

延安市退耕过程植被覆盖度变化及其影响因子分析*

朱会利^{1,2} 杨改河¹ 韩磊³

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054;

3. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054)

摘要: 基于像元二分模型, 利用 2000—2012 年的 MODIS 植被指数资料分析了延安市退耕还林过程中植被覆盖度的变化及影响因子。研究表明, 2000—2012 年延安市植被覆盖度呈极显著增长趋势, 由 43.4% 增加到 66.8%, 增幅达 53.9%。延安市各区县的植被覆盖度在波动中均呈现增长趋势, 增幅较大的为子长县、延川县和延长县, 分别为 212.8%、134.2% 和 127.8%, 增幅较小的为黄龙县和黄陵县, 分别为 28.9% 和 29.2%。植被覆盖状况总体呈现稳定的改善状态, 改善极显著和显著的县区面积占研究区总面积的 74.04%, 改善不明显的县区面积占研究区总面积的 23.91%, 退化显著和极显著的县区面积仅占研究区总面积的 2.05%。研究区高覆盖度植被和中覆盖度植被面积增加, 低覆盖度植被面积减少, 退耕初期由大到小表现为: 低覆盖度植被面积、高覆盖度植被面积、中覆盖度植被面积, 退耕后期由大到小分别为: 高覆盖度植被面积、中覆盖度植被面积、低覆盖度植被面积, 表明该区域植被覆盖度结构转好。植被覆盖度变化受 6—8 月份的降水量影响不大, 相关性较低, 但和累计退耕还林面积有较强的正相关性。说明退耕还林工程的实施增加了地面植被覆盖度, 改善了植被覆盖的结构, 植物应对环境变化的能力越来越强, 降水量的年际变化对植被覆盖度造成的影响越来越小。

关键词: 植被覆盖度 遥感 退耕还林 动态变化 影响因子

中图分类号: TP751; Q94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0272-09

Analysis of Fractional Vegetation Coverage Changes and Its Influence Factors during Farmland Returned to Forest Period in Yan'an City

Zhu Huili^{1,2} Yang Gaihe¹ Han Lei³

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the dimidiated pixel model, the changes of fractional vegetation coverage and its influence factors were analyzed by using the MODIS vegetation index in 2000—2012 during the period of returning farmland to forest in Yan'an City. The results indicated that the fractional vegetation coverage in Yan'an City was increased by 53.9%, which was changed from 43.4% to 66.8%. Fractional vegetation coverage in the districts and counties of Yan'an City was increasing in fluctuation, and those of Zichang County, Yanchuan County and Yanchang County were increased greatly by 212.8%, 134.2% and 127.8%, and those of Huanglong County and Huangling County were increased by 28.9% and 29.2%, respectively. The fractional vegetation coverage was generally improved steadily and remarkably, and the area with remarkable improvements took 74.04% of the total research area, inconspicuous improvements took 23.91% and remarkable degenerations took 2.05%; the area with high coverage and moderate coverage in the research area were increased while the area with low coverage was decreased. In the early

收稿日期: 2015-05-12 修回日期: 2015-06-16

* 林业公益性行业科研专项资助项目(201304312)和陕西省自然科学基金资助项目(2014JM2-4041)

作者简介: 朱会利, 博士生, 长安大学讲师, 主要从事资源环境遥感研究, E-mail: zhuhuil@chd.edu.cn

通讯作者: 杨改河, 教授, 博士生导师, 主要从事资源与环境生态研究, E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

stage, the area of returning farmland to forest can be listed in descending order as follow: low coverage area, high coverage area, and moderate coverage area, while in the later stage the descending order are: high coverage area, moderate coverage area and low coverage area, which showed that the coverage structure in the research area was improving. The changes of coverage were influenced little by precipitation amount from June to August, and it had strong positive correlation with the accumulated conversion area of farmland to forest. Therefore, it can be concluded that the implementation of returning farmland to forest increased the vegetation coverage and improved the structure of fractional vegetation coverage. As plants are more and more capable of adjusting to the environmental changes, the inter-annual variations of precipitation have decreasing influences on the fractional vegetation coverage.

Key words: Fractional vegetation coverage Remote sensing Farmland returned to forest Dynamic change Influence factors

引言

植被覆盖度(Fractional vegetation coverage, FVC)是植被(叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,是植物群落覆盖地表状况的一个综合量化指标。植被作为生态系统的主要组成成分,是生态系统存在的基础,在陆地表面的能量交换过程、生物地球化学循环过程和水文循环过程中扮演着重要的角色,对生态环境的调节起着巨大作用^[1-7]。

测量植被覆盖度的方法依据监测手段可分为地面测量法和遥感测量法两大类。地面测量法成本较高,野外操作很不方便,在大范围内快速提取植被覆盖度比较困难^[8-10]。遥感技术的发展为植被覆盖度测量方法的改进提供了技术基础,遥感测量法逐渐取代了传统的地面测量法,目前已成为地表植被覆盖度变化监测的主要手段。利用遥感数据提取植被覆盖度的方法主要有经验模型法、植被指数法和混合像元分解法^[11-17]。经验模型法是利用某单一波段、波段组合或计算得到的植被指数与实测植被覆盖度建立回归模型,在局部区域具有较高精度,但在空间应用上具有局限性,不具有普遍意义。混合像元分解法是将遥感影像的像元分解为植被信息和非植被信息两部分,估算其中植被信息的比重,即植被覆盖度。混合像元分解法不需要进行大范围的野外考察,经济方便,还可以利用不同时相的遥感影像估算植被覆盖度,适于植被覆盖度的动态监测研究^[18]。

