

李明,高维英.陕北黄土高原中部生态修复对局地气候的影响[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):156-163.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



陕北黄土高原中部生态修复对局地气候的影响

李明^{1,2},高维英^{3*}

(1.陕西省气象台,陕西 西安 710015;2.陕西省气象局秦岭与黄土高原生态环境气象重点实验室,陕西 西安 710016;

3.陕西省气象科学研究所,陕西 西安 710016)

摘 要:利用陕北黄土高原 2000—2019 年 MODIS 产品的 MOD13Q1 数据,定边、安塞、志丹、子长、延安气象站 1990—2019 年月(年)平均气温及最高(最低)气温、降雨量、降雨日数等资料,通过差值(比值)、相关系数、线性回归等方法,对陕北黄土高原生态修复显著区(志丹、安塞、子长、延安)和非显著区(定边)在生态修复前(1990—1999 年)、生态修复中(2000—2019 年)的气象要素变化进行对比分析。结果表明:(1)生态修复中显著区、非显著区的归一化植被指数以 0.123、0.081/10 a 的速率增加,显著区为非显著区的 1.5 倍;显著区和非显著区年平均气温分别以 0.164、0.467 °C/10 a 的速率上升,平均降雨量分别以 39.95、25.56 mm/10 a 的速率增加,显著区较非显著区升温明显缓慢,但平均降雨量的增加速率明显大于非显著区。(2)生态的显著性修复在 2012 年之后对年平均气温上升的抑制作用凸显,显著区和非显著区年平均气温差值在 2013 年发生突变,2013 年为生态修复对年平均气温影响的关键时间点;生态修复显著区在植被生长季(4—9 月)对年平均气温上升的抑制较为明显,7 月最为明显,显著区较非显著区年平均气温降低了 1.05 °C;对最高气温的抑制出现在 7—8 月,对最低气温的抑制出现在 5—6 月。(3)生态修复中(2013—2019 年)显著区的降雨日数较修复前明显偏少近 6 d,其减少主要是小雨日数的减少,中雨以上的降雨日数均随着生态修复的开展呈增加趋势;显著区植被生长季降雨量增加最为明显,降雨量的增加主要表现为中雨以上降雨日数的增加;1—7 月随着植被覆盖度不断增加,显著区与非显著区不同等级降雨日数差值逐渐增大,7 月达到最大,8—12 月随着植被覆盖度不断降低,降雨日数的差值逐渐减小。

关键词:黄土高原中部;生态修复;NDVI;局地气候;影响

中图分类号:P461.7

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2024)02-0156-08

人类活动对气候的强迫不仅包括温室气体排放导致的气候变暖,还通过直接改变地表物理性状对

气候系统产生深刻影响^[1]。植被占陆地生态系统90%~99%的质量或体积,是气候最为明显的反映和综合标志^[2]。陕北黄土高原地区生态环境脆弱,水土流失严重,是我国生态环境建设与保护的重点区域;1999 年陕西省试点推行退耕还林还草工程,随后国家正式发布《退耕还林工程计划(2001—2010 年)》;1999—2008 年位于黄土高原中部的榆林和延安两地累计退耕还林面积达 4 721 km²,植被指数显著提高^[3]。在遥感技术中,常用归一化植被指数(normalized

收稿日期:2022-10-11;修回日期:2023-02-23

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42171158);陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室面上项目(2021G-1)

作者简介:李明(1974—),男,正高级工程师,主要从事灾害性天气和气候变化和气候变化研究。E-mail:467665085@qq.com

通信作者:高维英(1972—),女,高级工程师,主要从事天气与气候变化。E-mail:908583340@qq.com

differential vegetation index, *NDVI*) 进行植被覆盖程度的研究^[4-8],特别是 MODIS 提供的 *NDVI* 数据产品具有较高的时间分辨率^[9],常被应用在植被变化中。2000—2015 年黄土高原区域植被指数整体呈现增长趋势^[9],退耕还林还草成为影响陕北黄土高原植被指数变化的主要驱动因素^[3]。植被覆盖引起的土地覆盖对区域气候影响显著,尤其是对局地气候,而对全球气候影响不明显^[10]。在半干旱人类活动密集的地区,生态修复的气候效应较为明显^[11-12]。生态修复引起植被覆盖变化,从而改变地表反照率和植被的蒸发效率,受影响的气候因子包括气温、降水、蒸散(发)等^[1,13]。

