

长白山区植被覆盖度时空变化及地形分异研究

石 淞, 李 文, 杨子仪, 于 冉

(东北林业大学 园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: [目的] 探究长白山区植被动态变化及其与地形的响应关系, 为山区生态环境保护与治理提供科学支撑。[方法] 基于 MODIS NDVI 与 DEM 数据, 采用像元二分模型估算长白山区 2000—2020 年植被覆盖度, 运用 Sen+Mann-Kendall 趋势分析、空间自相关分析及重心迁移模型, 结合地形面积差异修正系数, 深入解析植被覆盖度时空演变特征, 并定量揭示植被覆盖变化在高程、坡度、坡向因子上的分异效应。[结果] ①时空分布上, 2000—2020 年长白山区植被覆盖度以 $0.023\ 7/(10\ a)$ ($p < 0.001$) 的速率增长并于 2010 年发生明显的上升突变, 呈“四周高, 中间低”的分布格局, 整体处于较高水平。②时空变化上, 2000—2020 年长白山区植被改善区域面积远大于退化区域面积, 呈以“高一高”模式为主的显著聚集状态, 但聚集程度波动下降; 21 a 间植被覆盖重心整体向西南迁移。③地形分异上, 长白山区植被覆盖度随海拔、坡度升高均表现为先增加后减少趋势, 不同时段下海拔 $< 600\ m$, $\geq 1\ 200\ m$ 及坡度 $< 2^\circ$, $\geq 25^\circ$ 区域植被普遍呈退化趋势, 海拔 $600\sim 1\ 200\ m$ 及坡度 $2^\circ\sim 25^\circ$ 范围内以改善或稳定趋势为主; 平地区域植被退化趋势明显, 其他坡向上各变化类型差异较小。[结论] 近 21 a 来长白山区植被状况总体向好发展, 不同高程和坡度条件下植被变化空间分异明显, 而坡向对植被变化的影响并不显著。

关键词: 长白山区; 植被覆盖度; 时空变化; 地形分异

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0254-11

中图分类号: S157.1, TP79

文献参数: 石淞, 李文, 杨子仪, 等. 长白山区植被覆盖度时空变化及地形分异研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 254-264, 276. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.030; Shi Song, Li Wen, Yang Ziyi, et al. Spatiotemporal variations and topographic differentiation of fractional vegetation cover in Changbai Mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 254-264, 276.

Spatiotemporal Variations and Topographic Differentiation of Fractional Vegetation Cover in Changbai Mountain

Shi Song, Li Wen, Yang Ziyi, Yu Ran

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: [Objective] The dynamic changes of vegetation and its response relationship with topography in Changbai Mountain were explored in order to provide scientific support for ecological environmental protection and management in this mountainous area. [Methods] Based on MODIS NDVI and DEM data, fractional vegetation cover in Changbai Mountain from 2000 to 2020 was estimated using a pixel dichotomy model. Spatiotemporal variations of fractional vegetation cover were analyzed in depth using Sen+Mann-Kendall trend analysis, spatial autocorrelation analysis, and a center of gravity migration model. At the same time, the differential effects of vegetation cover variations were quantitatively determined by combining the analysis results with the correction coefficient for topographic areas in this study in terms of elevation, slope, and aspect factors. [Results] ① In terms of spatiotemporal distribution, the fractional vegetation cover in Changbai Mountain increased at a rate of $0.023\ 7/10\ yr$ ($p < 0.001$) from 2000 to 2020 and underwent an obvious upward mutation in 2010, showing a distribution pattern of “high around and low in the middle”, with an

收稿日期: 2022-08-15

修回日期: 2022-10-20

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目“黑龙江省绿色空间碳储量与景观格局适应性调控路径研究”(LH2022E001); 中央高校基本科研业务费项目(41421016); 国家自然科学基金项目“寒地城市森林水平与垂直结构季相变异的冷岛机制研究”(42171246)

第一作者: 石淞(1995—), 女(满族), 辽宁省沈阳市人, 博士研究生, 研究方向为区域环境变化与生态修复。Email: hongyanhaibo@nefu.edu.cn.

通信作者: 李文(1971—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 副教授, 主要从事城市生态修复与规划等方面研究。Email: liwen@nefu.edu.cn.

overall level of high. ② In terms of spatiotemporal variation, the area of vegetation improvement in Changbai Mountain was much larger than the area of degradation from 2000 to 2020, showing a significant clustering state dominated by a “high-high” pattern. However, the degree of clustering showed a fluctuating downward trend, and the center of gravity of vegetation cover generally migrated to the southwest during the 21-yr study period. ③ In terms of topographic differentiation, the fractional vegetation cover in Changbai Mountain increased and then decreased with the increase of elevation and slope over time. During different time periods, vegetation in the areas of elevation <600 m, ≥ 1200 m and slope $<2^\circ$, $\geq 25^\circ$ generally showed a degradation trend. The areas primarily showing improvement or stabilization over time had elevations of 600—1 200 m and slopes of 2° — 25° . The trend of vegetation degradation was obvious in the flat land area, while little difference in the variation types was observed for other aspects. [Conclusion] The vegetation condition of Changbai Mountain has generally improved over the past 21 years. Spatial differentiation of vegetation variations under different elevations and slopes was obvious, while the effect of aspect on vegetation variations was not significant.

Keywords: Changbai Mountain; fractional vegetation coverage; spatiotemporal variation; topographic differentiation

植被在地球系统中扮演重要角色,具有维持碳氧平衡,减少水土流失,调节局地气候等作用,对生境变化十分敏感^[1]。探索植被动态变化并揭示其空间分异规律,是全球变化研究中关注的热点问题^[2]。植被覆盖度(FVC)指植被地上部分在地面的垂直投影面积占研究区总面积的比例,是衡量陆表植被状况与环境质量变化的有效指标^[3]。植被覆盖度估算方法有野外地面实测与卫星遥感反演等,其中基于归一化植被指数(NDVI)的像元二分模型法效果良好,是测量植被覆盖度的常用方法之一^[4]。

近年来,国内外学者在不同时空尺度上关于植被变化及其影响因素的研究已有丰硕成果。研究表明^[5-7],植被覆盖变化不仅与气温^[8]、降水^[9]、土地利用^[10]、人口密度等^[11]因素密切相关,且受制于所处的地形环境。地形在影响地表水热条件再分配的同时,对人类活动的强度和范围产生不同程度作用,进而影响植被生长发育及其空间分布格局^[12]。探讨植被覆盖与地形因子的空间关系对深入认知植被地域分异规律,科学优化区域生态修复措施具有重要现实意义,受到学者们广泛关注。如银朵朵等^[13]以内蒙古大青山为例探讨了温带大陆性半干旱气候区植被覆盖度的动态变化及其地形分异特征,表明植被覆盖度总体以改善为主,且随海拔和坡度升高呈上升趋势;张诗羽等^[14]分析了岷江上游流域植被覆盖度变化的地形效应,发现各等级植被覆盖度区域对地形因子的响应程度不同,其中低、高植被覆盖度区分别受坡度、海拔影响最为明显;Emran等^[15]评估了孟加拉国吉大港山区植被指数与地形参数间的多尺度相关性,指出植被NDVI变化与土壤水分含量、高程和坡度高度响应,而与坡向无显著关联。前人的研究主要以植被覆盖起止年为单一研究跨度,忽略了不同阶段

下植被覆盖变化及其与地形因子响应关系的差异;且大多只结合地形因子等级分析植被覆盖的变化规律,对于各植被变化类型在不同地形因子等级上优势分布的定量研究仍非常有限。

长白山为鸭绿江、松花江、图们江三江之源,是中国东北地区的碳汇核心区与水源涵养地,也是全球变化响应的敏感区域^[16]。原始生态系统与典型火山地貌,造就长白山区独特的植被带垂直分异格局,其植被变化不仅关系到东北地区的社会经济发展,更对东北亚区域的生态安全产生深远影响^[17]。鉴于此,本文基于MODIS NDVI与DEM数据,采用像元二分模型估算长白山区2000—2020年植被覆盖度,运用Sen+Mann-Kendall趋势分析、空间自相关分析及重心迁移模型,结合地形面积差异修正系数,深入探究不同阶段下植被覆盖度时空演变特征,并定量揭示植被覆盖变化在海拔、坡度、坡向因子上的分异效应,以期对长白山区植被恢复与可持续发展提供借鉴。

