

DOI: 10.5846/stxb201901090082

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. 生态学报, 2020, 40(2): 678-691.

Liu J, Wen Z M, Gang C C. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 678-691.

黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应

刘 静^{1,2}, 温仲明^{1,3,*}, 刚成诚^{1,3}

1 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 杨凌 712100

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 植被与气候是目前研究生态与环境的重要内容。为探究黄土高原地区植被与气候因子之间的响应机制, 利用线性趋势分析、Pearson 相关分析、多元线性回归模型以及通径分析的方法, 对黄土高原 2000—2015 年全区和不同植被覆被类型区内 NDVI 与气候因子的变化趋势以及相互作用关系进行分析。植被覆被分类数据和植被指数数据分别来源于 ESA CCI-LC (The European Space Agency Climate Change Initiative Land Cover) 以及 MODND1T/NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)。结果表明: (1) 2000—2015 年黄土高原全区植被年 NDVI_{max} 显著增加的区域占总面积的 74.25%, 不同植被覆被类型年 NDVI_{max} 分别为常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶针叶林>镶嵌草地>农田>镶嵌林地>草地>灌木, 并且都呈显著增加趋势, 其中常绿阔叶林和农田增加幅度最大, 为 0.012/a。(2) 黄土高原全区 NDVI 与气温、日照、降水和相对湿度等气候因子之间没有显著相关性, 但在不同植被覆被类型区, 气候因子对 NDVI 存在显著作用, 且不同植被覆被类型差异明显。(3) 在全区和不同植被覆被类型区 NDVI 仅对降水的响应比较一致, 气温无论在整个区域尺度还是不同植被覆被类型区对植被的影响均不显著。(4) 常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林及镶嵌林地等以乔木为主的植被覆被类型受年均相对湿度和年总日照时数的显著负效应驱动, 草地、镶嵌草地等以草本为主的植被覆被类型则受到年总降水量的显著正效应影响。这说明对植被类型进行区分, 更有利于揭示气候对植被的作用机制。

关键词: 植被覆被类型; NDVI; 气候变化; 黄土高原

Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau

LIU Jing^{1,2}, WEN Zhongming^{1,3,*}, GANG Chengcheng^{1,3}

1 Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China

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

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Vegetation and climate are important aspects of ecology and environmental research. To explore the relationship between vegetation and climatic factors in the Loess Plateau, we analyzed the trends and responses of vegetation to climate changes in the whole zone as well as in different types of vegetation cover zones using linear trend analysis, Pearson's correlation analysis, multiple linear regression models, and path analysis methods published between 2000 and 2015. The vegetation cover classification data were obtained from maps published by European Space Agency Climate Change Initiative Land Cover (ESA CCI-LC) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data were derived from MODND1T/NDVI vegetation index data. The results indicated that (1) from 2000 to 2015, the regions with significant increase in

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402401-05)

收稿日期: 2019-01-09; 网络出版日期: 2019-11-04

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

NDVI_{max} in the Loess Plateau accounted for 74.25% of the total area, and among all the different vegetation cover types, the evergreen broad leaf forests and crop showed the greatest increase of 0.012/a. The decreasing order of the means of NDVI_{max} of the different vegetation cover types is as follows: evergreen broad leaf forests > evergreen needle leaf forests > deciduous broad leaf forests > deciduous needle leaf forests > mosaic grassland > crop > mosaic tree > grassland > shrub; (2) there was no significant correlation between NDVI and climatic factors such as temperature, sunshine hours, precipitation, and relative humidity in the whole zone. However, in different vegetation cover type zones, climatic factors had different significant effects on NDVI; (3) NDVI in the whole zone and in different vegetation cover type zones changed consistently with change in precipitation, whereas change in temperature did not have a significant effect; (4) vegetation cover types that were dominated by trees, such as forests with evergreen broad leaves, deciduous broad leaves, evergreen needle leaves and mosaic trees, were significantly affected by the mean annual relative humidity and mean annual sunshine hours. However, grass-dominated vegetation types, such as grasslands and mosaic grasslands, were significantly affected by the total annual precipitation. These results imply that the distinction between vegetation types is more important in studying the impact of climate change on vegetation.

Key Words: vegetation cover types; NDVI; climate change; the Loess Plateau

植被覆被是表征陆地生态系统结构功能稳定性的指示器,也是评价地区生态环境发展状况的重要指标之一^[1-2]。黄土高原地区水土流失严重,生态环境脆弱,是我国生态文明建设的重点区域。自退耕还林(草)工程实施以来,该区环境治理成效显著^[3-4]。据统计,黄土高原植被持续改善的面积占整个区域的 67.08%,在不同坡度和气候区植被覆被明显改善的均超过 50%^[5-7]。但已有研究表明,黄土高原地区由于其特殊的地质地形条件加之近些年全球气候变化影响,水热状况均已处于临界值范畴^[8],植被能否维持现有状况抑或出现退化存在较大争议。因此,研究该区植被覆被格局演变及其对气候变化的响应,对了解区域植被发展动态及预测未来格局具有重要意义。

植被与气候是目前研究生态与环境的重要内容。研究方法多基于归一化植被指数(NDVI)从不同时空尺度上来分析,对于植被的组织尺度—植被类型研究较少^[9],这可能是气候因子如何驱动植被覆被变化以及在不同时空尺度的效应差异尚不明确的原因。如 Liu 等^[10]基于 GIMMS3g NDVI 研究降雨量变化对全球植被生产力和恢复力的“记忆效应”,认为在干旱半干旱地区,以降雨为主导的水分“记忆效应”显著。同样,Eckert 等^[11]基于 MODIS NDVI 时间序列数据对蒙古土地退化及恢复进行趋势分析,通过对温度和降雨两种气象因子与 NDVI 的相关分析说明,仅有降雨与 NDVI 有较为一致的变化趋势。Lamchin 等^[12]通过分析 1982—2014 年亚洲植被 NDVI 的季节变化与温度、降水、蒸散发等因子的相关关系表明,温度是引起亚洲地区植被 NDVI 变化的最主要因素。在我国,植被与气候因子间的关系研究也仍有争议。Pang 等^[13]利用 GIMMS NDVI3g 数据探究 1982—2012 年青藏高原地区植被变化趋势以及对温度、降雨因素变化的响应,结果显示在生长期,不同季节和不同月份温度均与 NDVI 正相关,但降雨在不同季节对 NDVI 的作用并不一致。李辉霞等^[14]基于 Spot VEGETATION/NDVI 对三江源地区植被覆被变化及驱动因素的研究显示,气候和人为因素对植被生长的贡献率分别为 79.32% 和 20.68%,温度和降雨对植被生长效应相当。这些研究表明,植被覆盖对气候变化的响应比较复杂,出现这种现象的原因可能与研究尺度的不同有关,也可能与这些研究中没有区分不同植被类型的差异有关。很多研究将 NDVI 在空间上作为一个连续变量,与温度、降雨等气候因子的空间变化做相关分析^[11-12];有些是将全区的 NDVI 均值与区域气候因子做相关分析^[13-14]。前者虽然考虑了 NDVI 的空间变化,但没有进一步解析不同植被类型的响应差异;后者则忽略了 NDVI 的空间变化对植被与气候相互关系的影响。但事实上由于人为干扰或景观环境异质性,不同尺度区域内的植被类型的构成是不同的,而不同植被类型由于在物种组成、群落结构、根系分布^[15]等方面存在较大差异,对外界环境变化的响应也均不相同。这些差异可能是植被覆盖与气候变化的响应关系较为复杂的重要原因。因此,了解区域内不同植被类型 NDVI 对气候变化响应的差异,对于正确认识区域植被覆盖与气候变化的响应关系具有重要意义。