关于黄土高原植被动态变化对气候因子响应方面的研究,已有不少研究成果^[14-17],但气候因子对植被覆盖变化的敏感性及时滞效应的研究却非常有限,这要以大量详实数据为基础,且消除气候长期变化因素来进行。以往在这方面多采用模式模拟开展研究^[18-19],但众多的气候模式对土地覆盖的处理方案不一致,其研究结果均具有一定的局限性。本文利用黄土高原地区多年卫星遥感资料和 30 a 气象观测资料,在时间上选取生态修复前和生态修复中 2 个时段为研究对象,空间上选取生态修复显著区和非显著区进行对比,探究生态修复对局地气温和降水的敏感性及其影响变化。

1 数据来源

2000—2019 年的 *NDVI* 数据来自 MODIS 产品的 MOD13Q1 数据(下载自 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m;定边、安塞、志丹、子长、延安气象站 1990—2019 年月(年)平均及平均最高(最低)气温、降雨量、降雨日数资料来自中国气象局信息中心 CIMISS 数据库,资料均经过质量控制。

2 研究方法

陕北地区(整个区域)及其所辖的定边、安塞、志丹、子长、延安使用的 *NDVI* 数据经过以下处理:首先对下载的 MOD13Q1 数据采用最大值合成法(Maximum Value Composition, MVC)^[20]获取 2000—2019 年 *NDVI* 逐年格点最大数据,其次根据行政边界获得不同区域格点最大数据的平均值,即为不同区域的 *NDVI*。在地理位置紧邻、地形地貌相近地区,其大气环流形势和气候变化的方向和程度非常相似,文中选取定边及其紧邻的安塞、志丹、子长、延

安进行研究,使其处于气候变化基本一致区域;差值法或比值法可以消除定边及其紧邻的安塞、志丹、子长、延安的气候变化因素,从而突出生态修复对这些区域的影响。在实际计算中,基于气温、降雨量、降雨日数等要素数值大小的不同,气温、降雨日数的变化研究主要采用差值法,降雨量则采用比值法^[21];在具体分析中还用到变化趋势分析法^[3]、相关分析^[3]等常规统计方法。

2.1 变化趋势计算

NDVI、平均(最高、最低)气温、降雨量等的变化趋势计算,采用一元线性回归方法,以年份为自变量 x , *NDVI*、平均(最高、最低)气温、降雨量等为因变量 y ,探究因变量随时间的变化,其公式为:

$$y = bx + a \quad (1)$$

式中: b 为线性倾斜率,表示因变量的增减趋势,正值为增,负值为减,值的大小反映增减的快慢速率, a 为常数。

2.2 相关性分析

为了揭示 *NDVI* 与平均气温之间的相关性,通过相关系数来测算。其计算公式为:

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

式中: R_{xy} 为要素 x 和 y 之间的相关系数,值为正则正相关,值为负则负相关。 x_i 为第 i 年的 *NDVI*, y_i 为第 i 年的气温($i=1, 2, 3, \dots, n$), n 为年数, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为两个要素的平均值。

3 生态修复显著区和非显著区的确定

1999 年陕西省推行退耕还林还草试点工程。从 2000—2019 年陕北植被归一化指数(*NDVI*)变化趋势的显著性(图 1)可知,榆林西北部和延安南部为两大 *NDVI* 不显著变化区域,其余地区均为显著变化区域。2000 年(图 2a),榆林西北部植被指数较低, *NDVI* 数值大部 > 0.30,延安南部为高植被覆盖区, *NDVI* 数值达 0.50 以上;2019 年(图 2b),榆林西北部 *NDVI* 数值增加到 0.30~0.50,延安南部因之前植被覆盖较好,提升幅度有限, *NDVI* 数值变化不明显。在 2 个变化趋势不显著区域,榆林西北部可作为生态修复非显著区。为了更好地进行对比和分析,选取榆林西北部的定边作为生态修复非显著区,选取与定边纬度、海拔高度、地形和地貌相近的延安北部为生态修复显著区(包括安塞、志丹、子长、延安)(表

