

黄土高原丘陵沟壑区植被覆盖度变化监测

张舒婷¹, 王晓慧^{2,3}, 彭道黎¹, 纪平^{2,3}, 刘华^{2,3}, 凌成星^{2,3}, 侯瑞霞^{2,3}

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091; 3. 国家林业和草原局 林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 【目的】研究黄土高原水土流失严重区域实施“三北”(西北、华北和东北)防护林、退耕还林等林业生态工程以来的植被变化, 为制定合理的生态修复和管理对策提供依据。【方法】以陕西省延安安塞区为例, 基于 Landsat TM/OLI 影像, 运用像元二分法估算 2000 和 2017 年的植被覆盖度, 结合海拔、坡度和坡向分析其地形分异特征。【结果】①安塞区平均植被覆盖度从 2000 年的 24.98% 增长到 2017 年的 53.34%, 显著提高; ②植被覆盖度变化中极显著增加面积占比最大, 为 44.70%, 集中在河流沿岸; ③2000 年植被覆盖度随海拔升高逐渐减小, 2017 年随海拔升高先增加后减小。2000 和 2017 年植被覆盖度随坡度先增加后减少, 在坡度 25°~35°出现最大值。植被覆盖度随坡向的变化从大到小依次为阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡; ④海拔 < 1 300 m, 坡度 15°~35°, 平地、阴坡和半阴坡水热条件好, 植被恢复容易, 高植被覆盖度面积比例最大。【结论】2000–2017 年安塞区植被呈改善趋势, 海拔、坡度和坡向等地形条件下植被覆盖度存在差异, 生态恢复要因地制宜制定对策。图 2 表 6 参 27

关键词: 森林生态学; 黄土高原; 植被覆盖度; 变化监测; 地形分异

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)06-1045-09

Monitoring of vegetation coverage change in hilly and gully regions on the Loess Plateau

ZHANG Shuting¹, WANG Xiaohui^{2,3}, PENG Daoli¹, JI Ping^{2,3}, LIU Hua^{2,3}, LING Chengxing^{2,3}, HOU Ruixia^{2,3}

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] The present study is to analyze the vegetation changes in areas with severe soil erosion on the Loess Plateau since the implementation of forestry ecological projects such as the Three-north (northwest, north and northeast) Shelterbelts and Conversion of Farmland to Forests, so as to provide basis for formulating reasonable ecological restoration and management countermeasures. [Method] Taking Ansai District of Yan'an City in Shaanxi Province as an example, the vegetation coverage in 2000 and 2017 was estimated by pixel dichotomy based on Landsat TM/OLI image, and topographic differentiation characteristics were analyzed in combination with altitude, slope and slope direction. [Result] (1)Vegetation coverage significantly increased from 24.98% in 2000 to 53.34% in 2017. (2)The proportion of vegetation coverage with extremely significant increase in the study area accounted for 44.70%, which was concentrated along rivers. (3)In 2000, the vegetation coverage gradually decreased with the increase of altitude. In 2017, the vegetation

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-07-25

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0506502); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFYBB2017MB012)

作者简介: 张舒婷, 从事森林资源监测与评价研究。E-mail: zhangst95@163.com。通信作者: 彭道黎, 教授, 从事森林资源监测与评价研究。E-mail: dlpeng@bjfu.edu.cn

coverage increased first and then decreased with the increase of altitude. In 2000 and 2017, the vegetation coverage increased first and then decreased as the slope increased, and reached its maximum value at the slope of 25° – 35° . The order of vegetation coverage from large to small with the change of slope direction was shady slope, semi shady slope, semi sunny slope, and sunny slope. (4) When the altitude was less than 1 300 m and the slope was 15° – 35° , flat land, shady and semi shady slopes had good water and heat conditions, with easy vegetation recovery and the largest proportion of high vegetation coverage area. [Conclusion] The vegetation in Ansai District showed a trend of improvement from 2000 to 2017, with differences under terrain conditions such as altitude, slope, and slope aspects. Ecological restoration countermeasures should be formulated based on local conditions. [Ch, 2 fig. 6 tab. 27 ref.]