植被的分布受多种因素的影响,首先是自然因素的制约,受到地球内部作用(土壤母质、土壤类型等)以及外部作用(气温、降水等)综合作用的影响;此外人类活动也在很大程度上影响着植被覆盖的变化^[19-20]。延安市自1999年推行退耕还林工程以来,累计退耕还林面积已达 $6.067 \times 10^5 \text{ hm}^2$,土地利

用结构发生巨大改变,这必然影响植被的覆盖状况。准确地了解植被覆盖的动态变化,是客观评价退耕还林工程实施成果的一项重要指标。本文利用MODIS资料,采用象元二分模型,分析延安市的植被覆盖度动态变化。

1 研究方法

1.1 研究区概况

延安市地处黄土高原腹地,黄河中游,属于黄土丘陵沟壑区。境内地形复杂,沟壑纵横、梁峁起伏,干旱少雨,加之历代战乱破坏,人口急剧增加,传统“散牧”放羊等因素,使境内的植被每况愈下,水土流失严重,延安地区成为黄土高原乃至全国水土流失最严重的区域之一。1999年,延安市总土地面积为 3.7 万 km^2 ,其中水土流失面积达 2.88 万 km^2 ,水土流失面积占总面积的78.4%,年均侵蚀模数为 9000 t/km^2 ,年入黄泥沙2.58亿t,区域生态环境呈现出日益恶化的趋势。为了遏制严重的水土流失,1999年开始实施以改善生态环境为主要目的的退耕还林工程。经过十几年的努力,截至2012年,全市累计治理水土流失面积 1.45 万 km^2 ,年均治理水土流失面积达到 1100 km^2 ,水土流失治理程度达到53%,年均土壤侵蚀模数由 9000 t/km^2 下降到 7000 t/km^2 ,入黄泥沙由每年的2.58亿t下降到1.96亿t,生态环境得到了有效恢复。

1.2 数据来源及预处理

卫星遥感资料来自美国数位地球研究中心(Land Processes Distributed Active Archive Center, LPDAAC, NASA),数据类型为MODIS植被指数产品MOD13Q1,为陆地2级标准数据产品,内容为栅格的归一化植被指数和增强型植被指数(NDVI/EVI),空间分辨率250 m。该数据集统一采用SIN GRID投影并已进行去云、辐射校正、大气校正等处理^[21]。数据的时间为2000—2012年13年间7—8

月份的遥感数据,这也与延安市实施退耕还林工程的时间大致一致,在季节上也是典型的生长季,为植被覆盖度最好的时候^[22]。利用 ArcGIS 10.0 对延安市边界图进行裁剪。最大 NDVI 可反映一年中植被生长的最好状况,为了在年际间对植被覆盖进行客观比较,在 ERDAS IMAGINE 软件中利用最大值合成法,对各年的 NDVI 进行最大值合成。

1.3 像元二分模型

像元中的植被覆盖结构有所不同,据此可以分为均一像元和混合像元两类。当植被完全覆盖像元时,其植被覆盖度为 1(100%),属于均一像元;如像元不能被植被完全覆盖,其植被覆盖度小于 1,这种混合结构是由植被与非植被构成的,属于混合像元。像元二分模型是混合像元分解模型中最常用的线性模型,它假设一个像元的地表由有植被覆盖部分地表与无植被覆盖部分地表组成,像元信息可表达为由植被覆盖部分所贡献的信息和无植被覆盖部分贡献的信息之和,权重为各部分在像元中的面积比例。

根据像元二分模型的原理,通过遥感传感器所观测到的光谱信息(S)是由植被覆盖部分所贡献的信息(S_v)和无植被覆盖(裸土)部分所贡献的信息(S_s)两部分组成,即

$$S = S_v + S_s \quad (1)$$

设像元中植被覆盖的面积所占比例为 f_{veg} ,即为该像元的植被覆盖度,则裸土覆盖的面积比例为 $1 - f_{veg}$ 。如果全由植被所覆盖的均一像元所得的遥感信息为 S_{veg} ,则混合像元中的植被部分所贡献的信息 S_v 可以表示为

$$S_v = S_{veg} f_{veg} \quad (2)$$

如果全由裸土所覆盖的均一像元所得的遥感信息为 S_{soil} ,则混合像元的无植被覆盖成分所贡献的信息 S_s 可以表示为

$$S_s = S_{soil} (1 - f_{veg}) \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1)可以得到

$$S = S_{veg} f_{veg} + S_{soil} (1 - f_{veg}) \quad (4)$$

对式(4)进行变换,可以得到植被覆盖度为

$$f_{veg} = \frac{S - S_{soil}}{S_{veg} - S_{soil}} \quad (5)$$

式(5)表达了遥感光谱信息与植被覆盖度的关系。

归一化植被指数 (NDVI) 被定义为近红外波段与可见光红光波段数值之差和这两个波段数值之和的比值,即

$$I_{NDVI} = \frac{R_{nir} - R_{ris}}{R_{nir} + R_{ris}} \quad (6)$$

式中 R_{nir} ——物体在近红外波段附近的反射率

R_{ris} ——物体在可见光附近的反射率

根据像元二分模型,一个像元的 NDVI 值是由植被覆盖部分所贡献的信息 $NDVI_{veg}$ 和无植被覆盖(裸土)部分所贡献的信息 $NDVI_{soil}$ 这两部分组成,也一样适合式(5)的条件,因此可以将 NDVI 代入其中,得到混合像元法估算植被覆盖度的基本公式为

$$f_{veg} = \frac{I_{NDVI} - I_{NDVI_{soil}}}{I_{NDVI_{veg}} - I_{NDVI_{soil}}} \quad (7)$$

$NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 二者的值理论上应该为 0 和 1,但由于受地面状况和植被类型不同等因素的影响,实际值也会随着时间和空间而改变。

本文参数取给定置信度区间的最大值和最小值。置信度的取值主要参照图像的清晰度和大小等情况来决定。为了便于比较,提取 2000—2012 年 NDVI 最大值图像,在 NDVI 频率累积表上取频率为 99.5% 的 NDVI 值为 $NDVI_{max}$,取频率为 0.5% 的 NDVI 为 $NDVI_{min}$ ^[18]。植被覆盖度的定量转换在 ERDAS IMAGE 9.2 软件下通过 Modeler 实现,从而得到不同时相的植被覆盖度灰度图。

1.4 植被覆盖度的分级

为了直观地表达研究区植被覆盖度的空间分布情况,在 ArcMap 下进行制图,植被覆盖度的划分以 $f_{veg} = 0$ 时为无植被,其余采用等间距分类,每间隔 10% 划分为一级,共分为 11 个等级。在 ERDAS IMAGE 9.2 软件下,利用建模工具,依据植被覆盖度灰度值对其进行密度分割,得到不同时期的植被覆盖度等级图。为了计算不同等级植被覆盖度所占面积的比例,对不同年份图像中各植被覆盖度等级的像元个数进行统计。分析植被覆盖度结构的变化时,参照李登科等^[18]的研究,对延安市植被覆盖度进行等级划分, $f_{veg} < 30\%$ 为低覆盖度, $30\% \leq f_{veg} < 60\%$ 为中覆盖度, $f_{veg} \geq 60\%$ 为高覆盖度。

1.5 植被覆盖度变化趋势分析方法

利用延安市及各区县 2000—2012 年的每年植被覆盖度,在像元尺度上进行线性回归,得到逐像元回归斜率,计算公式为

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n f_i t_i - \sum_{i=1}^n f_i \sum_{i=1}^n t_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (8)$$

式中 B ——拟合直线的斜率

f_i —— i 年的植被覆盖度

t_i ——年份

n ——研究年数,取值 13

拟合直线的斜率可以反映 2000—2012 年延安市及各区县植被覆盖度的变化趋势。斜率为正,表

明植被覆盖度增加,斜率为负,表明植被覆盖度减小。显著性趋势检验采用相关系数的统计检验方法进行,如果相关系数通过置信度 0.05、0.01 的显著性水平($p < 0.05$ 、 $p < 0.01$),则认为植被覆盖度增加或减小趋势分别为显著和极显著,否则认为变化不显著。

植被覆盖度变化率计算公式为

$$f_{cr} = \frac{13B}{f_{ave}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 f_{cr} ——植被覆盖度变化率

f_{ave} ——2000—2012 年的平均植被覆盖度

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度的年际变化

2000—2012 年延安市植被覆盖度分布如图 1 所示。统计每年的植被覆盖度,计算其年平均值,并绘制延安市以及各区县的植被覆盖度变化曲线,如图 2 所示。2000 年退耕初期,子长县、延川县和吴起县植被覆盖度较低,黄龙县和黄陵县的植被覆盖度较高。这与延安市自然地理分布特征相一致,延安市北部位于黄土高原丘陵沟壑区,植被稀少,灌木丛较多,稀树灌木丛草原占较大面积;南部是桥山和黄龙山林区保存有大面积的天然次生林,植被覆盖较好。2000—2012 年延安市植被覆盖度整体呈增

长趋势,由 43.4% 增加到 66.8%,增幅达 53.9%,线性增长趋势呈极显著水平。延安市各区县的植被覆盖度在波动中均呈现增长趋势,其中富县、黄龙县和黄陵县的植被覆盖度线性增长趋势达显著水平,其他县区线性增长趋势均达极显著水平(表 1)。植被覆盖度变化幅度较大的为子长县、延川县和延长县,分别由 2000 年的 17.2%、24.3% 和 25.2% 增加到 2012 年的 53.8%、56.9% 和 57.4%,增幅分别为 212.8%、134.2% 和 127.8%,黄龙县和黄陵县的植被覆盖度变化较小,增幅分别为 28.9% 和 29.2%。

2.2 植被覆盖度的变化趋势

基于 2000—2012 年延安市植被覆盖度图,计算每个像元的植被覆盖度与时间的相关性,进行显著性检验,制作植被覆盖度的变化趋势图(图 3),并统计不同像元所占的比例。延安市植被覆盖状况总体呈现稳定的改善状态,改善极显著($p < 0.01$)的区县面积占研究区总面积的 39.17%,改善显著($p < 0.05$)的区县面积占研究区总面积的 34.87%,改善不明显的区县面积占研究区总面积的 23.91%,退化显著的区县面积占研究区总面积的 1.32%,退化极显著的区县面积占研究区总面积的 0.73%。植被覆盖度改善极显著和显著的区域主要分布在延安市的北部区域,该区域在退耕还林开始时覆盖度较低,是工程实施的重点区域,工程实施后该区域林地

