,在 30~70, 70~200 m 和 >200 m 的区域分布均较弱,表明 <30 m 的区域植被减少明显;在 <30 m 的区域,轻微减少类型除 2011—2014 年分布较弱 ($k = 0.65$) 外,其他时段分布优势明显,轻微增加类型均分

布较弱,显著增加类型除 2011—2014 年分布明显 ($k = 1.21$) 外,其他时段分布均较弱;在 30~70 m 的区域,轻微减少类型除 2007—2011 年和 2011—2014 年分布优势明显外,其他时段分布均较弱,轻微增加类型在 2004—2016 年分布较弱 ($k = 0.87$),其他时段的 k 值均大于 1,显著增加类型除 2011—2014 年外,其

他时段分布优势明显;在 70~200 m 的区域,轻微减少类型在 2004—2007 年和 2014—2016 年分布平稳,2011—2014 年分布优势明显($k=1.26$),其他时段分布较弱,轻微增加类型分布优势明显,显著增加类型 2007—2011 年和 2004—2016 年分布优势明显, k 值分别为 1.66 和 1.29;在 >200 m 的区域,轻微减少类型除 2007—2011 年和 2011—2014 年分布优势明显外,其他时段分布均很弱,轻微增加类型除 2004—2016 年分布较弱外,其他时段分布优势均较明显,显著增加类型在 2004—2007 年和 2004—2016 年分布优势明显,其他时段分布较弱。

3 讨论与结论

地形是影响植被空间分异的主要因子,已有植被覆盖变化与地形关系研究只是选择高程和坡度 2 个因子^[9-11]或者高程、坡度和坡向 3 个因子^[5,12-17]进行分析,且大多并未考虑不同地形因子绝对面积差异的影响。本文在已有研究基础上,以内陆资源型城市太原市城区为研究区,选取高程、坡向、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度 6 个地形因子(即结合微观与宏观地形因子),利用像元二分模型法和地形面积差异修正法,对太原市城区植被覆盖度的动态变化特征和地形分异效应进行了系统分析,这对该区城市化过程中的生态环境治理等具有重要意义。

(1) 2011 年太原市城区植被覆盖度有所下降,但 2004—2016 年植被覆盖度总体上呈显著上升趋势,主要为中高度覆盖度和高度覆盖度,二者占总面积的 65% 以上;2004—2016 年植被覆盖度显著下降区主要分布在南部的小店区和北部的尖草坪区,主要是交通建设及城市化所致,中东部和西部植被覆盖度上升较快,原因在于随着城市街道绿化和中心公园的修建,城市周边及城区植被在不断增加,植被覆盖度逐年上升。

(2) 不同坡向上,在平地区域植被覆盖变化的趋势较显著,而其余坡向上差异不明显,这与朱林富等^[13]的研究结论相一致,说明坡向差异对植被生长变化的影响不大,其原因还有待进一步研究;平地区域以植被覆盖减少为主,该区易受人类工程和社会经济活动干扰而发生退化,这是该区植被覆盖恢复缓慢的一大因素。

(3) 不同植被覆盖变化类型在不同高程、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度上的空间分布差异明显。植被覆盖显著减少类型在高程为 700—800 m,坡度 $<6^\circ$,坡度变率 $<2^\circ$,地形位为 1 级和 2 级及地形起伏度 <30 m 的区域均为优势分布,该地形区主要

为建设用地、耕地和水域等,人类活动较频繁,植被覆盖度低,但植被变化趋势显著,说明植被恢复弱;各时段植被覆盖轻微减少和显著增加类型在不同高程、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度上的分布各不同;植被覆盖轻微增加类型在高程 $>1\ 000$ m(除 2004—2016 年在 1 200—1 400 m 高程范围内分布较弱($k=0.86$)外),坡度 $>6^\circ$,坡度变率 $>2^\circ$ (除 2004—2016 年分布较弱外)、地形位为 4—10 级和地形起伏度 >30 m 的区域分布优势较明显,表明在此地形区域生态环境较好,受人类活动干扰小,植被变化趋势较弱,植被覆盖度较高,植被恢复效果较好。太原市城区东西两侧地区植被覆盖度较高,因随着高程、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏的增大,气温在逐渐降低,植被分布的垂直地带性明显,人类活动对植被的扰动和影响越小,所以东西两侧的植被覆盖度明显高于中部地区(图 1)。近年来,太原市实施了环城林带建设等绿化工程,积极推进东、西荒山绿化,绿化面积达 2.90×10^6 m² 余,建造了 29 处城郊森林公园,城市绿化率达 40.5%,该市生态环境明显改善。

