

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.035; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.035.

高建伦, 王晶晶, 白玥, 等. 退耕还林工程对陕西省气候的影响及其驱动机制[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2):150-157.

Gao Jianlun, Wang Jingjing, Bai Yue, et al. The influence of the Grain for Green Project on climate change in Shaanxi Province and its driving mechanism[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2):150-157.

退耕还林工程对陕西省气候的影响及其驱动机制

高建伦¹, 王晶晶², 白玥³, 申永丽¹, 马锋¹, 高娟¹, 李超², 魏孝荣²

(1.陕西省榆林市气象局, 陕西 榆林 719000; 2.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院,

陕西 杨凌 712100; 3.西部机场集团榆林机场有限公司航务部气象台, 陕西 榆林 719000)

摘要:[目的]研究陕西省植被恢复对区域气候的影响及其驱动机制,能够为深入认识西北地区气候变化对植被恢复的响应机制提供理论依据。[方法]基于陕西省气象站点实测数据和卫星遥感数据,采用观测资料减去再分析法(OMR)和土地利用转移矩阵等方法,对比分析了陕西省不同地形下垫面退耕还林(草)工程实施前后(1980—1999 年和 2000—2017 年)降水和气温的年际变化差异,讨论了植被恢复对气候反馈效应的驱动机制。[结果]退耕还林(草)工程实施后,陕西省年降水量增加,平均气温和最高气温增温趋势减缓。植被覆盖度增加引起的地表蒸散发和潜热通量变化是造成该区年降水增加和增温减缓的主要驱动因子,但其对年降水量和气温的影响因地形下垫面的不同而存在差异。[结论]植被恢复主要通过调控地表蒸散发和潜热通量影响陕西省气候变化,并且其对气候的影响因地形下垫面的不同而存在差异。

关键词:退耕还林(草); 降水量; 气温; 反馈效应; 植被恢复

中图分类号:P951

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2025)02-0150-08

The influence of the Grain for Green Project on climate change in Shaanxi Province and its driving mechanism

Gao Jianlun¹, Wang Jingjing², Bai Yue³, Shen Yongli¹,

Ma Feng¹, Gao Juan¹, Li Chao², Wei Xiaorong²

(1.Yulin Meteorological Office of Shaanxi Province, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Meteorological Station, Yulin Airport Co., Ltd., Aviation Department, China West Airport Group, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract:[Objective] The aims of this study are to examine the feedback effect of vegetation restoration on climate and its driving mechanism in Shaanxi Province, and to provide scientific basis for a deeper understanding of the response mechanism of climate change to vegetation restoration in northwest China. [Methods] Based on the measured data from meteorological stations and satellite remote sensing data in Shaanxi Province, we used the methods of Observation Minus Reanalysis (OMR) and land use transfer matrix to compare the interannual differences of precipitation and temperature in different terrain surface pattern before and after the Grain for Green Project of Shaanxi (1980—1999 and 2000—2017). Then, the mechanisms driving of the climate feedback effects were discussed under vegetation restoration. [Results] The implementation of the Grain for Green Project had led to an increase in annual precipitation and a decrease in the warming trend of average and maximum temperatures in Shaanxi Province. Changes in surface evapotranspiration and latent heat fluxes due to the increased vegetation cover were the primary drivers of the

收稿日期:2024-05-18

修回日期:2024-07-22

接受日期:2024-08-03

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项“侵蚀驱动的水碳氮耦合机理和模型模拟”(XDB40020305)

第一作者:高建伦(1983—),男,陕西子洲人,学士,工程师,主要从事生态气象研究。E-mail:JLgao1116@163.com

通信作者:魏孝荣(1978—),男,陕西武功人,博士,研究员,主要从事土壤物质循环研究。E-mail:xrwei78@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

increase in annual precipitation and the slowing down of temperature, but its effect on annual precipitation and temperature varied according to the topographic subsurface. [Conclusion] Vegetation restoration affects climate change in Shaanxi Province mainly by regulating surface evapotranspiration and latent heat fluxes, and its impact on climate varies according to the topographic subsurface.

Keywords: Grain for Green Project; precipitation; temperature; feedback effects; vegetation restoration

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,其动态变化能够通过改变大气与陆地之间水热通量的交换过程,进而影响区域和全球的气候变化。研究表明,1982—2015年期间全球植被覆盖度显著提升,植被绿化面积占陆地总面积的34%^[1-2]。目前,有关植被恢复对气候变化的反馈效应及其机制的研究备受关注。已有研究表明植被恢复对气候反馈效应的差异与地理环境密切相关^[3-4]。例如,Wei等研究表明华北地区植被恢复通过增强蒸散量使得该区气温显著降低,年降水呈现微弱增加趋势^[5]。Forzieri等通过探究气候梯度下叶面积指数(LAI)变化和地表热通量的变化发现北方地区LAI增加使得地表反照率降低,导致该区气温增加,然而,南半球干旱地区LAI增加使得蒸散发增强,导致气温降低^[6]。下垫面物质组成变化和微地形的差异是重要的地理环境因子,其不仅直接影响地气系统物质和能量交换^[7],而且会通过影响植被生长及对气候的反馈^[8],进而改变植被对区域降水和温度的影响。然而,目前已开展的相关研究却很少考虑下垫面变化下植被恢复对气候反馈效应的影响。

