

基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因

郭永强¹,王乃江¹,褚晓升¹,李成¹,罗晓琦¹,冯浩^{2,3*} (1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探明黄土高原植被覆盖时空变化及其原因,基于 Google Earth Engine(GEE),采用 Landsat Surface Reflectance data(陆地卫星地表反射率数据)分析了黄土高原 1987~2015 年间植被覆盖度的时空变化规律,并借助累积量斜率变化率方法对引起植被覆盖度变化的气候和人为因素进行了量化分析.结果表明:黄土高原年均植被覆盖度由 1987 年的 41.78%增加到 2015 年的 53.23%,增速为 0.38%/a($P<0.05$).其中,1987~1999 年年均植被覆盖度变化趋势不显著($P>0.05$);而退耕还林还草工程实施以来(2000~2015 年),年均植被覆盖度显著增加($P<0.05$),增速达到 0.59%/a.由像元尺度分析,黄土高原 72.93%的区域植被覆盖度呈增加趋势,其中 38.31%的区域增加趋势显著($P<0.05$).植被覆盖度的变化受气候和人为因素的共同影响,以 1987~1999 年为基准期,气候变化和人类活动对黄土高原 2000~2015 年间植被覆盖度变化的相对贡献率分别为 23.77%、76.23%,人类活动为引起黄土高原植被覆盖度变化的主要原因.退耕还林还草工程极大地改善了黄土高原的植被覆盖状况,但是城市的扩张使得部分地区的植被覆盖呈显著退化现象.

关键词: 植被覆盖度; 时空变化; 原因; Google Earth Engine; 黄土高原

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2019)11-4804-08

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0560

Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine. GUO Yong-qiang¹, WANG Nai-jiang¹, CHU Xiao-sheng¹, LI Cheng¹, LUO Xiao-qi¹, FENG Hao^{2,3*} (1.College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China). *China Environmental Science*, 2019,39(11): 4804~4811

Abstract: Based on Google Earth Engine, this study conducted a quantitative analysis for the spatiotemporal variation of vegetation coverage from 1987 to 2015 on the Loess Plateau using Landsat Surface Reflectance data, and the method of slope change ratio of cumulative quantity was used to evaluate the relative contributions of climate change and human activities to it. The results revealed that: the annual vegetation coverage significantly increased from 41.78% in 1987 to 53.23% in 2015 ($P<0.05$), especially after the implementation of the Grain for Green Program (2000~2015) with a significant increase of 0.59%/a ($P<0.05$). However, no significant change was observed for the vegetation coverage during 1987~1999 ($P>0.05$). At a pixel scale, about 72.93% of the research area showed an increasing vegetation coverage and 38.31% of the research area had a significant increase in vegetation coverage ($P<0.05$). Vegetation coverage changes was affected by both climate and human factors. Taking 1987~1999 as reference period, the relative contributions of climate change and human activities to vegetation coverage changes were 23.77% and 76.23% during 2000~2015, respectively. Therefore, human activities were the dominant factors for vegetation coverage changes on the Loess Plateau. The Grain for Green Program has greatly improved the vegetation status on the Loess Plateau, but the expansion of city has caused significant degradation of vegetation coverage in some areas.

Key words: vegetation coverage; spatiotemporal variation; reasons; Google Earth Engine; Loess Plateau

植被是陆地生态系统的重要组成部分,在全球的物质循环和能量流动中起着重要的作用^[1].随着气候变化和人类活动的加剧,植被的生长势必会受到影响^[2-7].因此,研究植被的时空变化规律及其对气候变化和人类活动的响应,在生态环境脆弱的干旱半干旱地区具有重要的生态学意义^[8-9].

黄土高原处于半湿润、半干旱和干旱区的过渡带,长期的乱垦、乱伐、乱牧以及不合理的耕作方式导致该地区植被稀疏,水土流失严重,黄河所含泥沙约 90%来源于此^[10].1999 年国家实施了退耕还林还

草工程^[11-12],黄土高原成为该工程重点实施区域.监测黄土高原退耕还林还草前后植被覆盖时空变化及其影响因素对该地区的可持续性生态建设具有重要的指导意义.

植被覆盖度是衡量地表植被覆盖状况的重要指标,影响大气和地表之间碳、水、能量转化,其高低关乎地表生态系统的健康与否^[13].目前,遥感观测

收稿日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879224,41630860)

* 责任作者, 研究员, nercwsi@vip.sina.com

技术凭借其快速、经济、准确等优势,已经成为区域尺度上植被覆盖度的主要监测手段^[14-15].黄土高原作为我国生态建设的重点区域,其植被覆盖度的动态变化受到广泛关注.国内外学者借助遥感观测技术对该地区植被覆盖度的时空变化规律及其影响因素(气温、降水和人类活动)进行了深入的研究.研究发现,近年来黄土高原植被覆盖度呈上升趋势,生态环境状况得到了改善^[16],并且认为降水与气温的增加以及植被的修复是该地区植被覆盖度增加的主要原因^[17].但受限于数据收集以及本地计算机性能,现有研究的时间序列较短,采用的影像空间分辨率较低,且并未定量探究气候变化和人类活动对于黄土高原植被覆盖的影响.