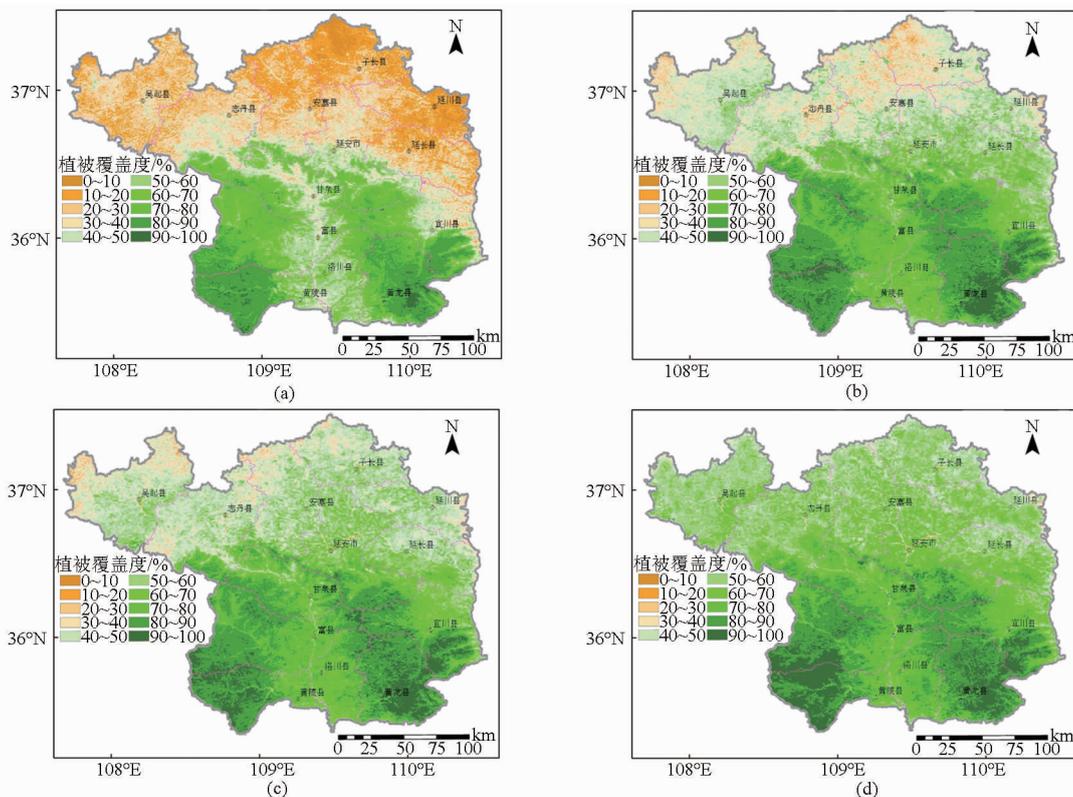


图 1 2000—2012 年延安市植被覆盖度分布图

Fig. 1 Distribution of FVC in Yan'an City from 2000 to 2012

(a) 2000 年 (b) 2004 年 (c) 2008 年 (d) 2012 年

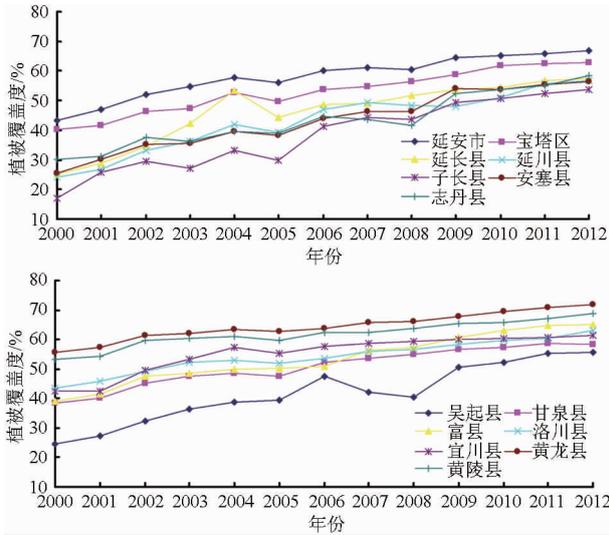


图2 2000—2012年延安市及各区县植被覆盖度的变化
Fig.2 Change of FVC in different areas of Yan'an City from 2000 to 2012

表1 2000—2012年延安市及各区县植被覆盖度线性回归方程

Tab.1 Equations of linear regression of FVC in different areas of Yan'an City from 2000 to 2012

区域	回归方程	R ²
延安市	$y = 1.7971x + 45.474$	0.960**
宝塔区	$y = 1.9105x + 39.677$	0.981**
延长县	$y = 2.4489x + 29.027$	0.902**
延川县	$y = 2.5896x + 24.835$	0.966**
子长县	$y = 2.9599x + 17.573$	0.973**
安塞县	$y = 2.5445x + 25.350$	0.984**
志丹县	$y = 2.2637x + 27.508$	0.965**
吴起县	$y = 2.5037x + 24.217$	0.959**
甘泉县	$y = 1.6908x + 38.906$	0.972**
富县	$y = 2.1612x + 38.366$	0.986*
洛川县	$y = 1.4486x + 43.997$	0.979**
宜川县	$y = 1.5111x + 44.665$	0.898**
黄龙县	$y = 1.2248x + 55.963$	0.981*
黄陵县	$y = 1.1292x + 53.964$	0.956*

注: y 为植被覆盖度, x 为时间序列; * 表示在 $p < 0.05$ 水平相关性显著, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平相关性极显著。下同。

面积的快速增加使植被覆盖度变化较为剧烈;延安市的南部地区由于天然次生林较多,该区域不是退耕还林工程实施的主要区域,工程实施后该区域植被变化不明显。其中,子长县和安塞县植被覆盖状况变化趋势较为显著,子长县改善极显著 ($p < 0.01$) 的面积占其总面积的 62.53%,改善显著 ($p < 0.05$) 的面积占其总面积的 33.82%;安塞县改善极显著 ($p < 0.01$) 的面积占其总面积的 57.14%,改善显著 ($p < 0.05$) 的面积占其总面积的 28.46%。黄龙县和黄陵县植被覆盖状况变化趋势较缓,黄龙县改善极显著 ($p < 0.01$) 的面积占其总面积的

