

1982—2006 年黄土高原地区植被 覆盖度对气候变化的响应

郭敏杰^{1,2}, 张亭亭^{1,3}, 张建军^{1,2}, 陈利利^{1,3}, 张晓萍^{1,3}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 基于黄土高原地区 1982—2006 年 GIMMS AVHRR NDVI 数据, 获取地面植被覆盖度, 并采用 ArcGIS 9.3 和 ANUSPLIN 4.3 分别对 82 个地面气象站点降水和温度数据进行插值处理, 以此分析黄土高原地区植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应, 为区域生态环境改善提供参考。结果表明: (1) 黄土高原地区区域平均植被覆盖度为 38%。植被覆盖度区域差异明显, 在空间上呈东南高、西北低的分布特征。(2) 近 25 年来, 植被活动在相对稳定的态势下趋于增强, 植被覆盖度增速为 0.75%/10 a。在植被覆盖度变化趋势上, 植被覆盖状况保持基本不变的面积为 40.6%, 趋于改善的面积(42%)大于退化面积(17.4%)。(3) 黄土高原地区年降水呈不显著下降趋势, 减少速率为 1.9 mm/a; 年均温度呈显著上升趋势, 增速为 0.7℃/10 a, 气候趋于暖干化。(4) 植被覆盖度与年降水量和年均温的偏相关性均达到显著, 但空间差异明显。其中植被生长对降水因子的响应更为敏感。

关键词: 植被覆盖度; 气候变化; 响应; 黄土高原地区

中图分类号: P461⁺.7; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)05-0035-06

Response of Vegetation Coverage to Climate Change in the Loess Plateau in 1982—2006

GUO Min-jie^{1,2}, ZHANG Ting-ting^{1,3}, ZHANG Jian-jun^{1,2}, CHEN Li-li^{1,3}, ZHANG Xiao-ping^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of
Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This paper studied vegetation coverage variations and the response of vegetation change to climate change in Loess Plateau in order to provide the reference for improving the regional ecological environment based on the data from GIMMS AVHRR NDVI of China from 1982 to 2006 and the data of precipitation and temperature from 82 weather stations interpolated by GIS 9.3 and spline interpolating method from ANUSPLIN 4.3 software. The results show that: (1) the Loess Plateau has a low vegetation coverage, which is only 38%, and vegetation coverage was obviously different in different regions, the value in southeast is high, while in northwest is low; (2) for almost 25 years, the vegetation activity of the Loess Plateau had been enhanced in a relatively stable situation, and vegetation coverage had increased by 0.75%/10 a, under this changing trend, the area of the vegetation coverage kept almost unchanged by 40.6% which tended to the improved vegetation coverage areas (42%) and was greater than the degradation area(17.4%); (3) In Loess Plateau, the annual precipitation has showed a decreasing trend indistinctively by 1.9 mm/a and the annual temperature has showed an increasing trend markedly by 0.7℃/10 a during 25 years. The climate has be-

收稿日期: 2013-12-17

修回日期: 2014-03-30

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“气候变化背景下黄土高原土地利用影响径流的空间尺度效应”(41230852); 国家自然科学基金项目“北洛河水沙动态过程及对退耕还林(草)响应机理”(41101265); 中科院知识创新项目(KZCX2-XB3-13); 中国科学院重点部署项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZ-EW-04-03-03)

作者简介: 郭敏杰(1987—), 女, 河南省项城市人, 硕士, 主要研究方向: RS/GIS 在水土保持中的应用。E-mail: guomjmdw@sina.com

通信作者: 张晓萍(1971—), 女, 河南省焦作人, 博士, 研究员, 从事区域水土流失规律及水土保持方向研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

come warm and dry; (4) the correlation analysis between vegetation coverage and annual precipitation and temperature was obviously different in different regions which is an extremely significant positive correlation, but there is an obvious difference in space. The vegetation growth is sensitive to precipitation.