Google Earth Engine(GEE)是基于云的平台,不仅提供了大量的影像数据,而且可以依靠 Google 的高性能集群服务器对影像进行在线可视化处理,大大提高了工作效率^[18].目前,GEE 被成功应用于大尺度植被长势监测、土地利用类型分类、地表水变化分析等方面^[19-20].基于此,本文借助 GEE 平台,采用 30m 分辨率的 Landsat Surface Reflectance data(陆地卫星地表反射率数据),在分析黄土高原 1987~2015 年植被覆盖度时空变化规律的基础上,确定了 2000~2015 年气候和人为因素对黄土高原植被覆盖度变化的相对贡献率.

1 数据与方法

1.1 研究区概况

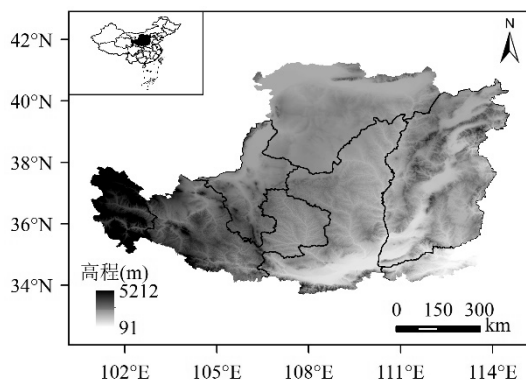


图1 黄土高原位置及概况

Fig.1 Location and overview of the Loess Plateau

黄土高原地处黄河中游(33°43'~41°16' N, 100°54'~114°33' E),地势西高东低,涉及山西、宁夏、

陕西、甘肃、内蒙古、青海、河南 7 个省(区),总面积约为 $6.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1).黄土高原受大陆性季风气候影响,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨.年均温度由西北部地区的 3.6°C 上升到东南部地区的 14.3°C ;年降水量由西北部地区的 150mm 上升到东南部地区的 800mm.该地区由于地形地貌、气候变化以及不合理的人类活动,生态环境恶劣,是世界上水土流失最为严重的地区之一.

1.2 GEE 平台

GEE 又称为谷歌地球引擎,是由谷歌、卡内基梅隆大学和美国地质调查局联合开发的世界上最先进的基于云计算的地理信息处理平台.该平台向用户免费提供海量的卫星影像和其他地球观测数据,并提供足够的运算能力对这些数据进行处理.通过 GEE 可以快速计算 NDVI 等植被指数,预测作物相关产量,监测全球森林变化等.同时,GEE 提供在线的 JavaScript API 和离线的 Python API 接口,方便用户进行数据处理^[18].

1.3 数据来源与处理

1.3.1 Landsat 影像 采用 Landsat Surface Reflectance data(陆地卫星地表反射率数据),空间分辨率为 30m,时间分辨率为 16d,该数据产品已经过大气校正,消除了大气散射、吸收、反射引起的误差,来源于 GEE 平台(<https://earthengine.google.com>).首先在 GEE 平台中利用时间和空间的过滤函数获取 1987~2015 年经过黄土高原上空的 Landsat Surface Reflectance 影像共 22407 景;然后批量对每一景影像进行去云,计算归一化植被指数(NDVI);最后采用最大值合成法对每年的 NDVI 影像进行融合,并使用黄土高原矢量图进行裁剪,获取黄土高原每年的 NDVI 最大值影像,NDVI 最大值影像可以反映当年植被长势最好时期的地表植被覆盖状况^[21].以上操作均在 GEE 平台中完成.

1.3.2 气象数据 气象数据为中国 1987~2015 年逐年年平均气温、年降水量空间插值数据,空间分辨率为 1km,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>).将数据上传到 GEE 平台中,使用黄土高原矢量图进行裁剪,获取黄土高原每年的平均气温和年降水量数据.

1.3.3 土地利用类型数据 中国土地利用现状遥感监测数据来源于中国科学院资源环境科学数据

中心(<http://www.resdc.cn>).在该网站选取 2000 年、2015 年两期中国土地利用现状遥感监测数据.土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型,空间分辨率为 1km.