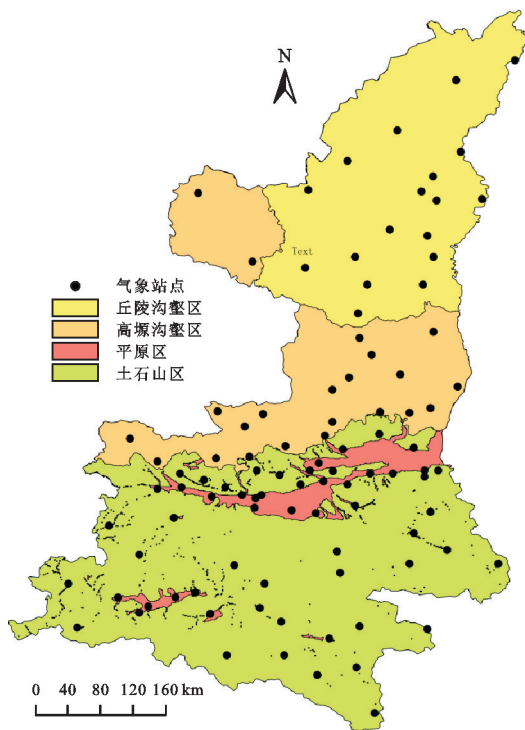
自20世纪70年代以来,中国政府启动了一批重大生态工程,尤其是1999年的退耕还林(草)工程,使得西北地区林草植被面积显著增加,土地退化得到遏制,区域气候特征也随之发生了变化。基于气象耦合模型和气候再分析数据表明西北地区植被恢复过程中林草面积的增加使得反照率降低,感热通量增加,导致气温升高^[9]。但是,也有研究指出植被覆盖度的增加有效缓解了西北地区气温的升高^[10-11]。目前,有关植被恢复对该区气候变化的影响及其驱动机制仍存在争议。陕西省位于黄土高原的核心地带,横跨丘陵沟壑区、高原沟壑区、平原区和土石山区,是退耕还林(草)工程实施的重点区域,也是这一生态工程效果最显著的区域,这为研究植被恢复对气候变化的影响提供了理想的试验平台。

本研究基于陕西省的气象站点实测数据,对比分析该区退耕还林(草)工程前后不同地形下垫面降雨和气温的变化特征,并利用气象数据和卫星遥感数据,采用统计分析和观测资料减去再分析法(OMR),分析该工程实施后,植被恢复对区域气候的影响特征,以期为深刻认识大型生态工程实施后植被对气候的调控机制提供理论依据和数据支撑。

1 研究区概况和数据方法

1.1 研究区概况

陕西省位于30°42′—39°34′N,105°30′—111°01′E,总面积约20.58万km²,属于狭长型地域,南北跨度大,东西跨度小。全省地势南北高、中间低、西部高、东部低,构成该区复杂多样的地貌特征,主要包括丘陵沟壑、高原沟壑、平原以及土石山区(图1)。该区属于典型的大陆性季风气候,年内降水量分配不均,降水主要集中在6—9月。全省南北跨度大使得南北区域呈现显著的气候差异,年平均气温为9~14℃,自北向南逐渐增加,年平均降水量为340~1240mm,降水量空间分布从南向北逐渐减少,其中陕北地区干旱少雨,水资源匮乏,陕南地区湿润多雨,水资源丰富^[9]。



注:地形分区数据来源国家地球系统科学数据中心和中国科学院地理科学与数据中心。

图1 研究区地形特征和气象站点空间分布

Fig. 1 Topographic characteristics and spatial distribution of meteorological stations in the study area

陕西省是我国水土流失最严重的省份之一,其北部地区位于毛乌素沙漠边缘,沙化严重,中部地区的地貌以丘陵沟壑为主,千沟万壑的地貌形态导致该区

水土流失严重,生态环境十分脆弱。20 世纪 70 年以来,我国政府在陕西省实施了大量的生态恢复措施,尤其是 1999 年起施行的退耕还林(草)工程,陕西省作为该工程实施的首批试点区域,退耕还林(草)工程的实施使得该区植被覆盖度显著增加,土壤侵蚀减缓,水土流失状况得到了明显改善。

1.2 气象要素变化趋势分析

本文选择陕西省 99 个气象站点 1980—2017 年的年降水量、年均气温、年最高气温、年最低气温。数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),其中删除缺失值数量较多的 4 个气象站点,其余气象站的缺失数据采用缺失日期所对应的前后两年同一时期数据的平均值进行插补。本研究依据陕西的地貌特征将气象数据按照地形下垫面不同分为土石山区、平原区、丘陵沟壑区、高原沟壑区,各分区的气象站点数量分别为 36, 20, 18, 21 个(图 1)。

Thiel-Sen 斜率估计法和 Mann-Kendall 非参数检验法不易受异常数据的影响,常用于长时间序列气象数据的变化趋势分析。因此,本研究气象数据的变化趋势采用 Thiel-Sen 斜率估计法计算,气象数据变化趋势的显著性采用 Mann-Kendall 非参数检验法进行检验。

