

DOI: 10.5846/stxb201506281310

张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(13): - .

Zhang H Y, Fang N F, Shi Z H. Spatio-Temporal Patterns for the NDVI and Its Responses to Climatic Factors in the Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): - .

黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应

张含玉^{1,2}, 方怒放^{1,2,3,*}, 史志华^{1,4}

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实验室, 杨凌 712100

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

4. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要:为研究黄土高原地区退耕还林(草)后, 植被覆盖变化及其对水热条件的响应, 利用 1999—2013 年 SPOT VGT NDVI 1km/10d 分辨率数据, 采用最大合成法、一元线性回归法和偏相关分析法, 系统分析了黄土高原地区 NDVI(归一化植被指数)的时空分布及变化趋势, 及其与气候因子的关系。结果表明: 黄土高原 1999—2013 年年最大 NDVI 的平均值为 0.31, NDVI 较高的区域位于黄土高原南部, 而西北部植被覆盖度较低; 自 1999 年开始, 黄土高原地区 NDVI 呈极显著($P < 0.01$)增加趋势, 年最大 NDVI 的变化斜率为 0.0099; 不同季节(春、夏、秋、冬)和生长季的植被状况均呈现良性发展趋势; 1998—2013 年间, 黄土高原地区气候呈现不显著的“冷湿化”特征; NDVI 年际(及生长季和季节)变化与降雨和温度的相关性不显著, 而在月时间尺度上, 呈显著的相关性, 并且月 NDVI 与当月降雨量的相关性要强于与当月温度的相关性; 植被生长对温度的响应存在一个月的滞后期, 而对降雨的响应无滞后效应。

关键词:黄土高原; 归一化植被指数; 时空特征; 植被变化; 气候变化

Spatio-Temporal Patterns for the NDVI and Its Responses to Climatic Factors in the Loess Plateau, China

ZHANG Hanyu^{1,2}, FANG Nufang^{1,2,3,*}, SHI Zhihua^{1,4}

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 712100, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

4 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: The Chinese Loess Plateau is one of the best-known areas in the world. It is located in the middle reaches of the Yellow River basin, and experiences the heaviest soil erosion in the world. In 1999, the Chinese government initiated the Grain-for-Green Program (GGP) for ecological restoration and soil erosion control. The main objective of the GGP was to rehabilitate forests and grasslands in an effort to control soil erosion. The project suggested converting all croplands with slopes of greater than 15° to grassland or forest. By the end of 2003, 79,000 km² of cropland had been returned to forest or grassland. Thus, it is necessary to assess the trend in land cover change following the implementation of the GGP in the Loess Plateau. The objectives of this study were 1) to investigate the spatio-temporal patterns of vegetation cover in Loess Plateau based on the 1999—2013, 1 km/10 d resolution SPOT VEGETATION Normalized Difference Vegetation Index

基金项目:国家自然科学基金(41301294); 西部之光, 中央高校基本业务费(2014YB053)

收稿日期:2015-06-28; **修订日期:**2015-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fnf@ms.iswc.ac.cn

(NDVI) data and 2) to investigate their responses to climatic factors. The NDVI data were provided by the Flemish Institute for Technological Research (VITO). The datasets can be downloaded from <http://cdc.cma.gov.cn>. The climatic factors were precipitation and temperature in this study. The precipitation and temperature data were downloaded from the China Meteorological Data Sharing Service System (<http://www.esiience.gov.cn/metdata/page/index.html>). The maximum-value composites, linear regression method, and partial correlation analysis were used to investigate the spatial distribution and changes in the NDVI and the relationships between the NDVI and precipitation and temperature in the Loess Plateau. The results showed that the average NDVI value for the Loess Plateau was 0.31 from 1999 to 2013. The higher NDVI values were mainly distributed in the southeast part of the Loess Plateau. In contrast, the northwest part of the Loess Plateau had lower NDVIs. The NDVI increased significantly from 1999 to 2013 ($P < 0.01$), and the slope of the trend line for NDVI was 0.0099. This indicated that the implementation of GGP improved vegetation coverage in the Loess Plateau and the vegetation construction achievements were quite noticeable. The seasonal NDVIs (spring, summer, autumn, and winter) and the growing season NDVI also showed significantly increased. Summer has the fastest NDVI growth rate (0.0087), followed by autumn (0.0081), spring (0.0064), and winter (0.0018). The growing season NDVI had the same growth rate as summer. From 1998 to 2013, precipitation and temperature in the Loess Plateau increased and decreased, respectively, but neither change was significant. The partial correlation analysis showed that NDVI correlated significantly with temperature and precipitation at the monthly scale. However, no significant correlations were noted between annual (or growing season and seasonal) NDVI and annual (or growing season and seasonal) temperature and precipitation. Temperature change had a lagging effect on vegetation growth, but precipitation change did not.