Key words: vegetation coverage; climate change; response; Loess Plateau Area

植被覆盖是一个地区环境质量的重要指标,是认识该地区环境质量和环境演变的重要内容。气候变化是陆地生态系统中决定地球上植被类型及其分布的主要驱动因子,同时,植被也是区域气候特征的反映和指示,两者之间存在着密不可分的联系^[1]。因此,植被—气候的响应对于研究气候变化与陆地生态系统的关系具有十分重要的实际意义,已经成为全球变化研究的主要内容之一^[2]。植被覆盖度是指植被(包括叶子、茎枝等)在地面的垂直投影面积占统计区域面积的百分比,它是衡量一个地区地表植被覆盖的重要指标^[3],在指示地表植被分布规律,探讨植被分布影响因子,分析和评价区域生态环境,及时准确地掌握其动态变化,分析其发展趋势等方面有重要作用^[4]。因此获取地表植被覆盖度及其变化信息,探讨气候因素的驱动作用,对于揭示全球气候变化影响下的区域生态系统响应特征,评价区域生态环境质量具有重要意义。

气候因素中以降水和气温对植被生长的影响最为直接和重要^[5-7],温度、降水通过影响植物光合作用、呼吸作用及土壤有机碳分解等进而影响植物的生长和分布。目前对不同区域进行植被覆盖变化及其对气候的响应问题,研究结论差异较大。刘军会等^[8]利用 GIMMSAVHRR NDVI 数据对青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系进行分析,结果表明青藏高原植被覆盖度呈“总体升高,局部退化”趋势,区域植被覆盖度变化与同期降水和温度变化均呈正相关;李震等^[9]对西北地区植被覆盖变化与气候因子的关系进行了研究,结果表明 NDVI 与降水存在明显的正相关关系,而与温度变化关系不明显,降水是影响西北地区植被覆盖变化的主要自然因素^[10-11]。如李月臣等^[12]对北方 13 省地区 1982—1999 年植被动态变化及其与气候因子的关系进行了分析,研究认为植被变化与气温相关性显著而与降水无显著相关,气温升高引起的生长期提前和生长季延长是植被增加的一个重要原因。

黄土高原地区作为世界上黄土分布面积最大、黄土地貌最发育的地理单元,也是我国人口、资源、环境矛盾最集中的区域之一,属于生态敏感区^[13]。该区域是雨养农业区,农林牧业生产和生态环境对气候条件的依赖性极强,气候变暖与干旱环境对黄土高原

经济影响极大^[14]。研究地表植被覆盖变化及其对气候变化的响应,对于该地区的能量、生物化学循环、水循环以及区域气候变化有重要意义,研究结果能更有效地服务于区域农业发展和生态建设工作。本文通过遥感图像处理建立黄土高原地区 1982—2006 年植被覆盖度时间序列,采用趋势分析、标准差、偏相关系数等方法,分析植被变化情况及其与降水、温度变化的关系,期望得到黄土高原地区近 25 年来的植被演变规律和气候因子对区域植被变化的驱动作用,对生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

黄土高原地区是世界上最大的黄土沉积区,地理位置位于北纬 $33^{\circ}41'—41^{\circ}16'$,东经 $100^{\circ}54'—114^{\circ}33'$,海拔 $800\sim 3\,000\text{ m}$,总面积约 62.68 万 km^2 (图 1)。涉及 7 个省(区),282 个县(旗、市、区)的部分地区,包括山西省和宁夏回族自治区全部,陕西省中部和北部、甘肃省的陇中和陇东地区、青海省的东北部、内蒙古自治区的河套平原和鄂尔多斯高原、河南省的西部丘陵地区。基本土地类型是塬、梁、峁、涧、坪,还有土石山林地、河谷平原、风沙草滩、覆沙地、黄土(包括次生黄土)台地。从东南向西北,气候依次为暖温带半湿润气候、半干旱气候和干旱气候。夏季雨热同季,冬季寒旱同期,光能资源较丰富,气候灾害发生频率较高。年降水量 $150\sim 750\text{ mm}$,降水的分布是由东南向西北,由山地向平地递减,年内分布很不均匀,且以暴雨形式为主。年均气温 $3.6\sim 14.3^{\circ}\text{C}$,大致随着纬度的升高和地势的缓慢抬升而由东南向西北逐渐降低。气候的南北分异导致了植被的变化,植被类型依次由东南湿润半湿润森林、半干旱森林草原往西北转变成轻干旱的温带典型草原、半干旱的温带荒漠化草原、干旱的荒漠半荒漠植被。黄土高原西部和北部临近大陆干旱气候,受到沙漠化的严重威胁,而高原的其他地区则旱作农田较多,天然植被缺乏,水土流失严重,干旱频繁。在人类对黄土高原地区开发利用的过程中,致使天然植被破坏殆尽,处于动态平衡的自然生态系统渐次解体,发展转化为农业区。虽然经过几十年的水土流失治理和植被恢复重建,但森林覆盖率仍较低。