植被是黄土高原地区生态环境改善的根本举措^[16],温度和降雨被普遍认为是影响黄土高原地区植被格局变化的主要驱动因素^[17]。其中降雨是限制植被发展的关键因子^[18-19],降雨的可利用性直接决定区域植被持续发展的可能性。温度只是植被生长的一个积极效应因素,调控植被季节变化,并且对植被生长作用具有两面性,具体受到水分条件的支配^[20-21]。目前该区在植被格局演变与气候因子相关关系研究中,也多集中于在温度、降雨两个因素,且在分析过程中,同样多以全区 NDVI 为研究对象,忽略了不同植被覆被类型对气候变化的响应差异,弱化了类型变化对气候因子响应的差异性。而有研究表明,黄河流域草地是对降雨变化响应最显著的类型,灌木和森林的响应均不显著^[22-24]。为此,本研究将基于 MODIS/NDVI 植被遥感数据和 ESA CCI-LC 植被覆被分类数据,探讨黄土高原不同植被类型覆被的时空变化,并分析气温、降水、相对湿度和日照等因素对不同植被类型的影响,以期预测未来黄土高原植被演变提供理论基础,同时对指导生产实践具有一定的意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地处我国西北地区,范围在 $100^{\circ}52'—114^{\circ}33'E$ 、 $33^{\circ}41'—41^{\circ}16'N$ 之间(图 1),跨甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、青海等七省^[25],东西绵延约 1000 km,南北地跨 750 km 左右,面积约 64 万 km^2 。该区属于大陆性季风气候,年均温为 $9—12^{\circ}C$,年均降雨量在 100—800 mm 之间。受全球气候变化的影响,黄土高原在 1961—2010 年间年均气温总体增幅约 $1.91^{\circ}C$,年均降雨量减少约 29.11 mm,气候波动较为明显^[26]。主要的植被覆被类型分为草地、农田、灌木、常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林和镶嵌类型植被(镶嵌林地、镶嵌草地)。

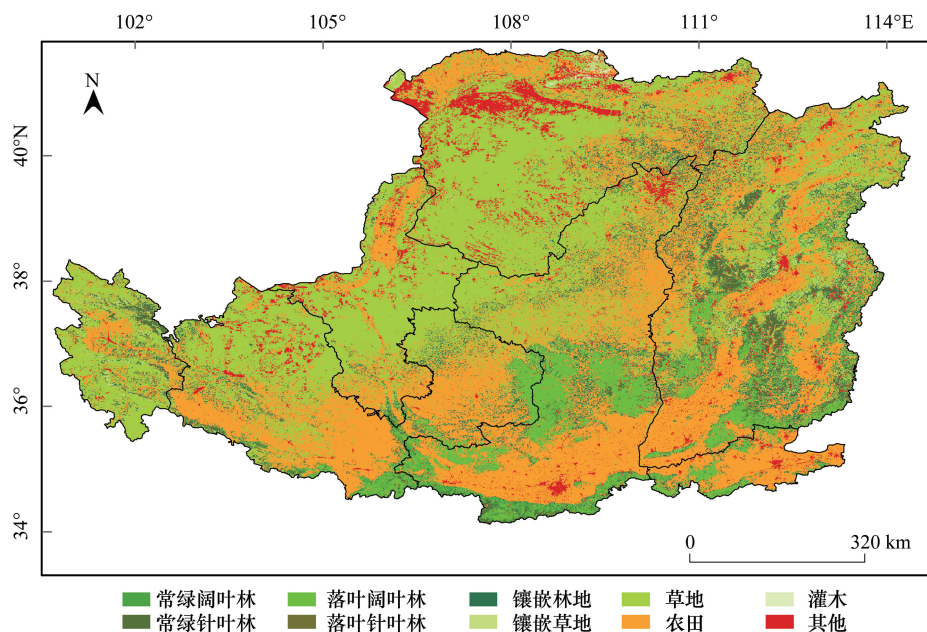


图 1 黄土高原植被覆被类型分布(2000—2015 年)

Fig.1 Distribution of different vegetation cover types in the Loess Plateau, 2000—2015

1.2 数据来源

1.2.1 土地覆被数据

土地覆被类型数据来源于欧洲航天局所研制在气候变化背景下的土地覆被(ESA CCI-LC)影像图(<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>),空间分辨率 300 m。黄土高原地区植被覆被类型分为农田、镶嵌草

地(草本分布>50%)、灌木、草地、镶嵌林地(乔木分布>50%)、常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林、城市、裸地、水体共 12 类^[27-28],文中选取时间节点 2000 和 2015 年两期,用以表示当年植被覆被类型。在全球范围内,ESA CCI-LC 数据的整体精度估计为 71.7%,且该数据资料目前已被广泛应用于全球范围内的土地利用/土地覆盖变化监测^[29-31]。

1.2.2 遥感植被数据

MODND1T/NDVI 植被指数数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率 500 m,时间为 2000—2015 年每旬,共 566 幅影像。利用 python 进行边界裁剪,再按年使用最大值合成法(MVC)消除云和大气散射等干扰误差^[32],为将云干扰降到最低,本文中使用 $NDVI_{max}$ 作为植被指数指标^[14],数据处理基于 ArcGIS10.3 平台。

1.2.3 气象观测数据

降水、气温、相对湿度、日照时数每日观测数据来自国家气象信息中心,数据集包含中国 824 个基准、基本气象站,从全国各站点中筛选出黄土高原范围内具有 2000—2015 年连续观测数据的共 82 个站点。数据筛选工作通过 R 实现^[33],对气象数据使用普通克里金插值法,像元大小采用与 NDVI 数据相同的空间分辨率。

1.3 数据处理方法

1.3.1 植被覆被类型未变区域提取

为最小化土地利用变化对植被类型分布的影响^[10],提取 2000—2015 年间植被覆被类型未变区域,利用 2000 年和 2015 年 ESA CCI-LC 土地覆被类型数据在 ArcGIS10.3 平台采用 Intersect 工具,处理得到 16 年里植被类型发生转移变化的区域,将其与城市、裸地、水体等类型合并为同一类,通过重分类得到黄土高原 2000—2015 年植被覆被类型未变区域图。这些植被类型未变化区域,是分析不同植被类型植被指数对气候变化响应的基础。

1.3.2 线性趋势分析

利用线性最小二乘回归的方法^[34]对每年的 $NDVI_{max}$ 以及插值得到的年均气温、年均日照时数、年总降水量以及年均相对湿度利用公式(1)进行计算,分析逐个像元值在 2000—2015 年间的变化趋势。

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

式中,slope 表示变化斜率,单位为每年; $n=16$ 代表总年份数, i 表示第几年, y_i 表示第 i 年变量 y 的值, y 分别代表年 $NDVI_{max}$ 、年均气温、年均日照时数、年总降水量以及年均相对湿度。slope>0 表示各变量在这 16 年间的变化趋势为增加,反之 slope<0,表示变化趋势减少。对线性趋势的结果用 F 检验的方法对其显著性进行检验,公式如下:

$$F = \frac{S_R}{S_E / (n - 2)} \quad (2)$$

式中, $S_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 代表回归平方和,回归自由度为 1, $S_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 代表残差平方和, $n-2$ 代表残差自由度。 $i=1,2,3,\dots,n$ 。 y_i 为第 i 年变量 y 的值。 $\hat{y}_i$ 为 i 与变量 y 的线性回归值, $\bar{y}$ 为变量 y 的 n 年平均。根据 F 值与临界值的比较将变化趋势分为显著($P<0.05$)、较显著($P<0.01$)、极显著($P<0.001$)三个等级。