5.33%,改善显著 ($p < 0.05$) 的面积占其总面积的 27.07%;黄陵县改善极显著 ($p < 0.01$) 的面积占其总面积的 7.39%,改善显著 ($p < 0.05$) 的面积占其总面积的 21.54%。

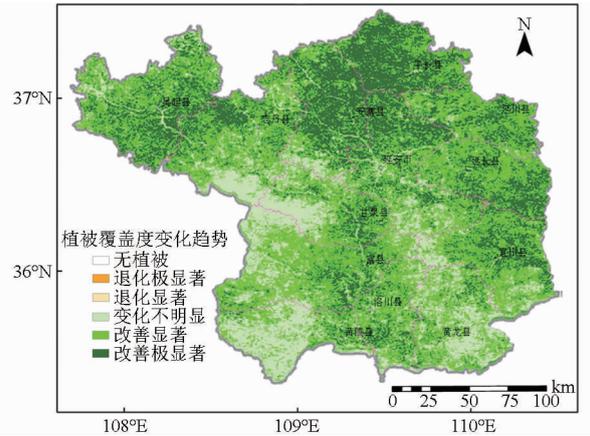


图3 2000—2012年延安市植被覆盖度变化趋势
Fig.3 Change trend of FVC in Yan'an City from 2000 to 2012

2.3 植被覆盖度的变化百分率

对延安市 2000—2012 年植被覆盖度图像的每个像元进行线性回归,得到逐像元回归斜率,然后计算 13 年来植被覆盖度变化率,得到植被覆盖度变化百分率及其分布图(图 4、图 5)。统计不同变化率像元的数量,可以得到不同变化率所占的比例。2000—2012 年,延安市植被覆盖度变化百分率总体为 38.3%,宝塔区、延长县、延川县、子长县、安塞县、志丹县、吴起县、甘泉县、富县、洛川县、宜川县、黄龙县和黄陵县的植被覆盖度变化百分率分别为 42.7%、80.1%、83.7%、98.6%、70.4%、53.5%、72.1%、40.1%、43.9%、33.6%、30.9%、13.3% 和 18.9%。研究期间,植被覆盖度变化率大于 100%、20%~100%、5%~20%、-5%~5% 和小于 -5% 的面积分别占延安市总面积的 20.8%、41.7%、

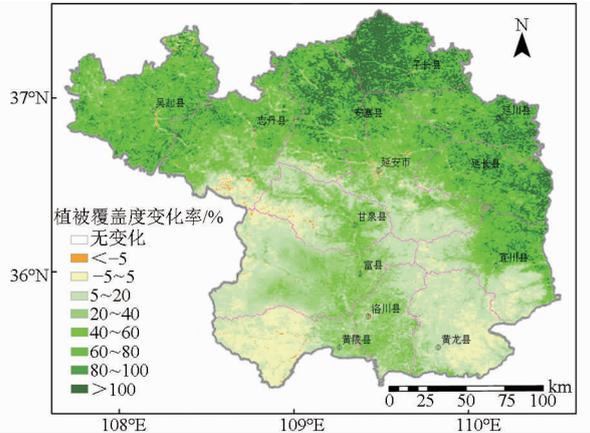


图4 2000—2012年延安市植被覆盖度变化率分布图
Fig.4 Change rate distribution of FVC in Yan'an City from 2000 to 2012

17.0%、17.4% 和 3%。这说明 13 年来，延安市近 79.5% 的国土面积植被覆盖度在增加，17.4% 的国

土面积植被覆盖度变化幅度较小，仅有 3% 的国土面积植被覆盖发生退化。

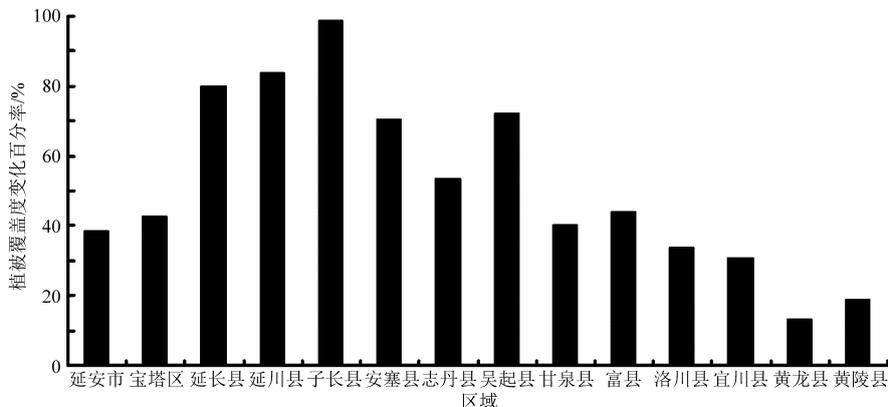


图 5 2000—2012 年延安市植被覆盖度变化百分率
Fig. 5 Change rate of FVC in Yan'an City from 2000 to 2012

2.4 植被覆盖度的结构变化

依据植被覆盖度灰度值对其进行密度分割，得到不同时期的植被覆盖度等级图，然后对图像中各植被覆盖度等级的像元个数进行统计，计算不同等级植被覆盖度所占面积的比例(图 6、表 2)。延安市高覆盖度植被主要分布在南部，这里天然次生林生长年代较久，枝繁叶茂，郁闭度高；低覆盖度植被主要分布在北部，该区域也是推行退耕还林工程的主要区域，植被生长年限较短，郁闭度低。延安市高覆盖度植被所占的面积比例由 2000 年的 35.3% 上升到 2012 年的 56.7%，增幅达 60.62%，呈现出极显著上升趋势；中覆盖度植被所占的面积比例由 19.5% 上升到 31.4%，增幅达 61.03%，呈现出极显著上升趋势；低覆盖度植被所占的面积比例由 45.2% 下降到 11.9%，减幅达 73.67%，呈现出极显著下降趋势。研究期间，延安市高覆盖度植被和中覆盖度植被面积在增加，低覆盖度植被面积在减少，所占面积由开始时的低覆盖度植被 > 高覆盖度植被 > 中覆盖度植被，转变为后期的高覆盖度植被 > 中覆盖度植被 > 低覆盖度植被，植被覆盖结构转好。

