

青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化及对气候因子的响应分析

欧阳习军^{1,2,3}, 董晓华^{1,2,3}, 魏榕^{1,2,3}, 龚成麒^{1,2,3}, 吴寒雨^{1,2,3}

(1.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3.水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072)

摘要:为了探究青藏高原植被覆盖时空演变特征及其驱动因子,对青藏高原的生态环境保护提供科学依据,基于1982—2015年青藏高原内部及其周边139个气象站点的气象数据和同期的GIMMS NDVI数据,研究了青藏高原生长季植被NDVI的时空变化特征及其与气候因子的响应关系。结果表明:(1)在研究期内,青藏高原生长季NDVI总体呈上升趋势,不同干湿地区生长季NDVI变化趋势有所差异,湿润地区植被退化面积占比相对较大,干旱地区植被改善面积占比相对较大。(2)研究区植被未来总体向改善方向发展,植被未来趋向改善面积占62.25%,趋向退化面积占37.58%。(3)研究区植被对各气候因子的响应存在一定的滞后性,草原、草甸、高山植被和灌丛4种主要植被对气温和相对湿度主要当月响应,对降水主要当月或滞后1个月响应,对日照时数主要滞后3个月响应。(4)气温、降水、相对湿度及日照时数4个气候因子对青藏高原植被NDVI变化的相对贡献率分别为37.19%,27.53%,20.30%和14.97%,其中,气温和降水是湿润/半湿润地区、半湿润地区、大部分半干旱地区及干旱地区植被NDVI变化的主要气候驱动因子,日照时数和相对湿度是湿润地区及少部分半干旱地区植被NDVI变化的主要气候驱动因子。整个青藏高原生长季植被NDVI变化的主要气候驱动因子为气温。综上,青藏高原植被整体呈改善趋势,气温为青藏高原植被变化的主要气候驱动因子。

关键词:NDVI; 植被覆盖; 气候因子; 时滞效应; 青藏高原

中图分类号:Q948; X17

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0220-10

Analysis of Spatiotemporal Variation of NDVI in the Vegetation Growing Season and Responses to Climatic Factors in Qinghai-Tibet Plateau

OUYANG Xijun^{1,2,3}, DONG Xiaohua^{1,2,3}, WEI Rong^{1,2,3}, GONG Chengqi^{1,2,3}, WU Hanyu^{1,2,3}

(1.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.Engineering Research Center of Ecoenvironment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 3.Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to explore the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of vegetation cover on the Qinghai-Tibet Plateau and provide scientific basis for the ecological environment protection of the Qinghai-Tibet Plateau, based on the meteorological data of 139 meteorological stations in and around the Qinghai-Tibet Plateau from 1982 to 2015 and GIMMS NDVI data in the same period, the temporal and spatial variation characteristics of vegetation NDVI and its response to climate factors in the growing season of the Qinghai-Tibet Plateau were studied. The results show that: (1) during the study period, NDVI in the growing season of the Qinghai-Tibet Plateau generally showed an upward trend, and the

收稿日期:2021-12-29

修回日期:2022-01-23

资助项目:欧洲空间局、中国国家遥感中心项目(58516);中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02-09)

第一作者:欧阳习军(1991—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail:841803353@qq.com

通信作者:董晓华(1972—),男,湖北秭归人,博士后,教授,主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail:xhdong@ctgu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

change trend of NDVI in the growing season in different dry and wet areas was different; the proportion of vegetation degradation area in wet areas was relatively large, and the proportion of vegetation improvement area in arid areas was relatively large; (2) the vegetation in the study area will develop in the direction of improvement in the future; the vegetation area that will tend to improve in the future accounts for 62.25% and the area that will tend to degrade accounts for 37.58%; (3) there was a certain lag in the response of vegetation to various climate factors in the study area; grassland, meadow, alpine vegetation, and shrub mainly responded to temperature and relative humidity in the current month, precipitation in the current month or one month later, and sunshine hours in the current month or three months later; (4) the relative contribution rates of temperature, precipitation, relative humidity, and sunshine hours to vegetation NDVI changes on the Qinghai-Tibet Plateau were 37.19%, 27.53%, 20.30% and 14.97%, respectively; temperature and precipitation were the main climate driving factors for vegetation NDVI changes in humid/semi humid areas, semi humid areas, most semi-arid areas and arid areas, sunshine hours and relative humidity were the main climatic driving factors of vegetation NDVI change in humid areas and a few semi-arid areas; the main climatic driving factor of vegetation NDVI change in the whole growing season of the Qinghai-Tibet Plateau was temperature. To sum up, the vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau showed an overall improvement trend, and temperature was the main climatic driving factor of vegetation change on the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: NDVI; vegetation coverage; climate factor; time lag effect; Qinghai-Tibet Plateau