1.3.3 Pearson 相关分析

为明确植被与气候之间相互关系,利用 Pearson 相关系数分别对全区及不同植被覆被类型区的植被年 $NDVI_{max}$ 与相应年均气温、年均日照时数、年总降水量以及年均相对湿度进行统计分析,计算相关系数并进行显著性检验,公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中, r 代表植被年 $\text{NDVI}_{\max}$ 与相应年均气温、年均日照时数、年总降水量以及年均相对湿度等相关系数, $N=16$ 代表总年数, i 表示第几年, X_i 表示第 i 年 $\text{NDVI}_{\max}$, Y_i 表示第 i 年气象要素值, $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别代表 $\text{NDVI}_{\max}$ 与各气象要素的均值。

1.3.4 多元线性回归模型和通径分析

以 2000—2015 年未发生变化的植被覆被类型数据为分类依据,借助 ArcGIS10.3 平台的 Zonal Statistics 工具提取每种植被覆被类型区域内的年 $\text{NDVI}_{\max}$ 、年均气温、年均日照时数、年总降水量以及年均相对湿度等数据,再用逐步回归的方法建立年 $\text{NDVI}_{\max}$ 与各气候要素间的回归模型,并对模型进行检验。根据线性回归方程结果的标准回归系数 (Standardized Coefficients) 得到不同气候因子与 NDVI 的通径系数,间接通径系数由气候因子间相关系数与通径系数乘积得到,该方法的实现基于 SPSS 的“Linear”程序,通径系数、相关系数由 Coefficients 和 Correlations 的输出结果获得^[35]。

2 结果与分析

2.1 全区植被 NDVI 和气候因素的变化趋势及相互关系

由图 2 所示,2000—2015 年间植被年 $\text{NDVI}_{\max}$ 均值范围是 0.041—0.982 (图 2a),高值主要分布在山西省东部和陕西省南部地区,低值主要位于长城以北地区以及宁夏、甘肃部分地区。年 $\text{NDVI}_{\max}$ 趋势连续减少幅度为 -0.036—0,增加幅度为 0—0.052 (图 2b)。其中显著增加区域从低到高占比分别是 16.47% ($P<0.05$)、22.69% ($P<0.01$)、35.09% ($P<0.001$),显著减少区域占比不到 4% (图 3a,3b)。这表明黄土高原大部分地区植被 NDVI 呈显著增加趋势^[6-7]。年均日照时数减少幅度为 -0.826—0,增加幅度为 0—0.921 (图 2d),显著减少范围占比 27.5%,主要分布在山西大部、陕西南部、甘肃与宁夏交界的部分地区;显著增加区域占 5.5%,主要分布于内蒙古巴彦淖尔市地区 (图 3d)。说明日照显著减少范围较大,仅局部地区日照显著增加。相对湿度仅减少趋势有显著性,主要分布在山西东部地区,较显著减少区域占 0.91%,显著减少区域占 7.47% (图 3f),减少幅度在 -0.007—0 之间 (图 2f)。大部分区域年均温度与年总降水量均无显著性变化,极少部分有显著增加趋势。温度有显著增加趋势的主要位于青海省范围的西部地区,占整个黄土高原的 1.93% (图 3c),增加幅度为 0—0.046 (图 2c),降水呈显著增加的地方主要位于陕西榆林东部以及山西大同、朔州、忻州市的交界范围内,占整个黄土高原的 1.68% (图 3e),增加幅度在 0—12.602 之间 (图 2e)。

对植被年 $\text{NDVI}_{\max}$ 与各气候要素作简单线性相关分析结果表明 (表 1),年总降水量与 $\text{NDVI}_{\max}$ 正相关,年均温、年均相对湿度、年均日照时数均与 $\text{NDVI}_{\max}$ 呈负相关,但相关性并不显著,徐丽萍、张含玉等人的研究也证明了这一点^[36-37]。这可能与研究的时间尺度有关。有研究表明黄土高原生长季温度与植被呈显著负相关,降水与植被呈显著正相关^[38-39],且气候变化对植被影响有一定滞后性,这些因素都有可能造成在全区尺度,气候变化对植被无显著影响。也可能是不同植被类型对气候变化的响应存在差异,从而掩盖了气候变化对植被的作用^[22-24]。

2.2 不同植被覆被类型区 NDVI 与气候因素变化

通过对植被类型进行合并后重分类得到黄土高原 2000—2015 年植被覆被类型未变化区域,分为常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林、镶嵌林地、镶嵌草地、灌木、草地、农田 9 种主要植被覆被类型 (图 2)。在未变化的植被覆被类型中,草地面积最大,占整个黄土高原的 39.86%,农田次之,比例为 35.21%。落叶阔叶林和镶嵌类型 (镶嵌林地和镶嵌草地) 植被区域面积相近,分别占到 7.69% 和 8.35%。常绿阔叶林仅占全区 1.98%,灌木及落叶针叶林分布范围较小,占比均不到 1% (表 2)。然而不同植被覆被类型 NDVI 与其