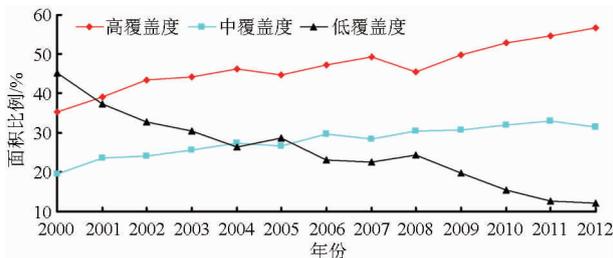


图 6 2000—2012 年延安市不同等级植被覆盖度所占面积比例

Fig. 6 Area percentage of different FVC levels in Yan'an City from 2000 to 2012

表 2 延安市不同等级植被覆盖度线性回归方程和变化幅度

Tab. 2 Equations of linear regression and change of different levels of FVC in Yan'an City

植被覆盖度等级	回归方程	R ²	变化幅度/%
高覆盖度	$y = 1.4484x + 38.685$	0.944 **	60.62
中覆盖度	$y = 0.9538x + 23.146$	0.949 **	61.03
低覆盖度	$y = -2.4022x + 38.169$	-0.965 **	-73.67

3 植被覆盖度影响因子分析

3.1 自然因素的影响

延安市位于黄土高原中部，属内陆干旱半干旱气候，植物所需水分主要依赖于降水，因此降水是影响此地区植被覆盖变化的重要自然因素。受夏季温度上升的影响，地表蒸发过程加剧，从而使地表水分的缺乏程度更加严重，由此造成黄土高原土壤干土层的发育，对植被生长具有明显的抑制作用，降水量增加，植被覆盖度增大，降水量减少，植被覆盖度减小，因此，夏季降水量严重影响植被生长。植被覆盖度最大值一般出现在 8 月份，与降水量之间存在滞

后的正相关关系^[23]。张岩等^[24]通过多年的观测数据，对陕北黄土高原地区降水量年际变化和年内变化对植被覆盖度的影响进行了研究，结果表明，降水量的年际变化会对植被覆盖度产生影响，降水的年内分布，尤其是 6—8 月份的降水量是影响黄土高原植被覆盖度的主要原因。

对延安市及各区县 2000—2012 年的 6—8 月份降水量进行统计，然后与植被覆盖度的变化进行比较，结果如图 7 和表 3 所示。对于整个延安市，降水量和植被覆盖度的相关系数仅为 0.154，且为不显著水平，两者之间的相关性很低。延安市各区县的降水量和植被覆盖度均表现出较低的相关性，也均为不显著水平。从图中还可以看出，研究期间，随着

时间的推移,降水量和植被覆盖度的走势差异也越来越大,尤其是后期,不论降水量增加还是减少,植被覆盖度均波动较小,基本呈现出稳定的上升趋势。这和刘志红等^[21]对黄土高原降水量与植被覆盖变化的研究结果并不一致,分析原因可能是由于退耕还林工程的实施增加了地面植被,并且随着植被覆盖结构越来越好(高植被覆盖度植被增加,低植被覆盖度植被减少),植物应对环境变化的能力越来越强,降水量的年际变化对植被覆盖度造成的影响越来越小。

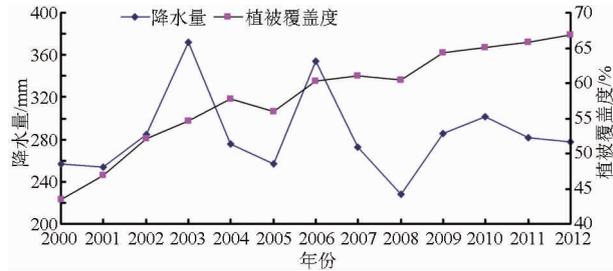


图7 2000—2012年延安市植被覆盖度与6—8月降水量的关系

Fig. 7 Relationship between FVC and precipitation during June and August in Yan'an City from 2000 to 2012

表3 2000—2012年延安市及各区县植被覆盖度降水量的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient of FVC and precipitation in Yan'an City from 2000 to 2012

区域	相关系数
延安市	0.154
宝塔区	-0.050
延长县	0.113
延川县	0.326
子长县	-0.098
安塞县	0.135
志丹县	0.382
吴起县	-0.180
甘泉县	0.191
富县	0.037
洛川县	0.026
宜川县	0.203
黄龙县	-0.068
黄陵县	-0.007

3.2 人为因素的影响

植被的变化受自然因素和人为因素的共同影响,而人为因素中的政策在不同时期、不同区域也有所不同,因此要区分自然因素和人为因素各自对植被覆盖的影响是相当困难的。对于延安市而言,研究期间最重要的人为因素是退耕还林工程,其实施对地面的植被结构带来了直接的影响。对延安市及各区县2000—2012年的累计退耕还林面积进行统计,然后与植被覆盖度的变化进行比较,结果如图8和表4所示。延安市累计退耕还林面积和植被覆盖度的相关性较强,相关系数为0.939,存在极显著的

