

黄土高原草地覆盖度时空变化及其对气候变化的响应

史晓亮¹, 王馨爽²

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2. 国家测绘地理信息局陕西基础地理信息中心, 西安 710054)

摘要:利用 AVHRR GIMMS 和 MODIS 两种 NDVI 数据源, 基于像元二分模型对 1982—2014 年黄土高原草地覆盖度进行了模拟, 并分析了时空变化特征及其与气候因子的关系。结果表明: 黄土高原平均草地覆盖度为 42.5%, 1982—2014 年总体呈增加趋势, 且低覆盖度草地面积明显减少, 而高覆盖度草地面积显著增加。黄土高原草地覆盖度空间分布差异显著, 表现出东南高、西北低的特点。从草地覆盖度年际变化的空间分布来看, 在退耕还草生态工程实施之前(1982—1998 年), 黄土高原大部分区域草地覆盖度无显著变化。自 1999 年后该区草地覆盖度增加趋势显著, 增速达到 1.76%, 尤其是在陕北高原、山西中西部的吕梁—太行山等地, 草地覆盖度增加趋势明显。通过退耕还草等生态工程的实施, 该区植被状况得到改善。黄土高原草地覆盖度与降水气温相关性不明显, 但空间差异明显, 草地生长对降水因子的响应更为敏感。

关键词:黄土高原; 草地覆盖度; 像元二分模型; 时空变化; 气候因子

中图分类号: TP79; P461⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0189-06

Spatial and Temporal Variation of Vegetation Coverage and Its Response to Climate Change in the Loess Plateau

SHI Xiaoliang¹, WANG Xinshuang²

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shanxi

Geomatics center of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on AVHRR GIMMS NDVI and MODIS NDVI data, spatial-temporal variations of the grassland coverage in the Loess Plateau from 1982 to 2014 were simulated using dimidiate pixel model, and the relationship between grassland coverage and climate factors was analyzed at grid scale. The results showed that average annual grassland coverage from 1982 to 2014 was 42.5% in the Loess Plateau, and the grassland coverage had increased over the past three decades. Besides, the area of low coverage grassland rapidly declined, and high coverage grassland developed fast. There was significant spatial difference of grassland coverage, and the grassland coverage of the southeast of the study area was higher than that of the northwest. Before the project of returning farmland to grassland (1982—1998), there was no significant change of grassland coverage in most regions of the study area. However, since the implementation of large-scale vegetation construction from 1999, the annual mean grassland coverage of the study area has increased significantly at a rate of 1.76%, especially in northern Shaanxi Plateau, Taihang-Lvliang Mountains, where significant increase in grassland coverage has been seen. The green for grain project has greatly improved the vegetation. As a whole, there was no significant correlation between grassland coverage and annual precipitation and temperature, but significant spatial difference was significant. The grass growths were sensitive to precipitation.

Keywords: the Loess Plateau; grassland coverage; dimidiate pixel model; spatial and temporal variation; climate factors

植被作为表征生态环境变化的指示器, 研究动态变化及其对气候变化的响应已成为全球变化的主要内容之一^[1]。植被覆盖度是指植被冠层在地面的垂直投影面积占统计区域面积的百分比, 是衡量一

个地区地表植被覆盖的重要指标^[2], 也是反映植被长势和描述生态系统的重要基础数据和基本指标^[1], 对区域生态系统环境变化具有重要的指示作用^[3]。因此, 及时准确获取地表植被覆盖度及其动态变化, 对

于揭示全球变化和人类活动影响下的区域生态系统演变特征,分析评价区域生态环境具有重要意义^[4]。

目前植被覆盖度测量方法可分为地面测量法和遥感测量法两大类。前者野外操作不便,成本较高^[5],且推广到大范围时具有较大的不确定性^[6]。随着遥感技术的发展,利用其覆盖范围广和连续观测时间序列长的特点,遥感测量法逐渐取代传统的地面测量法,从而成为估算植被覆盖度的主要技术手段^[7]。由于形式简单和具有一定物理意义,像元二分模型已成为较为常用的植被覆盖度遥感估算模型。吴云^[8]、马娜^[9]、李小亚^[10]、马琳雅^[11]、何慧娟^[12]等利用该模型分别对海河流域、内蒙古正蓝旗、甘肃省河东地区、甘南州、陕西省等地植被覆盖度进行了估算,得到了广泛的应用。