1.4 研究方法

1.4.1 像元二分模型 采用像元二分模型计算植被覆盖度,它假设一个像元的地表由有植被覆盖部分和无植被覆盖部分组成,植被覆盖部分占整个像元的面积比例即为该像元的植被覆盖度.该方法减小了大气、土壤背景与植被类型等的影响^[22].根据像元二分模型,像元的 NDVI 值由绿色植被部分所贡献的信息 $NDVI_{veg}$ 和裸土部分所贡献的信息 $NDVI_{soil}$ 这两部分组成,植被覆盖度计算公式如下:

$$f_c = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (1)$$

式中: f_c 为植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 为无植被覆盖区域的 NDVI 值,理论上应该接近 0; $NDVI_{veg}$ 为完全植被覆盖区域的 NDVI 值,理论上应该接近 1.但是由于大气、地表、土壤、植被类型等条件的变化,以及传感器观测角度的影响, $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 会随着时间的空间而变化.本文参考李苗苗等^[22]提出的在没有实测数据时 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 的取值方法,即在 NDVI 频率累积表上取给定置信区间内的最大值和最小值,分别作为 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$.彭文甫等^[23]均采用实测数据对该方法的精度进行了验证,结果表明基于该方法估算的植被覆盖度具有较高的精度和可靠性,验证结果符合要求.根据 1987~2015 年 NDVI 最大值影像,制作每年的 NDVI 频率累积表,在 NDVI 频率累积表上取累积频率 5% 的值作为当年的 $NDVI_{soil}$,取累积频率 95% 的值作为当年的 $NDVI_{veg}$.

1.4.2 线性趋势分析 本文采用一元线性回归方法对黄土高原每个像元 1987~2015 年的植被覆盖度进行趋势分析,用斜率—Slope 反映每个像元的变化趋势,计算公式如下:

$$Slope = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n i \cdot f_{ci} - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n f_{ci})}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中:slope 为趋势线的斜率; f_{ci} 为像元第 i 年的植被覆盖度; n 为观测时段的年数($n=29$).当 $slope>0$ 时,植被覆盖度呈增加趋势,反之则降低.

使用 F 检验对变化趋势进行显著性检验,根据

回归和显著性检验结果,将研究区分为:显著改善地区($Slope>0, P<0.05$)、显著退化地区($Slope<0, P<0.05$)、无显著变化地区($P>0.05$).

1.4.3 累积量斜率变化率 植被覆盖度受气候和人为因素的共同影响,为了量化 2000~2015 年间人类活动和气候变化对于黄土高原植被覆盖度变化的贡献率,需构建如果仅受气候变化影响的植被覆盖度序列.研究表明,退耕还林还草之前,黄土高原植被覆盖度与降水和温度的相关性高于退耕还林还草之后^[24],故以 1987~1999 年的数据建立黄土高原年均植被覆盖度(因变量)与年降水量和年均温(自变量)的二元线性回归方程,并用该方程重构 1987~2015 年如果仅受气候变化影响的植被覆盖度序列.将重构的植被覆盖度称为拟合植被覆盖度,遥感观测得到的植被覆盖度称为实际植被覆盖度(即气候和人为因素共同影响的植被覆盖度).

假设累积实际植被覆盖度—年份线性关系式的斜率在 1999 年前后分别为 $slope_a$ 和 $slope_b$;累积拟合植被覆盖度—年份线性关系式的斜率在 1999 年前后分别为 $slope_{fit-a}$ 和 $slope_{fit-b}$,则

累积实际植被覆盖度的斜率变化率 $R_1(\%)$ 为:

$$R_1 = 100 \times (slope_b - slope_a) / slope_a \quad (3)$$

累积拟合植被覆盖度的斜率变化率 $R_2(\%)$ 为:

$$R_2 = 100 \times (slope_{fit-b} - slope_{fit-a}) / slope_{fit-a} \quad (4)$$

气候变化对植被覆盖度变化的贡献率 $C_C(\%)$ 为:

$$C_C = 100 \times R_2 / R_1 \quad (5)$$

人类活动对植被覆盖度变化的贡献率 $C_H(\%)$ 为:

$$C_H = 100 - C_C \quad (6)$$

1.4.4 残差趋势分析 基于单个像元采用残差分析将气候变化和人类活动对植被覆盖度的影响进行分离.步骤如下:

(1)用已建立的植被覆盖度(因变量)与年降水量和年均温(自变量)的二元线性回归方程重构每个像元 1987~2015 年如果仅受气候变化影响的植被覆盖度序列.