(4) 本研究选取高程、坡向、坡度、坡度变率、地形位和地形起伏度 6 个地形因子,分析了太原市城区植被覆盖变化在不同地形因子上的分异性和变化趋势,这对该区城市化过程中的生态环境建设和效益评价等具有重要意义,由于影响植被变化的因素较多,本研究只是从地形方面进行了分析,未考虑气候等因素对植被生长的影响,今后还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 陈学兄,常庆瑞,毕如田,等. 基于山地植被指数估算临县植被覆盖度[J]. 应用基础与工程科学学报,2020,28(2):310-320.
- [2] 张灿,徐涵秋,张好,等. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估:以福建省长汀县为例[J]. 自然资源学报,2015,30(6):917-928.
- [3] 胡玉福,蒋双龙,刘宇,等. 基于 RS 的安宁河上游植被覆盖时空变化研究[J]. 农业机械学报,2014,45(5):205-215.
- [4] 吴志杰,何国金,王猛猛,等. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算与时空变化研究:以福建省永定县为例[J]. 遥感技术与应用,2016,31(6):1201-1208.
- [5] 赵婷,白红英,邓晨晖,等. 2000—2016 年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应[J]. 生态学报,2019,39(12):4499-4509.
- [6] 郭文炯,白明英. 太原大都市区城市化特征,问题与对策[J]. 经济地理,2000,20(5):63-66.
- [7] 鹿晨昱,张琳,薛冰,等. 基于 GIS 的太原市土壤侵蚀定量研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):247-251.

- [8] 陈学兄, 张小军, 陈永贵, 等. 陕西省 1998—2008 年植被覆盖度的时空变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(6): 674-678.
- [9] 赵丽红, 王屏, 欧阳勋志, 等. 南昌市植被覆盖度时空演变及其对非气候因素的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3723-3733.
- [10] Jia Lu, Li Zhanbin, Xu Guoce, et al. Dynamic change of vegetation and its response to climate and topographic factors in the Xijiang River basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(11): 11637-11648.
- [11] 谭学玲, 闫庆武, 王瑾, 等. 榆神府矿区植被覆盖的动态变化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1645-1653.
- [12] 童晓伟, 王克林, 岳跃民, 等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3425-3434.
- [13] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2023-2033.
- [14] 熊俊楠, 张昊, 彭超, 等. 汶川地震灾区植被覆盖度变化与地形因子的关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 24-31.
- [15] 赵文慧, 陈妮, 闫瑞, 等. 近 20 年来北洛河流域植被覆盖度随地形因子变化特征探究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 10-14.
- [16] 程东亚, 李旭东. 喀斯特地区植被覆盖度变化及地形与人口效应研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(8): 1227-1239.
- [17] 吴志杰, 何国金, 黄绍霖, 等. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J]. 遥感学报, 2017, 21(1): 159-167.
- [18] 陆荫, 张强, 李晓红, 等. 黄河流域甘肃段植被覆盖度时空变化及对气候因子的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 232-238.
- [19] Shen Xiangjin, Xue Zhenshan, Jiang Ming, et al. Spatiotemporal change of vegetation coverage and its relationship with climate change in freshwater marshes of northeast China [J]. Wetlands, 2019, 39(3): 429-439.
- [20] Zhou Qian, Zhao Xiang, Wu Donghai, et al. Impact of urbanization and climate on vegetation coverage in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2452.
- [21] 孙丕苓, 许月卿, 王数. 环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 277-288.
- [22] 吴见, 张艳, 谭靖, 等. 安徽省土地利用地形梯度格局变化分析[J]. 遥感信息, 2016, 31(4): 108-115.
- [23] 李靖, 廖和平, 蔡进, 等. 山地城市边缘土地利用格局与变化的地形梯度分布特征分析: 以重庆市巴南区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 296-305.
- [24] 陈奕竹, 肖轶, 孙思琦, 等. 基于地形梯度的湘西地区生态系统服务价值时空变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019(4): 623-631.
- [25] 陈学兄, 常庆瑞, 郭碧云, 等. 基于 SRTM DEM 数据的中国地形起伏度分析研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(4): 670-678.
- [26] 陈学兄, 张小军, 常庆瑞. 陕西省地形起伏度最佳统计单元研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 265-270.
- [27] 中华人民共和国自然资源部. 中华人民共和国土地管理行业标准 TD/T 1055-2019(第三次全国国土调查技术规程)[S]. 北京: 地质出版社, 2019.
- [28] 中国科学院地理研究所. 中国 1: 1000000 地貌图制图规范: 试行[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [29] 韩鹏, 姚娟, 李天宏. 3 种不同数据源 NDVI 的比较分析及其在延河流域的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 661-674.
- [30] 吴志杰, 徐涵秋. 卫星影像数据构建山地植被指数与应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(5): 656-664.

(上接第 298 页)

- [22] 王国华, 张虎, 魏岳嵩. 偏最小二乘回归在 SPSS 软件中的实现[J]. 统计与决策, 2017(7): 67-71.
- [23] Chen Xiaoqiu, Hu Bing, Yu Rong. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate Eastern China [J]. Global Change Biology, 2005, 11(7): 1118-1130.
- [24] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982—2008 [J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [25] Cleland E E, Chiariello N R, Loarie S R, et al. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem [J]. PNAS, 2006, 103(37): 13740-13744.
- [26] 张仁平. 新疆地区草地 NPP 和物候对气候变化的响应研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2017.
- [27] Luedeling E, Zhang Minghua, McGranahan G, et al. Validation of winter chill models using historic records of walnut phenology [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(11): 1854-1864.