

# 祁连山国家公园植被覆盖变化地形分异效应

李娟<sup>1,2</sup>, 龚纯伟<sup>2</sup>

(1.甘肃省基础地理信息中心, 甘肃 兰州 730000; 2.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650032)

**摘要:** [目的] 分析祁连山国家公园不同时间植被覆盖变化情况以及不同高程、坡度、坡向等地形条件下植被覆盖变化的空间分异性, 为祁连山生态环境修复和保护提供参考依据和数据支撑。[方法] 利用祁连山 2006, 2014, 2019 年 3 期遥感影像, 采用像元二分模型估算植被覆盖度, 结合趋势分析法和地形面积修正法, 对不同地形条件下植被覆盖空间分异性及变化特征进行分析。[结果] ① 祁连山植被覆盖度空间分布格局为西北部低, 东南部高, 总体以较低植被覆盖度为主。2006—2019 年, 祁连山植被覆盖度整体呈增加趋势, 增加面积约占 46.7%, 减少面积约占 33.3%, 植被恢复状况较好, 其中, 低和较低植被覆盖度面积减小, 其他等级植被覆盖度面积均有不同程度的增加。② 祁连山植被覆盖变化在不同高程范围内存在明显差异: 3 200 m 以下中低海拔区域呈增加趋势, 2 200 m 以下低海拔区域增加特别明显; 3 700 m 以上中高海拔区域则呈减少趋势, 且海拔越高减少趋势越明显。③ 随着坡度的增加, 祁连山植被覆盖变化趋势由增加转为稳定再转为减少。坡度 15° 以下区域呈增加趋势; 坡度 25° 以上区域呈减少趋势; 坡度 40° 以上区域减少趋势尤其明显; 坡度 15°~25° 范围内分布相对稳定。④ 从坡向来看, 除平地外, 祁连山植被覆盖变化类型在其他坡向上的差异较小。[结论] 祁连山植被覆盖变化在高程、坡度等地形条件下差异明显, 坡向的地形效应不明显。

**关键词:** 祁连山国家公园; 植被覆盖度; 地形面积修正系数; 地形因子; 分异效应

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)03-0228-10

**中图分类号:** S157.1, TP79

**文献参数:** 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.031; Li Juan, Gong Chunwei. Effects of terrain factors on vegetation cover change in national park of Qilian Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 228-237.

## Effects of Terrain Factors on Vegetation Cover Change in National Park of Qilian Mountains

Li Juan<sup>1,2</sup>, Gong Chunwei<sup>2</sup>

(1. Gansu Provincial Center of Fundamental Geographic Information, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650032, China)

**Abstract:** [Objective] The change in vegetation cover at different time and the spatial variability of vegetation cover change due to different terrain factors such as elevation, slope, and aspect were analyzed in order to provide reference and data support for the restoration and protection of the ecological environment of the national park of Qilian Mountains. [Methods] Based on remote sensing images of the Qilian Mountains in 2006, 2014, and 2019, the pixel dichotomy model was used to estimate vegetation cover, combined with the trend analysis method and the terrain area correction method in order to analyze the spatial distribution and variation characteristics of vegetation cover under different terrain conditions. [Results] ① Vegetation cover was low in the northwest and high in the southeast of Qilian Mountains. Most of the regions were covered with lower vegetation cover. Vegetation cover showed an increasing trend from 2006 to 2019. The increasing areas accounted for about 46.7% of the total area, and the decreasing areas accounted for about 33.3% of the total area. Vegetation recovery was good during this period. The area of low and lower vegetation cover

收稿日期: 2021-01-11

修回日期: 2021-03-31

资助项目: 甘肃省林业公益性行业研究专项“祁连山国家公园体制试点”(201904019)。

第一作者: 李娟(1980—), 女(汉族), 甘肃省张掖市, 硕士, 高级工程师, 研究方向为地理信息科学及 3S 技术应用研究。Email: 335268610@qq.com。

decreased, while the areas of other cover levels increased to varying degrees. ② There were significant differences in vegetation cover at different elevation ranges: The low-middle elevation areas below 3 200 meters showed an increasing trend, and the low elevation areas below 2 200 meters increased significantly, while the middle-high elevation areas above 3 700 meters showed a decreasing trend. The decreasing trend was more obvious at higher altitudes. ③ As slope increased, the trend in vegetation cover change shifted from increasing to stable, and then turned to decreasing in the steep slopes. The vegetation cover change showed an increasing trend in the areas below  $15^{\circ}$  and a decreasing trend in the areas above  $25^{\circ}$ , and the decreasing trend was particularly obvious above  $40^{\circ}$ . For areas with slopes ranging between  $15^{\circ}$  and  $25^{\circ}$ , the distribution of types of vegetation cover change was relatively stable. ④ For the different slope aspects, there were no obvious distribution differences for different vegetation cover change types except in the flat land area. [Conclusion] The effects of elevation and slope factors on vegetation cover change were obvious. However, the effect of aspect factor was not obvious.

**Keywords: national park of Qilian Mountains; vegetation coverage; correction coefficient for terrain areas; terrain factors; differentiation effect**

植被在生态系统中扮演着重要角色,是连接陆地土壤、水体和大气的重要介质<sup>[1]</sup>,起着能量交换和物质循环的作用,对人类活动的强弱程度反应十分敏感<sup>[2]</sup>,可以作为区域生态环境变化研究的“指示剂”<sup>[3]</sup>。植被覆盖的变化导致了陆地表层属性随之发生改变,进而影响水土保持和气候调节等,从而生态系统的稳定性也发生改变<sup>[4]</sup>。植被覆盖度是衡量地表植被状况的一个最重要的指标,也是影响土壤侵蚀与水土流失的主要因子,对于区域环境变化和监测研究具有重要意义<sup>[5]</sup>。其中,植被覆盖度以及植被长势的最佳指示因子归一化植被指数(NDVI),被广泛应用于植被遥感中,是区域植被变化和生态环境变化的最有效监测指标<sup>[6-8]</sup>。

祁连山是青藏高原与西北内陆干旱半干旱地区的分界线,是温带大陆性气候向高原山地气候的过渡地带,也是河西走廊地区重要的生态安全屏障和主要的水资源涵养地,是中国生态环境最脆弱的区域之一<sup>[9]</sup>。植被作为祁连山生态系统的重要组成部分,其变化不仅影响着当地社会经济和生态环境,同时对中国西部生态安全有着极其重要的影响<sup>[10]</sup>。对于山地来说,地形对其植被分布具有重要影响,由于山地的垂直高度存在较大差异,气温、降水等气候条件受其影响也呈现出空间差异性,因此,植被垂直地域分布呈现出明显差异;山地坡度影响着地表径流和水分以及热因子的再分配,进而改变土壤的特性及分布,植被的分布态势也会受到影响;地势的陡峭起伏度及坡度的缓急程度不同等,不但会形成局部小气候的变化,而且对水土的流失与积聚都有影响;另外,在不同的地形地势条件下,人类活动的剧烈程度不同,所有这些因素都对植物的生长发育及空间分布状况产生很大影响,因此,进行地形因子与植被覆盖度变化关