黄土高原是中国的生态脆弱区 and 水土保持重点区域^[13],由于特殊的自然环境和长期不合理的人类活动的双重影响,该区植被破坏严重,尤其是草地大范围严重退化,已有 95.1% 的可利用天然草原存在不同程度的退化^[14]。为改善日益恶化的生态环境,从 1999 年开始国家在黄土高原实施退耕还林还草、封山育林等大规模植被建设,有力推动了该区植被恢复和重建^[15]。目前已有学者在黄土高原开展了植被覆盖度研究。刘宪锋等^[16]研究认为 2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度呈增加趋势,气温、降水的增加以及退耕还林还草等工程的实施是该区植被覆盖度增加的主要原因。刘宇等^[15]研究同样认为黄土高原 2000—2008 年植被覆盖度整体呈上升趋势。郭敏杰等^[2]分析了黄土高原地区 1982—2006 年植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应后认为,植被活动趋于增强,植被生长对降水因子的响应更为敏感。但是以往研究多局限于单一遥感数据源,研究时间序列较短,且较少涉及对黄土高原地区在大规模生态工程建设实施前后草地覆盖度的研究。因此,本文综合利用 AVHRR GIMMS 和 MODIS 两种 NDVI 数据源,估算黄土高原 1982—2014 年长时间序列草地覆盖度,并以 1999 年为分界点,分析探讨该区大规模植被建设前后草地覆盖度的时空变化及其与气候因子的关系,以期为黄土高原退耕还林还草生态工程成效评价提供科学依据。

1 研究区概况

黄土高原位于黄河中上游地区,是世界上最大的黄土沉淀区,地理位置介于东经 100°54′—114°33′,北纬 33°43′—41°16′。包括太行山以西、青海省日月山以东,秦岭以北、长城以南广大地区。区域跨甘肃

省、青海省、陕西省、山西省、河南省、宁夏回族自治区以及内蒙古自治区等省区,总面积约 63.2 万 km²,其中草地面积占 41.7% (图 1)。

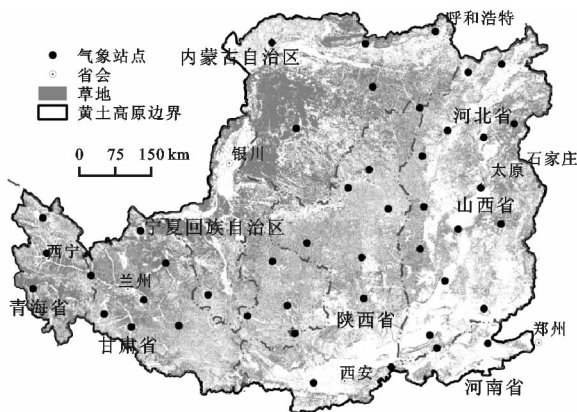


图 1 研究区位置

该区地形西高东低,海拔高度 84~5 206 m。地处半干旱半湿润气候带,属暖温带大陆性季风气候,夏季雨热同季,冬季寒旱同期,年均气温 3.6~14.3℃,年均降水量 300~800 mm^[17]。由于黄土高原处于半湿润、半干旱和干旱区的过渡带,而且大风、霜冻等自然灾害频发,以及盲目毁林开荒、陡坡耕作等人类不合理的开发活动,导致该区植被总体覆盖度较低,水土流失严重^[13]。

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究使用的 AVHRR GIMMS NDVI 数据是由美国国家航空航天局(NASA)于 2003 年推出的植被指数变化数据集,来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn),空间分辨率为 8 km,时间尺度为 1982 年 1 月—2006 年 12 月。该数据集为半月合成数据,采用最大值合成法 MVC(Maximum Value Composites)获取月 NDVI 数据^[18]。

MODIS NDVI 数据来自美国 NASA 地球观测系统的 2001—2014 年的 MOD13A3 月值 NDVI 数据(https://ladsweb.nascom.nasa.gov),空间分辨率为 1 km,并通过 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对下载获取的 MODIS NDVI 数据完成镶嵌、投影与格式转换等处理,并通过重采样获取空间分辨率为 8 km 的 MODIS NDVI 数据。最后利用黄土高原边界分别裁切获取研究区空间分辨率为 8 km 的 1982—2006 年 GIMMS NDVI 和 2001—2014 年 MODIS NDVI 数据。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.nmic.cn),包括研究区 45 个气象站点(图 1)1982—2014 年的年降水量、平均气温。采用反距离权重插值方法,获取与 NDVI 数据具有相同投