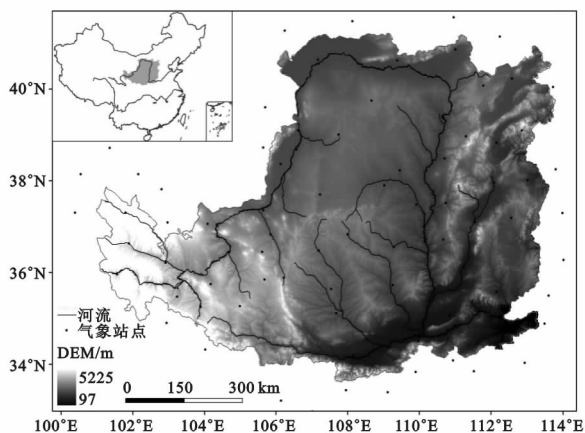


图1 研究区地形高程及气象观测站的分布

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 遥感数据 1982—2006年 GIMMS AVHRR NDVI 数据集是美国国家航天航空局(NASA)推出的全球植被指数资料。数据格式为 ENVI 标准格式,投影为 ALBERS,空间分辨率为 8 km,时间分辨率是 15 d。GIMMS—NDVI 数据集被认为是相对标准的数据,因为它是在美国地球资源观测系统数据中心的探路者数据库提供的 NDVI 数据集的基础上,考虑了全球范围内各种因素对 NDVI 值的影响,并对卫星传感器不稳定性、太阳天顶角和观测角、云层覆盖、气溶胶等影响的校正后发布的。该数据集已被广泛应用于全球及区域等大尺度植被变化的研究中,是目前评价植被覆盖长时间变化的主要数据源^[15-16]。

本研究采用国际上常用的最大值合成法 MVC^[17] (Maximum Value Composites) 获得月 NDVI 数据,并利用黄土高原边界矢量图裁取黄土高原地区 1982—2006 年逐月 NDVI 栅格图像。

2.1.2 气象数据及插值处理 采用中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供的黄土高原地区及周边 1982—2006 年共 82 个气象台站(图 1)的月降水和月平均温度数据。通过比较认为,降雨量值域范围大、空间分布高度不均匀,空间栅格化以 Kriging 插值方法为好^[18]。气温受高程的影响较大,则采用基于 ANUSPLIN 4.3 的薄盘光滑样条函数插值理论^[19],结合 DEM 数据(地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn>)对温度进行插值。经检验,以经度、纬度作为自变量,并引入高程作为协变量,样条次数为 2 时,插值结果精确。

为了进行遥感和气象数据的空间相关分析,且考虑插值的精度,将降水、温度数据插值为 500 m 的栅格数据,遥感 AVHRR NDVI 数据重采样为 500 m

的空间网格与之相匹配。本研究中所用的数据均集成到同一坐标系统下,投影方式为双标准纬线等面积圆锥(Albers)投影,采用的椭球体为 Krasovsky 椭球体,主要参数:中央经线 105°,原点纬线 0°,第一标准纬线 N1=25°,第二标准纬线 N2=47°。

2.2 研究方法

2.2.1 像元二分法 一般情况下,植被指数与植被覆盖度具有较强的正相关性:植被指数值越高,其植被覆盖度越大,生态环境条件较好,水土条件适合,植被生长茂盛;反之,植被覆盖度越好,其植被指数也越高,植被的生长越旺盛^[20]。本文中植被覆盖度信息提取是在对光谱信号进行分析的基础上,通过建立归一化植被指数与植被覆盖度的转换关系,直接提取植被覆盖度信息^[21]。采用像元二分模型估算植被覆盖度,假设每个像元的 NDVI 值由该像元的纯植被覆盖部分和裸土部分的 NDVI 值合成,则其公式如下:

$$\text{NDVI} = \text{NDVI}_v + \text{NDVI}_s(1 - f_v) \quad (1)$$

式中:NDVI_v——纯植被覆盖部分的 NDVI 值,理论上应该接近于 1;NDVI_s——裸土部分的 NDVI 值,理论上应该接近 0;f_v——植被覆盖度。由于大气、地表、土壤、植被类、季节变化等条件的变化,以及传感器的观测角度等的影响,NDVI_v 和 NDVI_s 会随着时间和空间而变化,通常以分析样本中的统计值来代替。通过分析样本中年最大 NDVI 和最小 NDVI 来确定 NDVI_v 和 NDVI_s 是简捷实用的方法。本文在实际计算中,以年 NDVI 最大值代替 NDVI_v、以年 NDVI 最小值代替 NDVI_s 作为分析植被覆盖度年际变化的基础。植被覆盖度(f_v)公式如下:

$$f_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_s}{\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s} \quad (2)$$