Key Words: Loess Plateau; normalized difference vegetation index; spatio-temporal patterns; vegetation change; climate change

黄土高原地处半干旱半湿润气候带,生态环境脆弱,土质松散,抗蚀性能差,加之长期乱垦滥伐,植被破坏殆尽,致使该地区水土流失严重,是我国水土保持重点区域^[1-3]。植被是联结土壤、大气和水分之间物质、能量交换的关键环节,是全球环境和气候变化的敏感指示器,具有截留降雨、减少雨滴击溅、增加土壤入渗、保土固土等功能,对减少水土流失有重要作用^[4-5]。为改善黄土高原植被覆盖状况,治理水土流失,自 1999 年开始国家实施了退耕还林(草)、封山育林以及荒山造林等大规模植被建设^[3,6-7]。加强黄土高原植被覆盖时空变化研究,有助于更好地理解陆地生态系统的动态变化特征,可为黄土高原生态建设提供有用的空间信息和理论支持^[8-10]。

归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)是遥感影像近红外波段反射值(Near Infrared Reflection, NIR)和红光波段反射值(R)之差与 NIR 和 R 之和的比值,常被用来表征植被覆盖和植被生长状况,是目前科学研究中最常用的植被指数^[5,11-13]。NDVI 可以对植被生长动态变化进行监测,同时能够在较大时空尺度上客观反映植被信息^[12]。近年来,国内外众多学者已经对不同地区的植被 NDVI 时空变化趋势及其与气候变化的关系和响应特征作了大量研究^[8,13-15]。例如,李本纲和陶澍利用 AVHRR NDVI 数据探讨了全国植被覆盖与温度和降雨的关系^[16];Wu 等利用 MODIS NDVI 研究了北京-天津沙源区 2000—2010 年植被覆盖时空变化趋势^[17]。目前对于黄土高原地区植被覆盖时空演变分析已有一些阶段性成果^[5,8-10],但对整个黄土高原在大规模植被建设实施后,植被覆盖年、生长季、季节及月变化和空间分布的研究仍相对较薄弱。

黄土高原是中国气候变化的敏感地带,研究发现,20 世纪 80 年代以来,黄土高原地区气候变化趋势明显^[8,18-20]。同期,在黄土高原开展了大规模的植树造林等生态建设活动^[2-3,7]。本文对该背景下的黄土高原地区植被覆盖在不同时间尺度上的变化进行分析,并在此基础上探讨气候变化对植被变化的影响。以期研究结果为该地区环境保护、生态建设和水土流失的综合治理提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地处中国黄河中上游地区(33°43′—41°16′N, 100°54′—114°33′E), 平均海拔 1000—1500 m, 总面积约为 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该区属温带大陆性季风气候, 四季分明, 年平均温度为 3.6—14.3℃。受温带大陆性气候的影响, 年降水量在 150—750 mm 之间, 全年降水主要集中在 7—9 月, 占全年降水量的 60%—80%。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 NDVI 数据

本研究所采用的 NDVI 数据来源于比利时佛莱芒技术研究所(Flemish Institute for Technological Research, VITO)发布的 10 日最大化合成 SPOT-VEGETATION (SPOT-VGT) S10 NDVI 产品, 空间分辨率为 1km, 时间尺度为 1998 年 4 月至 2014 年 5 月。该数据集已经过严格处理, 通过辐射校正、几何校正、大气校正等处理之后, 可保证 NDVI 数据的质量。本文使用的数据为 1999 年 1 月至 2013 年 12 月覆盖东亚的 SPOT-VGT S10 NDVI 数据集(可在 <http://free.vgt.vito.be> 免费下载)。

下载后的数据采用 VITO 提供的 VGT Extract 软件来提取, 设置输出范围和输出格式(ENVI, unsigned Integer)后, 通过批处理的方式提取 SPOT-VGT S10 NDVI 数据集。在 ArcGIS 10.0 中, 利用研究区边界截取黄土高原地区 NDVI 时序数据集, 根据公式 $NDVI = DN \times 0.004 - 0.1$ [21-22] 将句 DN 值转化为对应的句标准 NDVI 真实值, 并将数据投影系统转为 Albers 投影, 即可得研究区的逐句 NDVI 时序数据集。为进一步降低噪声并提高数据质量, 本文对研究区逐句 NDVI 时序数据集, 通过 IDL7.0 提供的 Savitzky-Goaly 滤波方法 [12] 重建高质量 NDVI 时间序列数据。

1.2.2 气象数据

1998 年 1 月—2013 年 12 月年黄土高原地区 51 个气象站点的日降水和温度数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>), 本研究选取的气象站点空间分布见图 1。最后, 利用 ArcGIS10.0 软件, 对 51 个气象站点的温度和降雨数据分别进行克里格(Kriging)插值, 获得整个黄土高原地区的平均温度和平均降雨量。

1.3 分析方法

根据研究需要, 将研究时段划分为年际、生长季、季节、月份四种时间尺度。季节划分采用气象学上的标准: 春季是 3—5 月, 夏季是 6—8 月, 秋季是 9—11 月, 冬季是 12 月和次年 1—2 月, 生长季是 4—9 月 [21]。采用最大合成法(Maximum Value Composites, MVC)获得各研究时段内最大 NDVI 值作为该研究时段的 NDVI 值。

NDVI 随时间的变化趋势利用 slope 分析, 即对每个栅格的 NDVI 数值进行一元线性回归分析, 计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

式中, slope 为变化速率, 即斜率; i 表示年序号, n 为研究序列的长度, $NDVI_i$ 为第 i 年的 NDVI 值。若 $\text{slope} > 0$, 则该像元 15a 间的植被覆盖度变化趋势是增加的, 且数值愈大植被覆盖度增加趋势愈明显; 反之则表明植被变化趋势是减少的; $\text{slope} = 0$ 表示此像元的植被覆盖度无变化。