(2)用遥感观测的每个像元的实际植被覆盖度序列,减去重构的如果仅受气候变化影响的植被覆盖度序列,得到如果仅受人类活动影响的植被覆盖度序列,计算公式如下:

$$\varepsilon = f_{c-real} - f_{c-predicted} \quad (7)$$

式中： ε 为残差值，即如果仅受人类活动影响的植被覆盖度值； f_{c-real} 为遥感观测的实际植被覆盖度值； $f_{c-predicted}$ 为如果仅受气候变化影响的植被覆盖度值。

(3)将每个像元的残差值与年份进行线性回归，得到残差的年际变化趋势，分析人类活动对植被覆盖度变化的影响，其公式如下：

$$\varepsilon = at + c \quad (8)$$

式中： ε 为残差值； t 为年份； c 为趋势线截距； a 为趋势线的斜率，当 $a > 0$ 时，则表明人类活动对该像元植被覆盖度的变化为正面影响，反之则为负面影响， a 的绝对值越大表明人类活动对植被覆盖度变化的影响越大。

2 结果与分析

2.1 黄土高原植被覆盖度空间分布特征

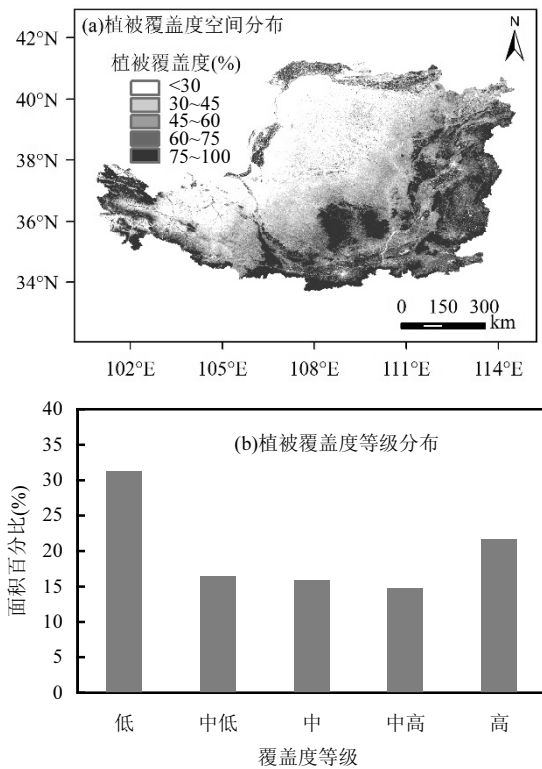


图2 1987~2015年黄土高原平均植被覆盖度空间分布
Fig.2 Spatial distribution of the average vegetation coverage on the Loess Plateau during 1987~2015

黄土高原植被覆盖度呈现由东南向西北递减的态势(图 2a),这与黄土高原植被类型的地带性分布有关.黄土高原植被类型从东南到西北依次为森

林植被带、森林草原植被带、典型草原植被带、荒漠草原植被带、草原化荒漠带^[25].根据水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》^[26],将植被覆盖度划分为 5 个等级:低覆盖度 [0,30%]、中低覆盖度 [30,45%]、中等覆盖度 [45,60%]、中高覆盖度 [60,75%] 和高覆盖度 [75%,100%].黄土高原低覆盖度区域所占的面积比例最大,达到 31.32%(图 2b),主要分布在黄土高原的西北部地区,这些地区多为草地和沙地,植被较为稀疏;其次为高覆盖度区域,面积占 21.66%,主要分布在东南部地区,植被类型多为林地、灌丛以及农作物,植被长势较好.

2.2 黄土高原植被覆盖度动态变化特征

1987~2015 年黄土高原年均植被覆盖度呈显著增加趋势,增速为 0.38 %/a($P < 0.05$),由 1987 年的 41.78%增加到 2015 年的 53.23%(图 3).

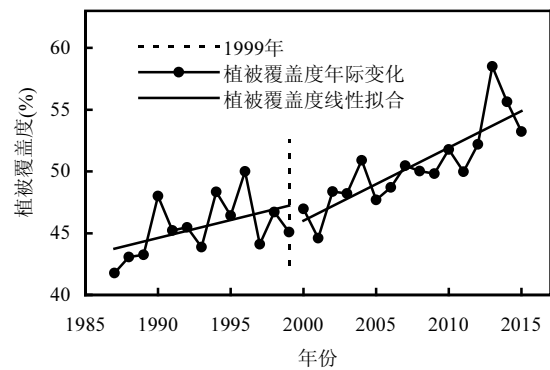


图3 1987~2015年黄土高原年均植被覆盖度年际变化
Fig.3 Inter-annual variation of annual vegetation coverage on the Loess Plateau in 1987~2015

其中 1987~1999 年期间,黄土高原年均植被覆盖度变化趋势不显著($P > 0.05$),植被状况未明显好转;2000~2015 年期间,黄土高原年均植被覆盖度迅速增加,增速达到 0.59 %/a($P < 0.05$),植被状况得到了明显的改善,并于 2013 年达到最高值 58.51%.由图 3 可见,2000 年以后,植被覆盖度在 2001 年为最低值,可能是因为退耕还林还草工程刚刚实施,耕地面积减少,而新种植的植被覆盖度较低^[27].