系研究可以很好地揭示山地植被的地域分布规律<sup>[11-12]</sup>。近年来,关于植被覆盖变化与地形因子关系的相关研究较多,如陈学兄等<sup>[13]</sup>研究了太原市城区植被覆盖变化地形分异效应;熊俊楠等<sup>[14]</sup>研究了汶川地震灾区植被覆盖变化与地形因子的关系;赵婷等<sup>[11]</sup>研究了秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应;但针对祁连山区域的相关研究非常有限,大多以祁连山 NDVI 变化的驱动力及对气候变化的响应为主,如陈京华等<sup>[15]</sup>研究了 1982—2006 年祁连山植被覆盖的时空变化情况,认为气温和水是影响祁连山植被 NDVI 变化的主要因子;邱丽莎等<sup>[16]</sup>研究了 2000—2017 年祁连山植被的时空变化,认为 18 a 间祁连山植被总体呈改善趋势,植被变化除受气候变化影响外,人工修复和改善也是关键因素;付建新等<sup>[17]</sup>从海拔、坡度和坡向的角度探讨了祁连山南坡 NDVI 变化及其与气温和降水的关系,认为不同海拔、坡度、坡向的植被受到气温和降水的影响不同。

过去,由于人为活动剧烈,大规模矿产资源的开发,水电项目的建设,对祁连山生态环境造成了极大的破坏,2014 年以来,祁连山生态环境变化引起了国家高度重视,开始采取一系列措施进行祁连山生态修复,在此过程中,地形对祁连山植被覆盖变化是否有影响? 本文基于祁连山 2006,2014,2019 年 3 期遥感影像,采用像元二分法模型进行植被覆盖度遥感估算,在充分考虑地形因子面积差异影响的基础上,探讨了该区域不同时间植被覆盖的变化情况以及不同高程、坡度、坡向等地形因子条件下祁连山植被覆盖变化空间分布规律,旨在全面地了解不同时段内祁连山植被覆盖变化趋势及其地形分异效应,以期对祁连山国家公园的植被恢复和重建提供科学依据。

## 1 研究区概况

祁连山国家公园位于西北内陆干旱半干旱区,地处青藏高原、蒙古高原和黄土高原交汇地带,跨青海省东北部和甘肃省西部区域,西起当金山口,东至乌鞘岭,南接柴达木盆地,北临河西走廊(图 1),东西长约 1 000 km,南北宽约 300 km,总面积约  $5.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。祁连山地势西北高,东南低,地形多为山地,海拔在 1 760~5 820 m 左右,从西北到东南走向的山脉包括大雪山、托来南山、疏勒南山、走廊南山、冷龙岭、乌鞘岭等。祁连山自然条件复杂,水热条件差异大,东部湿度大,降水多,西部气候干燥,降水少,属典型的高原大陆性气候,是内陆河流石羊河、黑河和疏勒河的发源地

和径流形成区,其地理位置对河西绿洲的形成以及该地区生态环境的维持具有重要意义<sup>[18]</sup>。在地形地势及气候的共同影响下,祁连山植被呈现出独特的垂直地域分布特征,海拔由低到高,植被分布依次为荒漠带、山地草原带、山地森林草原带、高山灌丛草甸带、高寒草甸和高山亚冰雪稀疏植被带。祁连山森林和草原分界明显,森林主要分布在阴坡,覆盖率约为 14.2%,植被类型有温带落叶阔叶林、温带常绿针叶林、寒温性针叶林及针阔混交林等;草原主要分布在阳坡,是祁连山生态的重要组成部分,主要以灌木及草本植被为主,随着海拔的升高,在亚高山区广泛分布着高寒落叶灌丛和高山蒿草草甸及高寒草甸等植被,在高山区则以高寒垫状植被及菊科高山植物为主。

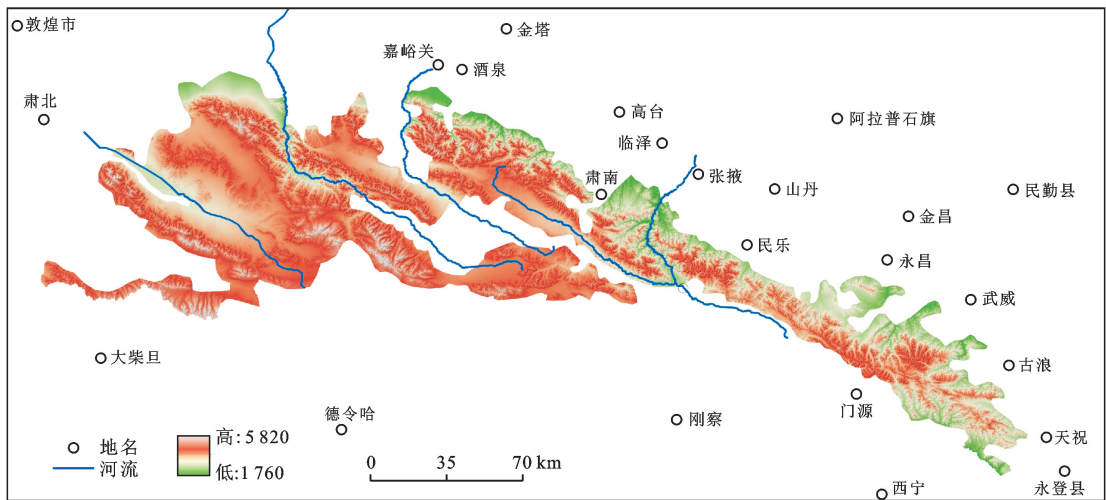


图 1 祁连山国家公园区位及地形图

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源及处理

本研究使用的遥感影像为 2006 年 7—9 月获取的中巴地球资源卫星影像( $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ),2014 年 8—10 月获取的美国 Landsat8 卫星影像( $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ),2019 年 6—10 月获取的资源三号及高分一号卫星影像( $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ )共 3 期。3 期遥感影像均摄于植被生长较好的月份,完全能够代表研究区域的土地利用和植被生长状况,可用于比较不同期植被变化情况。为保证研究区域数据的完整性以及研究结果的准确性,分别对三期影像进行大气校正、去除云影及水体<sup>[6]</sup>、几何精校正(借助 DEM 数据消除地形引起的几何畸变)和镶嵌处理等,为验证影像校正精度,在研究区尽量均匀选取 8 个明显的地面控制点,利用 GPS 接收机确定其精确地理位置,并与影像上相应点位地理坐标进行比较,经统计分析,3 期影像定位误差均不超过一个像元,

