

2000—2013 年西安市植被覆盖度时空演变

贾路¹, 任宗萍¹, 李占斌^{1,2}, 徐国策¹, 时鹏¹, 张译心¹, 王斌¹

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2.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实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:随着黄土高原地区退耕还林政策的实施,近十几年西安市植被覆盖情况变化发生了显著变化。为了对西安市植被覆盖变化进行深入的研究,利用 Mann-Kendall 趋势检验法及 Hurst 指数、Pettitt 检验法分析了 2000—2013 年来西安市植被覆盖度变化特征,并利用重心转移模型和相对发展率分析了西安市植被覆盖度变化的空间变化差异。结果表明:(1) 西安市植被覆盖度中等程度变异面积占总面积 10.02%;(2) 西安市植被覆盖度呈增加趋势的面积占区域总面积 86.54%,具有正向持续性的面积占区域总面积 72.62%,35.30%面积植被覆盖度呈持续改善;(3) 西安市植被覆盖度突变年份均显著发生在 2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年,发生显著突变年份的面积占总面积的 17.58%;(4) 西安市植被覆盖度相对发展率空间变化范围为 $-9.07 \sim 7.49$,相对发展率的负值占区域总面积的 20.77%,西安市植被覆盖度空间重心呈现由西南逐渐向东北方向转移的趋势;(5) 西安市降雨量与植被覆盖度均值均呈现增加趋势,相关系数为 0.47 ($p < 0.09$),空间分布重心呈现从东北向西南转移的趋势,与植被变化呈现相反的趋势。研究成果有助于进一步深化对西安市植被恢复状况及其影响因素的认识,为西安市植被恢复等生态建设工程提供一定的科学依据。

关键词:植被覆盖度;突变性;重心转移

中图分类号:Q948; TP75

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0274-06

Temporal and Spatial Evolution of Vegetation Coverage in Xi'an City from 2000 to 2013

JIA Lu¹, REN Zongping¹, LI Zhanbin^{1,2}, XU Guoce¹,
SHI Peng¹, ZHANG Yixin¹, WANG Bin¹

(1.State Key Laboratory base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With the implementation of the policy of returning farmland to forestland in the Loess Plateau, the changes in vegetation coverage in Xi'an City have changed significantly in the past decade. In order to conduct in-depth research on the changes of vegetation coverage in Xi'an City, the Mann-Kendall trend test and Hurst index, Pettitt test were used to analyze the changes of vegetation coverage in Xi'an City from 2000 to 2013, and the spatial variation of vegetation coverage change in Xi'an City was analyzed by using the gravity transfer model and relative development rate difference. The results showed that: (1) the moderate variation area of vegetation coverage in Xi'an City accounted for 10.02% of the total area; (2) the area of vegetation coverage in Xi'an City increased by 86.54%, and the area of positive persistence accounted for 72.62% of the total area, vegetation coverage of 35.30% of area showed continuous improvement; (3) vegetation coverage mutation years of Xi'an City occurred significantly in 2004, 2005, 2006, 2007, and 2008, respectively, the area of significant mutation years accounted for 17.58% of the total area; (4) the spatial variation range of relative coverage rate of vegetation coverage in Xi'an City ranged from -9.07 to 7.49 , and the negative value of

收稿日期:2018-11-29

修回日期:2019-01-20

资助项目:西安市水利水土保持工作站委托项目“西安市城市水土保持关键技术研究”(104-441118085)

第一作者:贾路(1994—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为水土资源保护与遥感。E-mail:XiaMuXingYi94@163.com

通信作者:徐国策(1985—),男,河南洛阳人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:xuguoce_x@163.com

relative development rate accounted for 20.77% of the total area; the trend of the center of gravity of vegetation coverage in Xi'an City gradually shifted from southwest to northeast; (5) the average rainfall and regional vegetation coverage in Xi'an City showed the increasing trend, the correlation coefficient was 0.47 ($p < 0.09$), and the spatial distribution center of gravity showed a trend of shifting from northeast to southwest, which was opposite to the change of vegetation. These research results will help further deepen the understanding of the vegetation restoration status and its influencing factors in Xi'an City, and provide a scientific basis for the ecological construction projects such as vegetation restoration in Xi'an City.