1987~2015 年期间,黄土高原 72.93%的区域植被覆盖度呈增加趋势,其中 38.31%的区域为显著改善地区,主要分布在山西大部分地区、陕西榆林和延安北部地区以及甘肃天水、平凉一带.水土流失最为严重的丘陵沟壑区,植被恢复最为明显.黄土高原

27.07%的区域植被覆盖度呈下降趋势,显著退化地区的面积占 6.55%,主要分布在陕西西咸新区以及黄土高原西北部的边缘地区(图 4).

同样由像元尺度分析 1987~1999、2000~2015 年 2 个时间段植被覆盖度的时空变化规律.结果表明,1987~1999 年研究区植被覆盖度呈增加和减少趋

势的面积分别占 59.02%和 40.98%,其中显著改善地区和显著退化地区的面积分别仅占 8.69%和 3.63%.由此可见,在退耕还林还草以前,黄土高原大部分地区植被覆盖状况无显著变化.2000~2015 年黄土高原植被覆盖状况明显好转,73.13%的区域植被覆盖度呈增加趋势,显著改善地区的面积达到 29.66%.

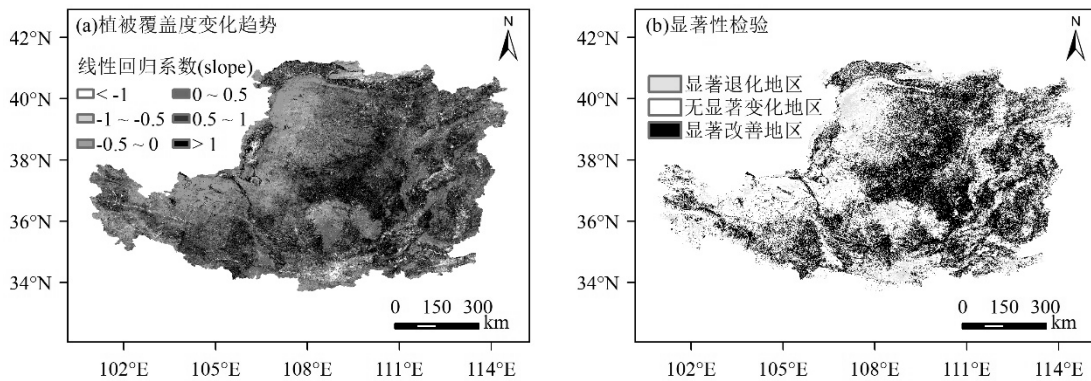


图 4 1987~2015 年黄土高原年均植被覆盖度动态变化

Fig.4 Spatial distribution of dynamic trend of vegetation coverage on the Loess Plateau in 1987~2015

2.3 气候变化和人类活动对于植被覆盖度变化的相对贡献

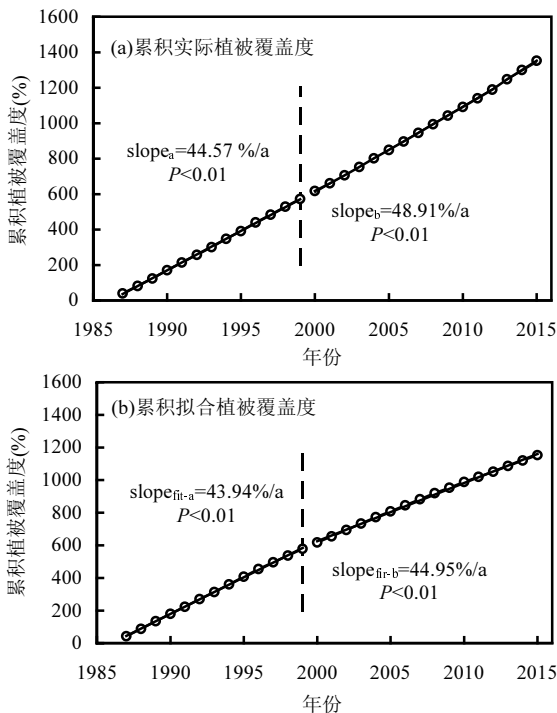


图 5 累积植被覆盖度与年份的线性关系

Fig.5 Linear relationship between the year and cumulative vegetation coverage

在 GEE 平台中,将植被覆盖度数据重采样为

1km×1km 的空间分辨率,与气象数据相匹配.再利用累积量斜率变化率的方法(图 5),求得气候变化和人类活动对于 2000~2015 年黄土高原植被覆盖度动态变化的贡献率分别为 23.77%、76.23%,人类活动为引起植被覆盖度变化的主要因素.