此外, 本研究中的偏相关分析与线性拟合分析分别借助 SPSS17.0 软件和 origin8.0 软件完成。

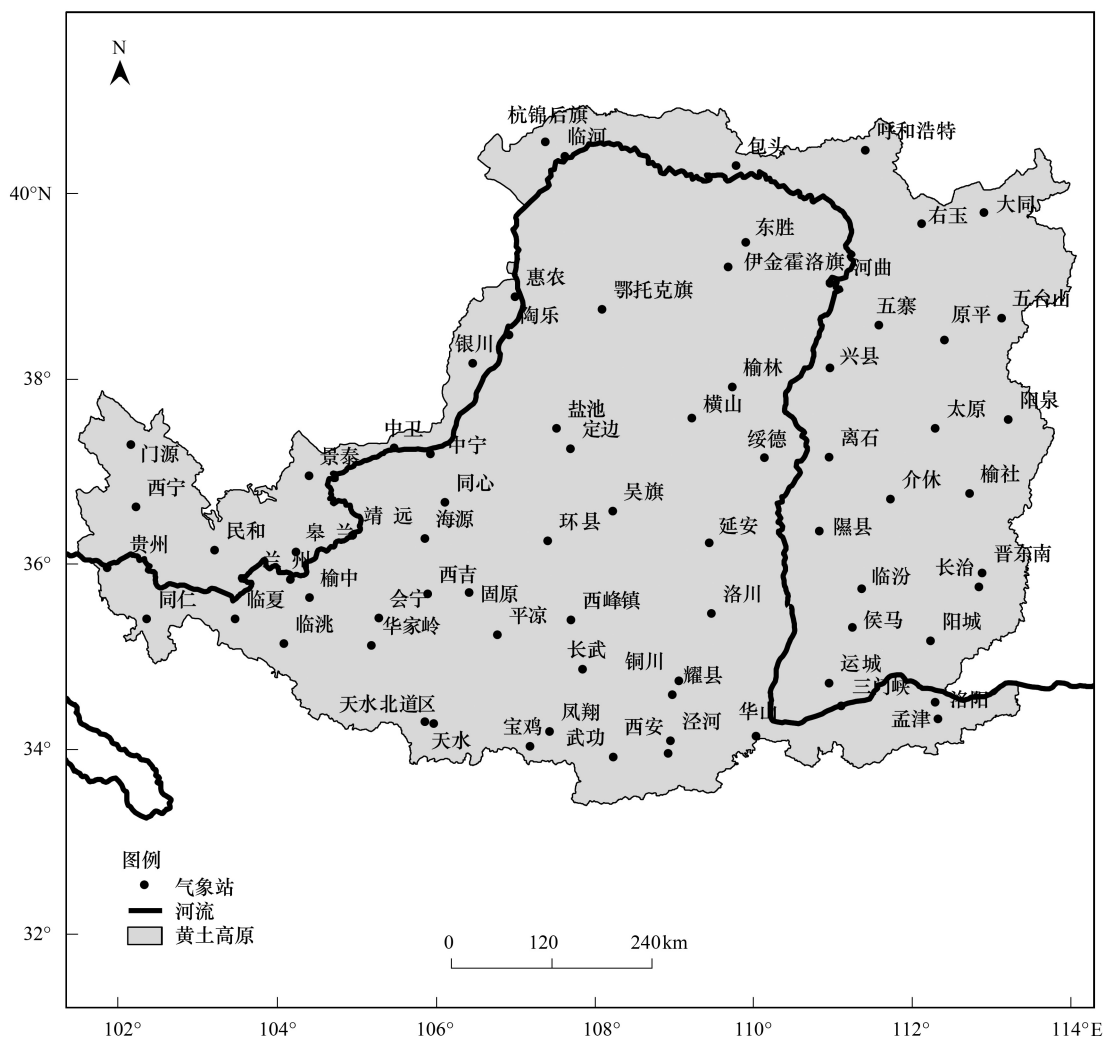


图1 黄土高原气象站位置及分布

Fig.1 Locations of meteorological station in Loess Plateau

2 结果与分析

2.1 黄土高原地区 NDVI 变化特征

2.1.1 黄土高原地区 NDVI 时空分布特征

黄土高原地区月 NDVI 的最小值出现在 1 月份和 2 月份(均为 0.16),随着降雨的增加以及气温的升高, NDVI 也逐渐增大。其中 NDVI 值较高的月份是 7—9 月,8 月份研究区 NDVI 值达到最高(0.50),之后 NDVI 开始下降。图 2 为研究区不同季节,生长季和年最大 NDVI 平均值(1999—2013 年)的空间分布图。从不同季节 1999—2013 年平均 NDVI 可以看出,冬季黄土高原植被覆盖度最低(平均 NDVI 为 0.19),绝大部分地区 NDVI 处于 0.1—0.2 之间,占黄土高原面积的 59.06%。随着温度回升,黄土高原春季植被覆盖逐步增加,研究区 NDVI 平均值为 0.35。在夏季,黄土高原地区降水量增加,植被茂密,NDVI 明显增大并达到最大值(平均 NDVI 为 0.51),大部分地区 NDVI 主要分布在 0.6—0.7 之间,占整个研究区的 17.34%。秋季黄土高原大多数植被开始落叶、凋零,农作物开始收割,地表植被减少,NDVI 与夏季相比也有减小趋势,整个研究区平均 NDVI 为 0.46。生长季 NDVI 和全年 NDVI 的空间分布范围较一致,研究区 NDVI 值主要分布范围为 0.5—0.6, 分别占整个研究区的 17.81%和 17.80%,另外整个研究区平均 NDVI 分别是 0.52 和 0.31。