Keywords: vegetation coverage; mutation; center of gravity transfer

当前中国区域水土流失^[1]与荒漠化、干旱等问题依然严重,急需进行生态环境治理。随着工业化和城镇化的迅速发展,广大人民对我国生态环境美好的生活越来越向往^[2]。植被在地表生态系统的能量交换、水循环、碳循环、生物地球化学循环和维持中发挥着重要作用,区域植被恢复情况的好坏,对区域生态环境变化具有重要意义。

在人类活动和气候变化高强度共同作用下,区域水文过程发生了非常明显的变化^[3]。气候变化、人类活动以及水文过程的变化直接或者间接对植被恢复等生态过程产生重要的影响^[4]。标准化植被指数(NDVI)数据具有较高空间覆盖和长时间序列等优点,已成为分析植被生长历史、监测当前状况和预测未来变化的最重要工具,通常被用于大尺度植被变化和空间密度分布的研究^[5-7]。目前我国基于NDVI数据对很多地区的植被变化及其影响因素都进行分析。有研究表明,中国北方地区年NDVI呈轻微上升趋势^[8]。人类活动对植被恢复起着一定的积极的作用,在青海、西藏高原地区有近61.2%的草原地区实施了一定的工程措施进行植被恢复,其中气候变化对56.7%的退化草原存在影响^[9]。尽管以往的研究对不同地区植被覆盖的变化和时空分布模式提供了十分有用的信息,但许多研究主要集中在植被覆盖的时空分布特征的驱动因子和植被动态变化上,对于植被恢复的空间差异变化研究却极为少见。因此,全面系统地西安市植被覆盖度时空变化及其差异进行分析研究是一个十分有意义的问题。

本文采用 Mann-Kendall 检验法对西安市 2000—2013 年植被覆盖度进行趋势分析,采用 Hurst 指数对西安市 2000—2013 年植被覆盖度进行持续性分析,同时通过 Pettitt 检验法对西安市 2000—2013 年植被覆盖度进行突变点分析,并结合相对发展率和重心转移模型对 2000—2013 年西安市植被覆盖度进行区域差异分析。研究成果有助于进一步深化对西安市植被覆盖度变化及其影响因素的认识,有利于为西安市植被恢复等生态建设工程提供

一定的科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

西安市地处陕西关中平原,位于 107° — 109° E, 33° — 34° N,共统辖 9 区 4 县,总面积约 9 983 km²,市区面积 1 276 km²。地质状况复杂多样,地质、构造和岩相具有不同的发育特点,地形南高北低(图 1),秦岭位于西安市南部,渭河位于西安市北部。地貌类型主要为平原和基岩山地两大类,平原所占比例为 46%,基岩山地所占比例为 54%。气候类型为暖温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,年内最高温度在 7 月份,年内最低温度在 1 月份,年平均降水为 600 mm 左右,由南向北逐渐递减。秦岭山地基本属自然植被,渭河平原、骊东南丘陵与黄土台塬属栽培植被,两大植被区域的分布与地貌区域范围大体一致。境内的自然植被分布于秦岭山区,随海拔高度变化演替,依次出现落叶阔叶林、针阔叶混交林、针叶林、高山灌丛与草甸等植被类型。

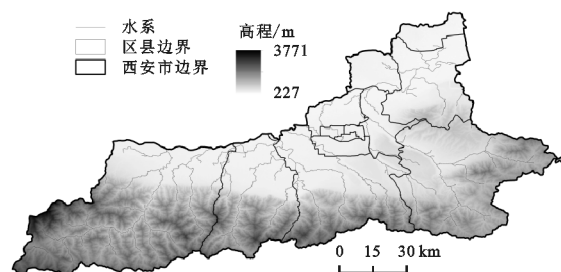


图 1 西安市地理位置

1.2 数据来源

本文所用 NDVI 数据是一个长期的 MODIS 植被指数数据集。数据集由中国科学院计算机网络信息中心国际科技数据镜像网站提供(<http://www.gscloud.cn>),数据时间为 2000—2013 年,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为旬,用最大值合成法(MVC)获得 NDVI 年值,植被覆盖率是根据以下公式计算的:

$$f = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \quad (1)$$

式中: f 为植被覆盖度; NDVI 为像素的植被指数; NDVI_{\max} , NDVI_{\min} 为研究区 NDVI 的最大值和最小值。

降水数据来源于中国气象数据服务中心中国地面气候资料的年度数据集, 包含西安市及其附近区域耀县、汉中、武功、华山、商州、镇安、佛坪 7 个气象站点 2000—2013 年逐年降水量, 通过算数平均法对 7 个雨量站年降雨量取平均值, 将点雨量转换为区域面降雨量。