Key words: forest ecology; Loess Plateau; vegetation coverage; change monitoring; topographic differentiation

水土流失是黄土高原面临的严峻问题。严重的水土流失破坏土地资源, 导致土地荒漠化, 地表植被大量退化, 降低土地生产力^[1]。20世纪70年代以来, 随着自上而下大规模的“三北”(西北、华北和东北)防护林工程、退耕还林(草)工程和天然林保护工程等一系列重点生态工程的实施, 黄土高原水土流失治理取得了一定成效。人类活动强度减弱, 森林灌草面积增加^[2], 植被生长状况良好^[3], 植被净初级生产力呈增加趋势^[4], 生态环境得到较大改善^[5]。然而, 黄土高原生态环境治理新时期, 面临新的问题。有研究表明: 黄土高原林业工程建设接近环境承载潜力, 后期合理协调水土资源配置与植被建设是关键任务^[6]。地形是影响植被分布格局的主导因子, 通过地形差异研究植被分布规律, 可为制定合理的生态修复和管理对策提供依据。国内外有不少学者进行相关研究, 定量分析植被覆盖状况与高程、坡度和坡向间的关系, 并因地制宜提出造林和管理措施^[7-9]。目前黄土高原植被覆盖度变化研究多以MODIS、NOAA/AVHRR为数据源, 从地貌上分析整个黄土高原或者省范围内的植被覆盖情况^[10-11], 但以相对较高的空间分辨率开展中小尺度的研究对管理经营更有实践价值^[12-13]。陕西省延安市安塞区位于黄河中上游, 是黄土高原水土流失严重的地区之一, 生态环境脆弱, 也是“三北”防护林、退耕还林(草)工程实施的重点区域。近年来, 安塞区植被覆盖度有所提高, 生态环境得到改善, 但是已实施工程的成果巩固存在隐患, 质量效益有待提升。鉴于此, 本研究利用安塞区2000年Landsat TM和2017年Landsat OLI影像, 结合数字高程模型(DEM)生成的高程、坡度和坡向分析植被覆盖的变化及分布规律, 以期开展生态工程、提高生态系统稳定性和改善生态系统质量提供支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

安塞区($36^{\circ}30'45''$ ~ $37^{\circ}19'03''$ N, $108^{\circ}05'44''$ ~ $109^{\circ}26'18''$ E)位于陕西省北部, 延安市北部, 地处西北内陆黄土高原腹地, 属典型的黄土高原梁峁丘陵沟壑区。土地总面积2 950 km²(其中90%为坡地^[14]), 地势西北高、东南低, 海拔为997~1 731 m。地貌类型以黄土梁涧、黄土峁状丘陵、黄土梁峁丘陵和沟谷阶地为主。气候属中温带大陆性半干旱季风气候, 年均气温8.8℃, 年均降水量505.3 mm, 降水多集中在7-9月, 年均蒸发量1 000.0 mm, 远大于降水量, 干旱频发。土壤以黄绵土、绵沙土等黄土性土和灰褐土为主, 缺乏有机质和黏粒物质, 胶结能力差, 抗蚀能力低。因此, 研究区水土流失严重, 水土流失面积比例约97%, 属于强度水土流失区。处于森林草原植被带向暖温带落叶阔叶林带过渡地带, 植被及森林资源分布南北差异明显。天然次生林集中分布在南川四乡, 人工林由小叶杨 *Populus simonii*、山杏 *Armeniaca sibirica*、刺槐 *Armeniaca sibirica* 及白榆 *Ulmus pumila* 等树种构成^[15], 多分布在北部。

1.2 数据来源

以Landsat卫星影像为数据源, 由中国科学院地理空间数据云平台下载(<http://www.gscloud.cn/>)2000年的Landsat TM影像和2017年的Landsat OLI影像, 遥感影像空间分辨率为30 m, 轨道号分别为127/34和127/35。2期影像成像时间均为树木枝叶繁茂的6月, 质量较好, 没有山区积雪、云和雾等影响, 而且成像时间相近, 避免不同植被生长状况造成的误差, 有利于开展植被覆盖度的遥感分析比较。

为了开展植被覆盖度地带性特征分析,本研究还采用了地面分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM V1 数字高程产品。

1.3 影像预处理

在 ENVI 5.1 软件支持下对影像进行预处理。对影像进行辐射定标和大气校正,消除因传感器、大气条件、太阳位置和角度等引起的测量值与真实光谱反射率之间的差异。研究区沟壑纵横,复杂地形下遥感影像受传感器方位与太阳高度、方位等影响,阴坡接收到的照度较弱,亮度值较低,阳坡接收到的照度较强,亮度值较高。地形校正是复杂地形区遥感影像预处理的重要步骤。本研究应用了 SCS+C 地形校正^[16],消除地形起伏引起的影像辐射亮度值的变化,使影像更好地反映地物的光谱特征。最后采用相同投影的矢量边界数据裁剪获得研究区的遥感影像。