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,是全球物质循环和能量流动的重要一环,对水土保持、气候调节以及生态环境的保护都起到了关键作用^[1]。研究发现,植被生长易受气候变化影响^[2],因此,在全球气候变暖的背景下^[3],研究植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应规律具有重要的现实意义。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够有效地监测植被覆盖的动态变化,是目前常用的表征地表植被生长状态的指标之一^[4]。近年来,归一化植被指数被广泛应用于植被动态变化及其影响因素的研究当中^[5]。气候变化对植被生长具有重要的影响,目前国内外已有众多学者利用 NDVI 数据对不同时间和空间尺度植被动态变化规律及其对气候变化的响应机制进行了研究。大量的研究表明,影响植被变化的主要气候因子是降水和气温^[6-7];也有研究显示,相对湿度和日照时数对植被变化也存在一定程度的影响^[8]。研究发现,各气候因子对不同的植被类型所产生的影响有所不同,会造成植被对气候因子的响应存在空间差异性^[9];同时,由于外部条件(土壤、水分)及植被生长特性的影响,植被对气候因子的响应存在一定的滞后性^[10]。

青藏高原作为世界上海拔最高的高原,是地球上一个独特的地理单元,其水能资源丰富,有“亚洲水塔”之称。高原内植被类型丰富,地理环境复杂,是研究植被与气候变化之间响应关系的理想场所^[11]。在气候变化背景下,研究青藏高原植被变化与气候因子

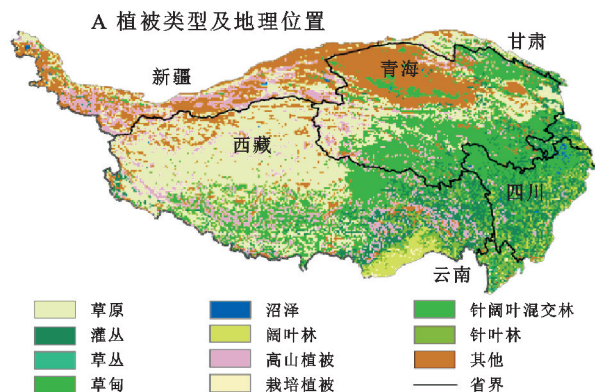
之间的相关关系有助于该区域的生态环境保护与水土资源开发。针对青藏高原植被覆盖变化及其与气候因子的响应关系目前已有相关研究。王涛等^[12]利用 1982—2015 年的降水、气温数据及同期的 GIMMS NDVI 数据分析了青藏高原植被的时空变化规律及其与气温和降水的相关关系,结果表明,研究区的植被整体趋向改善,局部趋向退化,且植被对气温和降水的响应具有空间差异性。王青霞等^[13]基于一元线性回归趋势分析、相关分析及经验正交函数分解(REOF)等多种统计分析方法研究了青藏高原植被对气候要素的响应规律,结果显示,不同时间尺度下气候要素对植被的影响程度有所差异。黄祥麟^[14]利用灰色关联分析方法分析了降水、气温、相对湿度和日照时数等气候因子对青藏高原生长季植被 NDVI 变化的驱动作用,结果表明,日照时数为青藏高原植被 NDVI 变化的主要驱动因子。以往的研究虽能在一定程度上揭示青藏高原植被覆盖变化的特征及其与气候因子的响应关系,但未对植被覆盖变化的未来趋势进行分析,也没有量化各气候因子对植被 NDVI 变化的影响程度。

鉴于此,本文基于 1982—2015 年青藏高原及其周边 139 个气象站点的气象数据和同期的 GIMMS NDVI 数据,采用一元线性回归分析方法、Theil-Sen Median 趋势分析法、Mann-Kendall 显著性检验法、Hurst 指数、滞后相关系数法和主成分回归分析法等多种统计方法,对青藏高原生长季植被 NDVI 时空

变化特征进行分析,深入研究植被对各气候因子的滞后响应规律,并在此基础上,分析量化植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子及其贡献率,以期为区域植被恢复和生态环境改善提供科学依据。