影和像元大小的年降水量和平均气温栅格数据集。黄土高原草地分布数据根据中国科学院遥感与数字地球研究所提供的2010年全国1:10万土地利用遥感监测数据裁切提取。

2.2 NDVI数据时间序列插补

由于AVHRR GIMMS和MODIS两种数据源的NDVI数据具有不同的时空分辨率和传感器精度,因此在基于两种数据源构建黄土高原长时间序列NDVI数据集时,应该对两种数据进行处理,以求达到一致性。本研究利用两种数据源的重合时间段的月NDVI数据(2001—2006年72个月)建立两种数据源间基于像元的一元线性回归模型,基本结构格式为^[19]:

$$G_i = a + bV_i + \epsilon_i \quad (1)$$

式中: ϵ_i 为随机误差;参数 a, b 的估计使用最小二乘法,拟合表达式为:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})(G_i - \bar{G})}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \quad (2)$$

$$a = \bar{G} - b\bar{V} \quad (3)$$

式中: G_i 为第 i 月的AVHRR GIMMS NDVI; V_i 为第 i 月经过重采样空间分辨率为8 km的MODIS NDVI; \bar{G} 和 \bar{V} 分别为2001—2006年所有月份GIMMS和MODIS NDVI数据的平均值。

在此基础上,应用建立的一元线性回归模型对2007—2014年的MODIS NDVI数据进行转换,从而实现对GIMMS NDVI数据的插补,经验证插补数据可以用于研究区NDVI长时间序列时空变化分析^[20]。最后采用最大值合成法获取年NDVI值^[21],最终建立黄土高原33 a(1982—2014年)逐年的NDVI数据集。

2.3 植被覆盖度估算

利用像元二分模型估算植被覆盖度的基本原理是假定通过遥感传感器观测到的信息 S 由纯绿色植被部分贡献的信息 S_v 和纯裸土部分贡献的信息 S_s 两部分组成,也即是两种纯组分以面积比例加权的线性组合^[9]。设像元中有植被覆盖的面积比例即为该像元的植被覆盖度为 f_c ,纯植被覆盖信息为 S_{veg} ,纯土壤信息为 S_{soil} ,则有

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

$$f_c = (S - S_{soil}) / (S_{veg} - S_{soil}) \quad (5)$$

根据像元二分模型的基本原理,一个像元的NDVI值可以表达为由绿色植被部分所贡献的信息NDVI_{veg}与裸土部分所贡献的信息NDVI_{soil}这两部分组成,因此可以将NDVI与像元二分模型结合,得到基于NDVI的植被覆盖度估算模型^[8]:

$$f_c = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (6)$$

式中:NDVI_{soil}为裸土或无植被覆盖区域部分对应的NDVI值;NDVI_{veg}为植被部分对应的NDVI值。

像元二分模型应用的关键是NDVI_{soil}和NDVI_{veg}值的确定,在理论上,纯裸地像元的NDVI_{soil}应该接近于0,且不随时间的变化而变化。但现实中由于大气条件、地表湿度等因素的影响,区域上的NDVI_{soil}并不是一个定值,其变化范围一般在-0.1~0.2^[22]。同样对于纯植被像元,植被构成、空间分布差异等因素均会造成NDVI_{veg}的变化^[1]。本文参考Gutman^[23],甘春英等^[24]提出的方法,依据研究区影像上的NDVI的灰度分布情况,以0.5%置信度截取NDVI的上下限阈值分别近似代表NDVI_{soil}和NDVI_{veg}。进而应用公式(6)计算黄土高原1982—2104年的植被覆盖度分布情况。

参照《中国资源环境遥感宏观调查与动态研究》^[25],将黄土高原草地定量划分为高覆盖度草地(覆盖度>50%)、中覆盖度草地(20%~50%)和低覆盖度草地(<20%)3级。

2.4 分析方法

本文应用一元线性回归分析方法在像元尺度分析黄土高原在大规模植被建设前后两个阶段草地覆盖度的变化趋势。计算公式为^[26]:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times f_{ci} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n f_{ci}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (7)$$

式中: θ_{slope} 为趋势斜率,即研究时段草地覆盖度的变化趋势; n 为研究时段的年数; f_{ci} 为第 i 年的草地覆盖度。斜率为正表示草地覆盖度增加,反之表示下降。