且同名地物点位置相同,满足研究要求;此外,为保证不同期植被覆盖度的遥感估算结果具有比较意义,对镶嵌后的 3 期影像进行重采样(分辨率为  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ),利用祁连山国家公园范围对 3 期影像进行掩膜和裁剪,得到研究区范围完全相同的 3 期影像数据。

DEM 数据来源于甘肃省自然资源厅,格网间距为  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ ,将该数据进行重采样(格网间距为  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ),方便与植被覆盖度数据进行叠加分析。

利用像元二分模型反演 3 期影像的植被覆盖度。像元二分模型的原理是将图像中的遥感信息(植被信息或波段)分解为绿色植被部分与无植被覆盖部分所贡献的信息两部分,则任一像元的信息值可表示为两部分信息的线性加权之和,该模型保留了植被覆盖的相关信息,而植被类型、土壤背景、大气的影被大大削弱<sup>[19-20]</sup>。根据该原理,假设一个像元的信息可以分为土壤与植被两部分,则植被覆盖度  $f$  的计算公式可以表示为:



$$f = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

式中:  $NDVI_{soil}$ ,  $NDVI_{veg}$  分别为无植被覆盖或裸土区域、纯植被覆盖区域的 NDVI 值。根据研究区域整幅影像上 NDVI 灰度值的分布情况,以置信度 0.5% 取 NDVI 的最小值与最大值近似代表  $NDVI_{soil}$  和  $NDVI_{veg}$  的值<sup>[21]</sup>。利用实地调查与地面测量相结合的方式,大致均匀选取 10 个点位,利用林地冠层分析仪对点位及其邻域进行 5~10 次测量并取其平均值作为验证点的植被覆盖度测量结果,以此对相应点位遥感影像植被覆盖度反演结果进行精度定量评价(图 2)。

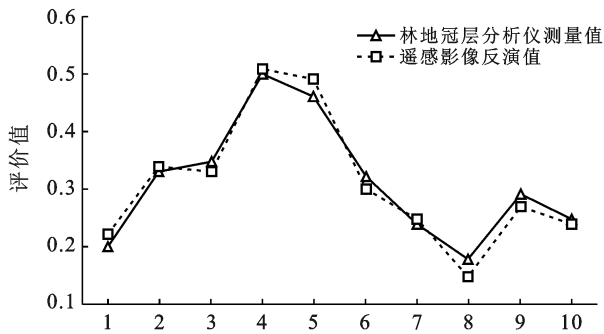


图 2 祁连山验证点植被覆盖度测量值与反演值结果对比

## 2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度变化趋势分析 趋势分析是采用最小二乘法逐像元对一组随时间变化的序列数据采用趋势线进行回归分析来拟合植被覆盖度的年际变化趋势,其公式为:

$$\theta_{slope} = \frac{a \times \sum_{i=1}^n (i \times NDVI_i) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n NDVI_i)}{a \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:  $\theta_{slope}$  为研究时段内植被覆盖度的变化趋势;  $NDVI_i$  为第  $i$  年的植被覆盖度;  $a$  为研究年份数目。

对植被覆盖变化趋势率进行计算,公式为:

$$\text{变化趋势率}(\%) = \frac{\theta_{slope} \times a}{\text{均值}} \times 100\% \quad (2)$$

按显著性水平 0.1 对 NDVI 变化趋势率进行  $t$  检验,结合  $\theta_{slope}$  值,将植被覆盖度变化趋势分为 5 类:显著增加型( $\theta_{slope} > 0, t < 0.01$ );轻微增加型( $\theta_{slope} > 0, 0.01 < t < 0.05$ );稳定型( $\theta_{slope} = 0, t > 0.05$ );显著减少型( $\theta_{slope} < 0, t < 0.01$ );轻微减少型( $\theta_{slope} < 0, 0.01 < t < 0.05$ )<sup>[17]</sup>。

2.2.2 地形面积修正 当地形变化时,会出现在某种地形条件下某种植被覆盖变化类型面积很小,但其面积比例相对于整个研究区却很大,从而影响植被覆盖度评价结果的合理性<sup>[22]</sup>。因此,在分析植被覆盖变化类型的空间分布状况时,采用地形面积修正系数  $v$  来消除地形的影响,其计算公式如下:

$$v = \frac{S_{vt} / S_t}{S_v / S_{\text{总}}} \quad (3)$$

式中:  $S_{vt}$  为在某地形条件  $t$  下某种植被变化类型  $v$  所占面积;  $S_v$  为某种植被变化类型  $v$  所占面积;  $S_t$  指某种地形  $t$  的面积,  $S_{\text{总}}$  为整个研究区域的总面积。  $v > 1$ , 表示植被变化类型  $v$  在地形条件  $t$  下面积变化趋势为增加;  $v = 1$ , 表示植被变化类型  $v$  在地形条件  $t$  下面积变化趋于平稳;  $v < 1$ , 表示植被变化类型  $v$  在地形条件  $t$  下面积变化趋势为减少<sup>[23]</sup>。

## 2.3 高程、坡度、坡向分级

基于 ArcGIS 空间分析模块,利用 DEM 数据生成高程、坡度、坡向分级图。根据研究区域地形、地理状况,并结合已有研究成果<sup>[17]</sup>,将研究区高程分为  $< 2\ 200, 2\ 200 \sim 2\ 700, 2\ 700 \sim 3\ 200, 3\ 200 \sim 3\ 700, 3\ 700 \sim 4\ 200, 4\ 200 \sim 4\ 700$  m 和  $> 4\ 700$  m 共 7 级;坡度划分依据自然资源部颁布的《第三次全国国土调查技术规程》,再结合祁连山地形状况将坡度分为  $\leq 5^\circ, 5^\circ \sim 10^\circ, 10^\circ \sim 15^\circ, 15^\circ \sim 25^\circ, 25^\circ \sim 40^\circ$  和  $> 40^\circ$  共 6 级;将坡向划分为平地、阳坡 ( $135^\circ \sim 225^\circ$ )、半阳坡 ( $225^\circ \sim 315^\circ$ )、阴坡 ( $315^\circ \sim 45^\circ$ )、半阴坡 ( $45^\circ \sim 135^\circ$ ) 共 5 类。坡度、坡向空间分布见图 3。