1.4 植被覆盖度提取

像元二分模型是植被覆盖度估算中常见的模型之一,其本质是简单的线性像元分解模型^[17]。一般情况下,像元包含的遥感信息与大气、土壤和植被类型等因素相关。像元二分模型设置了 S_{veg} 和 S_{soil} 2 个参数, S_{veg} 反映了像元内的植被信息,包括植被结构和种类等, S_{soil} 反映了包括土壤湿度、亮度、颜色和类型等与土壤相关的像元信息,从而削弱了大气、植被和土壤等因素对应影像信息的影像,保留了植被覆盖度信息。像元二分模型简单而且结果可靠,采用该模型估算植被覆盖度。归一化植被指数 (I_{NDV}) 与植被覆盖度之间存在较好的线性关系,能反映植被生长状态及植被覆盖等信息,构建的植被覆盖度计算公式^[18]为:

$$F_C = \frac{I_{NDV} - I_{NDVmin}}{I_{NDVmax} - I_{NDVmin}} \times 100\% \quad (1)$$

式 (1) 中: F_C 为植被覆盖度 (%); I_{NDV} 为归一化植被指数; I_{NDVmin} 为无植被覆盖像元的 I_{NDV} 值; I_{NDVmax} 为完全被植被所覆盖的像元的 I_{NDV} 值。根据 I_{NDV} 统计直方图,以 1% 确定阈值。

计算出来的植被覆盖度影像,将大于 1 的赋值为 1,小于 0 的赋值为 0,然后对植被覆盖度进行分级。根据已有研究^[19],将植被覆盖度分为 5 级:低植被覆盖度 ($F_C < 10\%$)、较低植被覆盖度 ($10\% \leq F_C < 30\%$)、中等植被覆盖度 ($30\% \leq F_C < 50\%$)、较高植被覆盖度 ($50\% \leq F_C < 70\%$) 和高植被覆盖度 ($F_C \geq 70\%$)。

对 2000 和 2017 年植被覆盖度采用差值法获取植被覆盖度变化值 (D),设置阈值进行标准化分级,将全区分为 7 个植被覆盖度变化等级: $D \leq -30\%$ 为极显著减少, $-30\% < D \leq -10\%$ 为显著减少, $-10\% < D \leq -5\%$ 为较显著减少, $-5\% < D \leq 5\%$ 为无显著变化, $5\% < D \leq 10\%$ 为较显著增加, $10\% < D \leq 30\%$ 为显著增加, $D > 30\%$ 为极显著增加。

1.5 地形信息提取

地形是植被分布的重要影响因素。利用 ArcGIS 软件从 DEM 数据中提取海拔、坡度和坡向数据,结合研究区实际情况进行分级,与植被覆盖度叠加,分析植被覆盖度在不同地形环境中的分布和变化差异。安塞区海拔为 997~1 731 m,将海拔分为 6 级。结合地形对植物长势的影响,借鉴水土流失调查中采用 8° 作为缓坡和斜坡界线的方法^[20-21],将坡度分为 6 级;依据地球公转以及太阳入射角,北半球西南坡最干燥,东北坡最潮湿,按湿润程度由高到低依次为东北向、北向、西北向、东向、西向、东南向、南向、西南向,考虑坡向对植被长势的影响,将其分为 5 级^[22-23]。地形要素分类情况见表 1。

表 1 地形因子分级及面积

Table 1 Terrain factor classification and area

等级	海拔/m	面积比例/%	坡度/(°)	面积比例/%	坡向	面积比例/%
1	<1 100	2.65	<5	4.99	平地	0.34
2	1 100~1 200	12.09	5~8	7.04	阴坡	25.30
3	1 200~1 300	29.55	8~15	24.39	半阴坡	24.36
4	1 300~1 400	37.54	15~25	38.68	半阳坡	24.37
5	1 400~1 500	15.95	25~35	20.73	阳坡	25.63
6	>1 500	2.21	>35	4.18		

2 结果与分析

2.1 2000和2017年植被覆盖度分布情况

2000和2017年安塞区平均植被覆盖度分别为24.98%和53.34%，呈明显上升趋势(表2)。利用2018年8月研究区内40个样点测量植被覆盖度数据进行精度验证，相关系数为0.7290，说明估算值与实际值具有一定的相关性。2000年安塞区植被覆盖度整体低，其中较低植被覆盖度占57.57%，低植被覆盖度占18.18%，中等植被覆盖度占16.34%。较高植被覆盖度和高植被覆盖度均很少，面积分别占4.28%和3.63%。由2000年安塞区植被覆盖度分级图(图1)可见：安塞区植被及森林资源分布南北差异显著，南部存在高植被覆盖度的天然次生林，北部植被覆盖度较低。

表2 2000和2017年安塞区植被覆盖度等级统计

Table 2 Statistics of vegetation coverage in Ansai District in 2000 and 2017

年份	低植被覆盖度		较低植被覆盖度		中等植被覆盖度		较高植被覆盖度		高植被覆盖度		平均植被覆盖度/%
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	
2000	536.21	18.18	1698.25	57.57	482.17	16.34	126.28	4.28	107.09	3.63	24.98
2017	87.02	2.95	487.64	16.53	815.68	27.65	749.60	25.41	810.37	27.47	54.34