1 研究区概况

长白山位于中国东北部中朝交界处,呈“东北—西南”山脉走向,垂直高差达2 000 m以上,地貌类型随海拔升高包括玄武岩台地、玄武岩高原与火山锥体三大部分。属温带大陆性山地气候,冬季严寒漫长,夏季短暂温凉,年降水约700~1 400 mm,年均温约 $-7\sim 3^\circ\text{C}$ 。植被资源丰富,包括针阔混交林带、针叶林带、岳桦林带、高山冻原带4个植被带,尤以红松(*Pinus koraiensis*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)等为典型树种^[18]。本文选取以长白山国家级保护区为核心所辐射的吉林省东南部白山市与延边朝鲜族自治州为研究区($126^\circ 11'$ — $131^\circ 31'E$, $41^\circ 36'$ — $44^\circ 51'N$),包含抚松县、敦化市、江

源区等 14 个县(市、区),总面积 $6.07 \times 10^4 \text{ km}^2$,囊括长白山主峰与主脉,地势起伏大,植被覆盖变化及其地形分异效应更为显著。

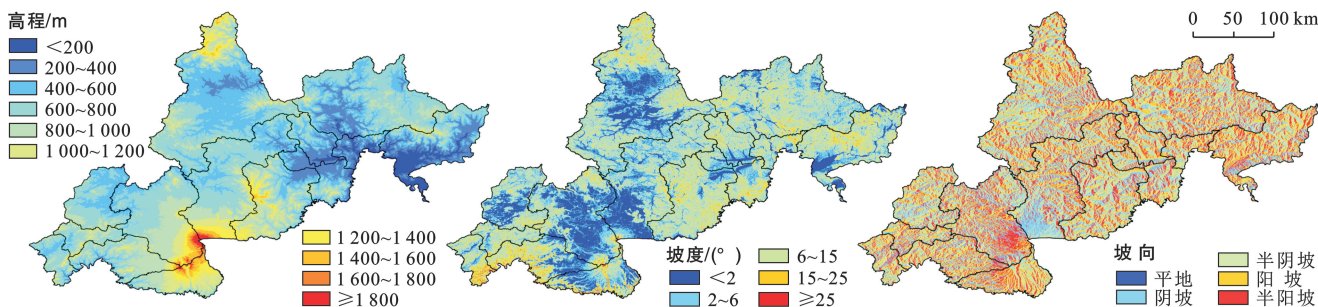
2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

2000—2020 年 NDVI 数据来源于 GEE(Google Earth Engine)平台 MODIS13Q1 数据集("MODIS/061/MOD13Q1"),时间分辨率 16 d,空间分辨率 250 m。通过在 GEE 平台中上传研究区矢量边界、调用函数与编写循环代码,实现批量格式与投影转换、最大值合成(MVC)、影像拼接、矢量裁剪等,得到年尺度 NDVI 最大值数据集。植被类型数据来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)《1:100 万中国植被图集》,空间分辨率 1 km。按研究区边界裁剪并重分类后得到研究区针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌丛、草甸、沼泽、高山植被、栽培植被

和其他共 9 种植被类型。

DEM 数据来源于 GEE 平台 NASA DEM 30 m 数据集(NASA/NASADEM_HGT/001),该数据集通过对 STRM 数据的再处理提高其准确性,为与 MODIS 数据叠加分析,将其空间分辨率重采样为 250 m。运用 ArcGIS 10.8 软件 Surface 工具,基于 DEM 数据提取坡度和坡向数据,并对各地形因子进行分级。结合研究区海拔分布实际,将高程划分为 <200 , $200 \sim 400$, $400 \sim 600$, $600 \sim 800$, $800 \sim 1\,000$, $1\,000 \sim 1\,200$, $1\,200 \sim 1\,400$, $1\,400 \sim 1\,600$, $1\,600 \sim 1\,800$, $\geq 1\,800 \text{ m}$ 共 10 级。依据自然资源部《第三次全国国土调查技术规程》,将坡度划分为 $<2^\circ$, $2^\circ \sim 6^\circ$, $6^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 25^\circ$, $\geq 25^\circ$ 共 5 级,将坡向划分为平地,阴坡($315^\circ \sim 45^\circ$),半阴坡($45^\circ \sim 135^\circ$),阳坡($135^\circ \sim 225^\circ$),半阳坡($225^\circ \sim 315^\circ$)共 5 类。将以上所有影像定义统一的空间参考(WGS84_UTM_Zone_52_N)(图 1)。



注:本图基于中华人民共和国民政部官网审图号 GS(2022)1873 号标准地图制作,底图无修改。下同。

图 1 长白山区高程、坡度及坡向空间分布

Fig.1 Spatial distribution of elevation, slope and aspect in Changbai Mountain

2.2 研究方法

2.2.1 像元二分模型 植被覆盖度与 NDVI 值呈高度正相关,像元二分模型假设各像元对应地表由植被和非植被两部分线性混合构成^[19]。公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中: $NDVI_{soil}$ 为纯裸土或无植被覆盖区域 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为纯植被覆盖区域 NDVI 值,理论上分别接近 0,1,但实际由于气候条件与季节变化等原因,二者并非定值。结合研究区 NDVI 灰度分布及土地利用情况,本研究截取累计频率为 0.5%,99.5% 分别作为历年 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的参数值。FVC 值域为 $[0,1]$,参考水利部《土壤侵蚀分类分级标准》,将植被覆盖度划分为极低($0 \leq FVC < 0.3$),低($0.3 \leq FVC < 0.45$),中等($0.45 \leq FVC < 0.6$),高($0.6 \leq FVC < 0.75$),极高($0.75 \leq FVC \leq 1$)共 5 级。

2.2.2 Sen+Mann-Kendall 趋势分析 Sen+Mann-Kendall 趋势分析是 Theil-Sen Median 斜率估计与 Mann-Kendall 检验的结合,抗噪性强且适用范围广^[20],基于 Matlab 2016 年逐像元分析 2000—2020 年长白山区植被覆盖度变化趋势。公式如下:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{FVC_j - FVC_i}{j - i} \right) \quad (\forall j > i) \quad (2)$$

式中: median 为中值函数,当 $\beta > 0$,表示 FVC 呈上升趋势,反之则呈下降趋势。对于给定的显著性水平 α ,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,表示 FVC 时间序列存在显著变化,反之则为不显著变化。本文取 $\alpha = 0.05$ 为显著性水平数值,即当 $|Z| > 1.96$ 时,代表通过置信度为 95% 的显著性检验。

2.2.3 空间自相关分析 通过计算全局莫兰指数结合 z 得分度量区域整体是否存在集聚现象并对其显著性进行分析,采用局部莫兰指数进一步确定空间

集聚的具体位置及类型^[21]。公式如下:

$$I=\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nw_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{S^2\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nw_{ij}}\tag{3}$$

$$I_i=\frac{(x_i-\bar{x})\sum_{j=1}^nw_{ij}(x_j-\bar{x})}{S^2}\tag{4}$$

式中: w_{ij} 为空间权重矩阵; S^2 为样本方差。 I 值域为 $[-1,1]$,当 $I>0$,表示空间分布趋向集聚,反之则趋向离散。根据 I_i 生成LISA聚类图,将空间分布划分为“高一高”“低—低”“高一低”“低—高”聚集及不显著共5类。

2.2.4 重心迁移模型 重心是经济、人口、PM_{2.5}等空间动态演变过程中的重要指标^[22],本文根据2000—2020年植被覆盖度重心位置变化追踪植被覆盖的迁移方向与距离。公式如下:

$$\bar{X}=\frac{\sum_{i=1}^nW_i\times A_i\times X_i}{\sum_{i=1}^nW_i\times A_i}\tag{5}$$

$$\bar{Y}=\frac{\sum_{i=1}^nW_i\times A_i\times Y_i}{\sum_{i=1}^nW_i\times A_i}\tag{6}$$

式中: \bar{X},\bar{Y} 分别为重心的经度、纬度; X_i,Y_i 分别为栅格 i 的几何中心经度、纬度; A_i,W_i 分别为栅格 i 的面积与FVC值。