相关关系。延安市截止到2012年,全市累计退耕还林面积已达 $6.067 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。退耕还林面积较多的区县为吴起县、安塞县和志丹县,退耕面积分别为 1.232×10^5 、 7.89×10^4 、 $7.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$;退耕还林面积较少的区县为黄龙县、黄陵县和洛川县,退耕面积分别为 7.5×10^3 、 7.7×10^3 、 $9.6 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。各区县的累计退耕还林面积和植被覆盖度之间均存在极显著的正相关关系,相关系数均在0.8以上,说明退耕还林工程的推行对各区县植被覆盖的增加起到了主要作用。

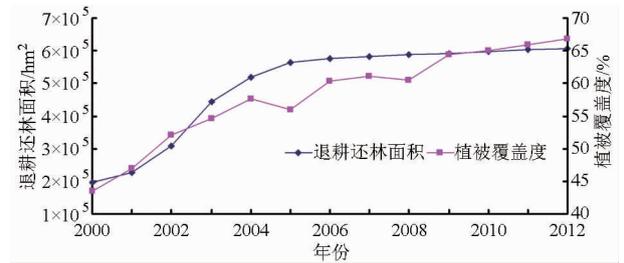


图8 2000—2012年延安市及各区县植被覆盖度与退耕还林面积的关系

Fig. 8 Relationship between FVC and area of farmland returned to forests in Yan'an City from 2000 to 2012

表4 2000—2012年延安市及各区县植被覆盖与退耕还林面积的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient of FVC and area of farmland returned to forests in Yan'an City from 2000 to 2012

区域	相关系数
延安市	0.939**
宝塔区	0.879**
延长县	0.944**
延川县	0.922**
子长县	0.810**
安塞县	0.863**
志丹县	0.817**
吴起县	0.895**
甘泉县	0.914**
富县	0.914**
洛川县	0.922**
宜川县	0.978**
黄龙县	0.909**
黄陵县	0.928**

4 结论

(1) 2000—2012年,延安市植被覆盖度整体呈极显著的增长趋势,由43.4%增加到66.8%,增幅达53.9%。延安市各区县的植被覆盖度在波动中均呈现增长趋势。植被覆盖度变化较大的为子长县、延川县、延长县、吴起县和安塞县,增幅分别为212.8%、134.2%、127.8%、126.8%和121.1%,变化较小的为黄龙县和黄陵县,增幅分别为28.9%和29.2%。

(2) 植被覆盖状况总体呈现稳定的改善状态,改善极显著的面积占研究区总面积的 39.17%,改善显著的面积占研究区总面积的 34.87%,改善不明显的面积占研究区总面积的 23.91%,退化显著的面积占研究区总面积的 1.32%,退化极显著的面积占研究区总面积的 0.73%。

(3) 植被覆盖度变化百分率为 38.3%,近 79.5%的国土面积植被覆盖度在增加,17.4%的国土面积植被覆盖度变化幅度较小,仅有 3%的国土

面积植被覆盖发生退化。植被覆盖结构转好,高覆盖度植被和中覆盖度植被面积在增加,低覆盖度植被面积在减少。

(4) 植被覆盖度变化受 6—8 月份的降水量影响减弱,尤其在研究阶段的后期,不论降水量增加还是减少,植被覆盖度均波动较小,基本呈现出稳定的上升趋势。这可能是由于退耕还林工程的实施增加了地面植被,并且随着植被结构转好,植被稳定性增强,降水量的年际变化对植被覆盖造成的影响逐渐减弱。

参 考 文 献

- 1 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):205-214.
Hu Yufu, Jiang Shuanglong, Liu Yu, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage on upper Anning river based on RS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):205-214. (in Chinese)
- 2 黄明斌,刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1057-1060.
Huang Mingbin, Liu Xianzhao. Regulation effect of forest vegetation on watershed runoff in the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9):1057-1060. (in Chinese)
- 3 查轩,唐克利,张科利,等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报,1992,6(2):52-58.
Zha Xuan, Tang Keli, Zhang Keli, et al. The impact of vegetation on soil characteristics and soil erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(2):52-58. (in Chinese)
- 4 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(1):74-79.
Li Mian, Yao Wenyi, Li Zhanbin. Progress of the effect of grassland vegetation for conserving soil and water on Loess Plateau [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1):74-79. (in Chinese)
- 5 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报,2006,26(9):3137-3143.
Xu Xianli, Ma Keming, Fu Bojie, et al. Research review of the relationship between vegetation and soil loss [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9):3137-3143. (in Chinese)
- 6 马祥华,焦菊英. 黄土高原植被恢复与土壤环境相互作用研究进展[J]. 水土保持研究,2004,11(4):157-161.
Ma Xianghua, Jiao Juying. Research progresses in interaction between vegetation restoration and soil environment in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4):157-161. (in Chinese)
- 7 王兵,刘国彬,张光辉,等. 黄土丘陵区中尺度流域水土流失治理环境效应评估[J]. 农业机械学报,2012,43(7):28-35.
Wang Bing, Liu Guobin, Zhang Guanghui, et al. Ecological and environmental assessment on the effects of water and soil loss comprehensive harness in meso-scale watershed in loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7):28-35. (in Chinese)
- 8 Frenette M, Julien P Y. Computer modeling of soil erosion and sediment yield from large watersheds [J]. International Journal of Sediment Research, 1987, 1:39-68.
- 9 Zhou Q, Robson M, Pilesjo P. On the ground estimation of vegetation cover in Australian rangelands [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(9):1815-1820.
- 10 李存军,赵春江,刘良云,等. 红外光谱指数反演大田冬小麦覆盖度及敏感性分析[J]. 农业工程学报,2004,20(5):159-164.
Li Cunjun, Zhao Chunjiang, Liu Liangyun, et al. Retrieval winter wheat ground cover by short-wave infrared spectral indices in field and sensitivity analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5):159-164. (in Chinese)
- 11 虞连玉,蔡焕杰,姚付启,等. 植被指数反演冬小麦植被覆盖度的适用性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(1):231-239.
Yu Lianyu, Cai Huanjie, Yao Fuqi, et al. Applicability of vegetation indices to estimate fractional vegetation coverage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):231-239. (in Chinese)
- 12 贾坤,姚云军,魏香琴,等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(7):774-782.
Jia Kun, Yao Yunjun, Wei Xiangqin, et al. A review on fractional vegetation covers estimation using remote sensing [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7):774-782. (in Chinese)
- 13 Colwell J E. Vegetation canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 1974, 3(3):175-183.
- 14 Serrano L, Penuelas J, Ustin S L. Remote sensing of nitrogen and lignin in mediterranean vegetation from AVIRIS data: decomposing biochemical from structural signals [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2):355-364.
- 15 孙刚,万华伟,王昌佐,等. 蒙陕甘宁能源金三角植被覆盖遥感监测与动态分析[J]. 农业机械学报,2013,44(2):247-250.
Sun Gang, Wan Huawei, Wang Changzuo, et al. Vegetation monitoring and analyzing of golden triangle energy in Inner Mongolia, Shaanxi, Gansu, and Ningxia region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):247-250. (in Chinese)
- 16 吴云,曾源,赵炎,等. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. 资源科学,2010,32(7):1417-