从图 2 黄土高原地区 NDVI 的空间分布图中可以看出,在各研究时段内,黄土高原东南部地区 NDVI 值较

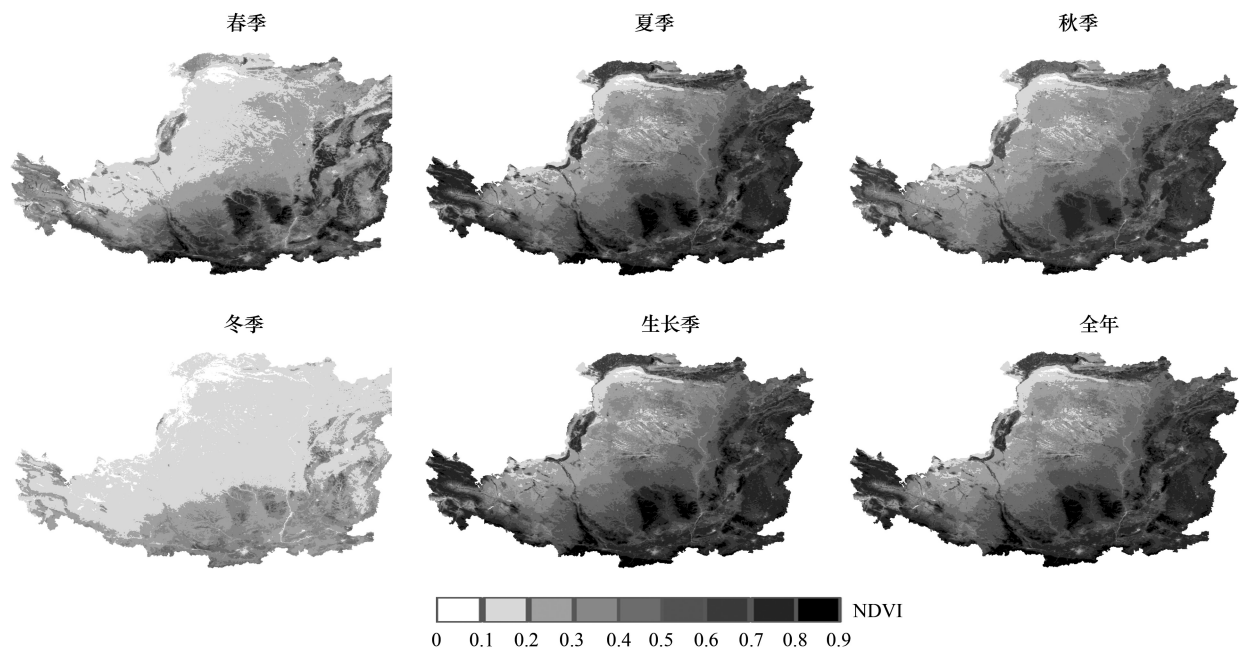


图2 黄土高原地区季节、生长季和年最大 NDVI 平均值的空间分布图

Fig.2 The distribution of different season, growth season and year maximum NDVI in Loess Plateau

高,其次是东部,而西北部干旱半干旱地区(荒漠、沙地以及裸岩)NDVI 值较低。黄土高原地区东南部植被覆盖明显高于西北部的原因,可能是东南部水热条件较好,植被类型主要为针阔叶林、寒温性灌丛和草丛^[9];而西北部由于东南季风带来的暖湿气流不能深入内陆,主要的植被类型是草原、草甸和高山稀疏植被,导致 NDVI 较低^[9]。

2.1.2 黄土高原地区 NDVI 变化趋势

图3为黄土高原地区 NDVI 从1999年到2013年的变化趋势。从图中可以看出,不同季节、生长季和全年的 NDVI 整体上呈增加的趋势。除冬季($P=0.020$)外,其他季节 NDVI 与生长季和全年 NDVI 均呈极显著($P<0.01$)的增加趋势。据统计,研究区四季 NDVI 平均增加速度由快到慢依次为夏季(0.0087)>秋季(0.0081)>春季(0.0064)>冬季(0.0018)。可见,黄土高原地区植被覆盖增加主要发生在夏秋两季,研究结果与张宝庆等^[5]的研究结果相同。另外,生长季 NDVI 平均增长速度(0.0087)与夏季 NDVI 增长速度无差异。年 NDVI 的变化速度最大,为0.0099。此外,夏季和生长季 NDVI 与全年 NDVI 的变化较为一致,1999—2001年黄土高原地区 NDVI 处于相对较低的水平,自2001年开始,NDVI 迅速上升,在2005年有短暂的下降之后,进一步增长。整体上来看,从1999年开始黄土高原地区 NDVI 呈增加趋势,说明退耕还林(还草)政策的实施,使得黄土高原地区的生态环境逐年改善,植被状况总体呈好转的趋势。