1.3 研究方法

Mann-Kendall 检验(M-K)是判断数据序列变化趋势的有效方法, 被广泛应用在气象和水文序列的分析中^[10], 本文采用 Mann-Kendall 检验进行年植被覆盖度的变化趋势分析。

Hurst 指数(H)在定量表征时间序列的持续性或长期相关性具有广泛的应用性, 已被广泛用于气候和水文序列的分析中^[11]。其中 H 代表 Hurst 指数。 H 的值在 $[0, 1]$ 的范围内。当 $H=0.5$ 时, 表明植被覆盖的时间序列是随机序列, 是不可持续的。当 $H>0.5$ 时, 植被覆盖度的变化与目前的趋势基本一致, 表明植被的可持续性为正向的。 $H<0.5$ 表示负可持续性, 未来植被覆盖变化将与当前趋势相反。

Pettitt 检验法^[12]采用 Mann-Whitney 中 $U_{t,N}$ 值检验同一总体中两个样本 X_1, \dots, X_t 和 X_{t+1}, \dots, X_N , Pettitt 检验的零假设为没有变化点, 当 $|U_{t,N}|$ 取最大值时对应的 X_t 被认为是可能的突变点。当 $p \leq 0.05$ 时认为数据中存在均值变异点。其显著性水平可由下式计算:

$$p = 2e^{\frac{-6U_{t,N}^2}{N^2 + N^3}} \quad (2)$$

相对发展率^[13](NICH)可以用来分析研究区内, 不同像元在研究时段初期与末期植被覆盖度变化量与研究区整体研究时段初期与末期变化量的差异, 计算公式如下:

$$\text{NICH} = \frac{Y_{2i} - Y_{1i}}{Y_2 - Y_1} \quad (3)$$

式中: Y_{2i} 为 2013 年第 i 个栅格植被覆盖度; Y_{1i} 为 2000 年第 i 个栅格植被覆盖度; Y_2 为 2013 年西安市植被覆盖度平均值; Y_1 为 2000 年西安市植被覆盖度平均值。

空间重心转移模型^[14]对地理对象的空间分布进行描述的重要方法, 可以用来研究植被覆盖度空间重心随时间的变化, 本研究采用空间重心转移模型来研究西安市 2000—2013 年植被覆盖度的重心变化, 计算公式如下:

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n (c_{mi} \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n c_{mi}} \quad (4)$$

$$Y_m = \frac{\sum_{i=1}^n (c_{mi} \cdot y_i)}{\sum_{i=1}^n c_{mi}} \quad (5)$$

式中: X_m 和 Y_m 为植被覆盖度空间分布重心的经纬度; c_{mi} 为第 i 个栅格的植被覆盖度值; x_i 为第 i 个栅格的经度; y_i 为第 i 个栅格的纬度。

本研究所有数据计算通过 ArcGIS 10.2 软件及 R 语言编程实现, 使用 Excel 软件进行基础数据整理。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度年际变化特征

2000—2013 年西安市植被覆盖度最小值空间变化范围为 0.33~0.97, 最大值空间变化范围为 0.56~1.00, 多年平均值空间变化范围为 0.44~0.98, 标准差空间变化范围为 0.01~0.17, 变异系数空间变化范围为 0.01~0.29。根据变异系数 C_v 的分类系统: 弱变异 $C_v \leq 10\%$, 中等变异 $10\% < C_v < 100\%$, 强变异 $C_v \geq 100\%$ 。2000—2013 年西安市植被覆盖度变化属于弱变异($C_v < 0.1$)和中等程度变异($0.1 < C_v < 1$)。

从图 2 中可以看出, 2000—2013 年西安市植被覆盖度变异程度中, 中等程度变异面积占总面积 10.02%, 弱变异面积占总面积 89.98%, 总体来说, 2000—2013 年西安市植被覆盖变异强度较弱, 中等程度变异范围较小, 中等程度变异主要分布于西安市城区及临潼区南部和蓝田县北部地区等, 该区人类活动强烈, 对植被变化影响较大。