2.2.5 地形面积差异修正 为消除因地形绝对面积差异而导致的植被覆盖度评价不合理性,引入地形面积差异修正系数 k ,以量化揭示不同FVC变化趋势类型在不同地形条件下的分异特征^[6]。公式如下:

$$k=\frac{S_{ie}/S_e}{S_i/S}\tag{7}$$

式中: S_{ie},S_e,S_i,S 分别为第 i 种FVC变化趋势类型

在第 e 级地形条件下的面积、第 e 级地形的面积、第 i 种FVC变化趋势类型的面积及研究区总面积。 $k>1,k<1,k=1$,分别表示第 i 种FVC变化趋势类型在第 e 级地形条件下为优势分布、非优势分布及平稳分布。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度的时空分布特征

3.1.1 时间分布特征 2000—2020年长白山区植被覆盖度整体呈显著上升趋势,增长率为0.023 7/(10 a)($p<0.001$),表明林草生态建设等工作成果逐步显现。植被覆盖度在2003年跌至最低值0.761,2008年回升至最高值0.826,多年均值为0.800。2000—2003年植被覆盖度有所减少,主要原因可能与该时段东北地区遭遇严重旱情灾害有关^[23]。2000—2020年白山市与延边朝鲜族自治州植被覆盖度均表现为增长趋势,增长率分别为0.029 5/(10 a),0.021 4/(10 a),植被覆盖度均值分别为0.790,0.803,表明21 a间白山市植被覆盖度增长率高于延边朝鲜族自治州,而植被覆盖状况则相对较差(图2a)。

为进一步判断植被覆盖度的突变特征,通过M-K检验发现UF与UB两条曲线在约2010年处存在一个交点,且交点位于95%置信区间内,同时UF曲线在交点后呈上升趋势并于2012年超出上限临界值1.96,说明长白山区植被覆盖度在2010年发生明显的上升突变。其主要原因可能为,相关研究表明^[24],近60 a来东北地区气温显著上升,降水量则周期波动较大,干旱缺水情况持续存在,而2010年前后,降水量处于相对丰水期,长白山区气候环境“暖湿化”趋势明显增强,促使植被物候期提前,积雪加速融化补充土壤水分改善其墒情,更有利于植被生长发育(图2b)。

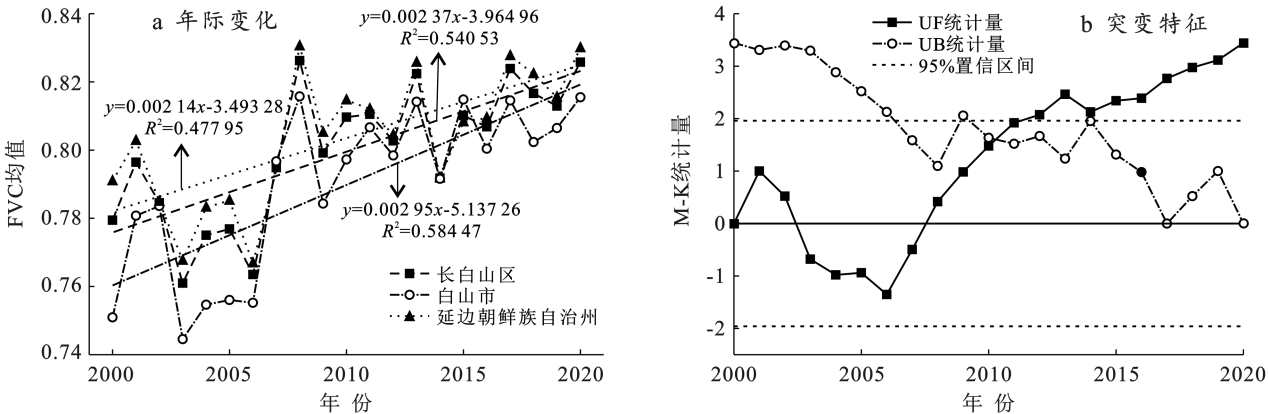


图 2 2000—2020 年长白山区植被覆盖度年际变化及突变特征

Fig.2 Interannual variation and mutation characteristics of vegetation coverage in Changbai Mountain from 2000 to 2020

3.1.2 空间分布特征 长白山区 2000—2020 年植被覆盖度多年均值的范围为 0~0.931,呈“四周高,中间低”的分布格局。其中极高植被覆盖度占主导,比例 81.61%,表明长白山区植被覆盖总体处于较高水平;高植被覆盖度次之,比例 14.384%,主要分布在敦化市、龙井市、和龙市等地;极低与低植被覆盖度面积极少,比例仅有 1.70%,主要分布在延吉市东南部、珲春市西南部、敦化市中部等各城市主城区。总体来看,植被覆盖度高值区主要分布在地势相对平缓、水热资源充足的区域,优渥的土壤状况与气候环境使植被生长发育良好,生态质量较高;低值区主要分布在人口

聚集或地势陡峭的区域,频繁的人类活动干扰导致环境承载力下降,且陡坡地区土壤侵蚀严峻,因此植被覆盖水平较低。造成植被覆盖度空间分布差异的原因同时与植被类型密切相关,植被覆盖度较高区域以森林为主要植被类型,而较低区域主要分布有大量的草地和农田。在极低、低、中等、高、极高植被覆盖度区域中,针叶林、针阔混交林及阔叶林占其总面积的比例依次递增,分别为 26.82%,38.94%,45.66%,51.89%,86.25%,而灌丛、草甸及栽培植被占其总面积的比例则依次递减,分别为 67.30%,56.60%,50.63%,44.63%,12.64%(图 3)。

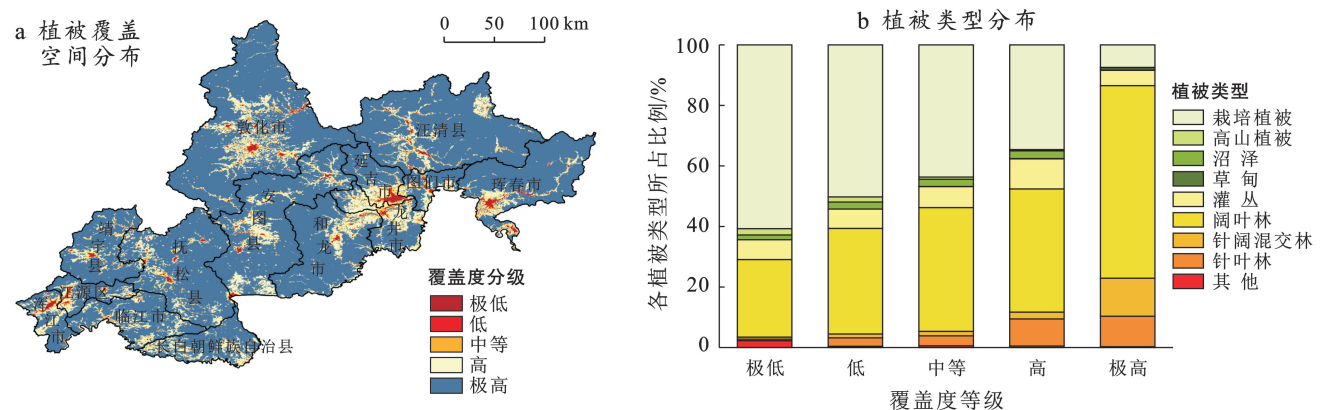


图 3 2000—2020 年长白山区植被覆盖度空间分布及各级植被覆盖度植被类型统计

Fig.3 Spatial distribution of vegetation coverage and statistics of vegetation types at different grades of vegetation coverage in Changbai Mountain from 2000 to 2020

3.2 植被覆盖度的时空变化特征

3.2.1 趋势特征 如图 4,表 1 所示,2000—2010 年,长白山区植被覆盖度 Sen 趋势呈“西南向东北递减”的空间格局,改善与退化区域比例分别为 70.80%,21.57%,主要变化趋势类型为轻微改善,比例 62.81%。改善区域主要分布在敦化市、安图县、临江市等地,退化区域主要分布在汪清县、珲春市、图们市等地。植被改善与退化区域的变化程度均以轻微为主,分别占其各自总面积的 86.72%,96.35%。2010—2020 年,长白山区植被覆盖度 Sen 趋势呈“中部和南部偏低,东北偏高”的空间格局,较上一时段主要由轻微改善向轻微退化转化。主要变化趋势类型仍为轻微改善,比例 59.87%,较上一时段比例减少 8.80%,主要分布在龙井市、图们市、汪清县中部等地,轻微退化区域较上一时段比例增加 7.79%,主要分布在敦化市、安图县、和龙市等地。