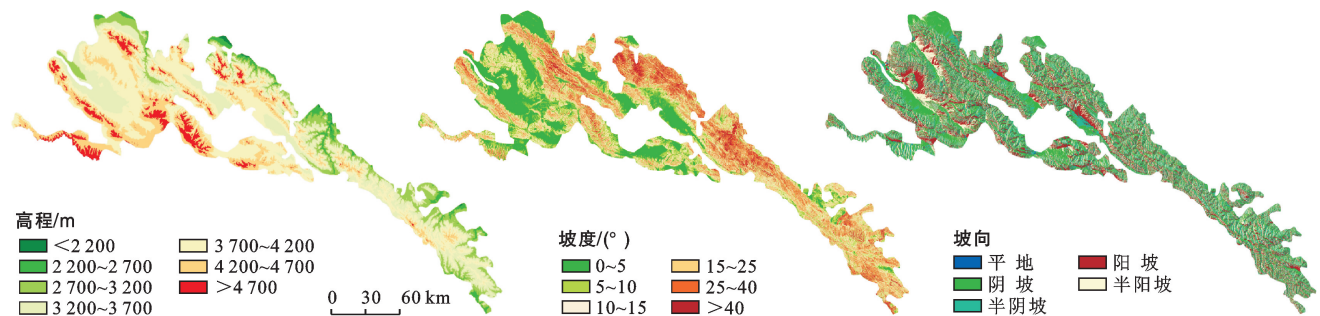


图 3 祁连山高程、坡度、坡向空间分布特征

## 2.4 植被覆盖度分级

根据水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),将植被覆盖度的不同等级与水土流失的不同等级相对应,同时结合祁连山地理状况和地面调查情况,将研究区域植被覆盖度分为 VI 级:

高植被覆盖度(70%~100%);V 级:较高植被覆盖度(50%~70%);IV 级:中等植被覆盖度(30%~50%);III 级:较低植被覆盖度(10%~30%);II 级:低植被覆盖度(0%~10%);I 级:无植被覆盖或裸土(0)这 6 个等级<sup>[20-21]</sup>。祁连山 3 期植被覆盖度分级见图 4。

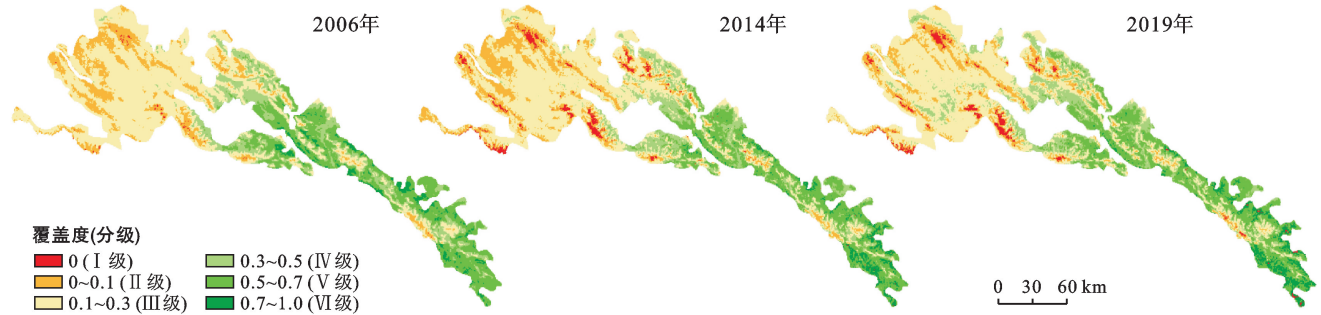


图 4 祁连山 2006,2014,2019 年植被覆盖度及其分级

## 3 结果与分析

### 3.1 祁连山植被覆盖度时空分布及变化特征

3.1.1 祁连山植被覆盖度时空分布特征 根据图 4 可知,祁连山植被覆盖度空间分布特征为“西北部低,东南部高”,VI 级植被覆盖区主要分布在乌鞘岭的东南部区域;V 级植被覆盖区主要分布在走廊南山东南部、冷龙岭、乌鞘岭及托来山东南部等区域,主要为森林草原覆盖区;IV 级植被覆盖区主要分布在托来山及走廊南山的西北部,主要为草原和高山植被混合覆盖区域;荒漠与草原植被过渡区域为 III 级植被覆盖区域;祁连山西北部的大雪山、疏勒南山、党河南山等区域主要为裸地、沙漠、碎石和冰川区,植被覆盖度为 II 级和 I 级。对祁连山各级植被覆盖度进行统计(表 1)可知,2006 年和 2019 年,祁连山植被覆盖度均以 III 级为主,分别占 46.81% 和 42.7%,但 2019 年面积占比比 2006 年减少 4.11%;II 级植被覆盖度由 2006 年的 14.95% 减少至 2019 年的 12.09%,减少约 2.86%;其他类型植被覆盖度均有所增加,尤其以 IV 级植被覆盖度区域面积增加最明显,增幅约为 3.18%,V 级和 VI 级植被覆盖度增幅分别为 1.07% 和 1.95%。但需要关注的是,祁连山无植被覆盖和裸地(I 级)面积略有增加,增加面积比例约为 0.77%。

3.1.2 祁连山植被覆盖度时空变化特征 对祁连山植被覆盖度变化趋势进行分析(图 5),结果表明:2006—2019 年祁连山植被覆盖度整体的变化趋势为增加,植被覆盖度显著增加和轻微增加区域面积分别占 24.9% 和 21.8%,主要分布在党河南山和疏勒南山西北部及乌鞘岭东南部区域;植被覆盖减少区域主要

分布在疏勒南山东南部、走廊南山中部和托来山、大雪山等的部分区域,显著减少和轻微减少区域面积分别占 10.8%、22.5%。其中,2006—2014 年,祁连山植被覆盖度平均变化率为 -0.016,总体呈现减少趋势,经显著性检验,植被覆盖度显著减少和轻微减少区域面积分别占总面积的 18.2% 和 37.1%,主要分布在祁连山西北部大部分区域、走廊南山张掖段、托来山、托来南山及疏勒南山东南部等的部分区域;24.7% 的区域未通过显著性检验,为稳定区;轻微增加和显著增加区域面积分别占 14.6% 和 5.4%,主要分布在党河南山、乌鞘岭及冷龙岭的部分区域。2014—2019 年,祁连山植被覆盖度平均变化率为 0.028,总体呈现出增加趋势,植被处于恢复期,经显著性检验,植被覆盖度显著增加和轻微增加区域面积分别占总面积的 27.4% 和 37.6%,主要分布在党河南山、疏勒南山西北部及托来山北部、走廊南山、乌鞘岭东南部、冷龙岭的部分区域;未通过显著性检验的稳定区域面积占 23.8%;轻微减少和显著减少区域面积分别占 9.1% 和 2.1%,主要分布在走廊南山张掖段以及乌鞘岭中部的个别区域。