1),可消除地理环境因素对分析结果的影响。

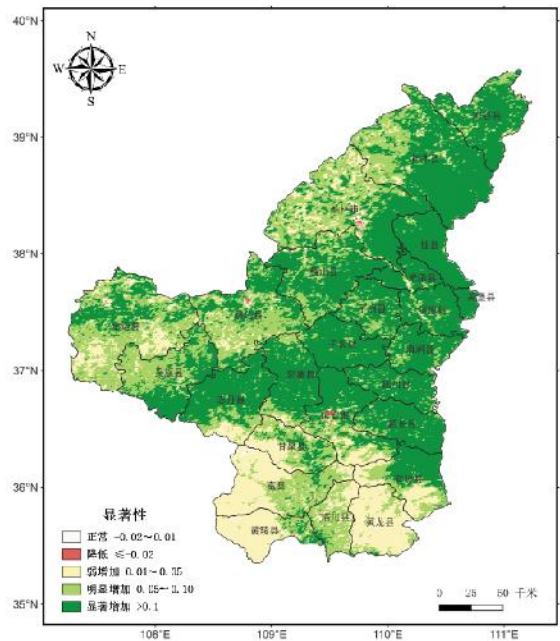


图 1 2000—2019 年陕北植被归一化指数(NDVI)变化趋势(每 10 a NDVI 增加值)的显著性 (审图号:陕 S(2018)006)

表 1 显著区和非显著区气象站及其信息

对比区域	站名	纬度	经度	海拔高度/km
显著区	安塞	36°53′	109°19′	1 068.8
	志丹	36°46′	108°46′	1 218.9
	子长	37°11′	109°42′	1 065.9
	延安	36°36′	109°30′	958.8
非显著区	定边	37°35′	107°35′	1 361.3

4 显著区与非显著区 NDVI 变化趋势及其与平均气温的相关分析

2000—2019 年显著区和非显著区 NDVI 均呈波动增加趋势(图 3),其中 2012 年 NDVI 出现了跳跃式增长。显著区 NDVI 的气候倾向率为 0.123/10 a,非显著区为 0.081/10 a,显著区为非显著区的 1.5 倍。分别计算显著区和非显著区 NDVI 与平均气温的逐年相关系数得出,非显著区的相关系数随着年份的增加呈现正相关(表 2),生态的缓慢修复对非显著区平均气温的影响不明显。显著区的相关系数随着年份的增加先呈现正相关,后为负相关(表 2),其中 2001—2011 年呈现正相关,2012—2019 年呈现负相关,即随着生态修复的开展,尤其是 2012 年 NDVI 的跳跃式增长,NDVI 波动式增大,2012 年之前年平均气温虽然处于升高时期但上升的幅度逐年降低;2012 年随着生态修复的持续开展,NDVI 与平均气温呈现负相关,生态修复对平均气温的降低作用凸显。

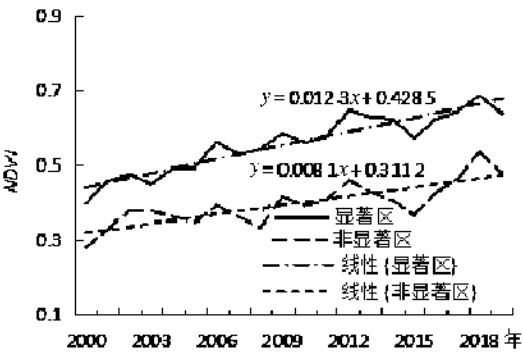


图 3 2000—2019 年显著区和非显著区 NDVI 变化以及显著趋势

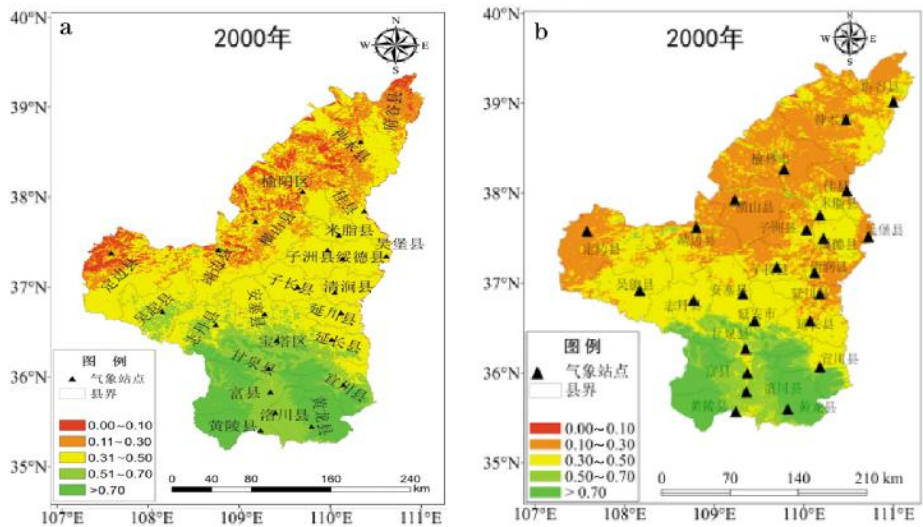


图 2 2000 年(a)与 2019 年(b)陕北植被归一化指数(NDVI)对比 (审图号:陕 S(2018)006)