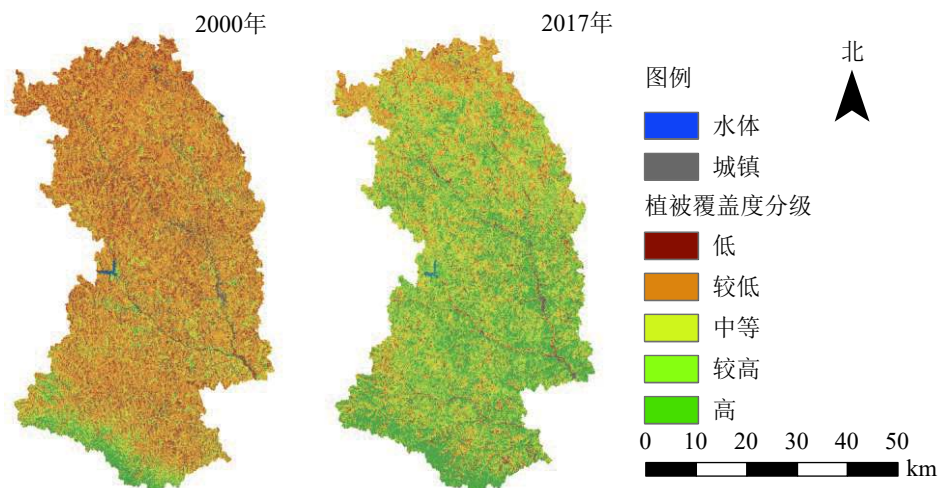


图1 2000和2017年植被覆盖度分级示意图

Figure 1 Vegetation coverage classification in 2000 and 2017

2017年安塞区植被覆盖度获得较大改善，植被覆盖度总体上较2000年大幅度提升。低和较低植被覆盖度面积减少，其中低植被覆盖度面积仅占2.95%。中等、较高和高植被覆盖度面积分别占27.65%、25.41%和27.47%。由2017年植被覆盖度分级图(图1)可见：安塞区植被覆盖度呈现由南向北递减趋势，北部主要是低和较低植被覆盖度区域，南部是高植被覆盖度的天然次生林地，河流沿岸和城镇周边为较高植被覆盖度区。

2.2 2000-2017年植被覆盖度变化

2000-2017年安塞区植被覆盖状况明显好转，区域内植被覆盖度呈现不同程度的增加(图2)。植被覆盖度显著和极显著增加面积占77.38%，其中极显著增加比例较大，占44.70%。植被覆盖度极显著增加区域分布在安塞区的河流沿岸，植被覆盖度显著增加区域主要集中在安塞区的西南部和北部。安塞区有177.83 km²植被覆盖度较显著减

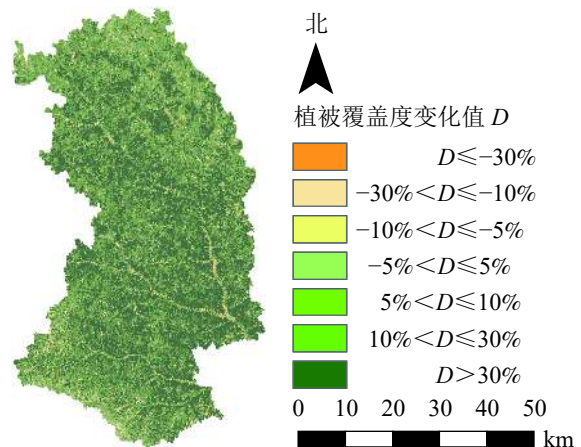


图2 2000和2017年植被覆盖度变化分级示意图

Figure 2 Vegetation coverage change classification map in 2000 and 2017

少，植被覆盖度无显著变化区域集中在南部的天然次生林地带，这些区域植被覆盖状况良好，改善空间不大。

人类活动是植被覆盖变化的影响因素。1999 年以来黄土高原大规模实施的退耕还林(草)、“三北”防护林、天然林保护等一系列重点林业工程是植被覆盖度增加的重要因素之一。根据《中国林业统计年鉴》获得安塞区 2001–2017 年的造林数据(表 3)。17 a 间，安塞区在退耕还林、天然林保护等林业生态工程的带动下，完成人工造林 1 148.95 km²，飞播造林 74.18 km²，封山育林 99.53 km²，修复退化林 13.34 km²。安塞区始终将人工造林、飞播造林和封山育林三者结合，增加森林植被覆盖度。2001–2003 年造林面积最多，但 2004–2006 年，由于干旱缺水，大量沙棘 *Hippophae rhamnoides* 人工林死亡导致植被覆盖度明显下降^[24]。封山育林按照自然规律，利用植被自我恢复功能培育森林资源，对迅速恢复和扩大植被意义重大。此外，自 2016 年起安塞区采用更新改造技术开展退化林修复，以提升森林质量，实现森林可持续经营。