参考已有文献^[22],对 1982—2006 年黄土高原地区年均植被覆盖度,采用等间距重分类为 5 个等级,即植被覆盖面积小于 20% 的低覆盖度区,20%~40% 的中低覆盖度区,40%~60% 的中覆盖度区,60%~80% 的中高覆盖度区和面积大于 80% 的高覆盖度区。

2.2.2 趋势分析 线性趋势能够排除短期气候对植被覆盖的影响,并能反映环境变化对植被动态的综合影响。一元线性回归是以单个像元的时间变化规律来反映整体的空间变化规律,综合反映区域时空格局演变^[23]。运用 GIS 的栅格计算功能模块,将植被覆盖度进行一元线性回归处理,用方程斜率(Slope)反映植被覆盖度每个栅格点的变化趋势。当 Slope 为正数时,表明该栅格代表的植被覆盖度随时间变化而升高,且数值越大说明升高的更快。反之,当 Slope

值为负数时,表示随时间变化植被覆盖度呈下降趋势。Slope 值在一定程度上也反映了该栅格植被覆盖度的变化程度。其计算公式为:

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times P_i) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n P_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: S ——像元植被覆盖度回归方程的斜率; P_i ——第 i 年的年植被覆盖度值; n ——检测时间段的年数;变量 i 从 1 到 n ,为研究时间段内年份的序号。

为了更好地评价黄土高原地区植被恢复状况,参照已有研究^[24-25],并根据本文数据的分布规律,采用自然分等法对结果进行分类:显著减少、轻微减少、保持不变、轻微增加、显著增加,具体见表 1。

2.2.3 标准差分析 标准差表示数据变量偏离常态的距离平均数,能反映一个数据集的离散程度,其值越大,说明该地区在研究时段内各像元 NDVI 距离平均值越远,即该段时间植被覆盖度的年际波动较大^[26]。

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} \quad (4)$$

聚类分析^[27]中按 Natural Breaks 将标准差(S_i)分为五类:高($S_i \geq 0.06$),较高($0.048 \leq S_i < 0.06$),中($0.04 \leq S_i < 0.048$),较低($0.031 \leq S_i < 0.04$)和低($0 \leq S_i < 0.031$)。在此基础上分析黄土高原地区多年平均植被覆盖度波动变化特征。

2.2.4 偏相关分析法 偏相关分析是指当两个变量同时与第三个变量相关时,将第三个变量的影响剔除,只分析另外两个变量间相关程度的过程^[26]。该方法可以解决地理系统中某一要素的变化影响其他要素与因变量关系的问题。其计算公式以及显著性检验公式如下:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} \times r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (5)$$

$$t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1 - r_{xy,z}^2}} \sqrt{n - 2} \quad (6)$$

式中: $r_{xy,z}$ ——变量 z 固定后变量 x 与 y 的偏相关系数; r_{xy} ——变量 x 与变量 y 的相关系数; r_{xz} ——变量 y 与变量 z 的相关系数; r_{yz} ——变量 x 与变量 z 的相关系数; n ——样本数 25。其中 $r_{xy,z}$ 为正值,表示正相关, $r_{xy,z}$ 为负值,表示负相关; t 表示显著性检验系数,查 t 分布表,可得出不同显著水平上的临界值 t_p ,若 $t > t_p$ 则表示相关显著;反之, $t < t_p$ 则表示相关不显著。

3 结果与分析

3.1 黄土高原地区植被盖度的时空变化特征

3.1.1 黄土高原地区植被覆盖度及空间格局 黄土高原地区 25 年多年平均植被覆盖度为 40%,如附图 1a 所示。自然植被变化过程中,农田作物的生长会影响植被覆盖度的估算。比较 1982—2006 年的 1—12 月份的年均植被覆盖度分布图,发现作物收获等节律活动,使黄土高原地区渭河平原、汾河平原等主要农作区 6 月和 10 月植被覆盖度较相邻月份明显降低,而 10 月份可以较好地保存其他地区植被覆盖度信息,因而采用 10 月份黄土高原地区年均植被覆盖度 38%,作为整个区域自然植被覆盖度的估算,如附图 1b 所示。与许炯心^[28]、孙艳萍^[29]等分析黄土高原自然植被覆盖度的时间和盖度值比较吻合。