表 1 2006,2019 年祁连山各级植被覆盖度面积比例及其变化情况

植被覆盖度	面积比例/%		变化比例/%
	2006 年	2019 年	
I 级(无植被覆盖或裸土)	0.38	1.15	0.77
II 级(低植被覆盖度)	14.95	12.09	-2.86
III 级(较低植被覆盖度)	46.81	42.70	-4.11
IV 级(中等植被覆盖度)	15.17	18.35	3.18
V 级(较高植被覆盖度)	19.45	20.52	1.07
VI 级(高植被覆盖度)	3.24	5.19	1.95

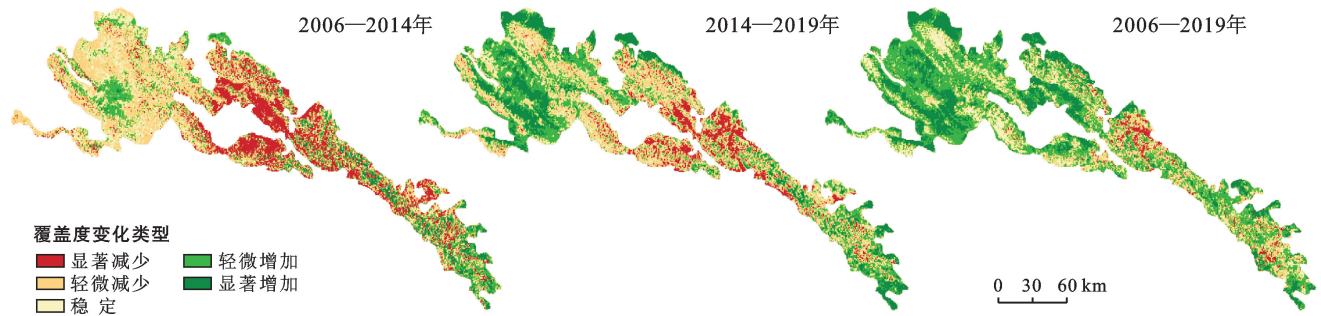


图 5 2006—2019 年祁连山不同时段植被覆盖度变化类型分布

### 3.2 祁连山植被覆盖度地形分异特征

**3.2.1 祁连山植被覆盖度高程梯度分异** 山地的气候条件及土壤状况等自然因素的变化由海拔高程决定,随着海拔的升高,形成了明显的植被垂直带,不同植被垂直带对人为活动干扰以及气候变化的响应度有所不同,从而表现出不同的变化趋势。图 6a 为祁连山植被覆盖度垂直分布状况,由图可知,随着海拔的升高,祁连山植被覆盖度整体呈现出先增大后减小的“倒 V 型”趋势。在低海拔区域(2 200 m 以下),植被生长所需的水热条件充足,但受人为活动干扰较大,植被覆盖度较低,地表呈现出荒漠草原景观;海拔升高,对人类活动的限制逐步增大,植被生长干扰程度逐渐减小,加之水热条件较适宜,植被覆盖逐渐好转,在海拔 2 200~3 200 m 的中山区,植被类型主要为森林草原;海拔 3 200~3 700 m 的亚高山区,生境较湿润,植被类型主要为灌丛草原;海拔 3 700~4 200 m 之间是植被覆盖度最高的区域,年降水量较高,但气温较低,呈现出草甸草原景观;随着海拔的继续升高,接收到的太阳辐射强度、空气流动等气象条件也随之发生改变,海拔升高至 4 200 m 以上,气温骤降,植被生长受热量条件和陡峭地势的限制,植被的适宜性变得较为脆弱,植被覆盖度降低,植被类型

为高寒草甸和高山亚冰雪稀疏植被。

### 3.2.2 祁连山植被覆盖度在坡度坡向上的空间分异

山地坡度影响着地表径流和水分以及热因子的再分配,进而改变土壤的特性及分布,同时也会影响植被的分布态势。图 6b 为植被覆盖度在坡度上的分布状况,随着坡度的增加,祁连山植被覆盖度呈现出先降低后增高最后又降低的倒“N”趋势。坡度在  $5^{\circ}$  以下,地势平缓,水土不易流失,植被覆盖度相对较高,但祁连山区平地很少;在  $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$  相对比较平缓的区域,由于人为活动的干扰,植被覆盖度较低;随着坡度的升高,人为活动减少,植被覆盖回归正常趋势,植被覆盖度增加;坡度  $>40^{\circ}$  的区域,水土流失严重,并且得到的积温较少,不利于植物生长,植被覆盖度急剧降低。

坡向即海拔改变量变化的方向。不同的坡向,接收的太阳辐射量及水分蒸散发量均存在差异,从而影响植被覆盖的空间分布。由图 6c 可知,祁连山阴坡由于日照的强度较低、获得的太阳辐射总量相对较少,水分蒸散发量较低,相对于其他坡向更有利于植被生长,因此植被覆盖度面积占比相对较高,达到 29.1%;其他坡向植被覆盖度面积占比差别不大,约为 23% 左右;平地由于人为活动剧烈,植被覆盖度很低。