此外,利用基于像元的相关分析方法,对1982—2014年黄土高原草地覆盖度与主要气候因子(降水与气温)进行逐像元相关分析,使用相关系数的空间分布情况来反映草地覆盖度对于气候因子的响应。相关系数计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中: r_{xy} 为相关系数,表示草地覆盖度与气候因子(降水或气温)两个要素之间的相关程度,相关系数越大,说明该像元处二者要素相关性越强。 x_i 表示第 i 年的草地覆盖度; y_i 表示第 i 年的降水量或气温; \bar{x} 和 \bar{y} 分别两个要素的平均值。

3 结果与分析

3.1 黄土高原草地覆盖度时空演变特征

3.1.1 草地覆盖度年际变化趋势 由图2可见,黄土

高原 1982—2014 年草地覆盖度年际波动变化较大,但整体呈增加趋势,年增速为 0.44%。年均草地覆盖度在 1982 年最低(31.8%),2014 年最高(54.9%),平均为 42.5%。其中 1982—1998 年研究区草地覆盖度年均增速为 0.32%,年均覆盖度为 39.3%。但是自 1999 年实施大规模退耕还草等生态工程建设以来,该区草地覆盖度呈现明显增加趋势,1999—2014 年年均增速达到 0.9%,年均覆盖度增加到 45.9%,草地覆盖情况得到了明显改善。

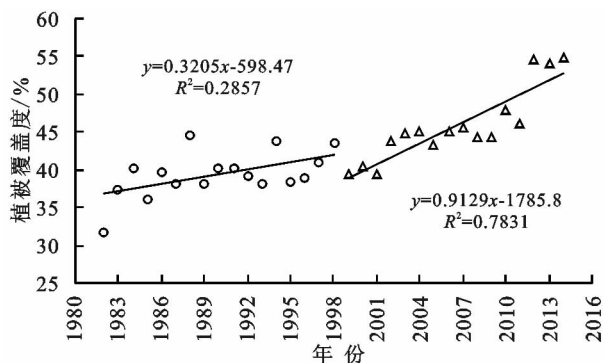


图 2 1982—2014 年黄土高原年均草地覆盖度变化动态

3.1.2 不同草地类型面积变化特征 在分析黄土高原草地覆盖度总体变化的基础上,本研究进一步研究了黄土高原不同草地类型的面积变化。从图 3 中可以看出,近 33 a 来黄土高原草地类型结构发生了较明显的变化。低覆盖度草地所占比例明显下降,在黄土高原大规模植被建设实施前(1982—1998 年)的 17 a 间,该区低覆盖度草地所占比例平均值为 25.7%,而自 1999 年开始经过 16 a 的大规模植被建设,1999—2014 年低覆盖度草地所占比例下降到 18.6%,相应的中覆盖度草地所占比例也略有下降。与此同时,该区大规模植被建设前后高覆盖度草地面积比例分别为 31.7%和 41.4%,高覆盖度草地面积呈现明显增加趋势。

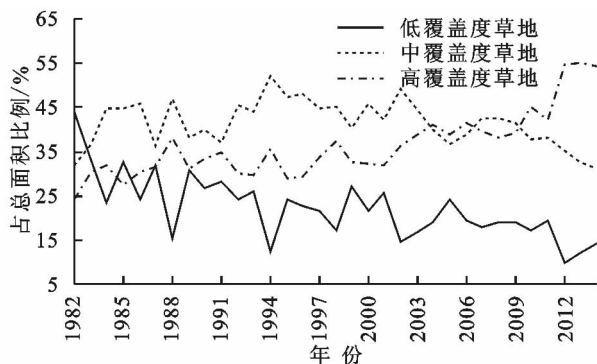


图 3 1982—2014 年黄土高原不同草地类型面积变化动态

3.1.3 草地覆盖度空间分布特征 黄土高原草地覆盖度受到气候、地形、人类活动等多种因素的综合影响,空间差异显著。从图 4 可以看出,在内蒙古自治区的鄂尔多斯地区、河套平原,甘肃省陇中、宁夏回族自治区中北部等部分地区,由于自然环境恶劣,草地覆盖度较低,