1.3 气象要素年际变化的驱动因子

考虑到数据的可获得性,本研究使用的 1981—2017 年陕西省的归一化植被指数(NDVI)分析退耕还林(草)工程降水量对植被覆盖度的响应,以及陕西省植被覆盖度的年际变化特征。研究使用的 NDVI 数据来源于美国航空航天局(NASA)的 NOAA 系列卫星的 AVHRR 传感器,空间分辨率为 0.05° (<https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/normalized-difference-vegetation-index>)。

美国国家环境预测中心(NCEP)的气候预测系统再分析(CFS)数据中距离地面 2 m 高度的气温指标是以气温的垂直递减率和大气风速模拟获取,2 m 高度的气温指标模拟中未加入地面气温观测数据,导致该数据对地表下垫面的变化不敏感。因此, Kalnay 等提出了观测资料减去再分析法(OMR),使用气象站地面观测的气温指标,包括年均温、年最高气温、年最低气温,和 CFS 数据中 2 m 高度气温指标差值研究地表下垫面变化对气温的影响^[12]。本研究利用 OMR 方法分析退耕还林(草)工程下气温变化对土地利用/覆被变化(LUCC)的响应程度。研究使用的地面 2 m 高度气温指标数据来源于 NCEP/CFS,空间分辨率 0.2° (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/climate-forecast-system>)。

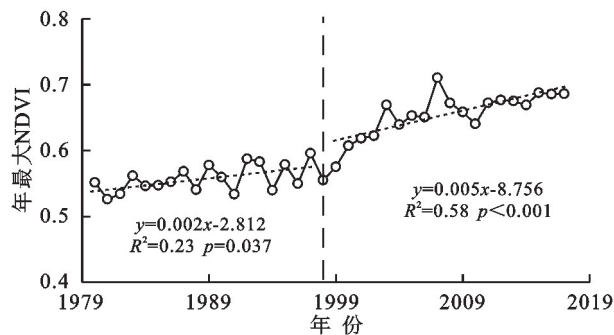
1.4 土地利用/覆被变化分析

土地利用/覆被数据能够反映不同时期土地利用现状,为研究区域土地类型变更和动态变化提供基础。由于 1980 年和 2017 年可获取的高分辨率土地利用/覆被数据缺失,本研究利用 1985 年、1999 年、2019 年陕西省的土地利用/覆被数据,通过土地利用类型转移矩阵,定量分析陕西省 1985—1999 年和 1999—2019 年两个时期 LUCC 的动态变化现状。研究使用的土地利用/覆被数据来源于 Yang 等的研究成果,空间分辨率为 30 m。该土地利用/覆被数据通过 5 463 个目视数据的分析表明,该数据对实际土地利用现状的模拟精度较高,准确率可达 80%^[13]。

2 结果与分析

2.1 降水和气温的年变化趋势

陕西省 NDVI 的年际变化特征如图 2 所示, 1980—1999 年期间 NDVI 年变化率低于 2000—2017 年, 2000—2017 年期间 NDVI 呈现显著增加趋势,其年变化率为 0.005 a^{-1} , R^2 为 0.58 ($p < 0.001$)。1999 年退耕还林(草)政策使得陕西省植被覆盖度显著增加。因此,为探究气候对植被恢复的响应机制,将气象数据的年际变化趋势分为 1980—1999 年、1999—2017 年两个时期进行对比分析。



R^2 为决定系数; p 为显著性水平。

图 2 陕西省 NDVI 的年际变化趋势

Fig. 2 Inter annual variation trend of NDVI in Shaanxi Province

该区气象站点降水量的年变化趋势见表 1,除高原沟壑区以外,退耕还林(草)工程实施以后陕西省年降水量的变化趋势均发生逆转,土石山区和平原区降水量的年变化率均从显著减少($\text{slope} = -13.52 \text{ mm/a}$, $\text{slope} = -13.37 \text{ mm/a}$ $p = 0.01$)转变为无显著变化($p = 0.36$, $p = 0.26$),丘陵沟壑区变化率从无显著变化($p = 0.50$)转变为显著增加($\text{slope} = 10.06 \text{ mm/a}$, $p = 0.02$)。陕西省该时段降水量的变化趋势与已有研究结果基本一致^[14-15]。陕西省 1950—2010 年降水量分时段结果发现,1980—1983 年降水量小幅度增加后,1984 年降水量开始下降,1997 年降水量到达最

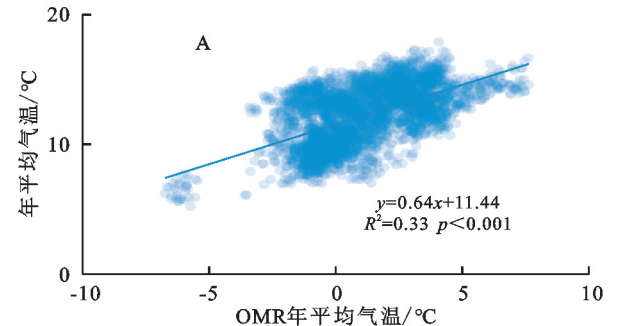
低值,1984—2008 年期间该区干旱少雨,年相对变率可达 82.4 mm/a^[16-18]。因此,1980—2008 年陕西省降水波动较大可能是造成 1980—1999 年、1999—2017 年两个时期部分区域降水量年变化趋势大的主要原因。综上所述,退耕还林(草)工程的实施有助于陕西省年降水量的增加,并且该工程下植被恢复对年降水量的影响根据地形下垫面的不同存在差异。