总体来看,2000—2020 年长白山区植被覆盖向好趋势显著,改善区域面积远大于退化区域面积,改善面积总计 $4.93 \times 10^4 \text{ km}^2$,比例为 81.29%,其中显

著改善和轻微改善比例分别 34.37%,46.92%。显著改善区域主要分布在龙井市北部、和龙市东北部、安图县东南部、江源区等地,植被覆盖度有大幅提升,改善程度较高,应持续推动这些区域生态建设高质量发展。退化区域面积为 $5\,418.13 \text{ km}^2$,仅比例 8.94%,主要分布在延吉市中部、珲春市西南部、和龙市东南部等地,主要原因:①与高山风蚀、盲目开垦导致土地沙化有关;②由于快速城镇化背景下建设用地扩张,对植被的干扰增大,这些地区植被退化形势依然严峻,仍需引起重视。21 a 间长白山区植被覆盖度变化趋势空间分布异质性明显,不同时段下各变化趋势类型所占比例有所起伏,但整体均以改善为主。

3.2.2 聚集特征 如图 5a 所示,2000—2020 年长白山区植被覆盖度全局莫兰指数 I 均为正值,多年均值为 0.572, z 得分范围为 $1\,684.919 \sim 2\,726.339$,表明近 21 a 来长白山区植被分布呈显著聚集状态。其中 2006,2005 年聚集度较低, I 值分别为 0.514,0.524,2002,2017 年聚集度较高, I 值分别为 0.646,0.606。总体来看,2000—2020 年长白山区植被覆盖度 I 值

呈速率为 $-0.015/(10\text{ a})$ 的波动下降趋势,表明植被覆盖空间集聚效应减弱,逐渐趋于破碎。

如图 5b,图 6 所示,采用局部自相关分析进一步判断空间聚类模式及其具体分布位置,得出长白山区植被覆盖度以“高一高”聚集为主,不显著与“低—低”聚集次之,“高一低”与“低—高”聚集面积较少。除不显著区外,各聚类模式所占面积均呈减少趋势,且“高一高”与“低—低”聚集区面积的下降速率($-36.10,-81.54\text{ km}^2/\text{a}$)高于“高一低”与“低—高”聚集区面积的下降速率($-8.05,-29.89\text{ km}^2/\text{a}$),表

明 21 a 间长白山区植被覆盖趋于片段化、离散化,与全局自相关分析结果相吻合。由 2000,2010,2020 年 3 个时期的 LISA 聚类图可知,21 a 间各聚类模式分布格局变化幅度较小,其中“高一高”聚集区密集分布在汪清县、珲春市、敦化市四周、安图县东北部等地,“低—低”聚集区主要分布在敦化市中部、延吉市南部、龙井市北部等地,“高一低”与“低—高”聚集区分布相对零散。将时空分布与聚集特征结果进行综合分析可知,2000—2020 年长白山区植被覆盖度的增长是全域共同作用的结果,而非某个地区的特定贡献。

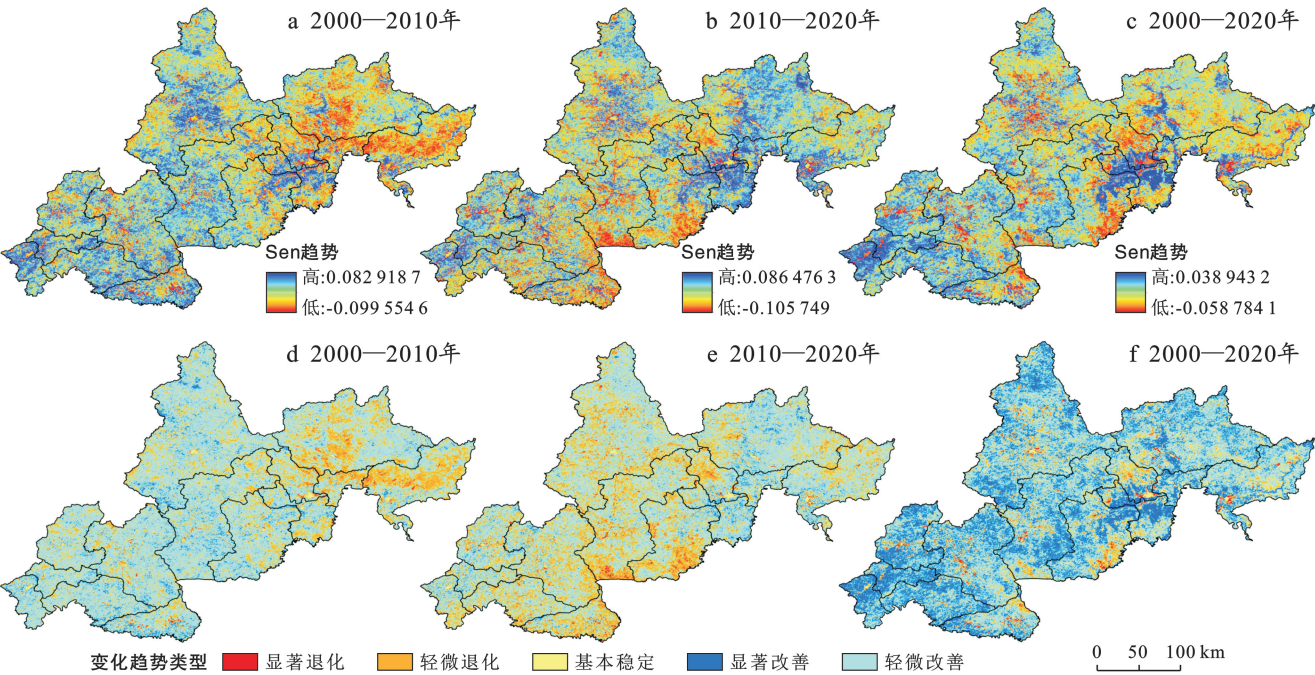


图 4 2000—2020 年长白山区不同时段植被覆盖度 Sen 趋势及变化趋势类型空间分布

Fig.4 Spatial distribution of vegetation coverage Sen trend and variation trend types during different time periods in Changbai Mountain from 2000 to 2020

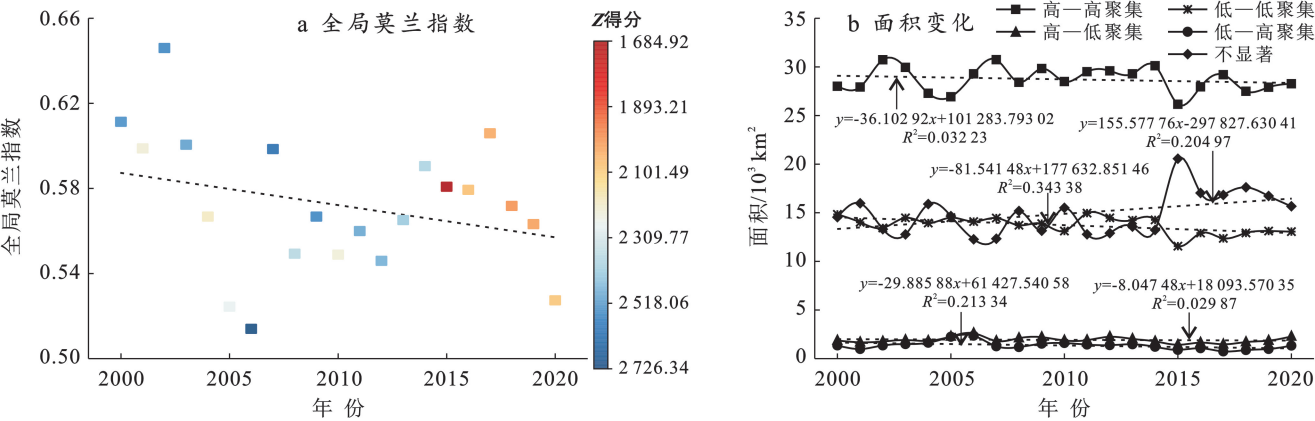


图 5 2000—2020 年长白山区全局莫兰指数及各聚类模式面积变化

Fig.5 Global Moran index and area change of each clustering pattern in Changbai Mountain from 2000 to 2020