主要为低覆盖度草地。在陕北地区、甘肃省陇东,以及宁夏回族自治区南部等地,主要分布着大范围的中覆盖度草地。而且青海省东部、陕西省关中地区以及山西省等地,草地覆盖度在 50%以上,相对较高,尤其是在陕西省的铜川、宝鸡和渭南,山西省长治、榆次等地,平均草地覆盖度大于 60%,草地质量较好。

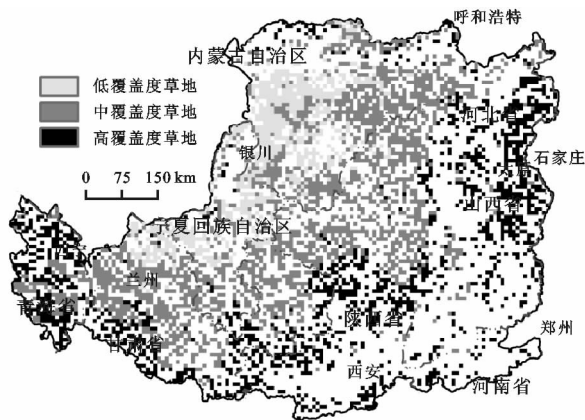


图 4 1982—2014 年黄土高原年均草地覆盖度的空间分布

3.1.4 草地覆盖度变化趋势的空间分布 本研究进一步采用逐像元线性趋势法分析了黄土高原大规模生态工程建设实施前后草地覆盖度的变化趋势。从图 5A 可以看出,在大规模植被建设实施前(1982—1998 年),虽然占黄土高原草地总面积 74.8%的区域覆盖度呈增加趋势,主要分布在内蒙古、宁夏回族自治区南部,甘肃省陇东和陕北地区等,但平均增加趋势仅为 0.52%,变化不显著。由此可见,在大规模植被建设前,黄土高原大部分草地覆盖度无显著变化。而自 1999 年开始经过 16 a 的大规模植被建设,1999—2014 年研究区 65.1%草地覆盖度呈增加趋势,尽管增加面积比例有所降低,但平均年增速达到 1.76%(图 5B)。尤其是在陕北高原、山西中西部的吕梁—太行山等地,草地覆盖度呈现显著增加趋势。其余地区草地覆盖度有所下降,但趋势不显著(-0.65%),主要分布在研究区西北部的大同、呼和浩特,以及青海省东部的西宁,甘肃省的陇东等地。这些地区气候干燥少雨,导致覆盖度有所下降。而在陕西关中地区的西安、宝鸡等地,由于人口众多,经济发展相对较快,人类开发活动剧烈,因此草地覆盖度同样有所下降。可以看出,黄土高原草地的生长状况整体有所改善。

3.2 黄土高原草地覆盖度与气候因子的相关关系

本研究基于像元尺度的相关分析方法,分别对 1982—2014 年的年最大草地覆盖度、年降水量和年均气温的相关系数进行逐像元分析,从而在空间尺度分析草地覆盖度与主要气候因子的关系。如图 6A 所示,黄土高原草地覆盖度与降水量的相关系数为 0.22,不存在明显的相关性。从像元尺度来看,草地覆盖度与降水呈正

相关的面积达到 85.2%,有26.7%的面积达到显著正相关($p<0.05$),主要分布在内蒙古自治区的鄂尔多斯地区、河套平原,宁夏回族自治区南部,甘肃省的陇东,以及陕北地区等地,尤其在陕北的榆林市、甘肃省白银市、

内蒙古自治区的乌海市等地草地覆盖度与降水量之间相关性较高,呈极显著正相关($p<0.01$),降水是这些区域草地生长的主要限制因子。其他大部分地区草地覆盖度与降水相关性不明显。