为进一步研究黄土高原地区植被覆盖变化的幅度和空间分布,对各像元 NDVI 与时间进行一元线性回归分析。结果显示(图4),黄土高原地区1999—2013年年最大 NDVI 变化斜率最大的地区是黄河中游区域,尤其是水土流失最为严重的丘陵沟壑区,其植被恢复态势最为明显。而中西部部分区域 NDVI 的变化斜率较小。从6个不同研究时段来看,黄土高原地区 NDVI 都表现出不同程度的增加趋势,大部分区域 NDVI 变化斜率主要在0—0.1之间,分别占整个黄土高原的68.13%(春季),60.32%(夏季),62.87%(秋季),65.87%(冬季),61.04%(生长季)和51.79%(全年)。此外,本研究将 NDVI 变化斜率小于零的区域定义为植被退化区。1999—2013年黄土高原植被退化面积为 $19.1\times 10^3\text{ km}^2$,仅占研究区总面积的2.99%。

2.2 黄土高原地区 NDVI 对水热条件的响应

2.2.1 黄土高原地区气候的时间变化特征

从表1月平降雨量和温度可以看出,两者的变化趋势基本一致。降雨量和温度的最小值均出现在12月

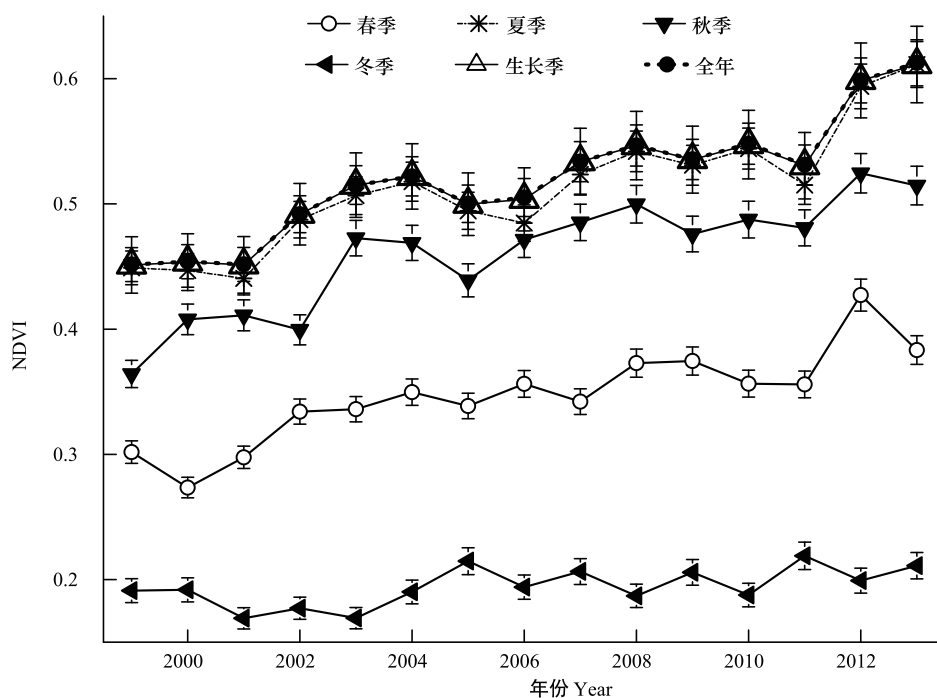


图3 黄土高原地区不同季节、生长季和年 NDVI 随时间的变化趋势

Fig.3 The change trend of different season, growth season and year NDVI in Loess Plateau