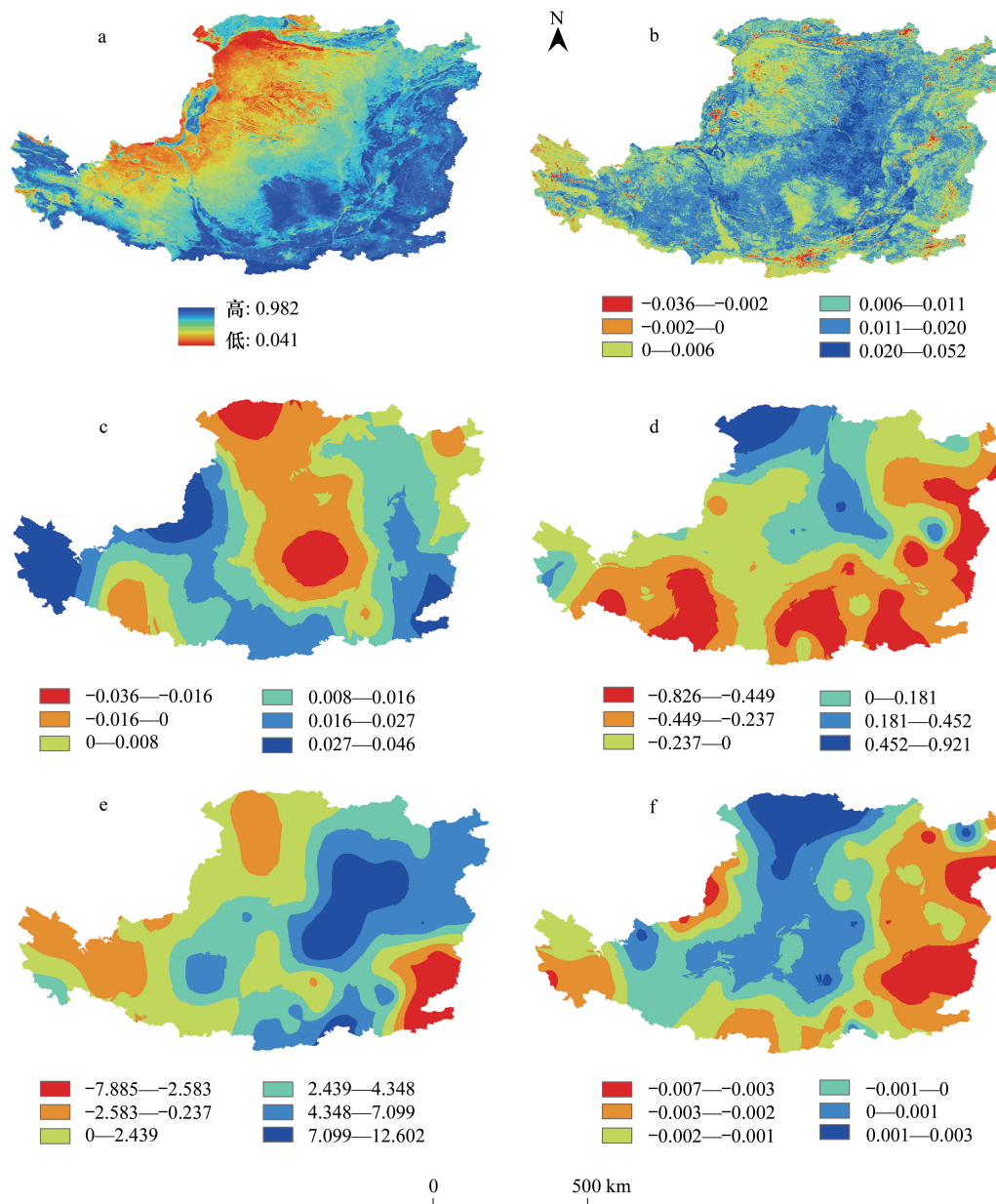


图2 2000—2015年黄土高原植被NDVI及气候因子变化趋势

Fig.2 Change trend of NDVI and climate factors in the Loess Plateau, 2000—2015

a. 年均NDVI_{max}; b. 年NDVI_{max}变化趋势; c. 年均气温变化趋势; d. 年均日照时数变化趋势; e. 年总降水量变化趋势; f. 年均相对湿度变化趋势; 大于0表示呈增加趋势, 反之减少

所占面积大小并不互相对应, 分别为常绿阔叶林 > 常绿针叶林 > 落叶阔叶林 > 落叶针叶林 > 镶嵌草地 > 农田 > 镶嵌林地 > 草地 > 灌木 (图4), 且逐年呈显著增加趋势 (表2)。其中农田和常绿阔叶林增加幅度最大, 为0.012/a; 镶嵌草地增幅最较小, 增幅为0.004/年。其中, 落叶阔叶林与镶嵌林地、常绿针叶林与灌木分别都有一致的增幅, 分别为0.008/年和0.007/年。

各植被覆被类型区内降水、相对湿度、气温和日照的年统计量年变化情况如图5所示, 不同植被覆被类型区气候特征明显。常绿阔叶林与落叶阔叶林区气温最高、降水量最大、日照时间最短、相对湿度最大。常绿针叶林、农田以及镶嵌林地区气候条件较特征并不突出, 气温、日照、降水及相对湿度年均值都位于中等水平。灌木、落叶针叶林、草地与镶嵌草地的气候条件相似, 这些区域区气温、降水和相对湿度都较低, 日照时间较

长。其落叶针叶林的气温最低,灌木的降水和相对湿度最低,日照时间最长。落叶针叶林气温在 2006 年有突增,常绿阔叶林气温在 2008 年有骤减,这可能是由黄土高原近些年气候暖干的趋势变化所造成^[40-41]。

表 1 黄土高原全区 NDVI_{max} 与气候因子的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between NDVI_{max} and climate factors in the whole Loess Plateau

年要素 Annual factors	年均温度/℃ Mean annual temperature	年总降水量/mm Total annual precipitation	年均相对湿度/% Mean annual relative humidity	年均日照时数/h Mean annual sunshine hours	年均 NDVI _{max} Mean annual NDVI _{max}
年均温度/℃ Mean annual temperature	1				
年总降水量/mm Total annual precipitation	-0.24	1			
年均相对湿度/% Mean annual relative humidity	-0.28	0.60 *	1		
年均日照时数/h Mean annual sunshine hours	0.13	-0.60	-0.43	1	
年均 NDVI _{max} Mean annual NDVI _{max}	-0.01	0.35	-0.31	-0.41	1

“*”表示在 $P < 0.05$ 水平相关性显著

表 2 不同植被覆被类型所占比例及 NDVI_{max} 年变化趋势

Table 2 Annual change trend and the proportion of the NDVI_{max} in different vegetation cover types

植被覆被类型 Vegetation cover types	像元数 Count	比例 Percentages	变化斜率 Change slopes	R^2	P
常绿阔叶林 Evergreen broad leaf forests	12237	0.67%	0.012	0.853	<0.01
落叶阔叶林 Deciduous broad leaf forests	139711	7.69%	0.008	0.801	<0.01
常绿针叶林 Evergreen needle leaf forests	35997	1.98%	0.007	0.234	<0.05
落叶针叶林 Deciduous needle leaf forests	6	0.00	0.010	0.704	<0.01
镶嵌林地 Mosaic tree	126310	6.96%	0.008	0.571	<0.01
镶嵌草地 Mosaic grassland	25195	1.39%	0.004	0.823	<0.01
草地 Grassland	723934	39.86%	0.006	0.848	<0.01
农田 Crop	639461	35.21%	0.012	0.856	<0.01
灌木 Shrub	1117	0.06%	0.007	0.879	<0.01
其他 Others	112238	6.18%	—	—	—

2.3 不同植被覆被类型区 NDVI 对气候因子的响应机制

在不同植被覆被类型区气候因子对各植被覆被类型的作用有明显差异。由表 3 可知,草地仅与降水显著相关,年 NDVI_{max} 在 $P < 0.05$ 水平与年总降水量呈正相关,相关系数为 0.56;镶嵌草地与降水和日照显著相关,年 NDVI_{max} 在 $P < 0.05$ 水平分别与年总降水量正相关、和年均日照时数负相关,相关系数为 0.44 和 -0.44。灌木与降水和相对湿度显著相关,年 NDVI_{max} 在 $P < 0.05$ 水平与年总降水量和年均相对湿度呈正相关,相关系数分别为 0.49、0.5;农田、落叶阔叶林、常绿阔叶林和镶嵌林地仅与日照显著相关,年 NDVI_{max} 分别在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.05$ 水平与年均日照时数呈负相关,相关系数分别是 -0.47、-0.64、-0.49、-0.44。常绿针叶林与相对湿度和日照显著相关,年 NDVI_{max} 分别在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平与年均相对湿度和年均日照时数负相关,相关系数分别是 -0.47 和 -0.6。落叶针叶林由于分布范围极小,与各气候因子没有显著相关性。年均温与各植被覆被类型年 NDVI_{max} 都无显著相关性,说明气温在年尺度上对不同类型植被作用均不显著。