退耕还林(草)工程的实施使得该区年平均气温从显著增加趋势($p<0.05$)转变为无显著变化,并且,2000—2017 年平均气温的年变化率均小于 1980—1999 年。除丘陵沟壑区最高气温的年变化率在 1980—1999 年、2000—2017 年期间无显著变化外,其余区域最高气温的年变化率从 1980—1999 年的显著增加趋势($p<0.1$)转变为无显著变化。1980—1999 年、2000—2017 年期间陕西省最低气温的年变化率均无显著变化(表 1)。陕西省退耕还林(草)工程的实施显著抑制该区平均气温和最高气温的上升。

表 1 陕西省降水量和气温的年变化趋势
Table 1 Annual variation trends of precipitation and temperature in Shaanxi Province

时期	指标	土石山区	平原区	丘陵沟壑区	高原沟壑区
1980—1999 年	降水量	-13.53***	-13.37***	-2.80	-5.52
	平均气温	0.06***	0.06***	0.08**	0.07***
	最高气温	0.09**	0.10*	0.07	0.07**
	最低气温	-0.05	-0.05	0.05	-0.03
2000—2017 年	降水量	5.78	6.26	10.06**	2.05
	平均气温	0.03	0.02	0.01	0.02
	最高气温	0.03	0.01	-0.03	0.01
	最低气温	-0.01	-0.03	0.06	0.07

注:*,**和***分别为 90%,95%和 99%显著性水平。



2.2 降水和气温变化的驱动因子

1980—2017 年各气象站点降水量与 NDVI 之间呈现显著正相关($R^2 = 0.28, p<0.001$),陕西省的降水量变化与植被恢复密切相关(图 3)。综合上述结果可知,陕西省植被覆盖度变化是造成 1980—1999 年、2000—2022 年期间降水量年变化率发生逆转的主要因素,退耕还林(草)工程实施下植被覆盖度的增加转变了陕西省部分区域降水量逐年下降的趋势,并使得部分区域降水量逐年增加。

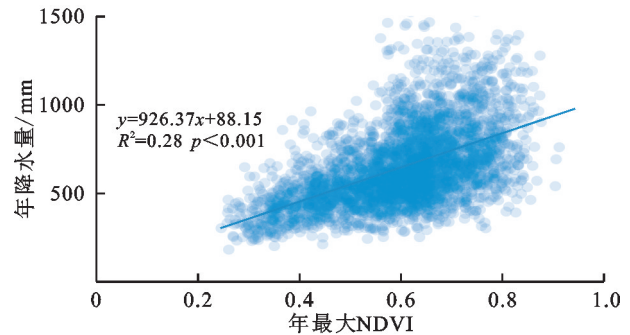


图 3 降水量和归一化植被指数(NDVI)的相关性
Fig. 3 Correlation between precipitation and normalized vegetation index (NDVI)

1980—2017 年各气象站点的年平均气温和最高气温分别与 OMR 年均气温和最高气温之间呈现显著正相关关系,其中年平均气温和 OMR 年平均气温之间的回归系数为 0.64($R^2 = 0.33, p<0.001$),年最高气温和 OMR 年最高气温之间的回归系数为 0.64($R^2 = 0.41, p<0.001$)(图 4)。基于 OMR 方法获取的气温指标,即 OMR 年均气温和 OMR 年最高气温,能够表征 LUCC 对研究区气温指标的影响。因此,LUCC 是改变陕西省年平均气温和年最高气温变化的重要驱动因子,并且年平均气温和最高气温对 LUCC 的响应程度基本相同。

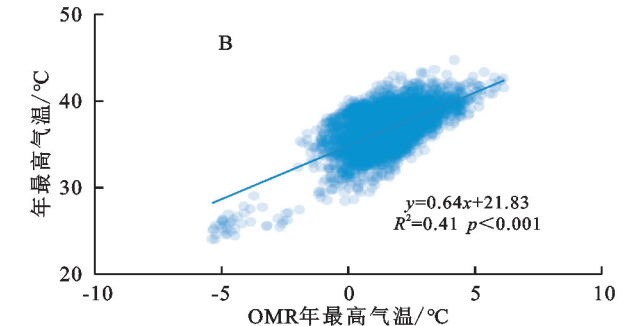


图 4 实测气温指标和 OMR 气温指标的相关性
Fig. 4 Correlation between the observation temperature index and the observation minus reanalysis (OMR) temperature index

1985—2019 年期间陕西省各地形 LUCC 的变化特征见图 5,通过各地形土地利用类型减少和增加面积的对比结果可知,1985—1999 年土石山区 LUCC 的

变化特征主要表现为草地和灌木地减少,林地增加,其中草地和灌木地面积分别减少 1 607.10 km²,878.89 km²,林地增加面积为 2 395.33 km²。1999—2019 年土

石山区 LUCC 的变化特征主要表现为耕地、草地和灌木地减少,林地增加,其中草地、灌木地和耕地面积分别减少 4 706.70 km², 1 833.41 km², 723.14 km², 林地增加面积为 6 273.70 km²。1985—1999 年期间土石山区土地以草地、灌木地转为林地为主, 1999—2019 年期间土石山区土地以耕地转为林地为主, 其次是草地、灌木地转为林地。1999—2019 年土石山区林地增加面积显著增加, 约为 1985—1999 年林地增加面积的 2.62 倍。