表 3 安塞区造林面积统计

Table 3 Statistics of afforestation area in Ansai District

年份	造林面积/km ²				年份	造林面积/km ²			
	人工造林	飞播造林	新封山育林	退化林修复		人工造林	飞播造林	新封山育林	退化林修复
2001	341.73	14.17	3.33	–	2010	27.06	–	6.67	–
2002	213.84	13.33	3.33	–	2011	18.67	–	10.00	–
2003	180.94	13.33	2.67	–	2012	50.00	–	5.33	–
2004	6.66	6.67	6.00	–	2013	76.47	–	1.53	–
2005	21.33	–	6.67	–	2014	53.34	6.67	4.67	–
2006	33.73	–	3.33	–	2015	14.66	6.67	6.67	–
2007	20.80	–	3.33	–	2016	16.66	6.67	6.67	6.67
2008	41.27	–	13.33	–	2017	16.66	6.67	6.67	6.67
2009	15.13	–	9.33	–	合计	1 148.95	74.18	99.53	13.34

说明：–表示该项无数据

2.3 植被覆盖度的地形分异特征

2.3.1 植被覆盖度随海拔的变化规律 根据不同海拔植被覆盖度的统计(表 4)，2000 年安塞区植被覆盖度随海拔的增加大致呈降低趋势，2017 年植被覆盖度随海拔升高先增加后减少，在海拔 1 100~1 200 m 内植被覆盖度最高，较高和高植被覆盖主要集中在海拔 1 100~1 300 m 区域。

比较各海拔等级的植被覆盖度，2000 年研究区整体植被覆盖度低，各海拔等级内，较低植被覆盖度所占面积比例最大，为 49.84%~60.32%；高植被覆盖面积比例最少，为 1.88%~5.44%。2017 年海拔 < 1 300 m 区域，面积比例最大的是高植被覆盖度；海拔 > 1 300 m 区域，中等植被覆盖度面积比例最大；海拔 > 1 500 m 时，30.10% 为较低植被覆盖度。2000 和 2017 年，各海拔等级间的植被覆盖度面积随海拔增加呈先增加后减少的趋势，拐点海拔区间为 1 200~1 400 m(表 4)。

表 4 安塞区不同海拔植被覆盖度的面积变化

Table 4 Area of different vegetation coverage at different altitudes in Ansai District

植被覆盖度	不同海拔植被覆盖度面积变化/km ²											
	<1 100 m		1 100~1 200 m		1 200~1 300 m		1 300~1 400 m		1 400~1 500 m		>1 500 m	
	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年
低	13.02	8.63	42.73	12.65	106.73	20.67	222.77	33.92	110.71	20.22	17.96	4.65
较低	38.95	17.28	205.29	43.12	525.59	106.89	650.04	206.63	267.36	112.57	38.17	19.61
中等	19.44	16.68	83.21	78.72	183.31	240.82	145.59	326.54	49.40	136.02	5.40	17.93
较高	5.17	15.08	18.55	97.19	38.32	250.83	40.02	262.54	17.34	100.34	1.94	12.02
高	1.59	20.62	6.69	124.98	17.54	253.46	48.70	277.79	25.60	101.69	1.69	11.04

2.3.2 植被覆盖度随坡度的变化规律 根据不同坡度植被覆盖度的统计(表5),2000年安塞区植被覆盖度随坡度增加逐渐增加,增幅很小;2017年植被覆盖度随坡度增加先增加后减少,坡度为25°~35°时,植被覆盖度最大。

表5 安塞区不同坡度植被覆盖度的面积

Table 5 Area of different vegetation coverage at different slopes in Ansai District

植被覆盖度	不同坡度植被覆盖度面积/km ²											
	<5°		5°~8°		8°~15°		15°~25°		25°~35°		>35°	
	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年
低	40.89	12.25	53.28	14.13	156.51	34.70	179.69	29.56	70.72	8.73	12.81	1.36
较低	77.84	37.87	112.48	50.15	400.70	146.80	674.01	178.09	381.89	77.14	78.48	16.06
中等	19.17	41.18	28.10	57.86	108.00	199.47	193.44	310.47	112.61	169.40	25.02	38.32
较高	4.88	29.46	7.07	43.77	27.98	165.49	50.20	292.10	26.76	171.82	4.44	35.36
高	4.37	26.42	6.69	42.28	25.95	173.03	43.16	331.22	19.21	184.66	2.43	31.98