表2 2000—2019年NDVI与平均气温的逐年相关系数

年	相关系数		年	相关系数	
	显著区	非显著区		显著区	非显著区
2000	—	—	2010	0.231	0.391
2001	1.000	1.000	2011	0.001	0.114
2002	0.734	0.996	2012	-0.316	0.160
2003	0.228	0.036	2013	-0.184	0.053
2004	0.131	0.043	2014	-0.234	0.097
2005	0.018	0.035	2015	-0.205	0.066
2006	0.598	0.353	2016	-0.161	0.162
2007	0.637	0.360	2017	-0.161	0.254
2008	0.209	0.406	2018	-0.254	0.271
2009	0.262	0.387	2019	-0.267	0.314

注:“—”表示数据不存在。

5 显著区和非显著区气象要素对比分析

5.1 平均及最高(最低)气温

1990—2019年显著区和非显著区平均气温分别为9.69、9.34℃。其中显著区年平均气温在8.6(1993年)~10.5℃(2006年);非显著区年平均气温在7.9(1993年)~10.3℃(2013、2016年)。显著区的年平均气温在1990—2012年高于非显著区,2013年2个区域的年平均气温均突增,但显著区的年平均气温上升幅度明显小于非显著区,2013—2019年显著区的年平均气温均低于非显著区,2013年为2个区域年平均气温对比出现突变的时间点。1990—2019年显著区和非显著区年平均气温均为上升趋势(图4),上升速率分别为0.164、0.467℃/10a,这种上升趋势是气候变化和生态修复的共同作用。显著区的平均气温上升速率明显低于非显著区,显著区平均气温上升速率的降低能够反映生态修复的作用。太阳是地球上温度与热量的主要提供者。一方面,太阳辐射穿过生态修复区(植被以森林草原和落叶阔叶林为主^[22])的树冠枝叶以直接辐射的形式到达地面,由于树冠的吸收、反射及投射作用,致使显著区内的光照时间明显缩短,光照强度减弱^[23],加之植被覆盖度上升导致水汽、云量增加,入射的太阳辐射减少。入射的太阳辐射的减少明显大于地表反照率下降产生的增温效应,显著区生态修复能够有效降低局地气温,在气候变暖的大背景下,温度上升减缓。

从1990—2019年两区域年平均气温差值变化趋势(图5)可知,2013年前2个区域的气温差值均

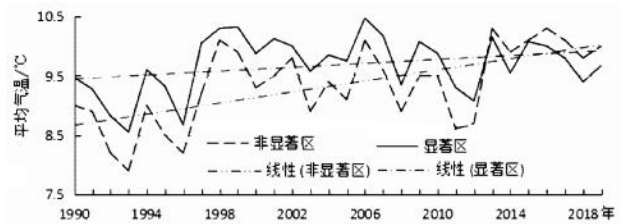


图4 1990—2019年显著区与非显著区平均气温变化及其线性趋势

为正值,2013年之后差值减小为负值。通过滑动 t -检验发现,显著区和非显著区的年平均气温差值于2013年通过0.001的显著性检验,2013年显著区和非显著区的气温差值出现明显突变。以往研究,陕北黄土高原2000—2014年林木覆盖指数呈极显著的增长趋势^[24],2009—2016年陕北黄土高原中部地区植被覆盖由中低植被覆盖向中等植被覆盖转移、中等植被覆盖向中高等植被覆盖转移^[3],不同植被覆盖指数对气象要素的影响也不同,大的植被覆盖指数对气象要素的影响更大^[25]。2000—2012年生态修复对气温的影响有限,2013年显著区和非显著区的气温差值出现突变,2013—2019年2个区域年平均气温差的平均值为-0.26℃,较1990—1999年(生态修复前)2个区域年平均气温差值的平均值(0.55℃)明显偏小,也较2000—2012年的0.51℃明显偏小。在生态修复中的2000—2012年,显著区与非显著区气温差值的变化不明显,2013年差值出现明显突变,说明生态修复对气温的影响有一定的滞后性。由于气温差值可以排除大气候背景下气温受气候变化的影响,因此可认为显著区较非显著区气温上升缓慢是由于生态环境得到了较好的改善,也说明2013年为生态修复对年平均气温影响的关键时间点,生态修复导致局地气候效应,抑制了显著区气温的上升速度。