就全区来看,植被覆盖度呈东南高、西北低的分布特征。低和中低覆盖度植被,面积分别为黄土高原地区总面积的 21.2% 和 35.9%,主要分布在西北部的内蒙古、宁夏绝大部分区域,以及甘肃北部小部分地区等干旱半干旱气候区。中和中高植被覆盖度面积比例分别为 26.6% 和 11.6%,分布在青海高原东南、陕甘交界以及山西、河南大部分地区。高植被覆盖度区面积比例为 4.7%,主要在陕西的黄龙山、子午岭、秦岭北坡以及山西太行和吕梁山地区。说明黄土高原大部分地区以中低植被覆盖度为主,空间差异明显。

3.1.2 植被覆盖度年际变化 为了揭示 1982—2006 年黄土高原地区植被覆盖度的多年动态特征,取各像元逐年平均植被覆盖度作为指标,对研究区域内每个栅格像元进行趋势分析(附图 2a)。总体上,研究区内植被覆盖度处上升趋势,线性趋势为 0.75%/10 a,有 64.3% 的植被覆盖度像元呈增加趋势,35.7% 的像元呈减少趋势。如表 1 和附图 2a 所示,40.6% 的地区植被状况基本不变,分布于黄土高原地区各地,大多位于鄂尔多斯高原中东部的毛乌素沙地。轻微增加面积占 30.7%,分布于各山地边缘,主要在黄土高原地区的北部和南部,如河套平原、晋陕蒙交界、大同盆地、长治盆地、渭河平原、陇中、陇东高原等部分一些水源相对较好的区域,这些地区也是主要的农业耕作区,植被覆盖度的增加可能与近期的一些退耕还林还草措施有关。而植被覆盖度呈显著增加(11.3%)的区域也多在此。呈轻微减少和显著减少的面积分别占到 16.3% 和 1.1%,主要分布在鄂托克旗沿银川、中卫到靖远、兰州一带,内蒙古的呼和浩特到包头部分地区以及山西太原盆地的部分地区。

黄土高原地区 1982—2006 年植被覆盖度标准差介于 0.014~0.036 之间,整体呈现东南部高,西北部及中部低,东北和西南部高低波动并存,稳定性存在明显的地域差异(附图 2b、表 2)。空间格局主要特征为:低波动区主要连片分布在河套平原和内蒙古沙地草原区域,植被变化相对稳定(21.4%),这也正是植被覆盖度保持不变的主要区域;较低和中波动区分别为 32.8%和 27.9%,占全区面积一半以上,主要分布在山西高原、陇中高原以及青海高原等地;较高和高波动区各占 13.9%和 4%,主要分布在陕甘盆地、汾渭平原的部分区域,大致与植被覆盖度趋势变化明显的区域相对应。由此可以看出,25 a 来黄土高原地区植被覆盖度波动较低,植被变化相对稳定,植被覆盖度区域增强,大部分区域无显著性变化,改善的面积大于退化的面积。

表 1 黄土高原地区植被覆盖演变趋势

变化斜率区间/(%/a)	变化水平	像元数	百分比/%
-0.5~-0.3	显著减少	109	1.1
-0.3~-0.1	轻微减少	1595	16.3
-0.1~0.1	保持不变	3976	40.6
0.1~0.3	轻微增加	3004	30.7
0.3~0.9	显著增加	1111	11.3

表 2 黄土高原地区植被覆盖度标准差

标准差(S_i)	变化水平	像元数	百分比/%
$S_i \geq 0.06$	高	387	4
$0.048 \leq S_i < 0.06$	较高	1364	13.9
$0.04 \leq S_i < 0.048$	中	2735	27.9
$0.031 \leq S_i < 0.04$	较低	3213	32.8
$0 \leq S_i < 0.031$	低	2095	21.4

3.2 气候因子的时空变化特征

黄土高原地区处在中国东部季风区与西部干旱区过渡的地带^[30],如附图 3(a,b)所示,1982—2006 年黄土高原地区年均降水量变化在 123~781 mm,区域年均降水量 425 mm,在空间分布上存在明显的地区差异,呈现西北向东南递增的态势。25 a 间黄土高原地区降水量呈不显著下降趋势,平均减少速率为 1.9 mm/a。其中,内蒙古河套平原、银川—环县沿线以北的狭长区、青海西宁、山西临汾、长治以及河南孟津等地降水增加,其余区域降水均减少。趋于减少的面积占 83.5%,主要分布在山西高原中北部、陕甘盆地、渭河平原等地,尤其是山西五台山,陕西华山等地降水减少趋势较其他区域减速快。