比较各坡度等级的植被覆盖度,2000年较低植被覆盖度面积比例最大,为52.90%~63.67%;较高植被覆盖度面积较少,高植被覆盖度面积仅占1.97%~3.78%。2017年,坡度<15°和>35°区域中,中等植被覆盖度面积比例最大,在27%左右;坡度15°~25°、25°~35°,高植被覆盖度面积比例最大,分别为29.04%和30.21%。各植被覆盖度面积随海拔增加呈先增加后减少的趋势,15°~25°坡度的面积最大,但2017年低植被覆盖度在8°~15°坡度时,面积最大(表5)。

2.3.3 植被覆盖度随坡向的变化规律 根据不同坡向植被覆盖度的统计(表6),安塞区植被覆盖度由高到低依次为阴坡、半阴坡、半阳坡、平地 and 阳坡。分析各坡向等级内的植被覆盖度,2000年各坡向内,较低植被覆盖度面积比例为50%以上,但2017年,平地、阴坡和半阴坡中以高植被覆盖度为主要类型,面积比例分别为28.84%、34.8%和30.78%;半阳坡、阳坡以中等植被覆盖度为主要类型,面积比例分别为32.63%和29.54%。说明阴坡、半阴坡植被覆盖改善优于阴坡、半阴坡。2000年,阴坡植被长势好,面积大,但较低植被覆盖度在阳坡面积为477.43 km²,大于阴坡的390.71 km²。2017年,低和高植被覆盖度在阴坡面积最大,较低、中等和高植被覆盖度在阳坡面积最大。

表6 安塞区不同坡向植被覆盖度的面积

Table 6 Area of different vegetation coverage in each slope direction in Ansai District

植被覆盖度	不同坡向植被覆盖度面积/km ²									
	平地		阴坡		半阴		半阳		阳坡	
	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年	2000年	2017年
低	2.73	0.68	149.15	29.73	127.66	22.92	112.69	21.33	121.68	26.07
较低	4.77	2.00	390.71	116.14	409.99	114.08	442.5	122.67	477.43	151.22
中等	1.51	2.38	128.30	170.94	119.73	184.08	117.5	212.48	119.30	246.82
较高	0.44	2.05	41.25	169.86	32.63	176.63	24.78	190.21	22.25	199.24
高	0.50	2.87	36.69	259.83	28.45	221.29	21.02	172.47	15.16	133.14

3 讨论

地形控制了太阳辐射和降水的空间再分配过程,一定程度上制约了植被的生长和空间分布,尤其是在地形复杂的山区。黄土高原地域广阔、地形复杂,由于地理本底(如水热条件)和社会经济因素(如土地利用类型)的影响,不同地形类型区域的植被格局不同。

海拔通过影响温度、湿度等资源的再分配,以及人类活动频率影响植被覆盖率。安塞区海拔<1 100 m的区域,地势平坦、水热条件好,人工造林以及自然植被恢复的成活率高,所以植被覆盖度很快得到提高。随海拔升高,气温降低,海拔1 400 m以上主要为丘陵沟壑分布区,沟壑纵横,植被稀疏,侵蚀剧烈,土壤保水能力差,有机质少,给人工造林和植被自然恢复增加了难度,植被覆盖度增幅受限。

坡度影响地表的物质流动和能量循环,一般坡度越大的地区,积温越少,投影面积相同条件下降水量越小,土层持水性能也越差。研究表明:15°~35°坡度内,土壤有机质含量最高,蓄水条件好,是植被覆盖的稳定区域;而坡度<5°时,人类活动在平坦土地上较为频繁,对植被覆盖有一定影响^[25]。安塞区坚持实施坡度>25°以上的坡耕地先退耕还林,所以15°~35°坡度范围内,植被恢复好,以高植被覆盖度为主;坡度<15°区域人类活动频繁,耕地面积大,使得植被覆盖度较低,以中等植被覆盖度为主;坡度>35°区域,植被生长受水热条件限制,所以中等植被覆盖度面积比例最大。

坡向影响坡面接受的太阳辐射以及地表与风向的夹角,从而影响光、热、水、土等因子的分配^[26]。安塞区处于干旱半干旱区域,阴坡日照少、温度低,蒸发量较少,土壤保持相对较高的湿度,所以各坡向植被覆盖度由高到低依次为阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡。2017年平地、阴坡和半阴坡以高植被覆盖度为主,半阳坡、阳坡的中等植被覆盖度面积比例最大,符合此规律。近年来,安塞区重视重点区域的荒坡治理,采取承包造林的方式,阳坡栽植侧柏 *Platycladus orientalis*, 阴坡栽植油松 *Pinus tabulaeformis* 的思路,选用营养钵苗木造林,局部区域治理成效显著。安塞区内阴坡、半阴坡和半阳坡面积相近,但2017年较低、中等和高植被覆盖度在阳坡面积最大,说明近年来,人工造林使得阳坡的植被在较低、中等和高植被覆盖度上的改善程度大于其他坡向^[27]。