表 1 2000—2020 年长白山区不同时段植被覆盖度变化趋势类型统计

Table 1 Statistics on variation trend types of vegetation coverage during different time periods in Changbai Mountain from 2000 to 2020

变化趋势类型	划分依据	2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2020 年	
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
显著退化	$\beta < -0.000\ 5, Z \geq 1.96$	477.06	0.79	1\ 004.56	1.66	779.31	1.29
轻微退化	$\beta < -0.000\ 5, Z < 1.96$	12\ 594.81	20.78	17\ 317.88	28.57	4\ 638.81	7.65
基本稳定	$-0.000\ 5 \leq \beta \leq 0.000\ 5$	4\ 626.25	7.63	6\ 002.88	9.90	5\ 921.56	9.77
显著改善	$\beta > 0.000\ 5, Z \geq 1.96$	4\ 841.44	7.99	3\ 545.50	5.85	20\ 831.56	34.37
轻微改善	$\beta > 0.000\ 5, Z < 1.96$	38\ 070.56	62.81	32\ 739.31	54.02	28\ 438.88	46.92

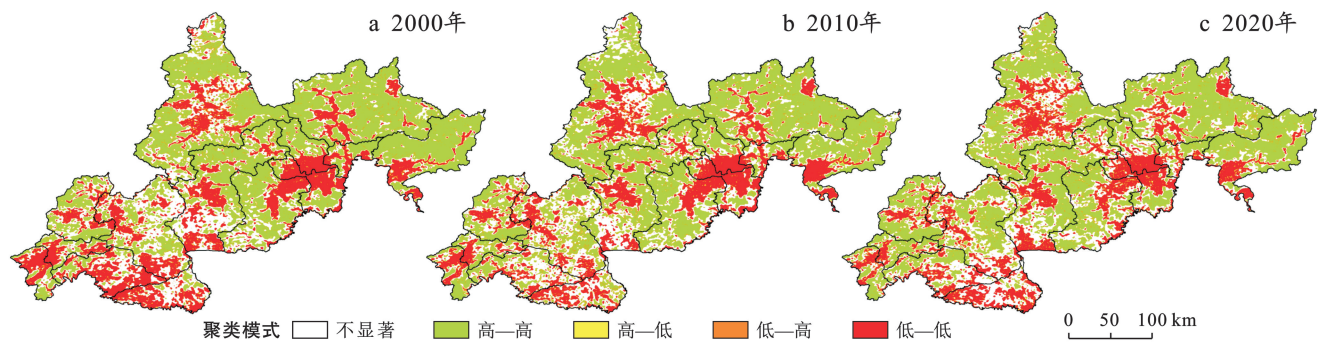


图 6 2000—2020 年不同时期下长白山区植被覆盖度 LISA 聚类

Fig.6 LISA clustering of vegetation coverage during different periods in Changbai Mountain from 2000 to 2020

3.2.3 重心迁移特征 如图 7 所示,2000—2010 年,极低、低、中、高植被覆盖度重心均有向东北迁移趋势,其中极低、高植被覆盖度重心迁移距离分别达到最小值(1.97 km)与最大值(17.97 km),极高植被覆盖度重心表现为向西南迁移 9.869 km。2010—2020 年,较低、高植被覆盖度重心转而向西北分别迁移7.07 km,1.51 km,低、中等植被覆盖度重心向西南分别折回 12.21 km,8.20 km,极高植被覆盖度重心则持续向西南迁移 1.94 km,除极低和低植被覆盖度外,其余植被覆盖等级此时段重心迁移距离较上一时段均有大幅下降。总体来看,长白山区极高植被覆盖度重心偏向于东北方向,其余等级植被覆盖重心分布较为集中,2000—2020 年山区整体植被覆盖度重心的空间迁移特征为自东北向西南移动,迁移距离为 2.35 km,迁移速率为 111.67 m/a,其主要原因可能为研究区东北部地势相对较低,人口密度相对较高,近年来城镇化发展更为迅速,尤其是延吉市、珲春市等城市建成区的扩张导致土地资源紧缺,影响区域植被恢复;而研究区西南部地势相对较高,山地植被群落结构更为稳定,且 2000 年后相继实施的“退耕还林”“天保工程”等林业措施的重点区域主要集中在其中的长白山自然保护区一带。

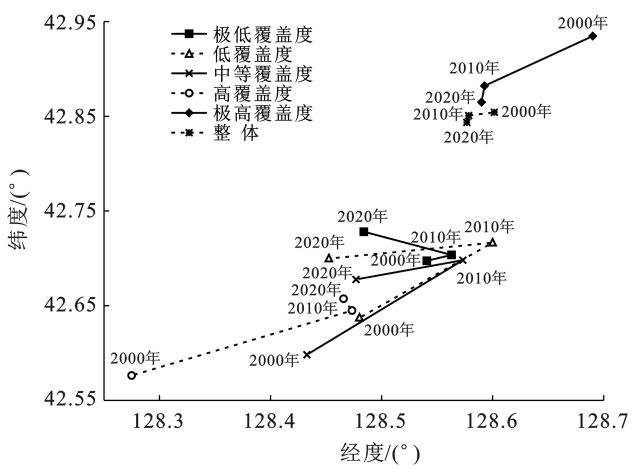


图 7 2000—2020 年长白山区各级植被覆盖度重心迁移

Fig.7 Center of gravity migration of vegetation coverage at different grades in Changbai Mountain from 2000 to 2020

3.3 植被覆盖度的地形分异特征

3.3.1 地形对植被覆盖度分布的影响 如图 8 所示,不同高程下区域水热条件有所差异,使植被分布表现出垂直地带性规律。海拔<1 000 m 范围内植被覆盖度均值呈增长趋势,植被覆盖面积占总面积的 87.21%,为植被生长的主要海拔区段。海拔<200 m 的区域植被覆盖度均值最低,为 0.630,海拔 800—1 000 m 的区域植被覆盖度均值达到最高 0.833,主要

原因为低海拔区域用地类型多为耕地和草地,受人类活动干扰较大,随海拔升高,人类活动受到一定程度制约,同时植被类型趋于多样化,因此植被覆盖状况逐渐转好。海拔持续升高至 1 000 m 以上后,植被覆盖度均值转为下降趋势,尤其在海拔 $\geq 1\ 800$ m 的区域,植被覆盖度均值急剧减少,主要原因为高海拔地区植被生长受环境条件限制且植被类型相对单一。总体来看,长白山区植被覆盖度均值及植被覆盖面积随海拔升高均表现为“先增加后减少”的趋势(图 8a)。

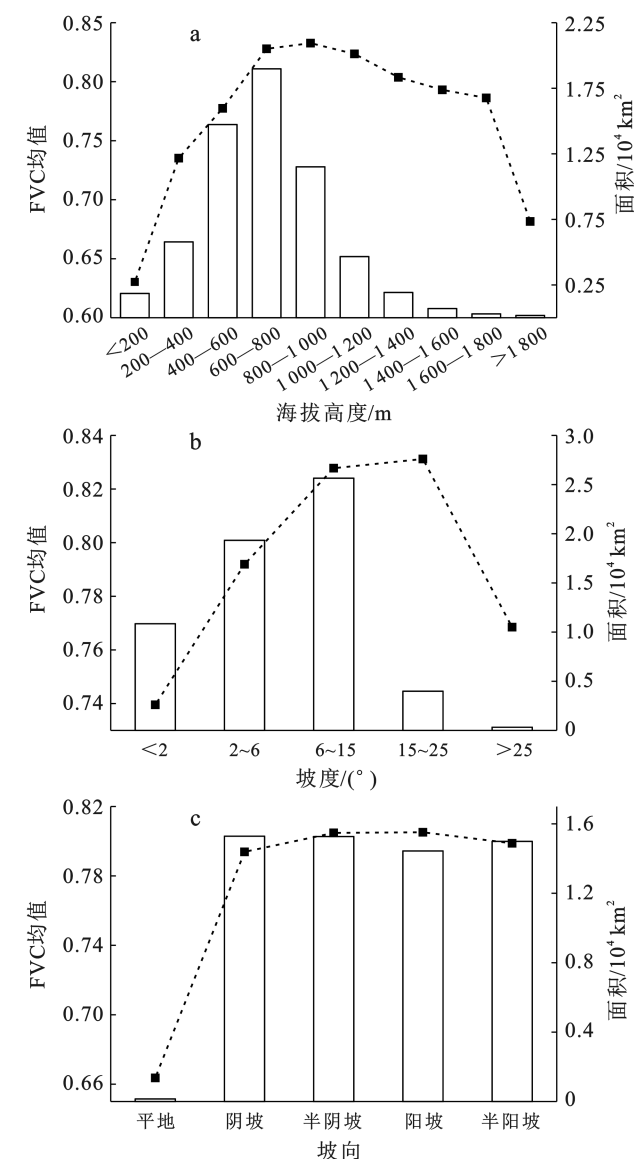


图 8 长白山区不同高程、坡度及坡向下植被覆盖度均值及植被覆盖面积变化

Fig.8 Variations in mean value of vegetation coverage and vegetation coverage area under different elevations, slopes and aspects in Changbai Mountain