1 研究区概况

青藏高原位于我国的西南部,区域范围介于东经 $73^{\circ}19' - 104^{\circ}47'$ 和北纬 $26^{\circ}00' - 39^{\circ}47'$, 平均海拔约为 4 000 m。该区域地跨新疆、西藏、甘肃、青海、四川和云南等 6 个省区,占地总面积 261 万 km^2 , 约为



全国陆地总面积的 1/4 左右(图 1A)^[15]。青藏高原的气候类型为典型的高原气候,其主要气候特征表现为辐射强烈,气温偏低,昼夜温差较大,年降水量较小,不同季节降水差异明显。自东南向西北,该地区气温和降水均呈现递减趋势^[16]。受气候和地形因素的影响,区域内植被类型丰富,且具有水平—垂直地域差异,其中,草原、草甸、高山植被和灌丛为青藏高原地区主要植被类型^[6],分别占区域总面积的 27.96%, 24.91%, 11.38% 和 9.83%, 其他植被类型覆盖面积占比相对较小(图 1A)^[12]。

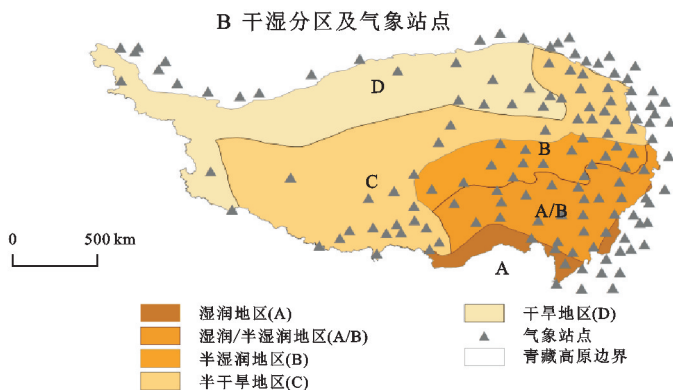


图 1 青藏高原地理概况

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

研究主要使用以下数据:(1) GIMMS NDVI 数据, GIMMS NDVI 数据是由美国航局(NASA)(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)发布的全球植被指数数据,该数据是时间分辨率为 15 d 的旬 NDVI 数据,其空间分辨率为 8 km,通过最大值合成法可将该数据转化为 NDVI 月值数据。对生长季 5—10 月^[6]的 NDVI 月值数据求平均得到多年平均生长季 NDVI 值,剔除 NDVI 值小于 0.1 的区域,排除裸土和稀疏植被的影响^[14]。(2) 降水量(P)和气温(T)数据采用国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>)提供的 1982—2015 年中国逐月降水量和逐月平均气温栅格数据集,数据空间分辨率为 1 km,使用 ArcGIS 软件将降水和气温数据重采样为 8 km 分辨率数据;相对湿度(RH)和日照时数(SD)数据采用青藏高原内部及周边 139 个气象站点 1982—2015 年的逐日实测数据(图 1B),数据来源于中国气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>),采用梯度距离平方反比法(Gradient Plus Inverse Distance Squared, GIDS)进行空间插值。(3) 植被类型数据,该数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),数据空间分辨率为 1 km,使用 Arc-

GIS 软件将降水和气温数据重采样为 8 km 数据。(4) 中国生态地理分区数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,数据以年干燥度为主要指标,将青藏高原划分为湿润地区(A)、湿润/半湿润地区(A/B)、半湿润地区(B)、半干旱地区(C)及干旱地区(D)5 类干湿地区(图 1B)。

2.2 研究方法

以青藏高原为研究区,基于 GIMMS NDVI 数据和气象数据,首先采用一元线性回归分析法、Theil-Sen Median 趋势分析法、Mann-Kendall 显著性检验法及 Hurst 指数对青藏高原生长季(5—10 月)NDVI 的时空变化特征进行分析,然后采用滞后相关系数法研究植被对降水量(P)、气温(T)、相对湿度(RH)和日照时数(SD)4 个气候因子的时滞效应,最后基于植被对各气候因子的时滞效应分析,采用主成分回归分析法探讨青藏高原生长季植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子,并量化各气候因子对植被 NDVI 变化的贡献程度。