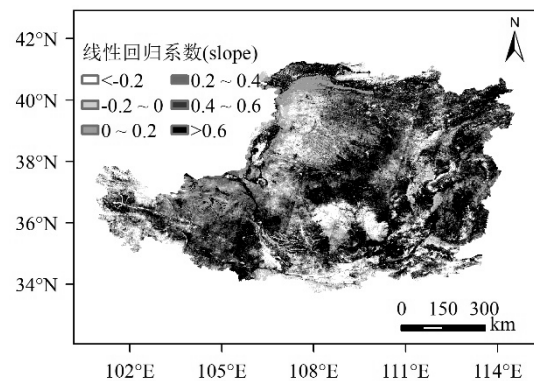


图 6 1987~2015 年人类活动对黄土高原植被覆盖度的影响
Fig.6 Effects of human activities on vegetation coverage on the Loess Plateau in 1987~2015

采用残差趋势分析人类活动对黄土高原植被覆盖度的影响(图 6).1987~2015 年黄土高原植被覆盖度残差的整体变化趋势为 0.36 %/a.在空间上,77.76%的区域残差趋势为正值,22.24%的区域残差趋势为负值.由此可见,人类活动对黄土高原植被

覆盖变化的影响逐渐增强,总体上对该地区的植被生长起到积极作用.

3 讨论

3.1 植被覆盖度与气候变化的相关性

降水是黄土高原土壤水分的主要来源,土壤水分的高低会对植被的生长产生影响,因此降水量是限制黄土高原植被生长的重要因素^[28].黄土高原 1987~2015 年降水量与植被覆盖度为显著正相关 ($P<0.05$),偏相关系数为 0.41.空间上,78.99%的区域降水与植被覆盖度呈正相关,其中 29.78%的区域为显著正相关($P<0.05$)(图 7a).在关中平原、河套灌区等灌溉农业地区,植被的生长对于降水的敏感性较

低^[29],相关性并不显著($P>0.05$).气候变暖使得植被生育期延长,并在生长期加速生长,因此温度也是黄土高原植被覆盖度的影响因素之一.该地区 1987~2015 年间年均温与植被覆盖度偏相关系数为 0.55($P<0.05$),呈正相关和负相关的面积分别占 71.44%和 28.56%,显著负相关的面积占 4.25%($P<0.05$),主要分布在黄土高原西北部地区(图 7b).主要是由于黄土高原西北部地区降水量较少,温度的升高会增加土壤水分蒸发,进而导致土壤干燥化,不利于植被的生长^[30].退耕还林还草政策颁布以后,黄土高原植被覆盖度在 2004~2005 年以及 2013~2015 年出现了大幅度的下降(图 3),可能与这 2 个时段年降水量与年均温均呈下降趋势有关.

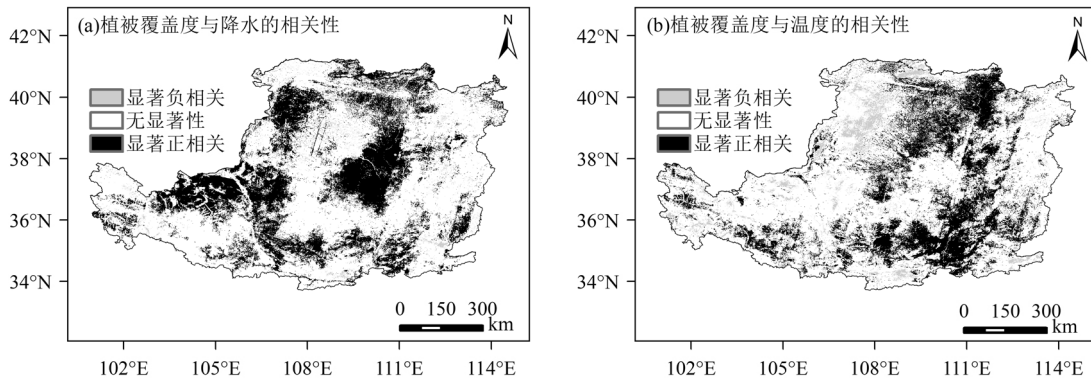


图 7 黄土高原 1987~2015 年 FVC 与年降水量和年均温的相关性

Fig.7 Relationships between FVC and precipitation and temperature on the Loess Plateau in 1987~2015

3.2 人类活动对于植被覆盖度的影响

表 1 黄土高原 2000~2015 年土地利用转移矩阵(km²)