坡度通过改变土壤有机物及水分含量,影响植被分布。在坡度 $< 25^\circ$ 范围内,植被覆盖度均值随坡度升高逐渐增大,坡度 $< 2^\circ$ 的区域植被覆盖度均值最

低,为 0.740,坡度 $15^\circ \sim 25^\circ$ 的区域植被覆盖度均值达到最高 0.831,主要原因为地势平缓地区人类活动相对剧烈,随坡度升高人类活动减少,植被覆盖度逐渐上升并归于平稳。坡度 $\geq 25^\circ$ 的区域,植被覆盖度均值急剧降低至 0.768,主要原因为陡坡地区土层薄弱,水土流失严重,不利于植被生长(图 8b)。

坡向影响植被蒸散发量及所吸收的太阳辐射量等因素,进而影响其生长。长白山区平地极少,仅占总面积的 0.241%,平地为人类活动的主要区域,植被覆盖度均值最低,为 0.664。其他坡向植被覆盖度均值差别不大,阴坡、半阴坡、阳坡及半阳坡植被覆盖度均值分别为 0.794,0.805,0.805,0.799,且植被覆盖面积相对均衡(图 8c)。

3.3.2 地形对植被覆盖度变化的影响 由图 9 可知,高程上,2000—2010 年植被覆盖显著退化、轻微退化与基本稳定型 k 值随海拔升高“先减后增”,均在海拔 < 200 m 范围内优势分布最明显, k 值分别为 3.810, 1.303, 1.385;显著改善与轻微改善型 k 值“先增后减”,分别在海拔 1 400—1 600 m 及 1 000—1 200 m 范围内优势分布最明显, k 值分别为 1.459, 1.103。2010—2020 年,显著退化型 k 值“波动幅度较大”,在海拔 < 200 m 及 $\geq 1\ 000$ m 范围内为优势分布;轻微退化型 k 值“逐渐递增”,并于海拔 ≥ 800 m 后呈优势分布;基本稳定型 k 值“先增后减”,在海拔 600—1 200 m 范围内为较弱优势分布;显著改善与轻微改善型 k 值“波动递减”,分别在海拔 < 600 m 及 200—800 m 范围内为优势分布。

总体来看,2000—2020 年长白山区植被覆盖度变化海拔分异特征明显。显著退化型 k 值随海拔升高“趋于减少”,其中海拔 < 600 m 范围内优势分布较为明显($k \geq 1.334$),在海拔 < 200 m 的区域优势分布最显著($k = 3.640$);轻微退化与基本稳定型 k 值“先减后增”,均在海拔 $\geq 1\ 200$ m 范围内优势分布相对明显($k \geq 1.149$);显著增加与轻微增加型 k 值分别呈“波动减少”与“缓慢增长”趋势,在海拔 600—1 200 m 范围内均为较弱优势分布,海拔 $\geq 1\ 200$ m 后,显著改善型 k 值“持续递减”,呈非优势分布,而轻微改善型 k 值“趋于增长”,在海拔 $\geq 1\ 800$ m 范围内优势分布最明显($k = 1.207$)。

2000—2010 年植被覆盖显著退化与显著改善型 k 值随坡度升高“先减后增”,分别在坡度 $< 2^\circ$ 及 $\geq 25^\circ$ 范围内优势最明显, k 值分别为 1.408, 1.333;轻微退化与基本稳定型 k 值“先增后减”,均在坡度 $6^\circ \sim 15^\circ$ 范围内优势分布最明显, k 值分别为 1.137, 1.101;轻微改善型 k 值“逐级递减”,在坡度 $< 6^\circ$ 范围内为较弱

优势分布。2010—2020 年,显著退化与轻微退化型 k 值“先减后增”,均在坡度 $\geq 25^\circ$ 范围内优势分布最明显, k 值分别为 1.478,1.326;基本稳定型 k 值“趋于

增长”,在坡度 $\geq 6^\circ$ 范围内为优势分布;显著改善与轻微改善型 k 值“先增后减”,分别在坡度 $2^\circ\sim 6^\circ$ 及 $6^\circ\sim 25^\circ$ 范围内为优势分布。

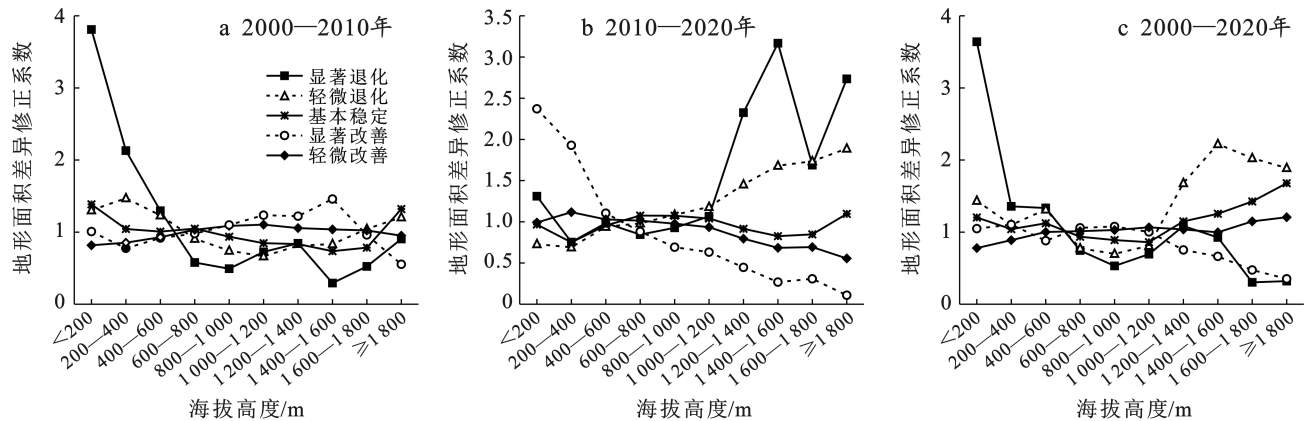


图 9 2000—2020 年长白山区不同时段各植被覆盖度变化类型 k 值随高程变化

Fig.9 Variation of k value with elevation for each vegetation coverage variation type during different time periods in Changbai Mountain from 2000 to 2020

如图 10 所示,总体来看,2000—2020 年长白山区植被覆盖度变化受坡度影响较大,其中显著退化型 k 值随坡度升高“先减后增”,在坡度 $< 2^\circ$ 范围内优势分布最明显($k=3.810$);轻微退化型 k 值“趋于减

少”,在坡度 $< 6^\circ$ 范围内为优势分布;基本稳定与显著改善型 k 值“先增后减”,分别在坡度 $6^\circ\sim 25^\circ$ 及 $2^\circ\sim 6^\circ$ 范围内为较弱优势分布;轻微改善型 k 值“波动增长”,在坡度 $\geq 6^\circ$ 范围内为较弱优势分布。