2.2.1 空间插值方法 本文采用梯度距离平方反比法(GIDS)^[17]对相对湿度和日照时数 2 个气象要素进行空间插值,与反距离加权插值法相比,该方法在进行气象要素空间插值时引入了海拔高程及经纬度作为协变量,能有效提升气象要素空间插值的精度,其计算公式为:

$$Z = \left[\sum_{i=1}^n \frac{Z_i + (X - X_i) \times C_x + (Y - Y_i) \times C_y + (U - U_i) \times C_u}{d_i^2} \right] / \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \right]$$

式中: Z 为待插值点的气象要素估算值; Z_i 为气象站点 i ($i=1, 2, \dots, n$) 的气象要素观测值; n 为用于插值的气象站点数; X, Y 和 U 分别为待插值点的经度、纬度和海拔高程; X_i, Y_i 和 U_i 分别为气象站点 i 的经度、纬度和海拔高程; C_x, C_y 和 C_u 为气象站点的气象要素值与经度、纬度和海拔高程的偏回归系数; d_i 为待插值点到气象站点 i 的大圆距离。

2.2.2 Theil-Sen Median 趋势分析法 Theil-Sen Median 趋势分析法又称 Sen's 趋势分析法, 是一种稳健的非参数统计斜率计算方法, 与常用的一元线性回归趋势分析法相比, 该方法不要求样本必须服从一定的分布特征, 且受样本异常值干扰较小, 因而常用于计算时间序列的变化趋势^[18]。利用 Sen's 趋势分析法可计算时间序列的变化趋势 β , 当 $\beta > 0$, 表明时间序列呈上升趋势; 当 $\beta < 0$ 表明时间序列呈下降趋势。

2.2.3 Mann-Kendall 显著性检验法 使用 Mann-Kendall 显著性检验法对时间序列的变化趋势进行显著性检验。Mann-Kendall 显著性检验法是一种常用的非参数统计检验方法, 该方法具有检验范围宽、受人为影响较小的特点^[19]。利用 Mann-Kendall 显著性检验法计算检验性统计量 Z , 在给定显著性水平 α 下, 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时, 表明时间序列变化趋势显著, 当 $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$ 时, 表明时间序列变化趋势不显著。

2.2.4 Hurst 指数 Hurst 指数可用于预测长时间序列数据相对于过去的未来变化趋势, 是描述时间序列变化趋势持续性的常用方法^[20]。Hurst 指数的指数值 H 在 $0 \sim 1$ 之间, 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明时间序列未来与过去呈现相同的变化趋势, 具有持续性, 且 H 越接近于 1, 持续性越强; 当 $H = 0.5$ 时, 表明该时间序列未来的变化趋势与过去无关, 为独立随机序列; 当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明该时间序列未来与过去呈现相反的变化趋势, 具有反持续性, 且 H 越接近于 0, 反持续性越强^[21]。

2.2.5 滞后相关系数法 植被对气候变化的响应存在一定的滞后性, 为了准确量化各气候因子对植被 NDVI 变化的影响程度, 需考虑植被对气候变化的时滞效应。本研究基于滞后相关系数法在月尺度上计算植被对各气候因子的滞后响应时间^[22]。滞后相关系数法的基本原理为: 首先分别计算月 NDVI 值与当前月, 前推 1 个月, \dots , 前推 $n-1$ 个月, 前推 n 个月的气象数据的相关系数, 然后对这 $n+1$ 个相关系

数的大小进行比较, 将最大的相关系数取作滞后相关系数, 滞后响应时间即为最大的相关系数所对应的滞后时间, 其计算公式如下:

生长季 NDVI 值与各气候因子的相关系数计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中: R 为相关系数; 变量 x 和 y 分别表示月 NDVI 值和气候因子; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为变量 x 和 y 的平均值, n 为样本数。

滞后相关系数计算公式为:

$$R^* = \max\{R_0, R_1, \dots, R_{n-1}, R_n\}$$

式中: R^* 为滞后相关系数; n 为滞后的月数; $R_0, R_1, \dots, R_{n-1}, R_n$ 为月 NDVI 值与当前月, 前推 1 个月, \dots , 前推 $n-1$ 个月, 前推 n 个月的气象数据的相关系数(通过 95% 置信水平检验)。若 $R^* = R_n$, 则表明 NDVI 对该气候因子变化响应的滞后时间为 n 个月。

多项研究表明, 青藏高原植被对各气候因子的时滞效应在通常 3 个月以内^[11-14], 故本文仅计算了青藏高原生长季植被月 NDVI 值与当月、前推 1 个月、前推 2 个月、前推 3 个月的降水量、平均气温、相对湿度及日照时数等气象数据的相关系数, 在此基础上分析植被对各气候因子变化的滞后响应时间及其空间分布。