4 结论

安塞区是黄土高原生态环境治理的重点区域,植被覆盖度从2000年的24.98%增长到2017年的53.34%,河流沿岸植被显著增加,整体植被呈改善趋势。地形是影响植被覆盖度时空动态变化的重要自然因子。安塞区内,坡度25°以上区域治理重点是保持水土,应根据山地肥力引种沙棘、苜蓿 *Medicago*、紫穗槐 *Amorpha fruticosa* 等根系发达的植物。海拔1300~1400 m、坡度15°~25°的区域占整个研究区面积比例的35%以上,这些区域应采取不同林业工程的实施模式,适地适树、因地制宜,才能加快实现黄土高原大绿化进程。

5 参考文献

- [1] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J].自然资源学报,2019,34(8):1748-1758.
ZHANG Wenqiang, SUN Congjian, LI Xingong. Vegetation cover change and ecological effect assessment in the Loess Plateau of Southwest Shanxi Province based on remote sensing image [J]. *J Nat Resour*, 2019, 34(8): 1748-1758.
- [2] 赵亮,刘宇,罗勇,等.黄土高原近40年人类活动强度时空格局演变[J].水土保持研究,2019,26(4):306-313.
ZHAO Liang, LIU Yu, LUO Yong, et al. Temporal and spantial evolution of human impact intensity on the Loess Plateau in recent 40 years [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2019, 26(4): 306-313.
- [3] 修丽娜,颜长珍,钱大文,等.生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力[J].水土保持通报,2019,39(4):214-221.
XIU Lina, YAN Changzhen, QIAN Dawen, et al. Analysis of spatial-temporal change and driving forces of vegetation in Loess Plateau under background of ecological engineering [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2019, 39(4): 214-221.
- [4] 董孟龙.基于NPP和生态绿当量的黄土高原土地利用生态效益研究[D].西安:长安大学,2018.
DONG Menglong. *Ecological Benefits of Land Use in the Loess Plateau Based on NPP and Ecological Green Equivalent*[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [5] 李粉玲,常庆瑞,申健,等.黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例[J].应用生态学报,2015,26(12):3811-3817.
LI Fenling, CHANG Qinrui, SHEN Jian, et al. Dynamic monitoring of ecological environment in loess hilly and gully region of Loess Plateau based on remote sensing: a case study on Fuxian County in Shaanxi Province, Northwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26(12): 3811-3817.
- [6] 杨波,王全九,许晓婷,等.还林还草工程后榆林市NDVI时空变化趋势[J].生态学杂志,2019,38(6):1839-1848.
YANG Bo, WANG Quanjiu, XU Xiaoting, et al. NDVI spatiotemporal variation in Yulin after grain for green project [J]. *Chin J Ecol*, 2019, 38(6): 1839-1848.