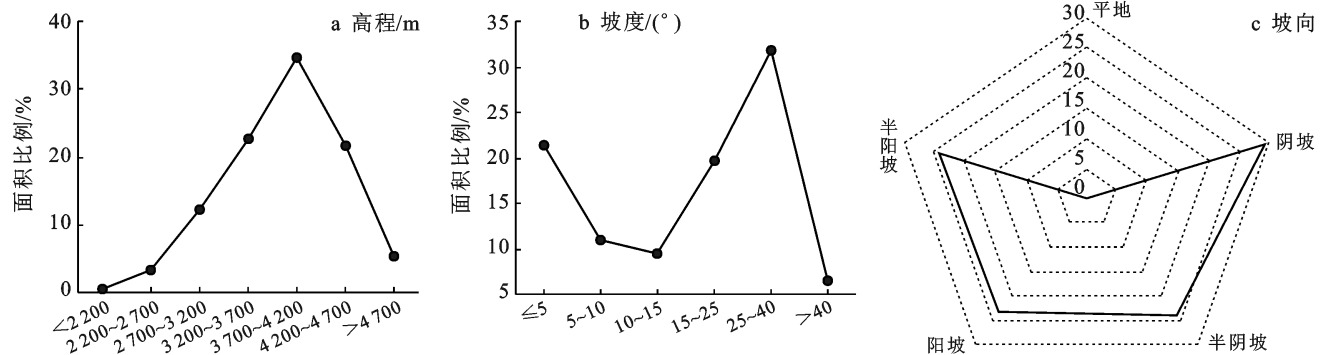


图 6 祁连山植被覆盖度在不同地形条件下的空间分布特征

### 3.3 祁连山植被覆盖度变化地形分异特征分析

#### 3.3.1 高程梯度对祁连山植被覆盖度变化的影响

将祁连山植被覆盖度变化类型数据与高程分级数据

进行叠加,统计出不同高程范围内的植被变化类型,并计算与之对应的地形面积改正系数  $v$ ,详细结果如表 2 所示。



表 2 祁连山 2006—2019 年不同植被覆盖度变化类型  $v$  值垂直变化

高程/m	植被覆盖度变化类型	地形面积改正系数 $v$		
		2006—2019 年	2006—2014 年	2014—2019 年
<2 200	显著减少	0.64	2.16	0.31
	轻微减少	0.12	3.38	0.20
	稳定	0.26	0.64	1.14
	轻微增加	1.03	0.34	2.73
	显著增加	2.99	0.58	2.48
2 200~2 700	显著减少	0.63	1.94	0.50
	轻微减少	0.47	1.51	0.35
	稳定	0.51	0.74	1.09
	轻微增加	1.62	0.72	4.34
	显著增加	2.12	0.98	1.97
2 700~3 200	显著减少	0.92	1.89	0.87
	轻微减少	0.68	1.26	0.64
	稳定	0.77	0.95	1.24
	轻微增加	1.19	0.71	2.16
	显著增加	1.54	0.93	1.32
3 200~3 700	显著减少	0.95	1.92	0.90
	轻微减少	0.71	1.60	0.75
	稳定	0.90	0.93	1.32
	轻微增加	1.04	0.71	1.62
	显著增加	1.07	0.90	0.96
3 700~4 200	显著减少	1.2	1.18	0.90
	轻微减少	0.85	0.95	0.79
	稳定	1.00	1.07	1.74
	轻微增加	0.98	0.92	0.50
	显著增加	0.96	0.66	0.98
4 200~4 700	显著减少	0.90	0.74	0.80
	轻微减少	1.52	1.44	0.89
	稳定	1.22	1.04	1.51
	轻微增加	0.85	0.45	0.20
	显著增加	0.44	0.15	0.57
>4 700	显著减少	0.14	0.63	0.54
	轻微减少	2.64	1.66	0.86
	稳定	1.39	1.00	2.98
	轻微增加	0.85	0.15	0.04
	显著增加	0.01	0.01	0.02

由表 2 可知,不同高程范围内各植被变化类型的空间分异较明显。2006—2019 年整个时段内,植被覆盖显著增加型随高程的升高呈明显减少趋势,在 3 200 m 以下区域为优势分布( $v > 1.54$ ),在 2 200 m 以下植被增加趋势尤其明显( $v = 2.99$ );轻微增加型先增加后减少,在 3 200 m 以下区域均为优势分布,在 2 200~2 700 m 之间区域优势分布较明显( $v = 1.62$ );3 200~3 700 m 之间分布相对稳定( $v$  略大于

或略小于 1);显著减少型随高程升高先增加后逐渐减少,在 3 700~4 200 m 之间区域呈较弱优势分布( $v = 1.2$ );轻微减少型随高程升高不断增加,在 4 200 m 以上区域为主导类型,在 4 700 m 以上分布优势明显( $v = 2.64$ )。其中,2006—2014 年,植被覆盖显著减少型随高程升高逐渐减少,在 4 200 m 以下区域均为优势分布( $v > 1.0$ ),尤其在 2 200 m 以下减少趋势显著( $v = 2.16$ );轻微减少型随高程升高呈上下波动趋势,在 3 700 m 以下及 4 200 m 以上区域均为优势分布,在 2 200 m 以下优势分布尤其明显( $v = 3.38$ );显著增加型及轻微增加型随高程增加先增加后减少,在各高程范围内均为非优势分布( $v < 1.0$ )。2014—2019 年,显著增加型随高程增加逐渐减少,在 3 200 m 以下区域呈优势分布,在 2 200 m 以下区域优势分布显著( $v = 2.48$ );轻微增加型先增加后减少,在 3 700 m 以下区域为优势分布,尤其在 2 200~2 700 m 范围内分布特别显著( $v = 4.34$ ),到 3 700 m 后  $v$  值迅速降低至 1.0 以下,呈非优势分布;显著减少型呈先增加后减少趋势,轻微减少型呈逐渐增加趋势,两者在各高程范围内均为非优势分布。

3.3.2 坡度对祁连山植被覆盖度变化的影响 祁连山地形复杂多样,植被覆盖变化受坡度影响较明显。将祁连山植被覆盖度变化数据与坡度分级数据叠加,统计出不同年份不同坡度范围内植被覆盖变化情况,见表 3。由表 3 可知,植被覆盖度变化随坡度的增加存在不同程度的差异,从 2006—2019 年整个时段来看,显著减少型和轻微减少型在坡度  $25^\circ$  以上区域均为优势分布,尤其在坡度  $40^\circ$  以上区域优势分布明显, $v$  值分别为 1.33, 1.27;轻微增加型和显著增加型在坡度  $15^\circ$  以下区域占主导类型,在坡度  $5^\circ$  以下区域分布优势尤其显著, $v$  值分别为 1.34, 1.37; $15^\circ \sim 25^\circ$  坡度范围内,各植被覆盖变化类型分布相对稳定( $v$  值略大于或略小于 1)。其中,2006—2014 年,植被覆盖显著减少型在各坡度范围内均为优势分布,在坡度  $25^\circ$  以上区域优势分布显著( $v > 1.47$ );轻微减少型在坡度  $5^\circ$  以上区域均为微弱优势分布,在坡度  $40^\circ$  以上区域分布相对明显( $v = 1.10$ );显著增加类型在各坡度范围内均为非优势分布( $v < 1.0$ ),轻微增加型仅在坡度  $5^\circ$  以下区域呈微弱优势分布( $v = 1.07$ )。2014—2019 年,轻微增加和显著增加型随坡度增加均逐渐减少,轻微增加型在坡度  $25^\circ$  以下区域为优势分布( $1.03 < v < 1.13$ );显著增加型在坡度  $15^\circ$  以下区域为优势分布,在坡度  $5^\circ$  以下增加趋势明显( $v = 1.60$ );显著减少型和轻微减少型随坡度升高均逐渐增加,显著减少型在坡度大于  $25^\circ$  区域为优势分布,在坡度  $40^\circ$  以

上减少趋势尤其明显( $v=2.46$ );轻微减少型在坡度大于 $15^\circ$ 的区域为主导类型,在坡度 $40^\circ$ 以上优势分布明显( $v=1.49$ )。