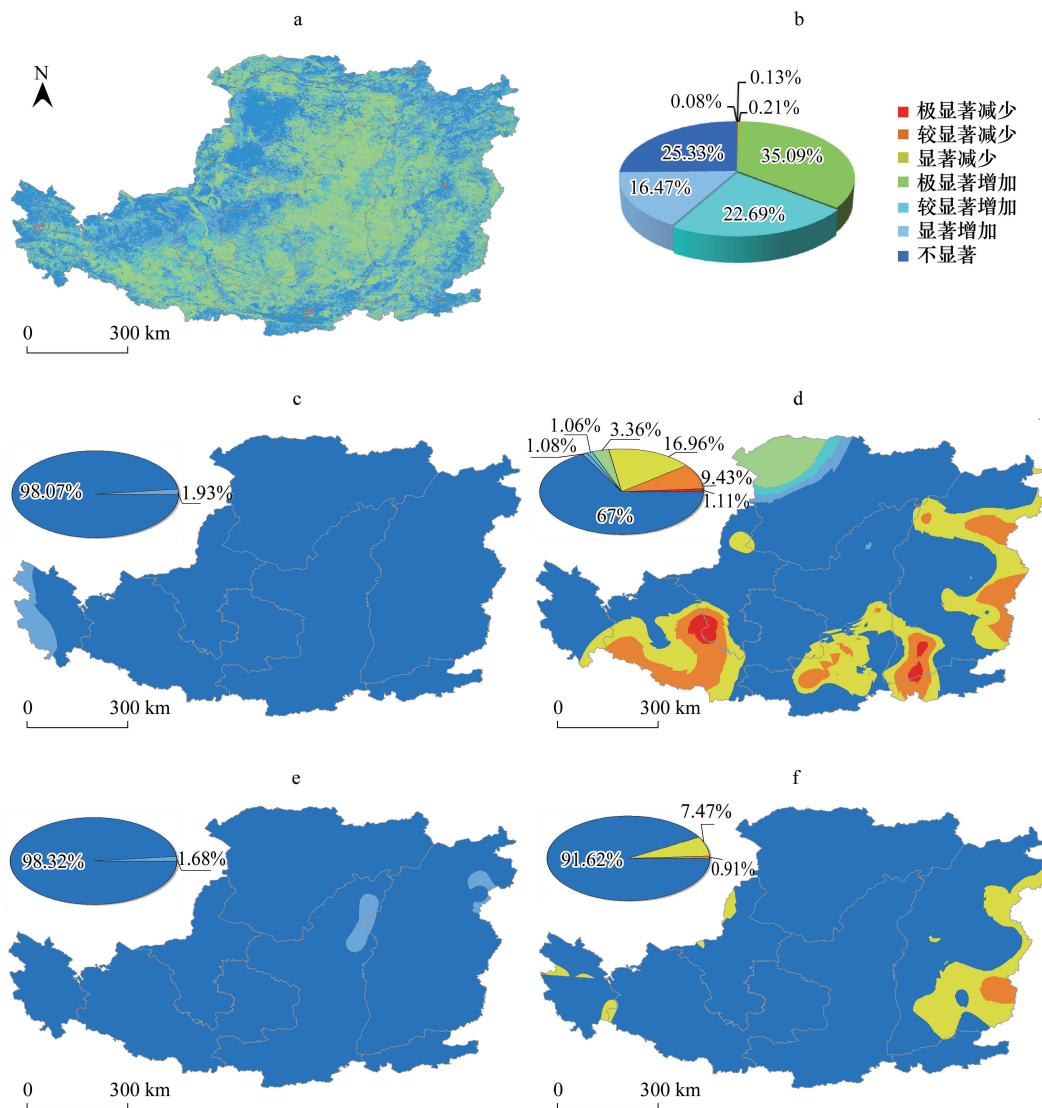


图3 变化趋势显著性等级及其比例

Fig.3 Significance and proportions of the change trend

a. 年 $NDVI_{max}$ 变化趋势显著性; b. 年 $NDVI_{max}$ 变化趋势显著性等级比例; c. 年均气温变化趋势显著性; d. 年均日照时数变化趋势显著性; e. 年总降水量变化趋势显著性; f. 年均相对湿度变化趋势显著性

表3 不同植被覆被类型区年 $NDVI_{max}$ 与气候因子相关系数Table 3 The correlation coefficients of the annual $NDVI_{max}$ and climate factors in different vegetation cover types zone

植被覆被类型 Vegetation cover types	年总降水量/mm Total annual precipitation	年均温/℃ Mean annual temperature	年均相对湿度/% Mean annual relative humidity	年均日照时数/h Mean annual sunshine hours
农田 Crop	0.37	0.03	-0.32	-0.47 *
草地 Grassland	0.56 *	-0.10	0.11	-0.28
灌木 Shrub	0.49 *	-0.38	0.50 *	0.11
落叶阔叶林 Deciduous broad leaf forests	0.24	0.04	-0.32	-0.64 **
常绿阔叶林 Evergreen broad leaf forests	0.23	0.06	-0.40	-0.49 *

续表

植被覆被类型 Vegetation cover types	年总降水量/mm Total annual precipitation	年均温/℃ Mean annual temperature	年均相对湿度/% Mean annual relative humidity	年均日照时数/h Mean annual sunshine hours
镶嵌草地 Mosaic grassland	0.44 *	-0.03	-0.22	-0.44 *
镶嵌林地 Mosaic tree	0.41	0.01	-0.32	-0.44 *
落叶针叶林 Deciduous needle leaf forests	0.41	-0.12	0.21	-0.27
常绿针叶林 Evergreen needle leaf forests	0.29	0.09	-0.47 *	-0.60 **

“*”, “**” 分别表示在 $P<0.05$, $P<0.01$ 水平相关性显著

对不同植被覆被类型区气候因子与植被 NDVI 建立多元线性回归模型,灌木与落叶针叶林由于分布范围较小,回归模型均不显著。其余各类植被覆被类型线性回归分析结果如表 4 所示,各回归方程和回归系数均通过 $P<0.05$ 显著性水平检验,并且不同植被覆被类型对气候因子的敏感度均存在差异^[35]。其中常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林都受到年均相对湿度以及年均日照时数两种气候因素的负效应驱动,且年均相对湿度对植被的影响较大,三种植被覆被类型回归系数分别是 -0.4092、-0.896、-0.9126。镶嵌林地与农田受到年均相对湿度和年均日照时数的负效应以及年总降水量的正效应影响,其中相对湿度的负效应最为明显,两种植被覆被类型回归系数分别为 -2.4213、-2.4884。镶嵌草地受年均相对湿度的负效应和年总降水量的正效应作用,年均相对湿度的作用系数较大,为 1.1724。草地只受到年总降水量的正效应影响,作用系数为 0.0007。同一气候因素对不同植被覆被类型的作用机制相同,相对湿度与日照对植被有负效应,降水对植被有正效应。

为了进一步分离各气候因子对不同植被覆被类型的影响,基于通径分析对不同植被覆被类型 NDVI 与气候因子的相关系数进行分解,结果如表 5 所示:在气候因子对植被的直接作用中,相对湿度和日照都与 NDVI 直接负相关,降水与 NDVI 直接正相关。常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林与日照的通经系数分别为 -0.576707、-0.79197、-0.735352,其绝对值大于相对湿度与其之间的通经系数,说明日照与以上三种植被覆被类型的线性关系更强。同理,镶嵌林地、农田与日照的通经系数分别为 -0.44、-0.47,日照与植被间的线性关系强度大于降水、大于相对湿度。镶嵌草地和草地都与降水有较强的直接线性关系,通经系数为 0.44 和 0.56。在气候因子对植被的间接作用中,相对湿度与日照相互之间的间接作用与植被均呈正相关。降水通过相对湿度与植被负相关,相对湿度通过降水与植被正相关,而降水与日照相互之间的间接作用与植被的相关性恰好与之相反,降水通过日照与植被正相关,日照通过降水与植被负相关。常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林区相对湿度通过日照的间接通经系数分别是 0.10092、0.21927、0.15428,说明相对湿度通过日照间接作用与植被有较大的相关性。镶嵌林地、农田范围降水通过相对湿度与植被的相关性较强,间接通经系数为 -0.38403、-0.40204。镶嵌草地则是相对湿度通过降水与植被的相关性较大,间接通经系数为 0.35215。