1985—1999 年平原区 LUCC 的变化特征主要表现为耕地减少, 建设用地增加, 其中耕地减少面积为 304.23 km², 建设用地增加面积为 404.47 km²。1999—2019 年平原区 LUCC 的变化特征与 1985—1999 年基本一致, 1985—1999 年和 1999—2019 年期间平原区土地均以耕地转为建设用地为主。但 1999—2019 年平原区耕地和建设用地变化面积远高于 1985—1999 年。1999—2019 年耕地减少面积是 1985—1999 年的 3.88 倍。1999—2019 年建设用地增加面积是 1985—1999 年的 2.80 倍。

1985—1999 年丘陵沟壑区 LUCC 的变化特征主要表现为耕地和荒地减少, 草地增加, 其中耕地和荒地面积分别减少 2 745.54 km², 572.97 km², 草地增加面积为 3 202.35 km²。1999—2019 年丘陵沟壑区

LUCC 的变化特征主要表现为耕地和荒地减少, 草地、林地增加, 其中耕地和荒地面积分别减少 4 464.15 km², 2 410.34 km², 草地、林地面积分别增加 5 214.35 km², 1 370.44 km²。1985—1999 年期间丘陵沟壑区以耕地、荒地转为草地为主, 1999—2019 年期间丘陵沟壑区以耕地、荒地转为草地、林地为主。1999—2019 年丘陵沟壑区林草地增加面积显著增加, 其中林地面积约为 1985—1999 年的 48.12 倍, 草地面积约为 1985—1999 年的 1.73 倍。

1985—1999 年高原沟壑区 LUCC 的变化特征主要表现为耕地和草地减少, 林地增加, 其中耕地和草地面积分别减少 537.86 km², 264.08 km², 林地增加面积为 760.88 km²。1999—2019 年高原沟壑区 LUCC 的变化特征与 1985—1999 年基本一致, 1985—1999 年和 1999—2019 年期间高原沟壑区土地均以耕地、草地转为林地为主, 但 1999—2019 年平原区耕地、草地、林地变化面积远高于 1985—1999 年, 1999—2019 年高原沟壑区耕地和草地面积分别减少 1 320.84 km², 1 010.85 km², 林地增加面积为 2 215.88 km²。1999—2019 年耕地和草地减少面积分别是 1985—1999 年的 2.46 倍、3.83 倍。1999—2019 年林地增加面积是 1985—1999 年的 2.91 倍。

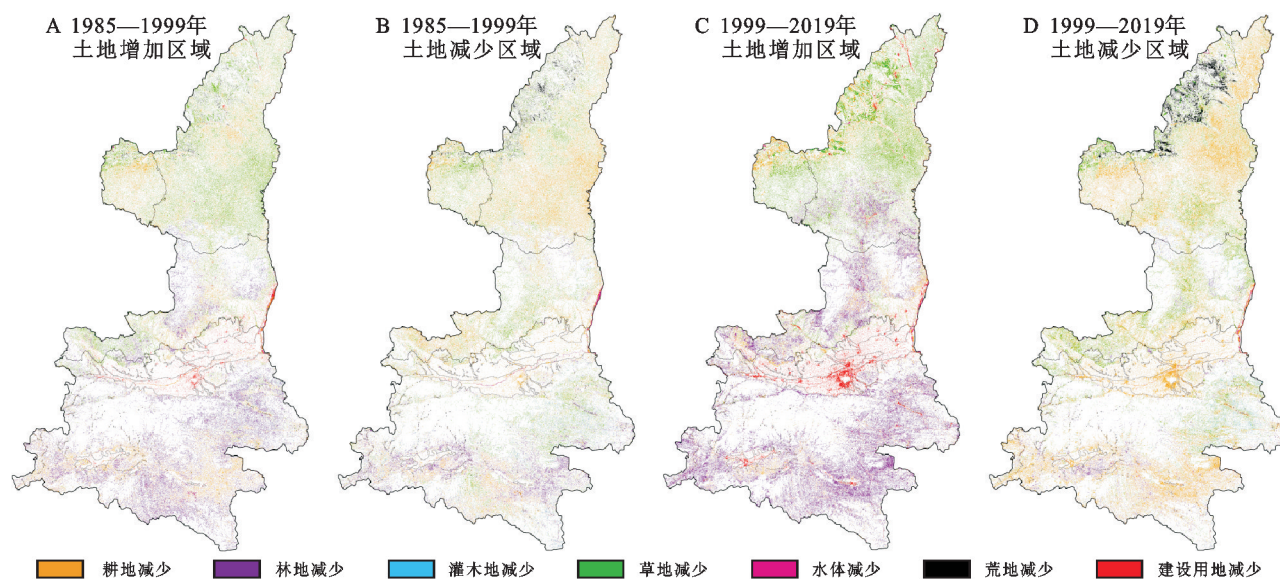


图 5 1985—2019 年陕西省土地利用类型变化

Fig. 5 Land use change in Shaanxi province from 1985 to 2019

陕西省各地形 LUCC 的变化特征存在显著差异, 土石山区以林地增加为主, 两个时期(1985—1999 年、1999—2019 年)林地增加面积分别为 2 395.33 km², 6 273.70 km²。平原区以建设用地增加为主, 两个时期建设用地增加面积分别为 404.47 km², 1 132.90 km²。丘陵沟壑区 1985—1999 年以草地增加为主, 其增加面积为 3 202.35 km², 1999—2019 年以林草地增加为主,