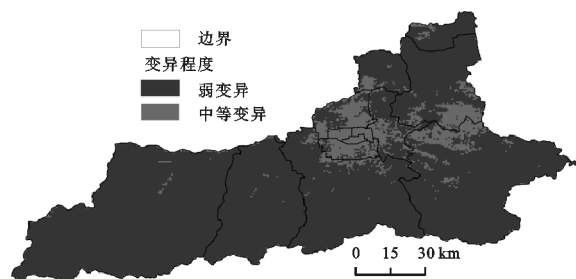


图 2 2000—2013 年西安市植被覆盖度变异等级空间分布

2.2 植被覆盖度的趋势性与持续性

为了进一步分析 2000—2013 年西安市植被覆盖度变化的趋势特征和未来变化的持续性, 结合 Mann-Kendall 检验和 Hurst 指数计算得到了 2000—2013 年西安市植被覆盖度 M-K 趋势检验图和 2000—2013 年西安市植被覆盖度 Hurst 指数分布图。

如图 3 所示, 区域植被覆盖度整体呈增加趋势, 其中呈增加趋势的面积占区域总面积 86.54%, 显著增加的面积占区域总面积的 37.25%, 显著减少的面积占区域总面积的 1.68%, 显著减少面积主要分布城区周边, 该区域人类活动强烈, 对植被破坏较大。

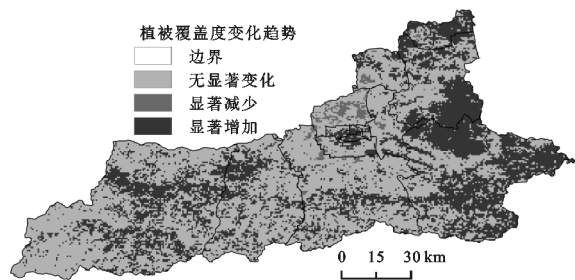


图 3 2000—2013 年西安市植被覆盖度 M-K 趋势检验

由图 4 可知,区域植被覆盖度 Hurst 指数空间变化范围为 0.18~0.72,其中正向持续性的面积占区域总面积 72.62%,负向持续性的面积占区域总面积 27.38%。西安市 35.30%面积植被恢复呈持续改善($H>0.5$,且 M-K 统计量 >0)。

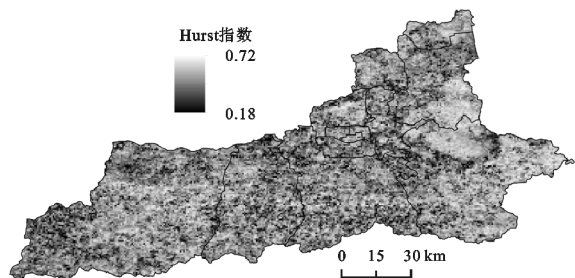


图 4 2000—2013 年西安市植被覆盖度 Hurst 指数分布

2.3 植被覆盖度突变点空间分布识别及突变年份分析

Pettit 检验是一种常用地时间序列突变点的方法,可以简单快速有效识别一个时间系列发生突变的时间,因此在突变点检验应用较为广泛。为此,本研究对所研究时期内的植被覆盖度进行 Pettit 检验,对西安市植被覆盖度突变性进行分析,得到各西安市植被覆盖度突变年份的时空分布情况。

如图 5 所示,2000—2013 年西安市植被覆盖度突变年份均显著发生在 2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年,发生显著突变年份的面积占总面积的 17.58%,其中发生显著突变年份在 2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年的面积占总面积的比例依次是 1.71%,4.85%,7.10%,2.86%,1.06%。本文将突变点前植被覆盖度 M-K 检验统计量小于零且突变点后植被覆盖度 M-K 检验统计量大于零的突变点定义为凹突变点,凹突变点表明外界环境对植被覆盖度变化具有促进作用;将突变点前植被覆盖度 M-K 检验统计量大于零且突变点后植被覆盖度 M-K 检验统计量小于零的突变点定义为凸突变点,凸突变点表明外界环境对植被覆盖度变化具有抑制作用。根据分析结果,2000—2013 年西安市植被覆盖度凹突变点占总突变点的 20.67%,2000—2013 年西安市植被覆盖度凸突变点占总突变点的 4.18%,因此,2000—2013 年西安市植被恢复在 2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年期间受到了外界环境的一定促进增长作用,发生突变的地点主要集中于灞桥区、蓝田