如附图 3(c,d)所示,1982—2006 年黄土高原地区年均温变化在-7.8~14.6℃,区域年平均温度为 7.2℃。总体分布大致呈现西南、东北区域年均温度低,如青海高原、六盘山、吕梁山、太行山部分区域;从

西北部的包头、库布齐沙漠到黄土梁峁丘陵沟壑、黄土塬,直至汾渭谷地,黄土高原地区温度呈依次升高的态势。在整个全球气温上升的大背景下,黄土高原地区 25 a 来气温总体趋于变暖,区域温度上升趋势达到极显著($p < 0.001$),为 0.7℃/10 a。增温趋势由西、南向中、东部逐渐递增,渭河平原和临汾盆地的大部分区域升温趋势较小,山西高原中部和北部区域升温较快,如太原、原平、大同、五台山等地。由此可以看出,黄土高原地区气候趋于暖干化,区域差异显著。

3.3 植被覆盖度与气候因子的关系

为了揭示黄土高原地区植被覆盖度总体状况的年际动态与水热因子的关系及其空间格局,选取各像元年均植被覆盖度、年降水量和年均温作为分析指标,分别计算植被覆盖度与降水、气温的偏相关系数,并将结果进行显著性 T 检验。

3.3.1 植被覆盖度与降水的相关性 1982—2006 年黄土高原地区年均植被覆盖度与年降水量偏相关空间特征(表 3),正相关占整个研究区的 85.9%,其中主要表现为不显著正相关($p > 0.05$),大部分位于内蒙古毛乌素沙地,陇东渭北高原以及山西高原部分地区,约占 63.6%;达到显著正相关($p < 0.05$)的面积约为 22.3%,主要分布在黄土高原地区西部西宁—靖远—固原—盐池—鄂托克旗一带,这些地区处于温带季风气候区的边缘,紧邻西北干旱半干旱气候区,气候干燥,年降雨量少,植被多为草地,降水是这些地区植被生长的主要限制因子。负相关主要表现为不显著负相关($p > 0.05$),占整个区域的 14.1%,主要布于汾渭平原大部分地区,其中只有 0.6%的面积达到显著负相关($p < 0.05$),主要位于黄龙和子午岭林区,这可能是由于这些地区降水量较高,对植物生长而言,已经相对充足,降水增加所引起的温度降低,反而会使植被活动减弱。

3.3.2 植被覆盖度与温度的相关性 1982—2006 年黄土高原地区年均植被覆盖度与年均温度偏相关空间特征(表 3),正相关占整个研究区的 68.7%,其中主要表现为不显著正相关($p > 0.05$),约为 51.1%,零散分布;显著正相关($p < 0.05$)约为 17.6%,主要位于陕甘盆地的天水、庆阳、子午岭、黄龙山等地,以及长治盆地、大同盆地的五寨、灵丘等部分区域,这些区域地势普遍偏低,且大多处于中温带半湿润农业气候区,水资源相对丰富,温度是这些地区植被生长的主要限制因子。负相关主要表现为不显著负相关($p > 0.05$),占整个区域的 28.9%,主要分布于黄土高原西北部干燥草原区,如库布齐沙漠、

鄂托克旗、盐池、靖远等地区;在环县北部、山西晋中、内蒙包头等地,达到显著负相关($p<0.05$),面积占 2.4%。相比黄土高原地区植被覆盖度变化与年降水量变化的关系,黄土高原地区植被覆盖度对降水因子的响应更为敏感。

表 3 黄土高原地区植被覆盖度与气候因子的相关显著性所占面积比重

相关性	植被覆盖度与 年降水量/%	植被覆盖度与 年均温/%
极显著负相关	0	0.6
显著负相关	0.5	1.8
不显著负相关	13.6	28.9
不显著正相关	63.6	51.1
显著正相关	14.6	10.1
极显著正相关	7.7	7.5

4 结论与讨论

(1) 黄土高原地区植被覆盖呈东南高、西北低的特征。从 20 世纪 80 年代到 21 世纪以来,处于中低和低覆盖度的植被较多,约占总面积的 57.1%。25 a 来年植被覆盖度呈增加趋势,其线性回归增速为 0.75%/10 a。其中有 64.3%的面积植被覆盖度呈增加趋势,35.7%的面积呈减少趋势。植被覆盖度标准差为 0.014~0.036,60.7%的面积处于较低和中波动区。说明 25 a 来黄土高原地区植被变化相对稳定,区域覆盖度增强,改善面积大于退化面积。