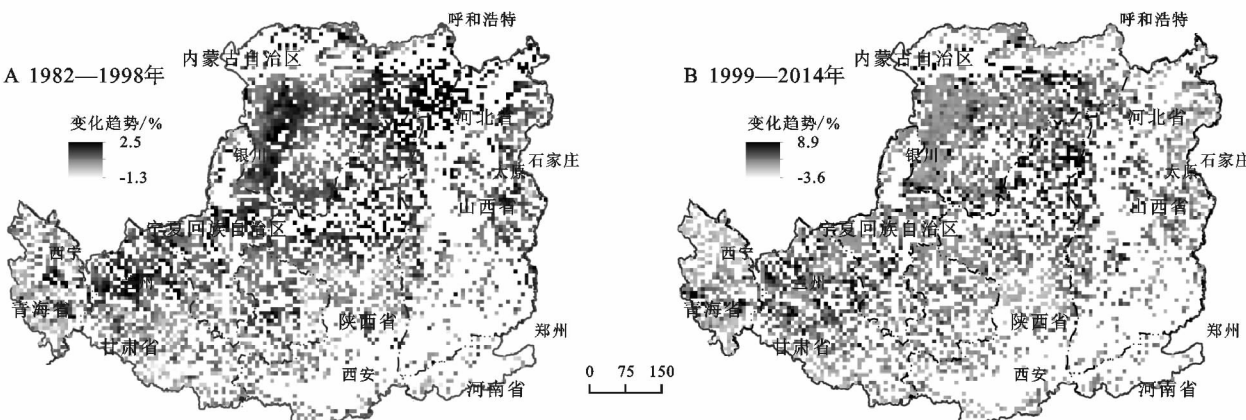


图 5 1998 年黄土高原大规模植被建设实施前、后草地覆盖度的变化趋势

从图 6B 可以看出,黄土高原地区草地覆盖度与年平均气温的相关系数为 0.13,不存在明显的相关性。从像元尺度来看,研究区草地覆盖度与气温呈正相关的地区占草地总面积的 70.5%,其中显著正相关约为 18.9% ($p<0.05$),主要分布在内蒙古自治区鄂尔多斯地区、陕

西省榆林、山西省北部部分地区。研究区草地覆盖度与气温呈显著负相关的地区占总面积的3.0%,主要分布在宁夏省西部、甘肃省天水等地。因此,相比黄土高原地区草地覆盖度与气温的关系,黄土高原地区降水因子对草地覆盖度的影响更为明显。

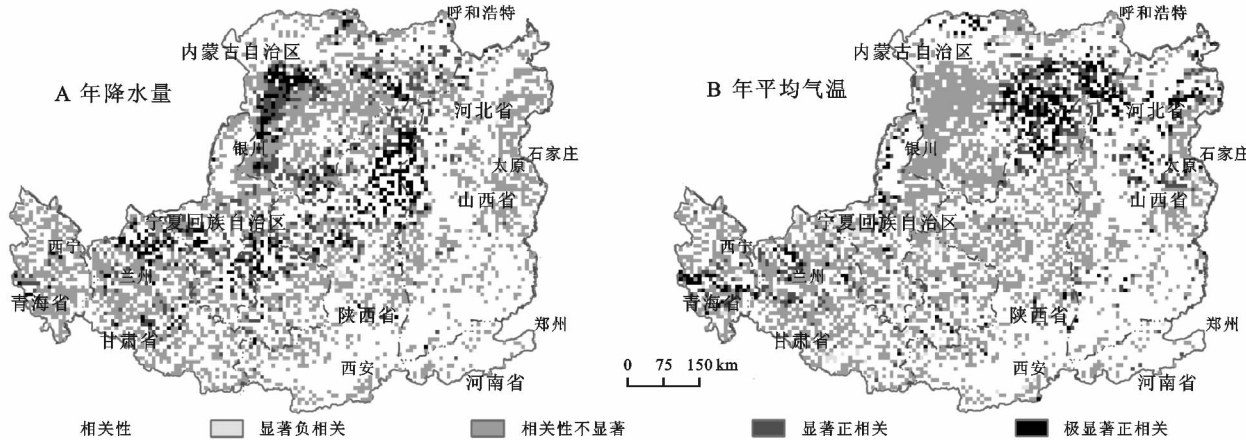


图 6 1982—2014 年黄土高原植被年最大草地覆盖度与年降水量、年平均气温间的相关性

4 讨论

一般认为黄土高原地区植被覆盖度呈增加趋势,植被覆盖度对降水因子的响应更敏感^[2],但是植被变化同时受到人类活动的影响。张宝庆等^[27]研究认为 1982—1998 年黄土高原 NDVI 与气温和降水表现出了良好的相关性,而在 1999 年之后,大规模植被建设措施的实施和农业技术进步促进了该区植被恢复,该区植被覆盖对气候等自然因子的变化敏感度降低。肖强等^[26]研究表明黄土高原植被覆盖变化对气候变化敏感,但是人类活动同样影响植被覆盖情况。尤其是随着该地区退牧还草等生态恢复工程的实施,黄土高原植被