Table 1 Land use matrixes on the Loess Plateau during 2000~2015

项目	2015 年						2000 年合计
	耕地	林地	草地	水域	城乡、工况居民用地	未利用地	
2000 年							
耕地	197994	1491	2538	594	2934	395	205946
林地	129	91195	323	65	254	81	92047
草地	1397	1610	252906	328	1617	1570	259428
水域	308	30	215	7721	79	254	8607
城乡、工况居民用地	16	9	40	20	14645	8	14738
未利用地	440	332	1627	195	406	40056	43056
2015 年合计	200284	94667	257649	8923	19935	42364	623822
面积变化	-5662	2620	-1779	316	5197	-692	

植被覆盖度的变化受气候变化和人类活动的共同影响.通过累积量斜率变化率定量计算气候变

化和人类活动的相对贡献率,结果证明人类活动对于 2000 年以后植被覆盖度增加的贡献远大于气候变化.长期以来,草地、林地和耕地是黄土高原主要的土地利用类型^[25].人类活动的加剧使得该区域的土地利用/覆被快速变化.从黄土高原 2000~2015 年土地利用转移矩阵(表 1)可以发现,退耕还林还草工程的实施使得大量的耕地被转化为了草地(2538km²)和林地(1491km²),对植被覆盖度的增加起到了关键的作用^[31].但是,随着城镇化的发展,城乡、工况居民用地急剧增加,部分耕地、草地被转化为了城乡、工况居民用地,从而导致部分地区植被覆盖状况显著退化.陕西的西咸一体化推动了经济的发展与城市的扩张,是导致该地区植被覆盖度显著降低的主要原因.同样,鄂尔多斯西部地区植被覆盖度降低也是由于土地利用类型由草地转变为了农村居民点及建设用地.退耕还林还草工程的实施在植被

恢复以及减轻该地区的水土流失方面起到了积极的作用.但也因注意到,大规模的植树造林可能会对该地区的土壤水分状况产生负面影响.植树造林增加了土壤水分的消耗,如果无法及时得到补给,会形成土壤干层^[32].因此,还需进一步探讨黄土高原大规模的植被建设与当地土壤水分状况的协调性.

3.3 GEE 平台的优势

GEE 平台为本研究提供了大量的数据(22407 张 Landsat 影像)以及强大的数据处理能力.相比于 ENVI 等传统的处理影像工具,GEE 平台可以快速、批量处理大量的影像,运行速度不受本地计算机性能的限制.GEE 当中包含影像去云、融合、裁剪、镶嵌、运算以及分类等常用的影像处理算法的封装函数,通过代码编程就可以快速方便的进行数据批量获取、处理分析和结果输出下载,可大大提高研究效率.

4 结论

4.1 1987~2015 年黄土高原年均植被覆盖度显著增加,增速达到 0.38%/a($P < 0.05$),72.93%的区域植被覆盖状况得到了改善,其中黄土高原丘陵沟壑区的植被状况改善最为明显.

4.2 黄土高原植被覆盖度的变化受气候和人为因素的共同影响,其中人类活动是引起该地区植被覆盖度变化的主要因素,贡献率达到 76.23%.

4.3 人类活动对于植被的影响具有两面性.一方面植被恢复使黄土高原大部分地区的植被状况得到改善,另一方面城市的扩张使得小部分区域的植被出现了退化现象.

4.4 与传统图像处理软件相比,GEE 具有海量的免费数据以及强大的数据分析和计算能力,大幅提高了研究效率.

参考文献:

- [1] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.2000~2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其成因 [J]. 中国环境科学, 2016,36(5):1568-1578.
Zhao A Z, Liu X F, Zhu X F, et al. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau [J]. China Environmental Science, 2016,36(5):1568-1578.
- [2] 周伟,刚成诚,李建龙,等.1982~2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应 [J]. 地理学报, 2014,69(1):15-30.
Zhou W, Gang C C, Li J L et al. Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during