(2) 黄土高原地区年降水量呈不显著下降趋势,减少速率为 1.9 mm/a;年均温度呈显著上升趋势,增速为 0.7℃/10 a,气候明显趋于暖干化。降水和温度因子对植被覆盖的影响区域差异明显。植被覆盖度与降水呈正相关的面积达到 85.9%,有 22.3%的面积达到显著正相关($p<0.05$)。而与温度呈正相关的面积为 68.7%,17.6%的面积达到显著正相关($p<0.05$)。黄土高原地区植被覆盖度与年降水量的偏相关性更高,且对降水因子的响应更敏感。

植被覆盖变化是一个自然与人类活动交互作用的过程。近 25 a 来黄土高原地区年降水量总体呈下降趋势,而区域植被覆盖度呈增加趋势,则可以认为,虽然植被覆盖度对降水量多少比较敏感,而非气候因素是年植被覆盖度增加的主要原因。这说明近年来国家实施的退耕还林还草、退牧还草、封山育林等一系列生态恢复工程取得了显著成效,人类活动强度的加大对植被覆盖时空演变产生了重要影响,同时导致植被覆盖对气候等自然因子的变化敏感度降低,削弱了植被生长对气候因子的依赖性。在本文中,仅分析了植被覆盖度变化对气候变化的响应关系,没有考虑

人类活动,如土地利用变化等因素的干扰,未能将人类活动在黄土高原地区植被覆盖度时空演变过程中所做的贡献量化;另外,气候因子还需考虑日照时间、湿度及蒸发量等因素,这些因素在未来研究中应予以考虑和思索。

参考文献:

[1] 李洪权,范广洲,周定文,等. 青藏高原春季植被变化特征及其对夏季气温的影响[J]. 地理科学,2008,28(2): 259-265.

[2] Roerink G J, Menenti M, Soepboer W, et al. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,2003,28(1):103-109.

[3] 甘春英. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[D]. 广州:华南师范大学,2011.

[4] 祁燕,王秀兰,冯仲科,等. 基于 RS 与 GIS 的北京市植被覆盖度变化研究[J]. 林业调查规划,2009,34(2):1-4.

[5] Application of artificial neural networks in global climate change and ecological research: An overview[J]. Chinese Science Bulletin,2010,45(34):3853-3863.

[6] Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999[J]. Science in China (Series C: Life Sciences),2004,55(3):229-240.

[7] 崔林丽,史军,杨引明,等. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征[J]. 地理学报,2009,64(7):850-860.

[8] 刘军会,高吉喜,王文杰,等. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 山地学报,2013,31(2):234-242.

[9] 李震,阎福礼,范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系[J]. 遥感学报,2005,9(3):308-313.

[10] 孙红雨,王长耀,牛铮,等. 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,1998,13(3):204-210.

[11] 武永利,李智才,王云峰,等. 山西典型生态区植被指数 (NDVI)对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2009,28(5):925-932.

[12] 李月臣,宫鹏,刘春霞,等. 北方 13 省 1982 年—1999 年植被变化及其与气候因子的关系[J]. 资源科学,2006,28(2):109-117.

[13] 任瑾,罗哲贤. 从降水看我国黄土高原地区的干旱气候特征[J]. 干旱地区农业研究,1989,7(2):36-43.

[14] 周立三. 中国农业地理[M]. 北京:科学出版社,2000.

[15] Beck H E, McVicar T R, van Dijk A I J M, et al. Global evaluation of four AVHRR-NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment,2011,115(10): 2547-2563.

参考文献:

- [1] 刘新卫,陈百明,史学正. 国内 LUCC 研究进展综述[J]. 土壤,2004,36(2):132-135.
- [2] 葛全胜,戴君虎,何凡能,等. 过去三百年中国土地利用变化与陆地碳收支[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [3] 张云鹏,孙燕,王小丽,等. 不同尺度下的土地利用变化驱动力研究:以常州市新北区为例[J]. 水土保持研究,2012,19(6):111-117.
- [4] 容芳芳,塔西甫拉提·特依拜,田源,等. 于田绿洲土地利用/覆盖变化轨迹分析[J]. 水土保持研究,2010,17(3):259-263.
- [5] 谭君,李世平. 铜川市土地利用变化对生态系统服务价值的影响分析[J]. 水土保持研究,2012,19(6):131-136.
- [6] 余慧容,蒲春玲,刘志有,等. 基于 TM/ETM+ 绿洲城市土地利用时空演变分析:以新疆奎屯市为例[J]. 水土保持研究,2012,19(6):147-151.
- [7] Chandra P Giri. Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications[M]. New York: CRC Press,2012.
- [8] 程克坚,彭补拙,濮励杰. 干旱绿洲地区土地资源可持续利用初探:以新疆吐鲁番市为例[J]. 资源科学,1998,20(4):14-18.
- [9] 刘荣,高敏华,谢峰. 基于 Logistic 回归模型的土地利用格局模拟分析:以新疆吐鲁番市为例[J]. 水土保持研究,2009,16(6):74-78.
- [10] 张光耀,刘光远,崔丽娜,等. 西北干旱区设施农业土地利用效益研究:以吐鲁番市为例[J]. 新疆农业科学,2011,48(6):1157-1161.
- [11] 曹晶晶,吴静,李纯斌. 基于马尔柯夫模型的酒泉市肃州区 LUCC 趋势预测[J]. 国土与自然资源研究,2008(1):45-47.
- [12] 刘启承,熊文强,韩贵锋. 用马尔可夫理论预测三峡库区的土地利用趋势[J]. 重庆大学学报,2005,28(2):107-110.
- [13] 徐岚,赵界. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报,1993,4(3):272-277.
- [14] 刘福辉. 基于遥感的张家界市永定区土地覆盖动态监测研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [15] 侯芳,高敏华. 吐鲁番市土地利用动态变化研究[J]. 资源环境与工程,2010,24(3):317-320.
- [16] 冉圣宏,李秀彬,吕昌河. 土地覆被及生态服务价值变化的多时间尺度模拟:以四川省渔子溪流域为例[J]. 地理学报,2006,61(10):1113-1120.
- [17] 刘姣娣,曹卫彬,李华,等. 基于马尔科夫模型的石河子垦区土地利用动态变化研究[J]. 新疆农业科学,2011,48(10):1936-1940.
- [18] 李传哲,于福亮,刘佳,等. 近 20 年来黑河干流中游地区土地利用/覆被变化及驱动力定量研究[J]. 自然资源学报,2011,26(3):353-363.
- [19] 刘纪远. 西藏自治区土地利用[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [20] 陈妮,李谭宝,张晓萍,等. 北洛河流域植被覆盖度时空变化的遥感动态分析[J]. 水土保持通报,2013,33(3):206-210,327.
- [21] 马明国,王建,王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报,2006,10(3):421-431.
- [22] 白文龙,张福平,倪海燕,等. 关中地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应研究[J]. 农业现代化研究,2013,34(1):104-108.
- [23] 周伟,王倩,章超斌,等. 黑河中上游草地 NDVI 时空变化规律及其对气候因子的响应分析[J]. 草业学报,2013,22(1):138-147.
- [24] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [25] 李双双,延军平,万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(7):960-970.
- [26] 许炯心,信忠保. 从黄土高原植被指数数据中获取森林覆盖率信息[J]. 中国水土保持科学,2010,8(4):7-12.
- [27] 孙艳萍,张晓萍,刘建祥,等. 黄土高原水蚀风蚀交错带植被覆盖度动态变化[J]. 干旱区研究,2013,30(6):1036-1043.
- [28] Jingyong Z, Wenjie D, Congbin F, et al. The influence of vegetation cover on summer precipitation in China: A statistical analysis of NDVI and climate data[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2003,20(6):1002-1006.
- [29] Goetz S J, Fiske G J, Bunn A G. Using satellite time-series data sets to analyze fire disturbance and forest recovery across Canada[J]. Remote Sensing of Environment,2006,101(3):352-365.
- [30] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. International Journal of Remote Sensing,1986,7(11):1417-1434.
- [31] 万龙,马芹,张建军,等. 黄土高原降雨量空间插值精度比较:KRIGING 与 TPS 法[J]. 中国水土保持科学,2011,9(3):79-87.
- [32] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology,2005,25(15):1965-1978.
- [33] Fung T, Siu W. Environmental quality and its changes, an analysis using NDVI[J]. International Journal of Remote Sensing,2000,21(5):1011-1024.
- [34] Pan Y, Shi P, Zhu W, et al. Measurement of ecological capital of Chinese terrestrial ecosystem based on remote sensing [J]. Science in China Series D: Earth Sciences,2005,48(6):786-796.

(上接第 40 页)