覆盖度的增加主要是人类活动影响的结果。因此,黄土高原地区植被覆盖受到气候和人类活动的综合影响,但是自 1999 年以来,植被覆盖与气候因子的相关性降低,人类活动对植被覆盖的影响程度明显增强。

以往关于黄土高原草地覆盖度的研究,由于遥感数据源时间尺度限制,未能分析该区在大规模退耕还草前后草地覆盖度的时空演变。而本文综合利用 AVHRR GIMMS 和 MODIS 两种 NDVI 数据源,并应用逐像元线性回归模型方法对 GIMMS NDVI 数据进行插补延长,从而实现了黄土高原长时间序列草地覆盖度的估算,对于评价该区退耕还草生态工程的实施效应更具参考价值。

5 结论

(1) 黄土高原 1982—2014 年平均草地覆盖度为 42.5%, 总体呈增加趋势, 尤其是自 1999 年该区实施大规模生态环境工程建设以来, 该区草地覆盖度增加趋势更加显著。33 a 间该区低覆盖度草地面积明显减少, 而高覆盖度草地面积显著增加, 草地质量得到明显改善。

(2) 黄土高原草地覆盖度空间分布差异显著, 总体表现为东南高、西北低的特征。而从草地覆盖度变化趋势的空间分布来看, 在大规模植被建设实施前 (1982—1998 年), 该区大部分区域草地覆盖度无显著变化。而自 1999 年开始经过 16 a 大规模生态工程的建设实施, 黄土高原在 1999—2014 年 65.1% 的区域草地覆盖度呈增加趋势, 年增速达到 1.76%。尤其是在陕北高原、山西中西部的吕梁—太行山等地, 草地覆盖度呈现显著增加趋势。

(3) 相比黄土高原地区草地覆盖度与气温的关系, 黄土高原地区降水因子对草地覆盖度的影响更为明显。

参考文献:

- [1] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [2] 郭敏杰, 张亨亨, 张建军, 等. 1982—2006 年黄土高原地区植被覆盖度对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 35-40.
- [3] 高彦净, 谢余初, 钱大文, 等. 甘肃白龙江流域植被覆盖度及景观格局变化[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 181-187.
- [4] 苗正红, 刘志明, 王宗明, 等. 基于 MODIS NDVI 的吉林省植被覆盖度动态遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 387-393.
- [5] 朱会利, 杨改河, 韩磊. 延安市退耕过程植被覆盖度变化及其影响因子分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 272-280.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 吴云, 曾源, 赵炎, 等. 基于 MODIS 数据的淮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.
- [9] 马娜, 胡云峰, 庄大方, 等. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J]. 地理科学, 2012, 32(2): 251-256.
- [10] 李小亚, 张勃, 靳自宝. 基于 MODIS—NDVI 的甘肃河

- 东地区植被覆盖度动态监测[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 112-115.
- [11] 马琳雅, 崔霞, 冯琦胜, 等. 2001—2011 年甘南草地植被覆盖度动态变化分析[J]. 草业学报, 2014, 23(4): 1-9.
- [12] 何慧娟, 卓静, 王娟, 等. 陕西省退耕还林植被覆盖度与湿润指数的变化关系[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 439-447.
- [13] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 166-174.
- [14] 韦莉, 赵军, 潘竟虎, 等. 基于 MODIS 数据的黄土高原草地净初级生产力的估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 660-664.
- [15] 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.
- [16] 刘宪锋, 杨勇, 任志远, 等. 2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1244-1249.
- [17] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 244-253.
- [18] 史晓亮, 李颖, 赵凯, 等. 诺敏河流域植被覆盖时空演变及其与径流的关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(6): 54-60.
- [19] Mao D H, Wang Z M, Luo L, et al. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18(1): 528-536.
- [20] 张春森, 胡艳, 史晓亮. 基于 AVHRR 和 MODIS NDVI 数据的黄土高原植被覆盖时空演变分析[J]. 应用科学学报, 2016, 34(6): 702-712.
- [21] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 47-58.
- [22] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3): 241-252.
- [23] Gutman G G. Vegetation indices from AVHRR: An update and future prospects [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2/3): 121-136.
- [24] 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 1019-1024.
- [25] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [26] 肖强, 陶建平, 肖洋. 黄土高原近 10 年植被覆盖的动态变化及驱动力[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7594-7602.
- [27] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 287-293.