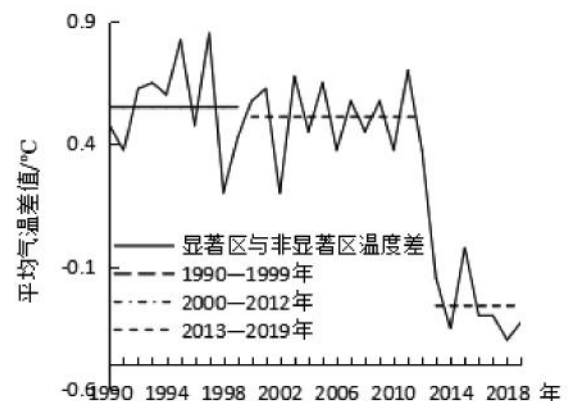


图5 1990—2019年显著区与非显著区年平均气温差值变化及其在不同生态修复时段差值的平均

在陕北地区,1、2、3、11及12月植被指数均低于0.1,4—9月为生长季,植被生长明显,植被指数显著增加,7—9月为全年植被指数较高的月份,均在0.4以上。对比分析生态修复前和生态修复中(2013—2019年)显著区和非显著区平均气温差在植被指数不同月份的变化情况(图6)可知,生态修复前,显著区和非显著区的平均气温差值全年基本在0℃以上,显著区的平均气温基本大于非显著区的平均气温;生态修复中(2013—2019年),仅1、2、3、11、12月显著区和非显著区的平均气温差值>0℃,4—10月两者的差值均<0℃,尤其是7月,差值最小,显著区的平均气温比非显著区的低1.05℃。植被生长季显著区的平均气温出现了小于非显著区的情况。1—12月生态修复中(2013—2019年)显著区与非显著区平均气温的差值均低于修复前,4—8月相差最为明显,其范围为0.96~1.48℃;其次是1、2、3、9、10月,相差较为明显,其范围为0.45~0.81℃,相差最不明显的为11、12月。

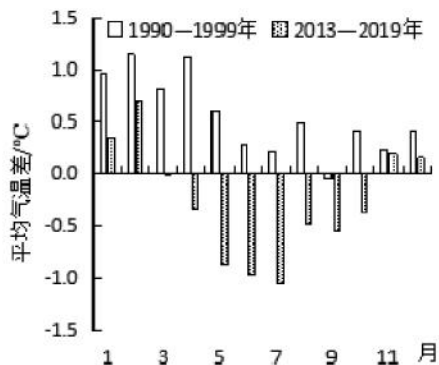


图6 生态修复前(1990—1999年)与生态修复中(2013—2019年)显著区与非显著区平均气温差值月变化

对于显著区和非显著区平均最高(最低)气温之差,其逐月变化趋势与平均气温的逐月变化趋势基本相似。不同的是,修复前和修复中(2013—2019年)显著区和非显著区的两条曲线比较靠近,说明植被指数增加对平均最高(最低)气温的影响不及平均气温明显。修复中(2013—2019年)显著区与非显著区平均最高气温之差仅在7、8月出现了<0℃的负值。7、8月正处于炎热夏季,树木生长繁茂,树冠有减少净辐射的效应,从而减少了到达林内的太阳辐射和长波辐射,同时树木的蒸腾作用消耗大量热量,使7、8月盛夏季节林木对气温的调节幅度更为明显;而修复中(2013—2019年)显著区与非显著区平均最低气温之差在5—6月出现了<0℃的负值。5—

6月陕北北部植被覆盖度急剧上升,平均最低气温一般出现在夜间,茂盛的树冠减少了长波辐射的射出,也减小了林内风速和乱流交换,抑制了气温的急剧降低^[23]。显著区内植被覆盖抑制了平均最低气温的上升。

5.2 降雨量及降雨日数

降雨量是大尺度环流和局地气象条件的产物。1990—2019年显著区和非显著区平均降雨量分别为511.1、349.2 mm。显著区年平均降雨量在298.2(1999年)~821.5 mm(2013年);非显著区年平均降雨量为200.1(2000年)~504.9 mm(2001年)。1990—2019年显著区和非显著区年平均降雨量均呈增加趋势,增加速率分别为39.95、25.56 mm/10 a,显著区的年平均降雨量增加速率明显高于非显著区(图7)。显著区与非显著区的降水量比值均>1.0,即显著区的年降水量始终大于非显著区。对修复前、修复中(2000—2012年)、修复中(2013—2019年)的比值分别进行平均,修复前的比值平均值为1.4,修复中(2000—2012年)和修复中(2013—2019年)比值的平均值均为1.5,说明植被指数的增加能在一定程度上增加降水量。