县等人类活动较少的地区,该区域植被覆盖度较高,植被覆盖良好。

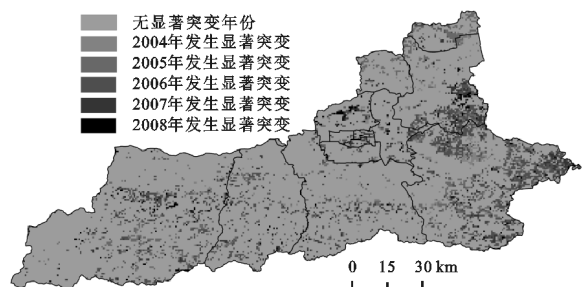


图 5 2000—2013 年西安市植被覆盖度突变点空间分布

2.4 植被覆盖度变化的空间差异性及其重心转移

为了进一步分析在外界环境干扰下西安市植被覆盖度变化的空间差异性,计算 2000—2013 年西安市植被覆盖度相对发展率,得到 2000—2013 年西安市植被覆盖度相对发展率空间分布图。

对图 6 进行分析得到,2000—2013 年西安市植被覆盖度相对发展率空间变化范围为-9.07~7.49,相对发展率的负值占区域总面积的 20.77%,相对发展率的负值主要出现在城区,说明城区植被覆盖度变化与区域整体变化趋势相反,人类活动的范围和强度在不断增大。相对发展率的最大值分布于灞桥区附近,说明该区域区植被覆盖度增长速率优于区域整体植被恢复程度。

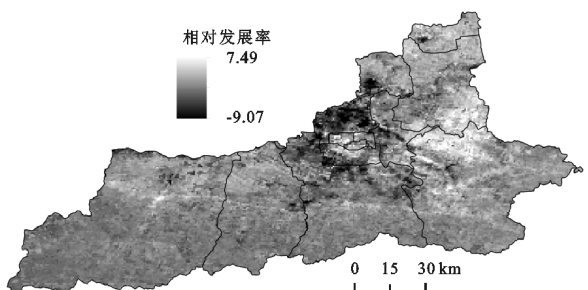


图 6 2000—2013 年西安市植被覆盖度相对发展率空间分布

由图 7 可以看出,2000—2013 年西安市植被覆盖度空间重心呈现由西南逐渐向东北方向转移的趋势。2000—2001 年植被覆盖度重心从东北向西南转移,2001—2002 年植被覆盖度重心从西南向东北转移且转移距离比较长,2002—2012 年植被覆盖度重心变化趋势不明显,2012—2013 年植被覆盖度重心从西南向东北转移。2013 年西安市各区县人口数量从大到小排序依次为:长安区>雁塔区>临潼区>碑林区>周至县>蓝田县>莲湖区>鄠邑区>未央区>灞桥区>新城区>高陵区>阎良区。整体来说,2000—2013 年西安市植被覆盖度增加趋势逐渐从西南部的周至等人口密度较小的地区向临潼区等人口密度较大的东北部区域转移,说明随着社会的进步,人们对植被等生态环境的保护更加注重。

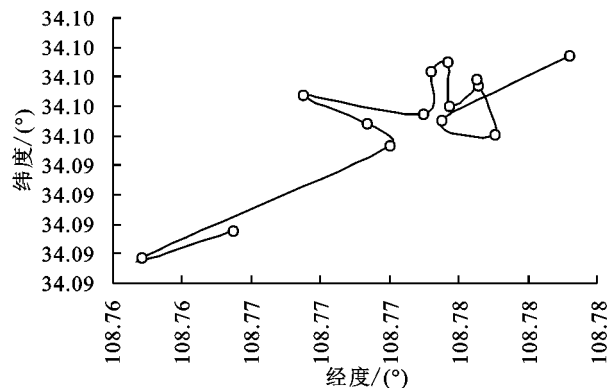


图7 2000—2013年西安市植被覆盖度重心转移

3 讨论

3.1 气候因素及对植被恢复的影响

降雨作为影响区域植被变化的主要气候因素^[15],降水变化对区域径流变化和土壤水的变化具有直接的影响,从而影响到植被对水分的吸收,进而影响到植被的生长变化。近近年来全球气候发生显著变化,气温升高,降水增多,对区域下垫面变化具有巨大影响^[16]。