- [7] 田地, 刘政, 胡亚林. 福州市植被覆盖度时空特征及与地形因子的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(6): 1158 – 1165.
TIAN Di, LIU Zheng, HU Yalin. Spatial-temporal characteristics of vegetation coverage and the relationship to topographic factors in Fuzhou City [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(6): 1158 – 1165.
- [8] ZHOU Qiuwen, WEI Xiaocha, ZHOU Xu, *et al.* Vegetation coverage change and its response to topography in a typical karst region: the Lianjiang River Basin in Southwest China [J]. *Environ Earth Sci*, 2019, **78**(6): 191 – 200.
- [9] EISENLOHR P V, ALVES L F, BERNACCI L C, *et al.* Disturbances, elevation, topography and spatial proximity drive vegetation patterns along an altitudinal gradient of a top biodiversity hotspot [J]. *Biodiversity Conserv*, 2013, **22**(12): 2767 – 2783.
- [10] 刘宇, 傅伯杰. 黄土高原植被覆盖度变化的地形分异及土地利用/覆被变化的影响[J]. 干旱区地理, 2013, **36**(6): 1097 – 1102.
LIU Yu, FU Bojie. Topographical variation of vegetation cover evolution and the impact of land use/cover change in the Loess Plateau [J]. *Arid Land Geogr*, 2013, **36**(6): 1097 – 1102.
- [11] 李登科, 王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(1): 1 – 10.
LI Dengke, WANG Zhao. Changes of fractional vegetation coverage after returning farmland to forests and its response to climate in Shaanxi [J]. *Chin J Ecol*, 2020, **39**(1): 1 – 10.
- [12] 闫瑞, 张晓萍, 闫胜军, 等. 1995–2014年北洛河流域植被恢复的地形分布特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, **37**(11): 1598 – 1603.
YAN Rui, ZHANG Xiaoping, YAN Shengjun, *et al.* Topographical distribution characteristics of vegetation restoration in the Beiluo River Basin from 1995 to 2014 [J]. *J Northeast Univ Nat Sci*, 2016, **37**(11): 1598 – 1603.
- [13] 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(11): 2896 – 2903.
LI Dengke, FANG Jianzhong, WANG Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage in Shaanxi Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(11): 2896 – 2903.
- [14] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响: 以陕西省安塞县为例[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(11): 1866 – 1878.
ZHOU Decheng, ZHAO Shuqing, ZHU Chao. Impacts of the sloping land conversion program on the land use/cover change in the Loess Plateau: a case study in Ansai County of Shaanxi Province, China [J]. *J Nat Res*, 2011, **26**(11): 1866 – 1878.
- [15] 徐勇, 张同升, 杨勤科. 黄土高原安塞县生态退耕情景及农业影响[J]. 地理学报, 2006, **61**(4): 369 – 377.
XU Yong, ZHANG Tongsheng, YANG Qinke. Ecological de-farming scenarios and their influences on agricultural development of county on Loess Plateau [J]. *Acta Geogr Sin*, 2006, **61**(4): 369 – 377.
- [16] 穆悦, 曹晓阳, 冯益明. 地形复杂山区常用植被指数的地形校正对比[J]. 地球信息科学学报, 2016, **18**(7): 951 – 961.
MU Yue, CAO Xiaoyang, FENG Yiming. Comparison of topographic correction on commonly used vegetation indices in rugged terrain area [J]. *J Geo-Inf Sci*, 2016, **18**(7): 951 – 961.
- [17] LEPRIEUR C, VERSTRAETE M M, PINTY B. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data [J]. *Remote Sensing Rev*, 1994(10): 265 – 284.
- [18] 张超, 余树全, 李土生. 基于多时相 Landsat 影像的庆元县植被覆盖变化研究[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(1): 72 – 79.
ZHANG Chao, YU Shuquan, LI Tusheng. Image analysis of vegetation coverage and changes (1994–2007) in Qingyuan County using multi-temporal Landsat remote sensing [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(1): 72 – 79.
- [19] 高健健, 穆兴民, 孙文义. 1981–2012年黄土高原植被覆盖度时空变化特征[J]. 中国水土保持, 2016(7): 52 – 56.
GAO Jianjian, MU Xingmin, SUN Wenyi. Spatial-temporal change of vegetation coverage in the Loess Plateau from 1981 to 2012 [J]. *Soil Water Conserv China*, 2016(7): 52 – 56.
- [20] 中华人民共和国水利部. 水土保持综合治理规划通则: GB/T 15772–2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 彭文甫, 周介铭, 徐新良, 等. 成都平原及其周边区域植被覆盖动态监测[J]. 地球与环境, 2017, **45**(2): 193 – 202.
PENG Wenfu, ZHOU Jieming, XU Xinliang, *et al.* Dynamic monitoring of fractional vegetation cover of Chengdu Plain and its surrounding area in China [J]. *Earth Environ*, 2017, **45**(2): 193 – 202.

- [22] 李俊清. 森林生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 93 – 94.
- [23] 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.
ZHAO Wenhui, CHEN Ni, YAN Rui, *et al.* Study on variation of the vegetation coverage based on terrain factors in the Berluo River Basin in the past 20 years [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2016, **23**(4): 10 – 14.
- [24] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(3): 449 – 460.
ZHAO Anzhou, ZHANG Anbing, LIU Haixin, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for green project in the Loess Plateau [J]. *J Nat Resour*, 2017, **32**(3): 449 – 460.
- [25] 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.
ZHANG Shiyu, ZHANG Yi, WANG Changquan, *et al.* Vegetation coverage and its correlation with topographic factors in upstream watershed of Minjiang River [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2018, **38**(1): 69 – 75.
- [26] 汤巧英, 戚德辉, 宋立旺, 等. 基于 GIS 和 RS 的延河流域植被覆盖度与地形因子的相关性研究[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(4): 198 – 203.
TANG Qiaoying, QI Dehui, SONG Liwang, *et al.* Correlation of vegetation coverage and topographic factors in Yanhe River Basin based on GIS and RS [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2017, **24**(4): 198 – 203.
- [27] 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.
ZHAO Ting, BAI Hongying, DENG Chenhui, *et al.* Topographic differentiation effect on vegetation cover in the Qinling Mountains from 2000 to 2016 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(12): 4499 – 4509.