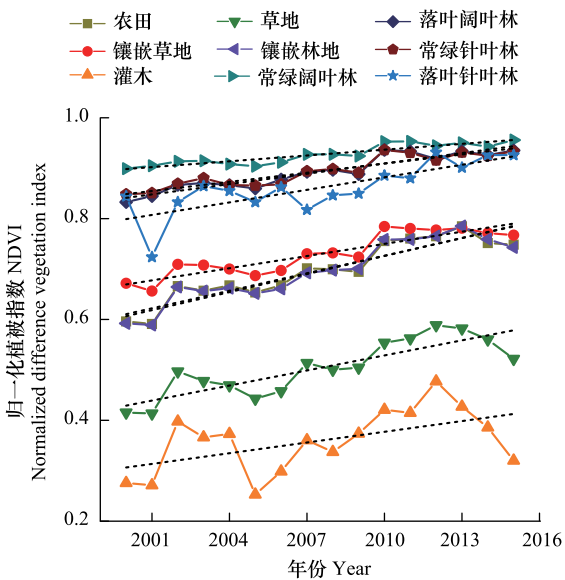


图 4 不同植被覆被类型 NDVI_{max} 年变化
Fig. 4 Annual changes of NDVI_{max} in the different vegetation cover type zone

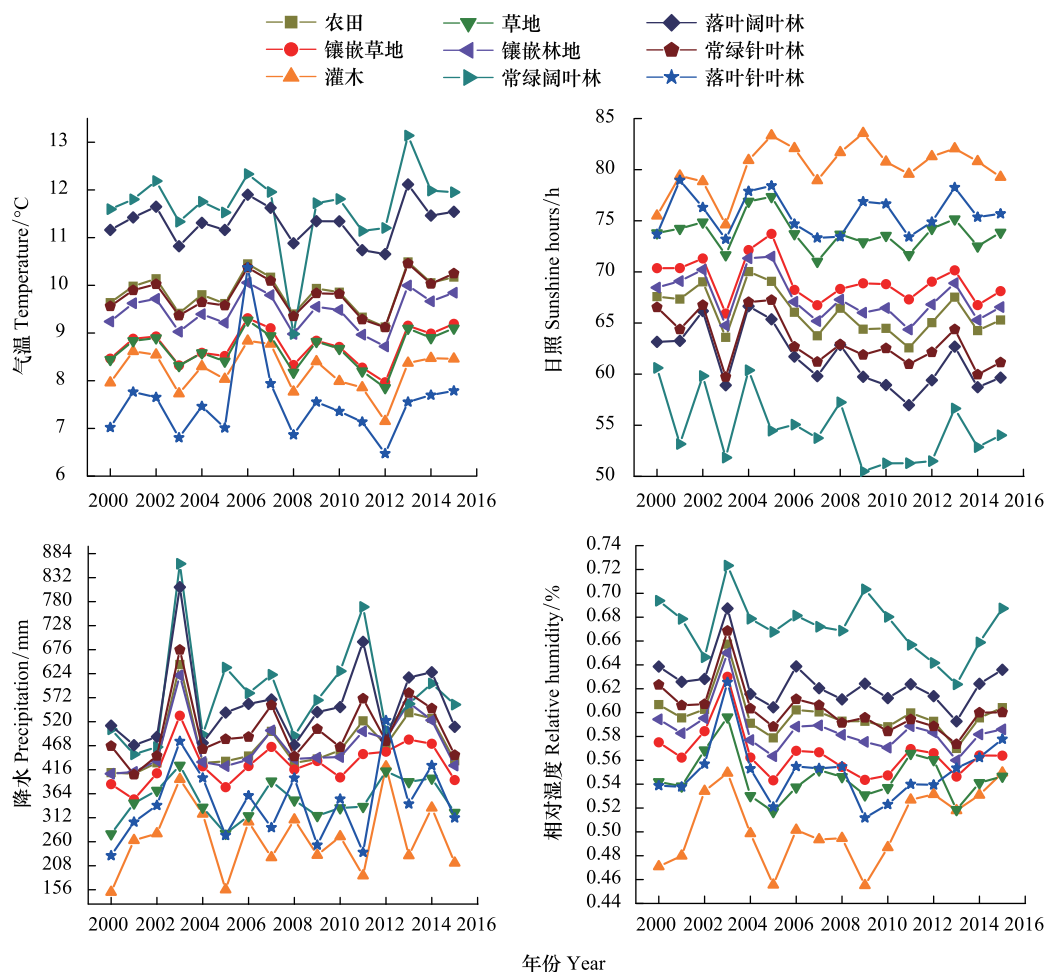


图5 不同植被覆被类型区气候因子年统计量变化

Fig.5 Annual changes of the climatic factors in different vegetation cover type zone

表4 黄土高原 2000—2015 年不同植被覆被类型年 $NDVI_{max}$ 与气候因子回归模型Table 4 Simulation models based on the annual $NDVI_{max}$ of different vegetation cover types and climate factors of the Loess Plateau, 2000—2015

植被覆被类型 Vegetation cover types	回归模型 Regression models	R^2	F	自由度 / (f1, f2) Degree of freedom	P	标准化残差 Residual standard error
常绿阔叶林 Evergreen broad leaf forests	$y = 1.3895(***) - 0.4092R1(*) - 0.0034S1(*)$	0.48	6	(2, 13)	0.0142(*)	0.0155
落叶阔叶林 Deciduous broad leaf forests	$y = 2.0285(***) - 0.896R2(**) - 0.0094S2(*)$	0.68	13.88	(2, 13)	0.0006(***)	0.0209
常绿针叶林 Evergreen needle leaf forests	$y = 2.0122(***) - 0.9126R3(***) - 0.0095S3(***)$	0.74	18.09	(2, 13)	0.0002(***)	0.0172
镶嵌林地 Mosaic tree	$y = 2.7554(***) - 2.4213R4(**) + 0.0006P4(*) - 0.0134S4(*)$	0.69	9.01	(3, 12)	0.0021(**)	0.0379
镶嵌草地 Mosaic grassland	$y = 1.1058(***) - 1.1724R5(*) + 0.0007P5(*)$	0.44	5.10	(2, 13)	0.0232(*)	0.0342
草地 Grassland	$y = 0.2606(*) + 0.0007P6(*)$	0.31	6.31	(1, 14)	0.0249(*)	0.0479
农田 Crop	$y = 2.8183(***) - 2.4884R7(**) + 0.0005P7(*) - 0.0135S7(*)$	0.66	7.88	(3, 12)	0.0036(**)	0.0386

y : 年 $NDVI_{max}$; P : 年总降水量, total annual precipitation; R : 年均相对湿度, mean annual relative humidity; S : 年均日照时数, mean annual sunshine hours;

“*”, “**”, “***” 分别代表 P 值在小于 0.05, 0.01, 0.001 水平的显著性

表 5 基于通径分析的不同植被覆被类型 NDVI_{max} 与气候因子的相关系数分解

Table 5 Correlation coefficient between NDVI_{max} and climatic factors for different vegetation cover types based on path analysis