其中林地增加面积为 1 370.44 km², 草地增加面积为 5 214.35 km²。高原沟壑区以林地增加为主, 两个时期林地增加面积分别为 760.88 km², 2 215.88 km²。因此, 1999 年退耕还林(草)政策的实施使得陕西省大量的土地转为林草地, 显著提高了该区植被覆盖度。综上所述, 陕西省植被覆盖度的增加是造成该区降水量和气温发生变化的主要驱动因子。

2.3 降水 and 气温变化的驱动机制

退耕还林(草)工程实施后,植被覆盖度明显增加使得陕西省降水量的年变化趋势发生逆转,降水量的年变化率呈现显著增加或者无变化趋势。该结果与黄土高原区域已有研究基本一致^[19-20]。Yang 等通过整合已有观测数据和模型模拟结果发现,植被恢复过程中,蒸散发增加是造成区域降水量的主导因素^[21]。植被恢复过程中植被覆盖度的增加能够增强蒸散发,使得区域内的水汽循环增强,水汽辐合作用增强和云量增多,从而导致降水量增加^[21]。本研究使用全球陆面数据同化数据集(GLDAS-CLSM)分析了陕西省蒸散发年际变化特征,结果也表明,1999

年退耕还林(草)工程实施以后,陕西省的蒸散发呈现逐年增加的趋势,2000—2017 年期间蒸散发的年变化率为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{a})$ (图 6A)。已有研究表明,不同下垫面蒸散量之间存在显著差异,主要表现为林地>草地>耕地>裸地,其中林草的增湿效果最佳^[22]。陕西省 1999 年以后土地利用类型转变主要以耕地和荒地转变为林草地、草地转变为林地为主。因此,2000—2017 年期间土地利用类型转变下,林草面积显著增加使得该区增强蒸散发,进而改变地表与大气之间的水汽交换,使得该区域降水量的增加,导致 1980—2017 年期间降水量的年变化趋势发生逆转。

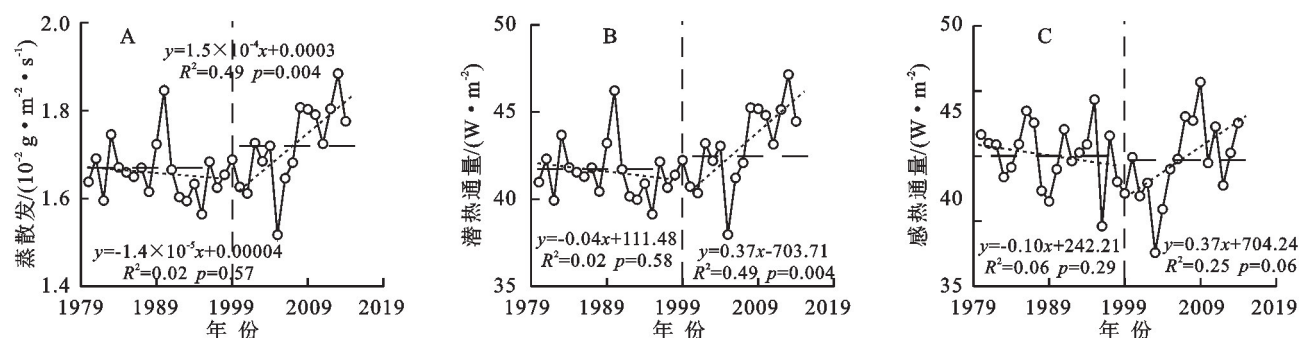


图6 陕西省蒸散发、潜热通量和感热通量的年际变化特征

Fig. 6 Interannual variation characteristics of evapotranspiration, latent heat flux, and sensible heat flux in Shaanxi Province

退耕还林(草)工程实施以后,大量的耕地和荒地转变为林草地,部分草地转变为林地,引起林草植被面积增加,减缓了该区平均气温和最高气温的上升。土地利用/覆被状况转变过程中植被覆盖度的增加会通过地表下垫面的变化引起局地热量状况发生改变,进而影响了该区的气温^[23-24]。不同下垫面的反射率为荒地>耕地>草地>裸地,耕地、荒地转变为林草地,草地转变为林地均会造成该区反照率的降低,地表接收的短波辐射增加,使得区域气温上升^[25-26]。但是,耕地、荒地转变为林草地,草地转变为林地后,植被覆盖度的增加也会引起蒸散发和潜热通量增加,导致区域降温^[20]。朱西存等^[22]通过不同下垫面的热量平衡各分量对比发现,相对荒地和耕地,林地、草地降温显著,林地由于受到树冠以及林下植被的影响,高温时间较短、气温变化较缓,导致林地调节气温、减弱风速、增加空气湿度的作用明显,虽然草地较矮,但盖度高,也能够起到调节气温的作用,但其降温效果显著低于林地。