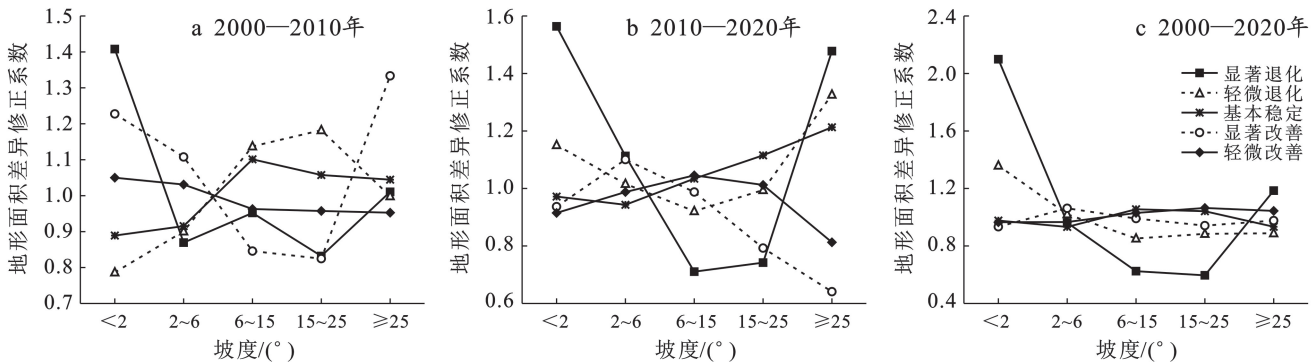


图 10 2000—2020 年长白山区不同时段下各植被覆盖度变化类型 k 值随坡度变化

Fig.10 Variation of k value with slope for each vegetation coverage variation type during different time periods in Changbai Mountain from 2000 to 2020

如图 11 所示,坡向上,2000—2010 年植被覆盖显著退化型在平地区域优势分布最明显($k=1.377$);轻微退化型在半阴坡、阳坡及半阳坡区域为较弱优势分布($1.016\leq k\leq 1.086$);基本稳定与显著改善型均在平地区域优势分布更显著, k 值分别为 1.943,1.130;轻微改善型除在阴坡为较弱优势分布外($k=1.035$),其他坡向均为非优势分布。2010—2020 年,显著退化与基本稳定型均在平地区域优势分布最明显, k 值分别为 1.610,1.657;轻微退化型除在半阳坡

区域为非优势分布外,其他坡向均为较弱优势分布($1.000\leq k\leq 1.016$);显著改善与轻微改善型在半阳坡区域均为较弱优势分布, k 值分别为 1.038,1.018。

总体来看,2000—2020 年长白山区除平地外,其他坡向对植被覆盖度变化的影响较不明显。在平地区域,显著退化、轻微退化与基本稳定型为优势分布, k 值分别为 2.582,1.259,1.695,其他坡向下各植被覆盖度变化类型 k 值差异较小,分布呈现相对平稳特征。

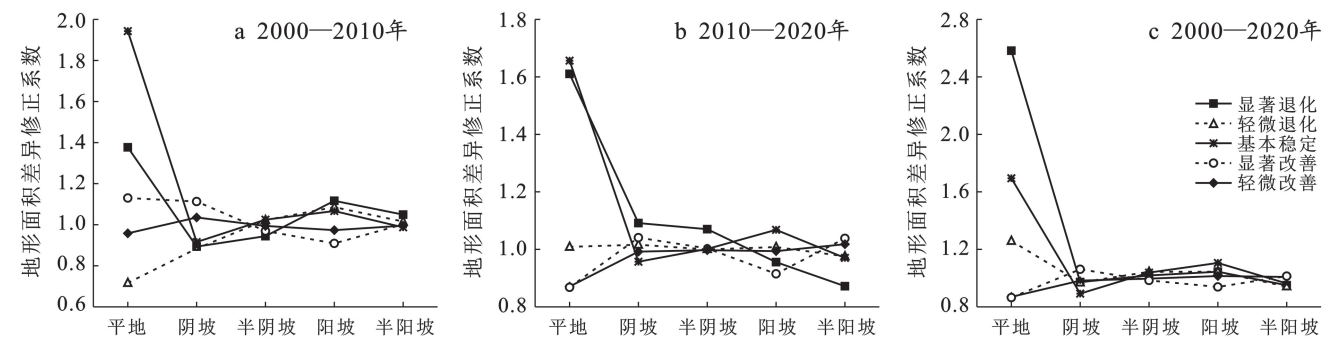


图 11 2000—2020 年长白山区不同时段下各植被覆盖度变化类型 k 值随坡向变化

Fig.11 Variation of k value with aspect for each vegetation coverage variation type under different time periods in Changbai Mountain from 2000 to 2020

4 讨论与结论

4.1 讨论

2000—2020 年长白山区植被覆盖度总体呈增长态势,改善趋势显著,呈明显的空间集聚效应且整体重心向西南方向迁移,表明近年来山区“山水林田湖草生态保护修复”等政策的落实使植被覆盖得以大幅度恢复,并趋于全域均衡,与侯光雷等^[25]、刘志锋等^[26]的研究结论一致。但也应注意到,敦化市中部、延吉市东南部、安图县南部等地植被覆盖度均值多年处于极低、低、中等等级,且 21 a 间植被退化程度相对较强,主要原因可能与城市用地扩张、旅游资源开发、高山风力侵蚀等因素造成植被破坏有关,同时 2000—2020 年山区植被覆盖存在破碎分布趋势,表明长白山区植被状况仍面临一定风险,未来需持续跟踪关注。

本研究结果表明,植被覆盖分布及变化受高程和坡度影响明显。在海拔 $<600, \geq 1\,200$ m 及坡度 $<2^\circ, \geq 25^\circ$ 区域,不同时段下植被普遍呈退化趋势,其中海拔 <200 m 及坡度 $<2^\circ$ 区域,植被覆盖度均值达到最低且显著退化优势分布明显,海拔 $\geq 1\,800$ m 及坡度 $\geq 25^\circ$ 区域植被覆盖度均值急剧下降,这与张建亮等^[27]得出的长白山自然保护区海拔 1 800 m 以上及坡度 $26^\circ \sim 35^\circ$ 范围内岳桦林出现明显退化的研究结果相符合。主要原因为低海拔及微斜坡区域受人类活动干扰强度大,植被生长受到抑制^[13];较高海拔及陡坡区域有效积温少且土层持水性差,植被类型以脆弱的耐寒高山植被为主,对气候变化响应更为强烈^[28]。应着力健全这些地区的生态补偿机制,加强林草资源培育、保护与管理,尽可能减弱人类活动对植被环境的破坏,提升植被水土保持能力以及对异质生境的适应性。在海拔 600—1 200 m 及坡度 $2^\circ \sim 25^\circ$ 区域,不同时段下植被变化普遍以改善或稳定为

主。主要原因与长白山作为“两山”理念重点试验区,在此范围内严格践行低质低效林改造、高密度补植珍贵树种等针对性生态策略有关,在不同学者^[29]的相关研究中也证实了这一观点。但其中仍存在的少数植被退化现象不容忽视,赵安周等^[30]的研究表明,大规模植树造林会加剧土壤干旱风险,对植物生长产生消极影响。因此,未来在持续落实各项林业工程的基础上,应同时注重植被建设与水文状况的协调,以保障长白山区绿色可持续发展。

从坡向分异来看,除平地因农业种植、设施修建等因素造成植被覆盖度均值较低,且不同时段下显著退化均为优势分布外,其他坡向各植被变化类型分布相对平稳,与李娟等^[31]对祁连山的研究结果相一致,但与姚镇海等^[32]对安徽省的研究结果存在差异,主要原因与山地区域的复杂地形及其所造就的局地小气候有关。长白山区高海拔区域面积比例普遍高于其他非山地地区,故人类活动受限相对更多,因此,在其他研究中由于人类活动在阳坡或阴坡区域对植被造成的负向干扰,在本研究中则可能由于阳坡区域接受辐射能更多、阴坡区域土壤湿润,腐殖质含量更高而转为对植被变化的有利条件,但其背后具体的响应效应,还需在后续研究中进一步探讨。

本文仅采用 MODIS NDVI 数据估算植被覆盖度,未使用多源数据进行相互验证,此外,植被覆盖变化影响因素错综复杂,本文主要从地形角度出发进行分析,对于其他环境、人为因素与植被生长间的作用关系仍有待研究。今后将加强多源数据集成与融合分析,并加入多因素考量,综合探讨长白山区植被时空演变特征及其驱动机制,以确保研究结果更加客观全面。