计算植被高度覆盖季(4—9月)和低度覆盖季(1、2、3、10、11、12月)在修复中(2013—2019年)显著区与非显著区降雨量比值与修复前显著区与非显著降雨量比值的差值得到,高度覆盖季差值为0.04、低度覆盖季差值为-0.27,在修复中(2013—2019年)植被高度覆盖季的降雨量较低度覆盖季的增加明显。

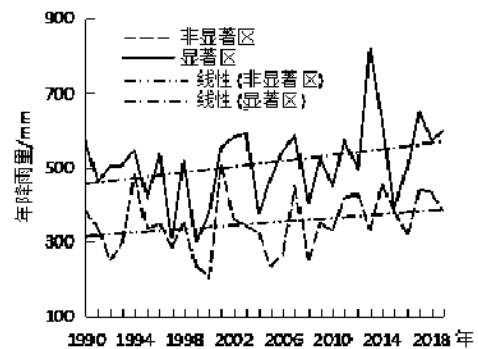


图7 1990—2019显著区与非显著区年降雨量变化及其线性趋势

由1990—2019年降雨日数的年季变化(图8)可知,显著区的降雨日数为73~131 d,降雨日数最少的是1997年,为73 d,最多的是2013年,为131 d;非显著区的降雨日数为63~113 d,最少的是1997

年,为63 d,最多是2014年,为113 d。显著区和非显著区降雨日数均呈逐年增加趋势,增加速率分别为2.293、5.713 d/10 a。显著区和非显著区降雨日数之差逐年呈减小趋势,下降速率为3.4 d/10 a,生态修复前显著区和非显著区降雨日数差值的平均值为26.3 d,修复中(2000—2012年)为24.7 d,修复中(2013—2019年)为20.4 d,修复中(2013—2019年)显著区的降雨日数较修复前偏少近6 d。生态修复中(2013—2019年)降雨量较修复前明显偏多,因此进一步分析小雨、中雨、大雨和暴雨降雨日数在显著区和非显著区的逐年变化(表3),显著区降雨日数较非显著区降雨日数减少主要是小雨日数的减少,中雨、大雨、暴雨及以上的降雨日数呈增加趋势。

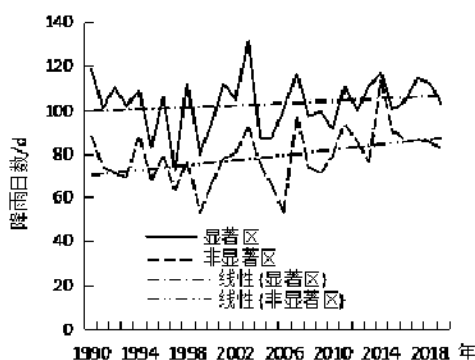


图8 1990—2019年显著区与非显著区降雨日数变化及其趋势

表3 生态修复不同时段显著区与非显著区不同降雨等级条件下降雨日数差值的平均/d

不同时段	小雨	中雨	大雨	暴雨及以上
修复前(1990—1999年)	21.1	3.9	1.5	0.2
修复中(2000—2012年)	18.4	5.0	1.7	0.5
修复中(2013—2019年)	13.4	5.4	2.0	2.1

从生态修复以来显著区和非显著区降雨日数差值月变化(图9)可知,小雨、中雨、大雨、暴雨及以上降雨日数差值均呈单峰分布。7月之前,显著区植被指数增加显著,不同等级的降雨日数差值也显著增大,7月达到最大值,说明随着植被指数的增加,显著区较非显著区不同等级的降雨日数明显增加,7月降雨日数增加到最大值。7月之后,随着植被指数的降低,显著区较非显著区不同等级的降雨日数均开始减小。

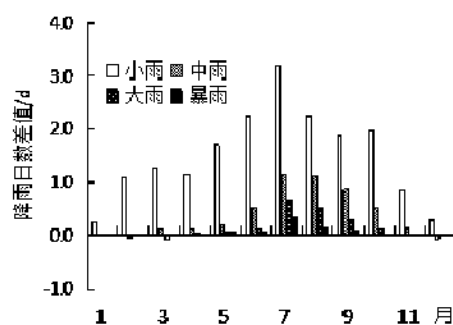


图9 2000—2019年显著区与非显著区降雨日数差值月变化

6 结论

以陕北黄土高原植被指数变化为切入点,选取志丹、安塞、子长、延安为生态修复显著区,定边为非显著区,对比分析了显著区和非显著区在生态修复前后气温、降雨量的变化,得到如下结论:

(1)2000—2019年显著区和非显著区NDVI均呈增加趋势,显著区的增加较非显著区增加趋势更为明显。非显著区NDVI与年平均气温的逐年相关系数基本呈正相关,生态的缓慢修复对年平均气温的影响不明显;显著区NDVI与年平均气温的相关系数随着年份的增加先呈正相关、后呈负相关,2012年之后生态修复对年平均气温上升的抑制作用凸显。

(2)生态修复显著区植被指数的显著增加抑制了显著区气温的上升。1990—2019年生态修复显著区和非显著区年平均气温均呈升温趋势,显著区较非显著区增温缓慢。2013年显著区和非显著区年平均气温发生了突变,1990—2012年显著区的年平均气温明显高于非显著区,2013—2019年显著区的年平均气温均低于非显著区,生态修复对年平均气温的影响有一定滞后性。生态修复在植被生长季(4—9月)对气温上升的抑制非常明显,对最高气温的抑制出现在7—8月,对最低气温的抑制出现在5—6月。

(3)生态修复前和生态修复中显著区、非显著区年平均降雨量均呈增加趋势,显著区的年平均降雨量增加速率明显大于非显著区。生态修复中,显著区在植被生长季(4—9月)降雨量增加较非显著区明显,降雨量的增加主要是因为中雨以上降雨日数的增加;1—7月显著区与非显著区不同等级的降雨日数差值逐渐增大,7月降雨日数差值增加到最大值,7月之后2个区域降雨日数的差值逐渐减小。

与目前国内外相关研究(主要采用数值模拟或

现场观测方法)相比,本文仅采用国家气象站资料进行分析,研究区域也具有一定的局限性。另外,气象站的观测还受到多种因素的影响,尤其是周边环境及仪器设备更换和维护,文章采用的分析方法较为简单,因此黄土高原的生态修复对局地气候的影响结论将期待更多的方法进行验证。

参考文献:

- [1] 邵璞,曾晓东.土地利用和土地覆盖变化对气候系统影响的研究进展[J].气候与环境研究,2012,17(1):103-111.
- [2] 宋敏敏,张青峰,吴发启,等.基于NDVI的延河流域时空演变分析[J].水土保持研究,2017,24(4):6-11.
- [3] 郭力宇,郭昭,王涛,等.陕北黄土高原植被动态变化及其对气候因子的响应[J].西安科技大学学报,2019,39(2):317-326.
- [4] LIU X F,ZHU X F,PAN Y Z,et al.Vegetation dynamics in Qin-ling-Daba mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014 [J].Journal of Geographical Sciences,2016,26(1):45-58.
- [5] YANG Q,QIN Z H,LI W J,et al.Temporal and spatial variations of vegetation cover in Hulun buir grassland of inner Mongolia,China [J].Arid Land Research and Management,2012,26(4):328-343.
- [6] 郭锐.植被指数及其研究进展[J].干旱气象,2003,21(4):71-75.
- [7] 曹孟磊,肖继东,陈爱京,等.伊犁地区不同草地类型植被指数与气候因子的关系[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):73-80.
- [8] 史尚渝,王飞,金凯,等.黄土高原地区植被指数对干旱变化的响应[J].干旱气象,2020,38(1):1-13.
- [9] 李宇恒,江涛,郭庆华.黄土高原植被覆盖度时空变化与预测分析[J].北京测绘,2020,34(11):1564-1569.
- [10] 张新时.研究全球变化的植被—气候分类系统[J].第四纪研究,1993(2):157-169.
- [11] 年雁云,王晓利,蔡迪花.黑河流域下游额济纳三角洲气候及生态环境变化分析[J].干旱气象,2015,33(1):28-37.
- [12] 王莺,李耀辉,孙旭映.黄河源区域生态环境演变与对策建议[J].干旱气象,2013,31(3):550-557.
- [13] 曹丽娟,张冬峰,张勇,等.土地利用变化对长江流域气候及水文过程影响的敏感性研究[J].大气科学,2010,34(4):726-736.
- [14] 刘敏,张潇月,李晓丽,等.黄土高原林下草地对模拟增温的短期响应[J].生态学报,2020,40(17):6009-6024.
- [15] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆被类型NDVI对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(2):678-691.
- [16] 彭代亮,黄敬峰,王秀珍.基于MODIS-EVI区域植被季节变化与气象因子的关系[J].应用生态学报,2007,18(5):983-989.
- [17] 刘绿柳,许红梅.黄河流域主要植被类型NDVI变化规律及其与气象因子的关系[J].中国农业气象,2007,28(3):334-337.
- [18] 马丹萌.自然植被恢复对东亚区域气候的可能影响[D].南京:南京信息工程大学,2021.
- [19] 刘伟光.中国区域植被对气候变化的响应及其对区域气候反馈的模拟研究[D].南京:南京信息工程大学,2021.
- [20] 殷娜.基于Landsat和MODIS时序数据的植被年内最大覆盖度提取方法研究[D].北京:中国地质大学,2022.
- [21] 张雪婷,李金鑫,陈正洪,等.我国大别山区风电场群对局地气候影响研究初探—以湖北大悟为例[J].气象科技进展,2019,9(2):56-61.
- [22] 杨延征,赵鹏祥,郝红科,等.基于SPOT-VGT NDVI的陕北植被覆盖时空变化[J].应用生态学报,2012,23(7):1897-1903.
- [23] 孙同光.新疆和田地区人工柽柳大芸规模化种植的效益分析[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.
- [24] 路慧萍.黄土高原近15年植被覆盖变化及其驱动力研究[D].太原:山西大学,2018.
- [25] 王兵,崔向慧,李海静,等.大岗山森林生态区气象要素分析[J].林业科学研究,2002,15(6):693-699.