植被覆被类型 Vegetation cover types	自变量 Independent variable	与 NDVI _{max} 的 相关系数 Correlation coefficient with NDVI _{max}	通径系数 (直接作用) Path coefficient (direct effect)	间接通径系数(间接作用) Indirect path coefficient (indirect effect)			
				R	S	P	合计 Total
常绿阔叶林	R1	-0.40	-0.497922	—	0.10092	—	0.10092
Evergreen broad leaf forests	S1	-0.49	-0.576707	0.08714	—	—	0.08714
落叶阔叶林	R2	-0.32	-0.538444	—	0.21927	—	0.21927
Deciduous broad leaf forests	S2	-0.64	-0.791970	0.14908	—	—	0.14908
常绿针叶林	R3	-0.47	-0.621952	—	0.15428	—	0.15428
Evergreen needle leaf forests	S3	-0.60	-0.735352	0.13049	—	—	0.13049
镶嵌林地 Mosaic tree	R4	-0.32	-0.788999	—	0.20658	0.26595	0.47253
	S4	-0.44	-0.493457	0.33030	—	-0.27713	0.05317
	P4	0.41	0.546408	-0.38403	0.25027	—	-0.13376
镶嵌草地 Mosaic grassland	R5	-0.22	-0.572789	—	—	0.35215	0.35215
	P5	0.44	0.717517	-0.28112	—	—	-0.28112
草地 Grassland	P6	0.56	0.557302	—	—	—	—
农田 Crop	R7	-0.32	-0.770943	—	0.18437	0.26237	0.44674
	S7	-0.47	-0.484295	0.29350	—	-0.27883	0.01467
	P7	0.37	0.503103	-0.40204	0.26840	—	-0.13364

P: 年总降水量, total annual precipitation; R: 年均相对湿度, mean annual relative humidity; S: 年均日照时数, mean annual sunshine hours

3 讨论

黄土高原自退耕还林(草)工程实施以来,植被覆被发生了较大变化。本文结果表明,从 2000 至 2015 年,黄土高原全区植被年 NDVI_{max} 增加范围广、趋势明显。显著增加区域占总面积的 74.25%,不同植被覆被类型年 NDVI_{max} 也呈显著增加趋势,其中常绿阔叶林和农田增加幅度最大,为 0.012/年。这与何远梅、刘哲等人的研究结果相一致,表明自退耕还林以来,黄土高原地区植被覆被得到极大改善^[5-7]。

黄土高原全区植被覆被 NDVI 与温度、日照、降水和相对湿度等气候因子之间没有显著相关性。在相关性的研究中,以全区 NDVI 为响应变量,年尺度上与气候因子作相关关系分析时,研究结果多数无显著相关性^[36-37]。但在不同植被覆被类型区,气候因子对植被覆被 NDVI 存在显著作用,且不同植被覆被类型差异明显。常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林都受到年均相对湿度以及年均日照时数两种气候因素的负效应驱动,且年均相对湿度对植被的影响较大,三种植被覆被类型回归系数分别是-0.4092、-0.896、-0.9126。这些植被覆被类型区气候特征是高温、高湿、日照时间短,日照越强、相对湿度越大容易对植被生长造成限制。镶嵌林地与农田受到年均相对湿度和年均日照时数的负效应以及年总降水量的正效应影响,其中相对湿度的负效应最为明显,两种植被覆被类型回归系数分别为-2.4213、-2.4884。这些区域水热条件较差,日照越强、相对湿度越大对植被生长造成的限制更加明显。镶嵌草地受年均相对湿度的负效应和年总降水量的正效应作用,年均相对湿度的作用系数较大,为 1.1724。草地只受到年总降水量的正效应影响,作用系数为 0.0007。这些以草本为主的植被覆被类型区气候特征是低温、低湿、日照时间长,因此降水的作用比较显著。年均相对湿度和年总日照时数对常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林及镶嵌林地有显著负效应,年总降水量则对草地与镶嵌草地有显著正效应。这表明以乔木为主的植被覆被类型受年均相对湿度和年总日照时数影响显著,而以草本为主的类型则都受到年总降水量的显著作用,与李晓兵、孙睿、刘绿柳 等人^[22-24]的研究结果相一致。上述结果表明,采用全区 NDVI 指数进行植被与气候因子的响应关系分析,往往会忽略不同植被类型间的差异性。在黄土高原整个区域尺度上,年尺度上的 NDVI 往往与气候因子没有显著的相关性^[36-37],这种整体尺度

上的不相关性,可能与不同植被类型植被指数的时间变化节律上的相互补充有关,从而掩盖了不同植被类型对气候变化响应的真实性,显然不利于揭示大尺度植被与环境变化的响应关系。

相对湿度与日照相互之间的间接作用与植被均呈正相关。降水通过相对湿度与植被负相关,相对湿度通过降水与植被正相关,而降水与日照相互之间的间接作用与植被的相关性恰好与之相反,降水通过日照与植被正相关,日照通过降水与植被负相关。在全区和不同植被覆被类型区降水都与 NDVI 呈正相关,说明黄土高原地区植被对降水的响应比较一致,并且植被对降水的需求都存在上升空间。日照在全区与植被 NDVI 呈负相关,在不同植被覆被类型区仅与灌木 NDVI 正相关,表明日照在大部分地区超过了植被生长的需求限度,也从侧面反映了水分胁迫可能会加剧植被的光抑制效应^[42]。气温和相对湿度均与全区植被 NDVI 呈负相关,在不同植被覆被类型区仅灌木、落叶针叶林、草地和镶嵌草地与气温呈负相关,其余呈正相关。负相关区域干旱、相对湿度低、日照时间长,虽然气温较低也仍对植被生长具有负作用;而正相关区域降水多,相对湿度大,日照时间短,虽然气温较高但仍对植被生长有利。不同植被覆被类型对相对湿度的响应与气温完全相反,负相关区域相对湿度大,正相关区域相对湿度低,说明相对湿度的变化范围超过了植被的生长耐受限度。

气温无论在整个区域尺度还是不同植被类型区对植被的影响均不显著,可能是因为黄土高原地区干旱缺水,温度对植被的影响被水分条件所限制^[20-21]。日照时数对植被年 $NDVI_{max}$ 有负效应,但光是植物光合作用的催化剂^[43],受大气环境的影响,同一光照强度可能产生不同的光合有效辐射^[44],所以研究日照时数对植被的影响还应考虑光合有效辐射。文中相对湿度对植被有负效应,植被处在相对贫乏的水分条件下,相对湿度增加可能会降低气孔导度^[45-46],对植被生长产生负效应。降水虽然对植被有显著促进作用,但黄土高原部分农田作物主要是靠灌溉水来维持,如内蒙古河套平原地区,农作物受人为因素影响较大^[17],所以农田对降水的响应还应结合人为因素综合分析。此外,由于研究使用的遥感影像分辨率不高,缺少纹理细节信息,不能区分天然林与人工林^[47],所以无法剔除人为因素的影响,这还有待下一步的深入研究。

4 结论

本文基于 ESA CCI-LC 植被覆被分类数据以及 MODND1T/NDVI 植被指数数据,使用趋势分析、Pearson 相关、多元线性回归模型以及通径分析等方法,分析了 2000—2015 年黄土高原不同植被覆被类型与气候因子的变化及其相互作用关系,探讨了不同植被覆被类型对气候因子的响应差异,得出以下结论:

(1) 从 2000 至 2015 年,黄土高原全区植被年 $NDVI_{max}$ 增加范围广、趋势明显,显著增加的区域占总面积的 74.25%。不同植被覆被类型年 $NDVI_{max}$ 分别为常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶针叶林>镶嵌草地>农田>镶嵌林地>草地>灌木,并且都呈显著增加趋势,其中常绿阔叶林和农田增加幅度最大,为 0.012/年。

(2) 黄土高原全区植被覆被 NDVI 与气温、日照、降水和相对湿度等气候因子之间没有显著相关性,但在不同植被覆被类型区,气候因子对植被覆被 NDVI 存在显著作用。这说明对植被类型进行区分,更有利于揭示气候对植被的作用机制。

(3) 在全区和不同植被覆被类型区降水都与 NDVI 呈正相关,说明黄土高原地区植被对降水的响应比较一致。日照在全区与植被 NDVI 呈负相关,在不同植被覆被类型区仅与灌木 NDVI 正相关。降水量少、相对湿度低、日照时间长的区域气温与 NDVI 呈负相关,降水量大,相对湿度大,日照时间短的区域气温与 NDVI 呈正相关。不同植被覆被类型对相对湿度的响应与气温完全相反,负相关区域相对湿度大,正相关区域相对湿度低,说明相对湿度的变化范围超过了植被生长的耐受限度。

(4) 常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林及镶嵌林地等以乔木为主的植被覆被类型受年均相对湿度和年总日照时数影响显著,草地、镶嵌草地等以草本为主的植被覆被类型则受到年总降水量的显著作用。气温无论在整个区域尺度还是不同植被类型区对植被的影响均不显著。

参考文献 (References):

- [1] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.