- 1982~2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(1):15-30.
- [3] Piao S L, Nan H J, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity [J]. Nature Communications, 2014,(5):5018.
- [4] Sun Y L, Yang Y L, 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 Parts A/B/C, 2015,87:67-78.
- [5] Huang K, Zhang Y J, Zhu J T, et al. The influences of climate change and human activities on vegetation dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Remote Sensing, 2016,8(10):876-893.
- [6] Ostwald M, Chen D L. Land-use change: Impacts of climate variations and policies among small-scale farmers in the Loess Plateau, China [J]. Land Use Policy, 2006,23(4):361-371.
- [7] 许炯心.农村社会经济因素变化对嘉陵江产沙量的影响 [J]. 山地学报, 2006,24(4):385-394.
Xu J X. Effect of the changing rural socio-economic factors on sediment yield of the Jialingjiang river basin [J]. Journal of Mountain Science, 2006,24(4):385-394.
- [8] Liu H Y, Zhang M Y, Lin Z S, et al. Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in Southwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018,256:10-21.
- [9] Tong X W, Wang K L, Brandt M, et al. Assessing future vegetation trends and restoration prospects in the karst regions of southwest China [J]. Remote Sensing, 2016,8(5):357-357.
- [10] 任美镔,史运良.黄河输沙及其对渤海、黄海沉积作用的影响 [J]. 地理科学, 1986,6(1):1-12.
Ren M E, Shi Y L. Sediment discharge of the yellow river and its effect on sedimentation of the bohai and yellow sea [J]. Scientia Geographica Sinica, 1986,6(1):1-12.
- [11] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. Scientific Reports, 2013,3(5):2846.
- [12] 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, 2007,37(11):1504-1514.
Xin Z G, Xu J X, Zheng W. Effect of climate change and human activities on vegetation in Loess Plateau [J]. Science China, 2007, 37(11):1504-1514.
- [13] Gu Z, Ju W, Li L, et al. Using vegetation indices and texture measures to estimate vegetation fractional coverage (VFC) of planted and natural forests in Nanjing city, China [J]. Advances in Space Research, 2013,51(7):1186-1194.
- [14] 陈效逖,王恒.1982~2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化 [J]. 地理学报, 2009,64(1):84-94.
Chen X Q, Wang H. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003. Acta Geographica Sinica, 2009,64(1):84-94.
- [15] 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.
Gan C Y, Wang X Z, Li B S, et al. Changes of vegetation coverage during recent 18 years in Lianjiang River Watershed [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011,31(8):1019-1024.
- [16] Jiang C, Wang F, Zhang H Y, et al. Quantifying changes in multiple

- ecosystem services during 2000–2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration [J]. *Ecological Engineering*, 2016,97:258–271.
- [17] 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.
Liu X F, Yang Y, Ren Z Y, et al. Changes of vegetation coverage in the Loess Plateau in 2000–2009. *Journal of Desert Research*, 2013,33(4): 1244–1249.
- [18] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017,202:18–27.
- [19] Gong P, Liu H, Zhang M N, et al. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10m resolution global land cover in 2017 [J]. *Science Bulletin*, 2019,64(6):370–373.
- [20] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature*, 2016, 540(7633):418–422.
- [21] 吴昌广,周志翔,肖文发,等. 基于 MODIS NDVI 的三峡库区植被覆盖度动态监测 [J]. *林业科学*, 2012,48(1):22–28.
Wu C G, Zhou Z X, Xiao W F, et al. Dynamic monitoring of vegetation coverage in three gorges reservoir area based on MODIS NDVI [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012,48(1):22–28.
- [22] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算 [J]. *资源科学*, 2004,26(4):153–159.
Li M M, Wu B F, Yan C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of miyun reservoir by remote sensing [J]. *Resources Science*, 2004,26(4):153–159.
- [23] 彭文甫,王广杰,周介铭,等. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川-都江堰段植被覆盖动态监测 [J]. *生态学报*, 2015,36(7):1975–1988.
Peng W P, Wang G J, Zhou J M, et al. Dynamic monitoring of fractional vegetation cover along Minjiang River from Wenchuan County to Dujiangyan City using multi-temporal landsat 5 and 8 images [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,36(7):1975–1988.
- [24] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247:260–270.
- [25] 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 J J, Mu X M, Sun W Y. Spatial-temporal change of vegetation coverage in the Loess Plateau from 1981 to 2012. *Soil and Water Conservation in China*, 2016,(7):52–56.
- [26] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007) [S]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of Water Resources the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [27] 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.
Xie B N, Qin Z F, Wang Y, et al. Spatial and temporal variation in terrestrial net primary productivity on Chinese Loess Plateau and its influential factors [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014,30(11):244–253.
- [28] 张宝庆,吴普特,赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析 [J]. *农业工程学报*, 27(4):287–293.
Zhang B Q, Wu P T, Zhao X N. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982–2009 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011,27(4):287–293.
- [29] Zhang B Q, Wu P T, Zhao X N, et al. Changes in vegetation condition in areas with different gradients (1980–2010) on the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013,68(8):2427–2438.
- [30] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209–210:87–99.
- [31] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. *Plos One*, 2012,7(2):e31782.
- [32] 王 力,卫三平,吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应—以燕沟流域为例 [J]. *生态学报*, 2009,29(3):1543–1553.
Wang L, Wei S P, Wu F Q. Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau: a case study of Yangou Catchment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009,29(3):1543–1553.

作者简介: 郭永强(1995–),男,河北张家口人,西北农林科技大学水利与建筑工程学院硕士研究生,主要研究方向为农业水土资源利用与保护。