黄土高原植被恢复后植被蒸散作用增强会引起区域气温下降^[10-11]。已有研究表明植被覆盖的增加能够增强植被和土壤的蒸散作用,使得潜热通量增加幅度大于感热通量减少,从而导致气温下降^[5]。苟娇娇等^[10]基于卫星反演数据也指出植被恢复过程中潜热通量、感热通量以及蒸散发的改变是造成西北地区

降温的主要因素。本文使用全球陆面数据同化数据集(GLDAS-CLSM)分析了陕西省潜热通量和感热通量的年际变化特征发现,退耕后潜热通量的年变化率显著增加,2000—2014 年期间潜热通量的年变化率为 $0.37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2000—2014 年潜热通量($43.06 \text{ W}/\text{m}^2$)大于 1980—1999 年($41.58 \text{ W}/\text{m}^2$)。然而,2000—2014 年感热通量($34.73 \text{ W}/\text{m}^2$)略低于 1980—1999 年($34.98 \text{ W}/\text{m}^2$)(图 6B,C)。综合上述结果可知,退耕还林(草)工程实施后,陕西省土地利用转变造成的林草植被面积增加能够通过影响下垫面的反照率、蒸散发、增强潜热通量,进而改变该区的气温变化。此外,1999 年土地利用转变下植被覆盖度增加造成的蒸散发增强、潜热通量上升引起的降温作用远大于反照率降低引起的升温作用,最终导致该区升温减缓。

3 结论

本文使用 1980—2017 年陕西省气象站点观测数据,分析了退耕还林(草)工程实施对该区不同地形下垫面气象要素的影响,并且,结合 NDVI 数据、OMR 方法以及地气间能量交换的改变,探究了该工程实施后气候要素变化的驱动机制。通过研究得出如下结论:

(1) 退耕还林(草)工程的实施有助于陕西省年降水量的增加,并抑制了该区平均气温和最高气温的

上升,但其对年降水量、平均气温和最高气温的影响因地形下垫面的不同而存在差异。

(2) 退耕还林(草)工程实施后,陕西省大量的荒地、耕地转为林草地,能够促进地表的蒸散发,使得区域内的水汽循环增强,水汽辐合作用增强和云量增多,从而导致该区降水量增加。

(3) 退耕还林(草)工程实施后,陕西省大量的荒地、耕地转为林草地,使得区域蒸散发增强和潜热通量上升引起的降温作用远大反照率降低引起的升温作用,最终导致该区升温减缓。

参考文献(References):

- [1] Chen C, Park T, Wang X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2:122-129.
- [2] Yang Y J, Wang S J, Bai X Y, et al. Factors affecting long-term trends in global NDVI[J]. *Forests*, 2019, 10 (5):372.
- [3] 翟俊,刘纪远,赵国松,等.1990—2010年中国土地覆被变化引起反照率改变的辐射强迫[J].*地理学报*, 2013, 68 (7):875-885.
Zhai J, Liu R G, Liu J Y, et al. Radiative forcing over China due to albedo change caused by land cover change during 1990—2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7):875-885.
- [4] Lawrence D, Vandekar K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5:27-36.
- [5] Wei J F, Jin Q J, Yang Z L, et al. Land-atmosphere-aerosol coupling in North China during 2000—2013[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37 (S1): 1297-1306.
- [6] Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, et al. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth[J]. *Science*, 2017, 356 (6343):1180-1184.
- [7] 郑海雷,王介民,米谷俊颜,等.河西走廊沙漠和绿洲下垫面生态条件下能量交换若干特征[J].*生态学报*, 2000, 20(1):88-92.
Zheng H L, Wang J M, Maitani Toshihiko, et al. Some characteristics of energy exchange at the underlying surface of desert and oasis in Hexi Corridor[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1):88-92.
- [8] 李超然,温仲明,李鸣雷,等.黄土丘陵沟壑区地形变化对土壤微生物群落功能多样性的影响[J].*生态学报*, 2017, 37(16):5436-5443.
Li C R, Wen Z M, Li M L, et al. Impact of terrain changes on the functional diversity of soil microbial community in the loess hilly-gully region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16):5436-5443.
- [9] Tian L, Zhang B Q, Chen S Y, et al. Large-scale afforestation enhances precipitation by intensifying the atmospheric water cycle over the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(16):e2022JD036738.
- [10] 苟娇娇,王飞,金凯,等.黄土高原植被恢复引发区域气温下降[J].*生态学报*, 2018, 38(11):3970-3978.
Gou J J, Wang F, Jin K, et al. Cooling effect induced by vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11):3970-3978.
- [11] Jin K, Wang F, Zong Q L, et al. Impact of variations in vegetation on surface air temperature change over the Chinese Loess Plateau[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 716:136967.
- [12] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. *Nature*, 2003, 423(6939):528-531.
- [13] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [14] 何艳芬,张晓.陕西省1980—2006年气候变化时空特征研究[J].*干旱区资源与环境*, 2011, 25(11):59-63.
He Y F, Zhang L. Temporal and spatial characteristics of climatic change from 1980 to 2006 in Shaanxi Province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(11):59-63.
- [15] 路培,吴发启.陕西省近30年降水变化特征分析[J].*水土保持研究*, 2013, 20(4):64-68.
Lu P, Wu F Q. The Analysis of Rainfall Characteristics of Shaanxi Province in Recent 30 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(4):64-68.
- [16] 安彬,孙虎,刘宇峰,等.陕西省气候及其生产潜力时空变化特征[J].*陕西师范大学学报:自然科学版*, 2014, 42 (3):103-108.
An B, Sun H, Liu Y F, et al. The spatial and temporal features of climate and its potential productivity in Shaanxi Province[J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2014, 42(3):103-108.
- [17] 熊光红.关中降水与气温时空动态演变特征研究[D].西安:长安大学, 2015.
Xiong G H. Study on spatial and temporal variability regularity of precipitation and temperature on Central Shanxi Province [D]. Xi'an: Changan University, 2015.
- [18] 卫旭东,刘引鸽,缪启龙.陕西省降水量变化及其影响分析[J].*水土保持通报*, 2004, 24(4):40-43.
Wei X D, Liu Y G, Miao Q L. Influences on changes of precipitation in Shaanxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(4):40-43.