- [2] Wang J, Wang K L, Zhang M Y, Zhang C H. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 451-461.
- [3] 刘晓燕, 刘昌明, 杨胜天, 金双彦, 高亚军, 高云飞. 基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析. *地理学报*, 2014, 69(11): 1595-1603.
- [4] 高健健, 穆兴民, 孙文义. 2000—2012 年黄土高原植被覆盖的时空变化. *人民黄河*, 2015, 37(11): 85-91.
- [5] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 程圣东. 黄土高原植被恢复潜力研究. *地理学报*, 2017, 72(5): 863-874.
- [6] 何远梅, 姚文俊, 张岩, 李镇, 朱清科. 黄土高原区植被恢复的空间差异性分析. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 63-69.
- [7] 刘哲, 邱炳文, 王壮壮, 齐文. 2001—2014 年间黄土高原植被覆盖状态时空演变分析. *国土资源遥感*, 2017, 29(1): 192-198.
- [8] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [9] 魏丽萍, 王孝安, 王世雄, 朱志红, 郭华, 孙嘉男, 郝江勃. 黄土高原马栏林区基于不同植被组织尺度的群落物种多样性. *植物生态学报*, 2011, 35(1): 17-26.
- [10] Liu L B, Zhang Y T, Wu S Y, Li S C, Qin D H. Water memory effects and their impacts on global vegetation productivity and resilience. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2962.
- [11] Eckert S, Hüsler F, Liniger H, Hodel E. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2015, 113: 16-28.
- [12] Lamchin M, Lee W K, Jeon S W, Wang S W, Lim C H, Song C, Sung M. Long-term trend and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data. *Science of the Total Environment*, 2017, 618: 1089-1095.
- [13] Pang G J, Wang X J, Yang M X. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012. *Quaternary International*, 2016, 444: 87-96.
- [14] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [15] 任蔓莉, 魏晨辉, 裴忠雪, 路嘉丽, 王琼, 王文杰, 祖元刚. 松嫩平原沙土区不同植被类型对土壤相关指标的影响. *植物研究*, 2015, 35(5): 765-771.
- [16] 温仲明, 焦峰. 自然植被分布预测研究进展. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 117-124.
- [17] 李斌, 张金屯. 黄土高原地区植被与气候的关系. *生态学报*, 2001, 23(1): 82-89.
- [18] 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: 地球科学*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [19] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 陈抒晨. 2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因. *中国环境科学*, 2016, 36(5): 1568-1578.
- [20] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, Gao P, Wang F, Zhao G J. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209-210: 87-99.
- [21] Xie B, Jia X, Qin Z, Shen J, Chang Q R. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China: 1982—2011. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(6): 1583-1594.
- [22] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379-382.
- [23] 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系. *地理学报*, 2001, 56(6): 667-672.
- [24] 刘绿柳, 肖风劲. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 477-481.
- [25] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区资源环境社会经济数据集. 北京: 中国经济出版社, 1992.
- [26] Wang Q X, Fan X H, Qin Z D, Wang M B. Change trends of temperature and precipitation in the Loess Plateau Region of China, 1961—2010. *Global and Planetary Change*, 2012, 92-93: 138-147.
- [27] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. A dataset mapping the potential biophysical effects of vegetation cover change. *Scientific Data*, 2018, 5: 180014.
- [28] Bontemps S, Boettcher M, Brockmann C, Kirches G, Lamarche C, Radoux J, Santoro M, Vanbogaert E, Wegmüller U, Herold M, Achard F, Ramoino F, Arino O, Defourny P. Multi-year global land cover mapping at 300 M and characterization for climate modelling: achievements of the Land Cover component of the ESA Climate Change Initiative. *ISPRS-international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, XL-7/W3: 323-328.
- [29] Gang C C, Zhao W, Zhao T, Zhang Y, Gao X R, Wen Z M. The impacts of land conversion and management measures on the grassland net primary productivity over the Loess Plateau, Northern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 827-836.
- [30] Yang Y L K, Xiao P F, Feng X Z, Li H X. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125: 156-173.
- [31] Kuppel S, Fan Y, Jobbágy E G. Seasonal hydrologic buffer on continents: patterns, drivers and ecological benefits. *Advances in Water Resources*,

- 2017, 102: 178-187.
- [32] Huete A, Justice C, Leeuwen W V. MODIS Vegetation Index (MOD13). Algorithm theoretical basis document. 1999.
- [33] R Core Team (2013) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> [2019-01-09].
- [34] Stow D A, Hope A, McGuire D, Verbyla D, Gamon J, Huemmrich F, Houston S, Racine C, Sturm M, Tape K, Hinzman L, Yoshikawa K, Tweedie C, Noyle B, Silapaswan C, Douglas D, Griffith B, Jia G S, Epstein H, Walker D, Daeschner S, Petersen A, Zhou L M, Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 89(3): 281-308.
- [35] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法. *生物学通报*, 2010, 45(2): 4-6.
- [36] 徐丽萍. 黄土高原地区植被恢复对气候的影响及其互动效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [37] 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): 3960-3968.
- [38] 马利群, 秦奋, 孙九林, 王浩, 夏浩铭. 黄土高原昼夜不对称性增温及其对植被 NDVI 的影响. *资源科学*, 2018, 40(8): 1684-1692.
- [39] 易浪, 任志远, 张翀, 刘雯. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系. *资源科学*, 2014, 36(1): 166-174.
- [40] 谢宝妮. 黄土高原近 30 年植被覆盖变化及其对气候变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [41] 程杰, 呼天明, 程积民. 黄土高原半干旱区云雾山封禁草原 30 年植被恢复对气候变化的响应. *生态学报*, 2010, 30(10): 2630-2638.
- [42] 陈建. 四种灌木植物光合效率对土壤水分的响应过程与机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [43] 秦景, 贺康宁, 朱艳艳. 库布齐沙漠几种常见灌木光合生理特征与土壤含水量的关系. *北京林业大学学报*, 2009, 31(1): 37-43.
- [44] McCree K J. Photosynthetically active radiation//Lange O L, Nobel P S, Osmond C B, Ziegler H, eds. *Physiological Plant Ecology I*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981: 41-55.
- [45] Kudoyarova G R, Veselov D S, Faizov R G, Veselova S V, Ivanov E A, Farkhutdinov R G. Stomata response to changes in temperature and humidity in wheat cultivars grown under contrasting climatic conditions. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2007, 54(1): 46-49.
- [46] 万素梅, 贾志宽, 郑建明. 黄土高原地区不同生长年限苜蓿光合作用的日变化规律研究. *自然资源学报*, 2009, 24(6): 992-1003.
- [47] 王荣, 江东, 韩惠, 张峰, 赵少华. 高分辨率遥感影像天然林与人工林植被覆盖信息提取. *资源科学*, 2013, 35(4): 868-874.