表 3 祁连山 2006—2019 年不同植被覆盖度变化类型  $v$  值随坡度变化情况

坡度/ ( $^\circ$ )	植被覆盖度变化类型	地形面积改正系数 $v$		
		2006—2019 年	2006—2014 年	2014—2019 年
$\leq 5$	显著减少	0.69	1.08	0.17
	轻微减少	0.57	0.92	0.30
	稳定	0.83	1.16	0.46
	轻微增加	1.34	1.07	1.13
	显著增加	1.37	0.35	1.60
5~10	显著减少	0.92	1.13	0.49
	轻微减少	0.86	1.05	0.72
	稳定	0.96	1.01	0.74
	轻微增加	1.11	0.89	1.10
	显著增加	1.10	0.60	1.30
10~15	显著减少	0.99	1.06	0.69
	轻微减少	0.96	1.02	0.96
	稳定	1.01	1.01	0.97
	轻微增加	1.11	0.96	1.10
	显著增加	1.15	0.83	1.02
15~25	显著减少	1.03	1.09	0.95
	轻微减少	1.02	1.01	1.11
	稳定	1.04	1.01	1.12
	轻微增加	0.95	0.99	1.03
	显著增加	0.94	0.93	0.87
25~40	显著减少	1.11	1.47	1.55
	轻微减少	1.23	1.02	1.41
	稳定	1.09	1.01	1.34
	轻微增加	0.81	0.92	0.92
	显著增加	0.80	0.92	0.63
$> 40$	显著减少	1.33	1.48	2.46
	轻微减少	1.27	1.10	1.49
	稳定	1.06	1.03	1.20
	轻微增加	0.79	0.82	0.88
	显著增加	0.78	0.91	0.71

3.3.3 坡向对祁连山植被覆盖度的影响 将祁连山植被覆盖变化类型数据与坡向分类数据进行叠加分析,统计出不同年份不同坡向植被覆盖度变化情况见表 4。

由表 4 可知,除平地外,祁连山各植被覆盖度变化类型在其他坡向分布差异不显著。2006—2019 年,在平地区域,植被覆盖显著减少型占主导类型( $v=1.6$ ),表明该区域受人为活动干扰较大,植被覆盖度较低;在阴坡区域,显著增加型呈较弱优势分布( $v=1.16$ );在阳坡区域,轻微增加型呈较弱优势分布( $v=1.14$ );除此之外,各植被变化类型在其他坡向分

布差异不明显。其中,2006—2014 年,在平地区域,植被覆盖显著减少型优势分布明显( $v=2.91$ ),其他植被覆盖变化类型呈非优势分布;在其他坡向,各植被覆盖变化类型分布差异不明显( $v$  值略大于或略小于 1)。2014—2019 年,在平地区域,显著增加型和轻微增加型均呈优势分布, $v$  值分别为 1.49,1.18,表明该区域植被覆盖在逐渐恢复;在其他坡向,各植被覆盖变化类型分布差异不明显。

表 4 祁连山 2006—2019 年不同植被覆盖度变化类型  $v$  值随坡向变化情况

坡向	植被覆盖度变化类型	地形面积改正系数 $v$		
		2006—2019 年	2006—2014 年	2014—2019 年
平地	显著减少	1.60	2.91	0.88
	轻微减少	0.78	0.66	0.36
	稳定	1.07	0.56	1.59
	轻微增加	1.06	0.52	1.18
	显著增加	0.52	0.21	1.49
阴坡	显著减少	0.95	0.96	0.90
	轻微减少	0.99	0.99	0.96
	稳定	0.92	1.04	0.95
	轻微增加	0.95	0.98	0.95
	显著增加	1.16	0.96	1.05
半阴坡	显著减少	0.99	1.01	0.99
	轻微减少	0.97	0.93	1.04
	稳定	0.98	1.01	1.04
	轻微增加	0.99	1.02	1.05
	显著增加	1.02	1.01	0.97
阳坡	显著减少	0.98	1.07	0.98
	轻微减少	0.96	0.99	0.93
	稳定	1.06	0.98	0.97
	轻微增加	1.14	0.91	1.04
	显著增加	0.88	0.91	0.95
半阳坡	显著减少	0.98	0.97	0.92
	轻微减少	0.99	1.04	1.04
	稳定	1.05	0.97	1.05
	轻微增加	0.99	0.96	1.01
	显著增加	0.90	0.93	1.06

## 4 讨论与结论

### 4.1 结论

针对祁连山植被覆盖度研究,已有成果多基于气候对其变化的响应,从地形角度出发的研究较少。本文基于祁连山 2006,2014,2019 年 3 期影像,采用像元二分法模型进行植被覆盖度估算,在充分考虑地形面积差异影响的基础上,探讨了该区域不同时间植被覆盖变化情况以及不同高程、坡度、坡向等地形条件



下植被覆盖的空间分异性,研究结果对祁连山生态修复具有参考意义。

(1) 祁连山植被覆盖度空间分布特征为“西北部低,东南部高”,总体以较低植被覆盖度为主。2006—2019年祁连山植被覆盖度整体的变化趋势为增加,增加区域主要分布在党河南山和疏勒南山西北部及乌鞘岭东南部区域,尤其在祁连山西北部部分区域植被覆盖增加显著,增加面积约占 46.7%,减少面积约占 33.3%,植被恢复状况较好。低、较低植被覆盖度面积减少;中、较高和高植被覆盖度面积均有增加。其中,2006—2014年,祁连山植被覆盖度平均变化率为-0.016,总体呈现减少趋势;2014—2019年,祁连山植被覆盖度平均变化率为 0.028,总体呈现出增加趋势。

(2) 祁连山植被覆盖度随海拔的升高呈现出先增加后减少的趋势,其中,海拔 3 700~4 200 m 之间是植被覆盖度最高的区域。从不同高程范围来看,各植被覆盖变化类型的空间分异较明显,海拔越高,植被覆盖度减少越明显。2006—2019年,3 200 m 以下的中低海拔区域植被覆盖呈增加趋势,在 2 200 m 以下的低海拔区域的荒漠草原带植被增加趋势尤其明显,根据相关资料,植被增加类型主要以草本植物及灌木为主;海拔 3 700 m 以上的中高海拔区域植被覆盖则呈较弱的减少趋势,在 4 700 m 以上高海拔区域的高寒草甸带植被减少趋势更明显,3 200~3 700 m 高程范围内植被覆盖变化相对稳定。