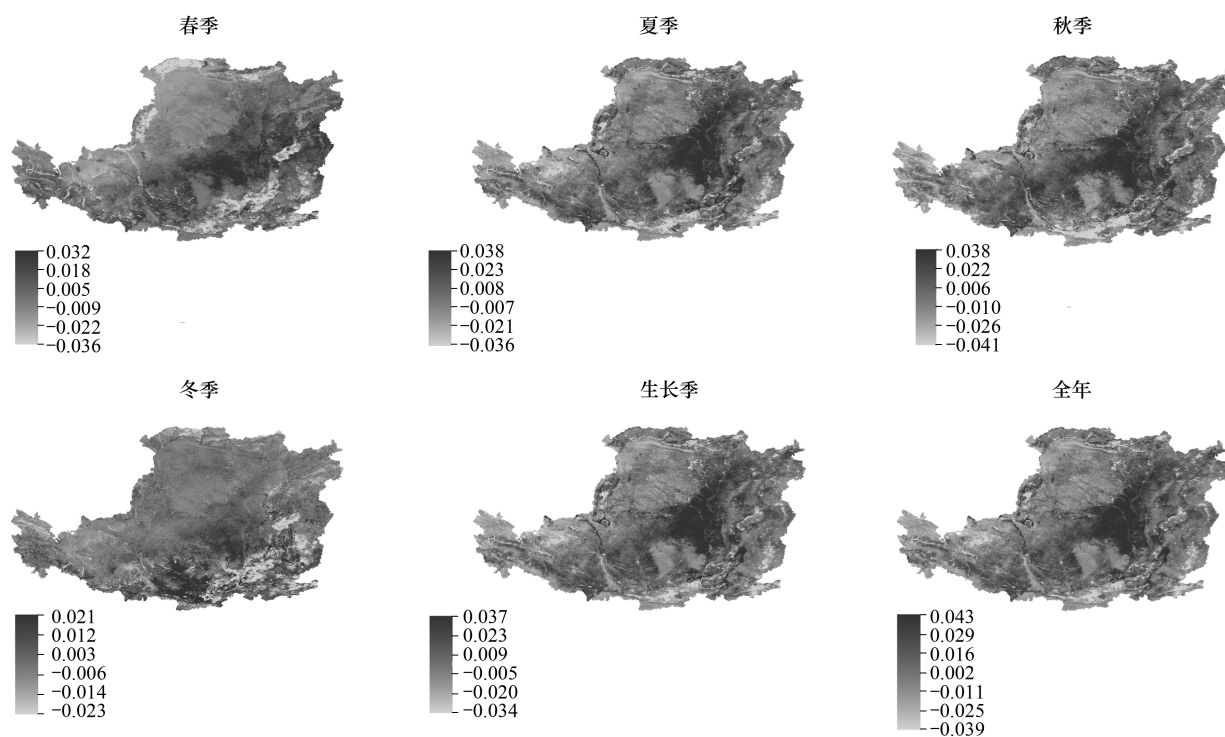


图4 1999—2013 年黄土高原季节和年最大 NDVI 变化斜率

Fig.4 The change slope of season, growth season and year maximum NDVI in Loess Plateau

份到次年2月份,其中降雨量较集中和温度较高的月份均在6—9月,在7月份达到峰值。由月NDVI的变化趋势和表1可以看出,月NDVI、月降雨量和月温度的增速相似,且存在NDVI对于降雨和温度的滞后效应。

表 1 黄土高原地区多年月降雨量和温度												
Table 1 The mean month precipitation and temperature in Loess Plateau												
气候因子 Climate factors	一月 January	二月 February	三月 March	四月 April	五月 May	六月 June	七月 July	八月 August	九月 September	十月 October	十一月 November	十二月 December
降雨量 Precipitation/mm	3.9	5.4	10.1	20.9	43.8	53.4	93.5	84.5	68.9	29.2	9.7	2.9
温度 Temperature/℃	-6.6	-1.8	4.3	11.7	16.9	21.4	22.9	21.1	16.3	9.6	2.0	-4.6

图 5 为不同季节、生长季的降雨量和温度变化趋势。从图中可以看出,冬季降雨量和温度最低,而夏季降雨量和温度最大,其次为生长季。从降雨量的变化趋势可以看出,除春季降雨量有减小趋势外,其他季节降雨量均呈增加趋势,但变化趋势均不显著($P>0.05$)。冬季降雨量的年际波动较小,而夏季、秋季和生长季的降雨量年际波动较大。从温度的变化趋势可以看出,不同研究时段的温度,均有降低的趋势,但不显著($P>0.05$)。

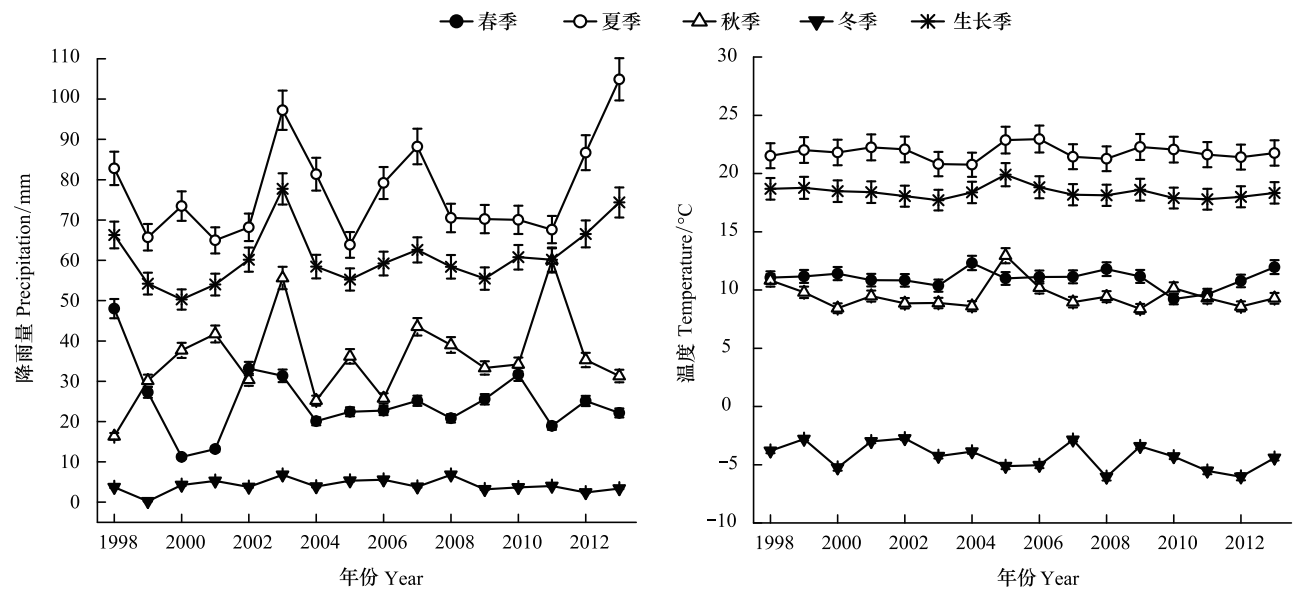


图 5 黄土高原地区不同季节和生长季降雨和温度的变化趋势

Fig.5 The change slope of different season and year precipitation and temperature in Loess Plateau