4.2 结论

(1) 时空分布方面,2000—2020 年长白山区植被覆盖度呈显著上升趋势,增长率为 $0.023\,7/(10\,a)$

($p < 0.001$)并于 2010 年发生明显的上升突变;山区植被覆盖度呈“四周高,中间低”的空间分布格局,极高植被覆盖度等级比例达到 81.61%,整体处于较高水平。

(2) 时空变化方面,2000—2020 年不同时段下长白山山区植被覆盖度变化趋势空间分布异质性明显,但均为改善区域面积>退化区域面积;山区植被覆盖度呈以“高一高”模式为主的显著聚集状态,但聚集程度以 $-0.012/(10\text{ a})$ 的速率波动下降;21 a 间山区整体植被覆盖度重心向西南迁移。

(3) 高程分异方面,长白山区植被覆盖度均值随海拔升高呈“先增加后减少”的趋势,其中海拔 800—1 000 m 范围内植被覆盖度均值达到最高 0.833。不同时段下山区海拔 600 m 以下及 1 200 m 以上区域植被覆盖度普遍呈退化趋势,海拔 600—1 200 m 范围内以改善或稳定趋势为主。

(4) 坡度分异方面,长白山区植被覆盖度均值在坡度 25° 以下范围内逐渐递增,坡度达到 25° 以上后急剧降低至 0.768。不同时段下山区坡度 2° 以下及 25° 以上区域植被覆盖度显著退化趋势均呈优势分布,坡度 $2^\circ \sim 25^\circ$ 范围内主要表现为改善趋势。

(5) 坡向分异方面,长白山区除平地植被覆盖度均值最低、且不同时段下显著退化优势分布均最明显外,其他坡向对植被覆盖度分布及变化的影响较不明显。

[参 考 文 献]

- [1] Sun Wenyi, Song Xiaoyan, Mu Xingmin, et al. Spatio-temporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209/210:87-99.
- [2] Gao Wande, Zheng Ce, Liu Xiuhua, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us sandy land, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,137:108745.
- [3] 孟浩斌,周启刚,李明慧,等.基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(8):1790-1799.
- [4] 王思,张路路,林伟彪,等.基于 MODIS-归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究[J].*生态学报*, 2022,42(6):2149-2163.
- [5] 杨灿,魏天兴,李亦然,等.黄土高原典型县域植被覆盖度时空变化及地形分异特征[J].*生态学杂志*,2021,40(6): 1830-1838.
- [6] 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.
- [7] Fan Jiaqi, Xu Yan, Ge Haoyuan, et al. Vegetation growth variation in relation to topography in Horqin Sandy Land [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106215.
- [8] 刘咏梅,马黎,黄昌,等.基于 MODIS-Landsat 时空融合的陕北黄土高原植被覆盖变化研究[J].*西北大学学报(自然科学版)*,2019,49(1):62-70.
- [9] Gao Xiang, Huang Xingxing, Lo K, et al. Vegetation responses to climate change in the Qilian Mountain Nature Reserve, Northwest China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021,28:e01698.
- [10] 马海云,张林林,魏学琼,等.2000—2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化[J].*应用生态学报*, 2021,32(2):618-628.
- [11] 徐勇,赵纯,窦世卿,等.2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 时空演变及其与人口密度的相关性[J].*水土保持通报*,2022,42(2):264-274.
- [12] 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.
- [13] 银朵朵,王艳慧.温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J].*生态学报*,2021, 41(3):1158-1167.
- [14] 张诗羽,张毅,王昌全,等.岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J].*水土保持通报*,2018,38 (1):69-75.
- [15] Emran A, Roy S, Bagmar M S H, et al. Assessing topographic controls on vegetation characteristics in Chittagong Hill Tracts (CHT) from remotely sensed data [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018,11:198-208.
- [16] Wang Chunli, Jiang Qun'ou, Engel B, et al. Analysis on net primary productivity change of forests and its multi-level driving mechanism: A case study in Changbai Mountains in Northeast China [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020,153:119939.
- [17] 王美玲,张继超,王舶鉴,等.长白山区森林景观格局动态[J].*生态学杂志*,2017,36(11):3138-3147.
- [18] 张园,袁凤辉,王安志,等.2001—2018 年长白山自然保护区生长季 NDVI 变化特征及其对气候变化的响应[J].*应用生态学报*,2020,31(4):1213-1222.
- [19] 李苗苗.植被覆盖度的遥感估算方法研究[D].北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2003.
- [20] Li Sijia, Wang Jinman, Zhang Min, et al. Characterizing and attributing the vegetation coverage changes in North Shanxi coal base of China from 1987 to 2020 [J]. *Resources Policy*, 2021,74:102331.

- [42] Tang Jie, Xie Yun, Liu Chuan, et al. Effects of rainfall characteristics and contour tillage on ephemeral gully development in a field in Northeastern China [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 218: 105312.
- [43] Prosser I P, Slade C J. Gully formation and the role of valley-floor vegetation, Southeastern Australia [J]. Geology, 1994, 22(12): 1127.
- [44] Stöcker C, Eltner A, Karrasch P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: A case study from Andalusia, Spain [J]. Catena, 2015, 132: 1-11.
- [45] Guan Yabing, Yang Shengtian, Zhao Changsen, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104800.
- [46] Whitford J A, Newham L T H, Vigiak O, et al. Rapid assessment of gully sidewall erosion rates in data-poor catchments: A case study in Australia [J]. Geomorphology, 2010, 118(3/4): 330-338.
- [47] Yang Dan, Mu Kai, Yang Hui, et al. A study on prediction model of gully volume based on morphological features in the Jinsha dry-hot valley region of southwest China [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(5): 300.
- [48] Lentz R, Dowdy R, Rust R. Soil property patterns and topographic parameters associated with ephemeral gully erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 48: 354-361.
- [49] Casali J, López J J, Giráldez J V. Ephemeral gully erosion in Southern Navarra (Spain) [J]. Catena, 1999, 36(1/2): 65-84.
- [50] Nachtergaele J, Poesen J, Steegen A, et al. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils [J]. Geomorphology, 2001, 40(3/4): 237-252.
- [51] 李镇, 齐志国, 秦伟, 等. 利用高分立体影像构建东北黑土山地丘陵区切沟体积估算模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 122-130.
- [52] 张晟旻, 李浩. 东北黑土区的侵蚀沟治理措施与模式[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 221-227.
- [53] 王誉闻. 辽阳市东部山区坡耕地侵蚀沟治理体系探索[J]. 水土保持应用技术, 2022(4): 32-33.
- [54] 孙业欣. 典型黑土区侵蚀沟的综合生态治理实践[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(8): 83-86.
- [55] 王磊. 营口市侵蚀沟水土保持综合治理方法及效益分析[J]. 地下水, 2020, 42(2): 208-209.

(上接第 264 页)

- [21] Ren Hongrui, Shang Yingjie, Zhang Shuai. Measuring the spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity in Inner Mongolia using spatial autocorrelation [J]. Ecological Indicators, 2020, 112: 106108.
- [22] 原丽娟, 毕如田, 徐立帅, 等. 沁河流域植被覆盖时空分异特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1093-1103.
- [23] 蔡思扬, 左德鹏, 徐宗学, 等. 基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 15-21.
- [24] 吴金华, 盛芝露, 杜加强, 等. 1956—2017 年东北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 340-347.
- [25] 侯光雷, 张洪岩, 郭聃, 等. 长白山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子敏感性[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 285-292.
- [26] 刘志锋, 南颖, 胡浩, 等. 2000—2008 年长白山地区植被覆盖变化特征[J]. 西北植物学报, 2010, 30(2): 391-398.
- [27] 张建亮, 刘方正, 崔国发. 长白山国家级自然保护区植被时空变化及其驱动因子[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3525-3536.
- [28] 胡孟珂, 于欢, 孔博, 等. 2001—2020 年嘉陵江流域植被覆盖度时空变化特征[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 82-89.
- [29] 王慧, 王兵, 牛香, 等. 长白山森工集团天保工程生态效益动态变化[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 86-93.
- [30] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1568-1578.
- [31] 李娟, 龚纯伟. 祁连山国家公园植被覆盖变化地形分异效应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 228-237.
- [32] 姚镇海, 吴丹娃, 褚荣浩, 等. 安徽省植被覆盖度动态变化及其对地形的响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 283-290.