从图8可以看出,2000—2013年西安市面降雨量最小值为570.18 mm,最大值为1 002.74 mm,多年平均值为734.00 mm,变异系数为0.17,变异强度为中等程度。2000—2013年西安市植被覆盖度均值变化的最小值为0.83,最大值为0.90,多年平均值为0.87,变异系数为0.02,变异强度为弱变异。2000—2013年西安市面降雨量和区域植被覆盖度均值均呈现增加趋势,根据M-K趋势检验结果,降雨量变化呈不显著增加趋势,植被覆盖度均值呈显著增加趋势。降雨量的Hurst指数为0.51,植被覆盖度均值的Hurst指数为0.66,降雨量与植被覆盖度均值未来呈现增加趋势,降雨量与植被覆盖度均值皮尔逊相关性系数为0.47($p < 0.09$),呈不显著正相关。根据转移重心模型,2000年西安市降雨量空间分布重心坐标为108.72°E,33.83°N,2013年西安市降雨量空间分布重心坐标为108.54°E,33.79°N,2000—2013年西安市降雨量空间分布重心呈现从东北向西南转移的趋势,与植被变化呈现相反的趋势。

3.2 不同土地利用变化对植被覆盖的影响

由图9可知,2000—2013年西安市各类土地利用植被覆盖度均有增加趋势,2000年西安市耕地、林地、草地、建设用地、未利用地的植被覆盖度均值依次为0.80,0.91,0.86,0.76,0.83,其中林地植被覆盖度最大,建设用地植被覆盖度最小。2013年西安市耕地、林地、草地、建设用地、未利用地的植被覆盖度均值依次为0.87,0.94,0.93,0.76,0.87,其中林地植被覆盖度最大,与2000年相比草地与耕地的植被覆盖

度增加最多,建设用地植被覆盖度最小,与2000年相比基本未发生变化。

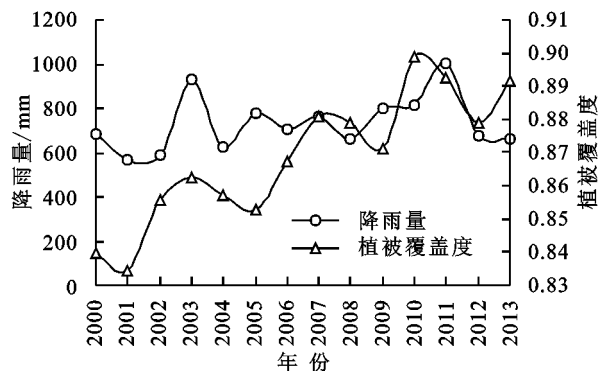


图8 2000—2013年西安市植被覆盖度与降雨时间序列

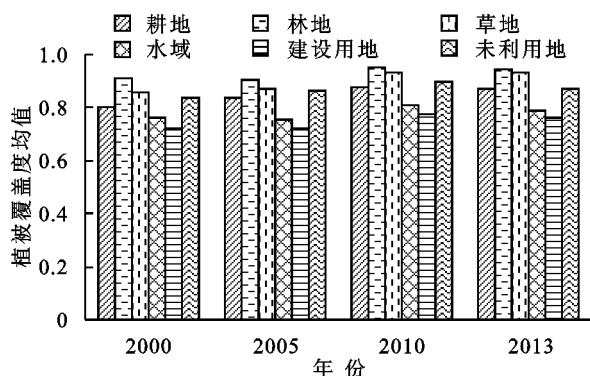


图9 2000—2013年西安市各类型土地利用植被覆盖度变化

以上研究说明,2000—2013年西安市降雨对植被变化存在一定程度促进作用,但主要是土地利用等人类活动引起的植被覆盖度变化。

4 结论

(1) 2000—2013年西安市植被覆盖度变异程度整体较弱,中等程度变异面积占总面积10.02%,弱变异面积占总面积89.98%,主要分布于西安市城区及临潼区南部和蓝田县北部地区等。

(2) 2000—2013年西安市植被覆盖度整体呈增加趋势,其中呈增加趋势的面积占区域总面积86.54%,正向持续性的面积占区域总面积72.62%,负向持续性的面积占区域总面积27.38%,35.30%面积植被恢复呈持续改善。

(3) 2000—2013年西安市植被覆盖度突变年份均显著发生在2004年、2005年、2006年、2007年、2008年,发生显著突变年份的面积占总面积的17.58%。