1424.

Wu Yun, Zeng Yuan, Zhao Yan, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in the Hai River Basin based on MODIS data [J]. Resources Science, 2010, 32(7):1417-1424. (in Chinese)

- 17 牛宝茹, 刘俊蓉, 王政伟. 干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(1):27-30.
Niu Baoru, Liu Junrong, Wang Zhengwei. Remote sensing information extraction based on vegetation fraction in drought and half-drought area [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(1):27-30. (in Chinese)
- 18 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, Fan Jianzhong, Wang Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shaanxi Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11):2896-2903. (in Chinese)
- 19 陈晓光, 李剑萍, 韩颖娟, 等. 宁夏近 20 年来植被覆盖度及其与气温降水的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9):1375-1383.
Chen Xiaoguang, Li Jianping, Han Yingjuan, et al. Vegetation coverage and its relationships with temperature and precipitation in Ningxia in 1981-2004 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9):1375-1383. (in Chinese)
- 20 孙红雨, 王长耀. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3):204-211.
Sun Hongyu, Wang Changyao. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data [J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(3):204-211. (in Chinese)
- 21 郭锐, 韩天虎, 王静, 等. 玛曲退牧还草工程生态效果的遥感监测[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1):154-160.
Guo Ni, Han Tianhu, Wang Jing, et al. Ecological effects of restoring grazing to grassland project in Maqu County [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(1):154-160. (in Chinese)
- 22 刘志红, 郭伟玲, 杨勤科, 等. 近 20 年黄土高原不同地貌类型区植被覆盖变化及原因分析[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1):16-23.
Liu Zhihong, Guo Weiling, Yang Qinke, et al. Vegetation cover changes and their relationship with rainfall in different physiognomy type areas of Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(1):16-23. (in Chinese)
- 23 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(11):1504-1514.
Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Climate change and human activities impact on the Loess Plateau vegetation cover change [J]. Science in China Press, 2007, 37(11):1504-1514. (in Chinese)
- 24 张岩, 张清春, 刘宝元. 降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2):268-272.
Zhang Yan, Zhang Qingchun, Liu Baoyuan. Study on vegetative coverage and height variation in Northern Loess Plateau [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2):268-272. (in Chinese)

(上接第 258 页)

- 16 Fredeen A L, Rao I M, Terry N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max* [J]. Plant Physiology, 1989, 89(1):220-280.
- 17 郑绍建, 杨志敏, 胡霁堂. 玉米、小麦细胞磷、锌营养及交互作用的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2):150-155.
Zheng Shaojian, Yang Zhimin, Hu Aitang. Study on the nutrition of phosphorus and zinc interaction in corn and wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(2):150-155. (in Chinese)
- 18 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):247-260.
Shi Zhou, Liang Zongzheng, Yang Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):247-260. (in Chinese)
- 19 Graeff S, Steffens D, Schubert S. Use of reflectance measurements for the early detection of N, P, Mg, and Fe deficiencies in *Zea mays* L. [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2001, 164(4):445-450.
- 20 Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry [J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3):271-281.
- 21 李颖, 薛利红, 潘复燕, 等. 氮磷互作对水稻冠层光谱的影响及 PNN 识别[J]. 中国农业科学, 2014, 47(14):2742-2750.
Li Ying, Xue Lihong, Pan Fuyan, et al. Effect of interaction of N and P on rice canopy spectral reflectance and its PNN identification [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(14):2742-2750. (in Chinese)
- 22 刘炜, 常庆瑞, 郭曼, 等. 冬小麦导数光谱特征提取与缺磷胁迫神经网络诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4):1092-1096.
Liu Wei, Chang Qingrui, Guo Man, et al. Diagnosis of phosphorus nutrition in winter wheat based on first derivative spectra and radial basis function neural network [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(4):1092-1096. (in Chinese)
- 23 黄双萍, 洪添胜, 岳学军, 等. 基于高光谱的柑橘叶片磷含量估算模型实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4):202-207.
Huang Shuangping, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, et al. Hyperspectral estimation model of total phosphorus content for citrus leaves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):202-207. (in Chinese)