(3) 从坡度来看,植被覆盖度变化情况与坡度的大小呈反比,坡度越大,植被覆盖度减少趋势越显著。2006—2019年,在坡度 15°以下区域植被覆盖呈增加趋势,在坡度 5°以下增加优势尤其显著;在坡度 25°以上区域植被覆盖呈减少趋势,在坡度 40°以上区域减少趋势尤其明显;在 15°~25°坡度范围内,各植被覆盖变化类型为稳定分布。

(4) 从坡向来看,除平地外,各植被覆盖变化类型在其他坡向分布差异不显著。平地区域由于易受人为活动的干扰,植被覆盖度呈减少趋势;其他坡向对植被覆盖变化影响不大。

## 4.2 讨论

祁连山作为西北地区生态环境最脆弱的区域之一,近年来,在全球气候变暖的大背景下,其植被生长环境也呈现出较为明显的变化,气温、降水等气候条件受地形影响呈现出空间差异性,同时,人类活动的剧烈程度在不同的地形地势条件下也不同,所有这些因素都对植物的生长发育及空间分布状况产生很大影响,因此,在进行祁连山生态保护及修复的同时关

注地形对植被覆盖变化的影响具有重要意义。

本文研究结果表明,2006—2019年,祁连山植被覆盖度总体上呈增加趋势,这是由于 2014 年以来,政府加强对祁连山地区的生态保护及生态环境治理修复工作,采取封山育林、禁牧、禁止滥砍滥伐、滥采滥挖等严格的生态保护和恢复措施,人类活动大大减少,植被逐渐恢复;另外,随着全球气温升高,祁连山冰川积雪消融加速,也对植被生长发育有一定的促进作用。但需要特别说明的是,祁连山中等、较高和高植被覆盖度增加的同时,疏勒南山东南部、走廊南山和大雪山等个别区域的无植被覆盖或裸露土地也略有增加,分析其原因,可能是由于该区域过去人为活动剧烈,矿产资源的开发,水电项目的建设,对自然生态环境造成了极大的破坏,植被的适应性变得特别脆弱,导致植被覆盖出现减少现象,具体的原因还需要进一步的研究和探讨才能确定。

从祁连山生态植被变化的地形分布特征来看,其在地形、坡度上的差异明显,植被覆盖度随高程和坡度增加呈减少趋势。海拔 3 700 m 以上区域植被覆盖减少,该区域虽然地势高,人类活动少,但植被类型主要以脆弱的灌草丛及高山草甸、高寒垫状植被类型为主,脆弱的本底条件以及寒冷的气候等自然因素可能是造成植被退化的主要原因,因而推断气候变化对祁连山高海拔区域的植被覆盖影响较大,在日后的环境生态治理工作中需加强对高海拔区域的脆弱的草甸等植被类型的保护和管理;另外,坡度 25°以上区域植被覆盖呈减少趋势,究其原因,可能是由于该区域地势陡峭,接收的太阳辐射强度较低,水土流失严重,植被生长适宜性脆弱,植被状况容易发生变化,有必要引起足够的重视,在进行生态保护的同时加强该区域的水土涵养能力有利于植被覆盖状况的改善;需要特别说明的是,在分析祁连山植被变化在坡向上的差异时发现,虽然植被覆盖变化在不同坡向上存在一定差异,但变化幅度不明显,可能是由于祁连山地势走向为从西北到东南,且整体海拔较高,地形状况复杂,独特的地形地势条件形成了局地的小气候,水热条件组合情况多变,导致植被覆盖变化受坡向的影响不大,而受高程和坡度的影响较大,不过这只是一种推断,具体的原因和影响效应还需在后续的工作中进一步探讨。

此外,植被覆盖度变化的影响因素较多,本文只从地形因子角度出发进行了植被覆盖度的变化分析,没有考虑气温、降水等气象因子以及政策等不确定因素所带来的影响,在后续的研究中,综合气候、人类活动等影响因素探讨植被覆盖度变化是非常必要的。

## [参 考 文 献]

- [1] 桂娟,王旭峰,李宗省,等.典型冰冻圈地区植被变化对人类活动的响应研究:以祁连山为例[J].冰川冻土,2019,41(5):1235-1243.
- [2] 李卓,张继超,孙然好,等.气候和地形对植被覆盖动态演化的影响研究[J].生态科学,2017,36(6):35-43.
- [3] Meyer W B, Li B L T. Human population growth and global land-use/cover change [J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1992,23(23):39-61.
- [4] Mu Shaojie, Yang Hongfei, Li Jianlong, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation coverage and its relationship with climate factors in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013,23(2):231-246.
- [5] 李苗苗,吴炳方,颜长珍.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.
- [6] 李娟,龚纯伟.兰州市南北两山植被覆盖度动态变化遥感监测[J].测绘科学,2011,36(2):175-177.
- [7] 谭清梅,刘红玉,张华兵,等.基于遥感的江苏省滨海湿地景观植被覆盖度分级研究[J].遥感技术与应用,2013,28(5):934-940.
- [8] 王朗,傅伯杰,吕一河,等.生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2010,21(8):2109-2116.
- [9] 丁永建,叶佰生.祁连山中部地区40年来气候变化及其对径流的影响[J].冰川冻土,2000,22(3):193-199.
- [10] 戴声佩,张勃,王海军,等.基于SPOT NDVI的祁连山草地植被覆盖时空变化趋势分析[J].地理科学进展,2010,29(9):1075-1080.
- [11] 赵婷,白红英,邓晨晖,等.2002—2016年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应[J].生态学报,2019,9(12):4499-4509.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] 陈京华,贾文雄,赵珍,等.1982—2006年祁连山植被覆盖的时空变化特征研究[J].地球科学进展,2015,30(7):834-845.
- [16] 邱丽莎,张立峰,何毅,等.2000—2017年祁连山植被动态变化遥感监测[J].遥感信息,2019,34(4):97-107.
- [17] 付建新,曹广超,郭文炯.1998—2017年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季NDVI变化及其与气象因子的关系[J].应用生态学报,2020,31(4):1203-1212.
- [18] 张禹舜,贾文雄,赵一飞,等.基于CASA模型研究祁连山地区植被净初级生产力的时空变化[J].西北植物学报,2014,34(10):2085-2091.
- [19] 吴昫昭,田庆久.ETM<sup>+</sup>数据绝对反射率反演方法分析[J].测绘科学,2004,19(2):27-31.
- [20] 李娟.兰州市南北两山植被覆盖度动态变化遥感监测[J].矿山测量,2010,23(1):34-37.
- [21] 彭继达,张春桂.基于高分一号遥感影像的植被覆盖遥感监测:以厦门市为例[J].国土资源遥感,2019,31(4):137-142.
- [22] 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.
- [23] 魏建瑛,徐建英,樊斐斐.卧龙自然保护区植被覆盖度变化及其对地形因子的响应[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):440-449.