(4) 2000—2013年西安市植被覆盖度相对发展率空间变化范围为-9.07~7.49,相对发展率的负值占区域总面积的20.77%,城区植被覆盖度变化与区域整体变化趋势相反,人类活动的范围和强度在不断增大,西安市植被覆盖度空间重心呈现由西南逐渐向东北方向转移的趋势。

(5) 2000—2013 年西安市面降雨量和区域植被覆盖度均值均呈现增加趋势,降雨量与植被覆盖度均值皮尔逊相关性系数为 0.47($p<0.09$),呈不显著正相关。降雨量空间分布重心呈现从东北向西南转移的趋势,与植被变化呈现相反的趋势,西安市降雨对植被变化存在一定程度促进作用,但主要起作用的是非降雨因素。

参考文献:

[1] 胡良军,张晓萍,杨勤科,等.黄土高原区域水土流失评价数据库的建立[J].水利学报,2002,33(1):81-85.

[2] 翟绍果,湛基东.共建美好生活的时代蕴意、内涵特质与实现路径[J].西北大学学报:哲学社会科学版,2017,47(6):20-26.

[3] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457-464.

[4] 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):98-108.

[5] 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.

[6] Lanfredi M, Simoniello T, Macchiato M. Comment on “Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999” by L. Zhou et al[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108 (D/12), DOI: 10.1029/

2002JD003046.

[7] Sun Y, Yang Y, Zhang L, et al. The relative roles of climate variations and human activities in vegetation change in North China[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2015, 87/88:67-78.

[8] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2015,9(1):38-41.

[9] 李析男,谢平,李彬彬,等.变化环境下不同等级干旱事件发生概率的计算方法:以无定河流域为例[J].水利学报,2014,45(5):585-594.

[10] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-496.

[11] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].生态学报,2014,34(17):5007-5020.

[12] 陈占寿,乔爱芳.几种水文序列变异点诊断方法的性能比较[J].青海师范大学学报:自然科学版,2014(3):1-5.

[13] 毕燕,徐洪琼,陈乔.广西国内旅游规模区域差异分析[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2012,29(4):118-123.

[14] 李巍.大兴安岭地区土壤侵蚀动态研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.

[15] 许炯心.黄土高原植被—降水关系的临界现象及其在植被建设中的意义[J].生态学报,2005,25(6):1233-1239.

[16] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.



(上接第 273 页)

[15] He Q, Yang X H, Huo W, et al. Characteristics of sand granularity from Kumtag Desert and its environmental significance[J]. Journal of Desert Research, 2009,29(1):18-22.

[16] 王翠,雷加强,李生字,等.策勒绿洲—沙漠过渡带风沙流挟沙粒度的垂直分异[J].干旱区地理,2014,37(2):230-238.

[17] 张号,张克存,安志山,等.敦煌月牙泉景区沙丘粒度特征[J].中国沙漠,2014,34(3):645-649.

[18] 哈斯,王贵勇.沙坡头地区新月形沙丘粒度特征[J].中国沙漠,2001,21(3):271-275.

[19] 张克存,牛清河,安志山,等.敦煌沙漠—绿洲过渡带近地表风沙动力环境[J].水土保持通报,2015,35(4):8-11,17.

[20] 林永崇,徐立帅.策勒绿洲—沙漠过渡带风成沉积物粒度的空间变化[J].应用生态学报,2017,28(4):1337-1343.

[21] 周娜,尤源,雷加强,等.毛里塔尼亚努瓦克肖特沙丘粒度分布特征及其环境意义[J].中国沙漠,2018,38(2):252-261.

[22] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. the Journal of Geology, 1922,30(5):377-392.

[23] 刘志杰,公衍芬,周松望,等.海洋沉积物粒度参数 3 种计算方法的对比研究[J].海洋学报:中文版,2013,35(3):179-188.

[24] 桂洪杰.黄河宁蒙河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究[D].兰州:兰州大学,2013.

[25] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,1987(1):95-285.

[26] 唐进年,王继和,苏志珠,等.库姆塔格沙漠羽毛状沙丘表面沙粒度分布特征[J].干旱区地理,2008,31(6):918-925.

[27] 庞红丽.腾格里沙漠北缘沙丘分布及粒度特征研究[D].北京:中国地质大学,2012.

[28] 李恩菊,董治宝,赵景波.巴丹吉林沙漠典型高大沙山迎风坡粒度特征[J].干旱区地理,2011,34(3):471-478.

[29] Lancaster N. Geomorphology of desert dunes[M]. London: Routledge, 1995.