Effects of Ecological Restoration on Local Climate in the Middle of Loess Plateau in Northern Shaanxi

LI Ming^{1,2}, GAO Weiying³

(1. Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710015, China;

2. Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Xi'an 710016, China;

3. Meteorological Science Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710016, China)

Abstract Based on the MOD13Q1 data of MODIS products in the Loess Plateau of Northern Shaanxi from 2000 to 2019, the monthly (annual) average temperature, maximum (minimum) temperature, rainfall and rainfall days of Dingbian, Ansai, Zhidan, Zichang, and Yan'an meteorological stations from 1990 to 2019 were used. the difference (ratio), correlation coefficient and linear regression were used. The changes of meteorological elements in the ecological restoration significant areas (SIER; Zhidan, Ansai, Zichang, Yan'an) and non-significant area (NSIER; Dingbian) of the Loess Plateau in northern Shaanxi were compared and analyzed before ecological restoration (1990–1999; BER) and during ecological restoration (2000–2019; DER). The results showed that: (1) The normalized differential vegetation index (*NDVI*) in SIER and NSIER at DER increased by 0.123 and 0.081/10 a, and the rate in SIER was 1.5 times that in NSIER. The annual average temperature in SIER and NSIER increased by 0.164 °C/10 a and 0.467 °C/10 a, respectively, and the annual average rainfall increased by 39.95 mm/10 a and 25.56 mm/10 a, respectively. The temperature increased in SIER was significantly slower than that in NSIER, but the increase rate of average rainfall was significantly greater than that in NSIER. (2) Significant restoration of ecology had a prominent inhibitory effect on the annual average temperature rose after 2012. The abrupt change in the annual average temperature difference of SIER and NSIER occurred in 2013, which was a key time point for the impact of ecological restoration on the annual average temperature. In the vegetation growth season (April–September), the inhibition of the annual average temperature rose in SIER was more obvious, especially in July. The annual average temperature in SIER was 1.05 °C lower than that in NSIER. The inhibition of the highest temperature appeared in July–August, and the inhibition of the lowest temperature appeared in May–June. (3) The number of rainfall days in SIER at DER (2013–2019) was significantly less than that BER by nearly 6 days. The decrease was mainly due to the decrease of light rain days. The number of rainfall days above moderate rain showed an increasing trend with the development of ecological restoration. The increase of rainfall in the vegetation growth season in SIER was the most obvious, and the increase of rainfall was mainly manifested in the increase of the number of rainy days above moderate rain. From January to July, with the continuous increase of vegetation coverage, the difference between different grades of rainfall days in SIER and NSIER gradually increased, reaching the maximum values in July. From August to December, with the decrease of vegetation coverage, the difference of rainfall days gradually decreased.

Key words central loess Plateau; ecological restoration; *NDVI*; local climate; effect