- [19] Ge J, Pitman A J, Guo W, et al. Impact of revegetation of the Loess Plateau of China on the regional growing season water balance[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020,24(2):515-533.
- [20] 赵倩倩,张京朋,赵天保,等.2000年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应[J].*高原气象*,2021,40(2):292-301.
Zhao Q Q, Zhang J P, Zhao T B, et al. Vegetation changes and its response to climate change in China since 2000[J]. *Plateau Meteorology*, 2021,40(2):292-301.
- [21] 张宝庆,田磊,赵西宁,等.植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J].*中国科学(地球科学)*,2021,51(7):1080-1091.
Zhang B Q, Tian L, Zhao X N, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the loess plateau in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021,64(6):920-931.
- [22] 朱西存,赵庚星.局地不同下垫面对气象要素的影响及其气候效应[J].*中国生态农业学报*,2009,17(4):760-764.
Zhu X C, Zhao G X. Local influence of underlying surface on meteorological elements and associated climatic effect[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009,17(4):760-764.
- [23] Tang X, Cui Y, Li N, et al. Human activities enhance radiation forcing through surface albedo associated with vegetation in Beijing[J]. *Remote Sensing*, 2020,12(5):837.
- [24] Yu M, Wang G L, Pal J S. Effects of vegetation feedback on future climate change over West Africa[J]. *Climate Dynamics*, 2016,46(11):3669-3688.
- [25] 朱躲萍,叶辉,王军邦,等.青海三江源区高寒植被地表反照率变化及其辐射温度效应[J].*生态学报*,2022,42(14):5630-5641.
Zhu D P, Ye Hui, Wang G B, et al. Albedo changes of alpine vegetation and its radiative temperature effect in the three-river headwaters region of Qinghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(14):5630-5641.
- [26] Wang K, Zhao D S, Zhu Y, et al. Albedo-dominated biogeophysical warming effects induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023,154:110690.

~~~~~  
(上接第149页)

- [21] Li Z X, Zhang Q Y, Li Z, et al. Responses of soil CO<sub>2</sub> emissions to tillage practices in a wheat maize cropping system: a 4-year field study[J]. *Field Crops Research*, 2023,294:108832.
- [22] 陈蕾,董希斌.抚育间伐强度对兴安落叶松林初冬时期土壤呼吸及理化性质的影响[J].*东北林业大学学报*, 2020,48(6):146-151.  
Chen L, Dong X B. Effect of tending thinning intensity on soil respiration and physicochemical properties of *larix gmelinii* forest during early winter[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020,48(6):146-151.
- [23] 金鑫,翟婷,汪蓬,等.黄土和红壤坡面侵蚀差异及其与土壤性质的关系[J].*水土保持学报*,2023,37(4):118-123.  
Jin X, Zhai T, Wang P, et al. Difference of slope erosion between loess and red soil and its relationship with soil properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(4):118-123.
- [24] Jin H F, Huang S S, Shi D M, et al. Effects of different tillage practices on soil stability and erodibility for red soil sloping farmland in Southern China[J]. *Agronomy*, 2023,13(5):1310.
- [25] Abrha H, Abraha B. Tillage and crop residue effects on soil carbon and moisture for wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in semiarid regions of tigray, Ethiopia[J]. *Asian Soil Research Journal*, 2023,7(4):20-32.
- [26] Cao J H, Li C J, Gao X D, et al. Agricultural soil plastic as a hidden carbon source stimulates microbial activity and increases carbon dioxide emissions[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023,198:107151.
- [27] Ray R L, Griffin R W, Fares A, et al. Soil CO<sub>2</sub> emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall[J]. *Scientific Reports*, 2020,10:5849.
- [28] Inglia I, Alberti G, Bertolini T, et al. Precipitation pulses enhance respiration of Mediterranean ecosystems: the balance between organic and inorganic components of increased soil CO<sub>2</sub> efflux[J]. *Global Change Biology*, 2009,15(5):1289-1301.
- [29] Niu F R, Chen J, Xiong P F, et al. Responses of soil respiration to rainfall pulses in a natural grassland community on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2019,178:199-208.
- [30] Huang H, Calabrese S, Rodriguez-Iturbe I. Variability of ecosystem carbon source from microbial respiration is controlled by rainfall dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021,118(52):e2115283118.