对黄土高原地区 1998—2013 年 51 个气象观测站点的降雨量和温度实测资料分析发现,黄土高原气候变化呈现“冷湿化”趋势。降雨量呈增加的趋势,变化斜率为 3.023;温度呈现降低的趋势,变化斜率为-0.046 (图 6)。但是,由于降雨量和温度年际波动较大,研究区降雨量增加($P=0.293$)温度降低($P=0.061$)的趋势不显著。

2.2.2 研究区 NDVI 对水热条件的响应

从 NDVI 与降雨量、温度的偏相关分析结果来看,在春季、夏季、秋季、生长季和全年,NDVI 与降雨量均呈正相关,而冬季降水与 NDVI 呈负相关(表 2)。在植被变化对温度变化的敏感性方面,四季、生长季和全年的平均 NDVI 和平均温度均呈负相关。原因可能是:

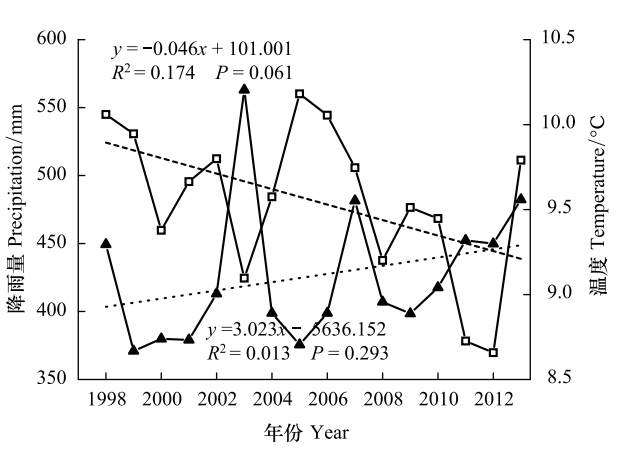


图 6 1998—2013 年研究区降雨量和温度的年际变化

Fig.6 The change of precipitation and temperature from 1998 to 2013 in Loess Plateau

(1) 温度是植被覆盖增加的限制因子。温度上升可以加速地表蒸散发过程,由此引起土壤干化从而抑制植被生长,降低 NDVI;(2) 与其他因素相比,人类活动对 NDVI 的影响占绝对主导地位,如最近十几年研究区退耕还林草措施实施和农业生产水平的提高促使植被 NDVI 显著增加,而最近十几年的年气温呈现不显著的微弱下降趋势(图 8),即气温对 NDVI 的负效应是一种伪效应^[21]。具体原因,还需要进一步深入定量的分析研究。然而,研究区 NDVI 与降雨量和温度的相关性均不具有统计的显著性($P>0.05$),说明研究区植被的季节和年际变化分别与季节和年降雨量和气温的关系并不密切。由于降雨和温度变化具有时间尺度上的差异,仅仅通过降雨和温度与 NDVI 在季节和年际变化尺度上的关系,并不能充分说明植被变化对水热条件的响应^[12]。并且,考虑到水热条件对植被生长影响的滞后性,有必要从月时间尺度上分析植被变化对水热条件的响应。

表 2 不同时段 NDVI 与降雨量、温度的偏相关关系

Table 2 The partial correlation coefficient between NDVI and precipitation and temperature

气候因子特征时间 Time	降雨量 Precipitation		温度 Temperature	
	$R_{\text{NDVI 降水} \cdot \text{气温}}$	P	$R_{\text{NDVI 气温} \cdot \text{降水}}$	P
春季 Spring	0.342	0.232	-0.028	0.807
夏季 Summer	0.541	0.056	-0.087	0.768
秋季 Autumn	0.144	0.624	-0.132	0.654
冬季 Winter	-0.461	0.097	-0.439	0.116
生长季 Growing season	0.563	0.068	-0.028	0.924
全年 Year	0.415	0.14	-0.215	0.461

$R_{\text{NDVI 降水} \cdot \text{气温}}$ 表示剔除气温影响后 NDVI 与降水的偏相关系数; $R_{\text{NDVI 气温} \cdot \text{降水}}$ 表示剔除降水影响后 NDVI 与气温的偏相关系数

为了进一步研究 NDVI 对降雨和温度的响应,本研究分别计算了 1999—2013 年 180 个月份 NDVI 与降雨及温度的偏相关系数。气候因子分别选取当月、上月和上上月 3 个特征时间的值与当月 NDVI 计算偏相关系数,结果见表 3。从表中可以看出,研究区当月 NDVI 与当月、上月及上上月的降雨和温度存在显著的相关关系($P<0.05$)。NDVI 与当月降雨的相关性高于与当月温度的相关性。但是,NDVI 与上月及上上月温度的相关性要强于与降雨的相关性。另外,NDVI 与降雨和温度的最大的偏相关系数分别出现在当月($R_{\text{NDVI 降水} \cdot \text{气温}} = 0.606$)和上月($R_{\text{NDVI 气温} \cdot \text{降水}} = 0.783$)。可见,植被生长对温度的响应存在一个月的滞后期,而降雨无滞后效应。

表 3 月 NDVI 与降雨量和温度的偏相关分析

Table 3 The partial correlation coefficient between month NDVI and month precipitation and temperature

气候因子特征时间 Time	降雨量 Precipitation		温度 Temperature	
	$R_{\text{NDVI 降水} \cdot \text{气温}}$	P	$R_{\text{NDVI 气温} \cdot \text{降水}}$	P
当月 Current month	0.606	0.000	0.589	0.000
上月 Last month	0.319	0.000	0.783	0.000
上上月 The month before Last	-0.173	0.02	0.633	0.000

$R_{\text{NDVI 降水} \cdot \text{气温}}$ 表示剔除气温影响后 NDVI 与降水的偏相关系数; $R_{\text{NDVI 气温} \cdot \text{降水}}$ 表示剔除降水影响后 NDVI 与气温的偏相关系数

3 结论

(1) 退耕还林(草)工程实施以后,黄土高原地区植被覆盖有所改善,1999—2013 年研究区年最大 NDVI 的平均值为 0.31,研究区大部分地区年 NDVI 的平均值在 0.5—0.6 之间。NDVI 在空间分布的差异较明显,其中黄土高原东南部水热条件有利于植被生长,NDVI 较高,而西北部植被覆盖度较低。

(2) 自 1999 年以来,黄土高原地区年最大 NDVI 呈极显著($P<0.01$)的增加趋势。四季与生长季 NDVI 也呈上升趋势,四季 NDVI 增加速度由快到慢依次为夏季(0.0087)>秋季(0.0081)>春季(0.0064)>冬季(0.0018)。生长季 NDVI 的增长速度与夏季一样,为 0.0087。

(3)1998—2013 年,黄土高原地区气候呈现降雨增加温度降低的“冷湿化”趋势。但由于降雨和温度的年际波动较大,降雨和温度的变化趋势不明显。

(4)在季节、生长季和全年时间尺度上,NDVI 与降雨和温度的相关性不显著。在月时间尺度上,NDVI 与当月降雨量的相关性要强于与当月温度的相关性。另外,植被生长对温度的响应存在一个月的滞后期,而降雨无滞后效应。

参考文献 (References):

- [1] Fu B J, Hu C X, Chen L D, Honnay O, Gulinck H. Evaluating change in agricultural landscape pattern between 1980 and 2000 in the Loess hilly region of Ansai County, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(2/4): 387-396.
- [2] Zhang X P, Zhang L, Zhao J, Rustomji P, Hairsine P. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China. *Water Resources Research*, 2008, 44(7): 1-12.
- [3] Mu X M, Zhang L, McVicar T R, Chille B, Gau P. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2007, 21(16): 2124-2134.
- [4] 陈效速, 王恒. 1982-2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化. *地理学报*, 2009, 64(1): 84-94.
- [5] 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. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-293.
- [6] Cao S X, Xu C G, Chen L, Wang X Q. Attitudes of farmers in China's northern Shaanxi Province towards the land-use changes required under the Grain for Green Project, and implications for the project's success. *Land Use Policy*, 2009, 26(4): 1182-1194.
- [7] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [8] 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. *中国科学 D 辑*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [9] 张翀, 任志远, 李小燕. 黄土高原植被对气温和降水的响应. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4205-4215.
- [10] 陈安安, 孙林, 胡北, 罗隆诚, 王俊. 近 10a 黄土高原地区 NDVI 变化及其对水热因子响应分析. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 215-219.
- [11] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [12] 王丝丝, 于兴修, 刘正佳. 沂蒙山区植被 NDVI 的时空特征及其对水热条件的响应. *遥感技术与应用*, 2014, 29(1): 61-68.
- [13] 吴丽丽, 任志远, 张翀. 陕北地区植被指数对水热条件变化的响应及其时滞分析. *中国农业气象*, 2014, 35(1): 103-108.
- [14] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang Tao, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [15] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 184-190.
- [16] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析. *生态学报*, 2000, 20(5): 898-902.
- [17] Wu Z T, Wu J J, Liu J H, He B, Lei T J, Wang Q F. Increasing terrestrial vegetation activity of ecological restoration program in the Beijing-Tianjin Sand Source Region of China. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 37-50.
- [18] 姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 张秀云. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响. *资源科学*, 2005, 27(5): 146-152.
- [19] Li Z, Zheng F L, Liu W Z, Flanagan D C. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961-2007. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 92-100.
- [20] 刘晓清, 赵景波, 于学峰. 黄土高原气候暖干化趋势及适应对策. *干旱区研究*, 2006, 23(4): 627-631.
- [21] 张文帅. 陕甘宁黄土高原区 NDVI 变化及其在土地利用变化检测中的适宜性[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2014.
- [22] Maisongrande P, Duchemin B, Dedieu G. VEGETATION/SPOT: an operational mission for the earth monitoring; presentation of new standard products. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 9-14.