2.2.6 相对贡献率计算方法 主成分回归分析法是将主成分分析和回归分析相结合的一种统计分析方法。在回归分析过程中, 当自变量并非相互独立时, 若直接建立因变量与自变量之间的回归方程, 会导致回归方程的回归系数存在偏差, 从而影响回归分析的准确性。为了避免回归分析中自变量不相互独立的问题, 常在回归分析前对自变量进行主成分分析, 然后将提取的主成分作为新的自变量与因变量进行回归分析^[23], 从而提高回归分析的精度, 主成分回归分析法的具体过程如下:

(1) 对自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 进行标准化处理, 得到新的自变量 s_1, s_2, \dots, s_n ;

(2) 对变量 s_1, s_2, \dots, s_n 进行主成分分析, 选取累积贡献率超过 85% 的前 m 个主成分 Z_1, Z_2, \dots, Z_m 作为新的自变量与因变量 Y 进行多元回归分析; 利用最小二乘法建立因变量与选取的主成分之间的多元线性回归方程: $Y = k_1 Z_1 + k_2 Z_2 + \dots + k_m Z_m$;

(3) 将上述多元线性回归方程转化为原变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的回归方程: $Y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$;

考虑到植被对气候变化具有时滞效应,故本研究基于主成分分析法逐像元建立月 NDVI 值与滞后气象数据的回归方程,采用回归方程的确定性系数 (R^2) 表示植被 NDVI 变化与气候因子的相关程度,回归方程的表达式如下所示:

$$\text{NDVI}(i) = \alpha_{i,1}x_1 + \alpha_{i,2}x_2 + \cdots + \alpha_{i,m}x_m \quad i \in (1, 2, \cdots, n)$$

式中: $\text{NDVI}(i)$ 为第 i 个像元的月 NDVI 值; $\alpha_{i,1}, \alpha_{i,2}, \cdots, \alpha_{i,m}$ 为回归方程的系数; x_1, x_2, \cdots, x_m 为气候因子; m 为气候因子个数; n 为研究区像元个数。

采用回归方程中各气候因子对应系数的绝对值表示各气候因子对 NDVI 的影响程度,针对每一个栅格像元,将各气候因子对应的系数绝对值除以所有气候因子对应系数绝对值的和,可得每个像元各气候因子对植被 NDVI 的相对贡献率。对整个研究区各气候因子的相对贡献率求和,再求平均,可得各气候因子对整个研究区植被 NDVI 变化的相对贡献率。每个像元各气候因子对植被 NDVI 变化的相对贡献率和整个青藏高原各气候因子对植被 NDVI 变化相对贡献率的计算公式分别如下:

$$C_{i,h} = \frac{|\alpha_{i,h}|}{|\alpha_{i,1}| + |\alpha_{i,2}| + \cdots + |\alpha_{i,m}|}$$

$$i \in (1, 2, \cdots, n), h \in (1, 2, \cdots, m)$$

$$P_h = \frac{\sum_{i=1}^n C_{i,h}}{n} \quad i \in (1, 2, \cdots, n), h \in (1, 2, \cdots, m)$$

式中: $C_{i,h}$ 为第 h 个气候因子对第 i 个像元 NDVI 的相对贡献率; m 为气候因子个数; P_h 为第 h 个气候因子对整个研究区植被 NDVI 变化的相对贡献率。

3 结果与分析

3.1 植被 NDVI 的时间变化规律

根据 1982—2015 年青藏高原多年月平均 NDVI、降水量 P 和气温 T 的逐月变化趋势(图 2)可知,青藏高原植被 NDVI、降水量 P 及气温 T 多年月平均值都呈现单峰变化,NDVI 月均值的最大值出现在 8 月,最大值为 0.415,降水量 P 和气温 T 月均值的最大值均出现在 7 月,最大值分别为 97.48 mm 和 8.54℃,由此可得,植被与气温和降水之间存在一定的响应关系,且水热条件不同,NDVI 值也会有所差异^[8]。比较各月多年 NDVI 月均值可知,5—10 月 NDVI 月均值高于其他月份,植被长势较好,表明选取 5—10 月作为植被生长季较为合理。利用一元线性回归分析方法,分析 1982—2015 年整个青藏高原及其不同干湿地区植被生长季 NDVI 的年际变化趋势(图 3),结果表明,研究区生长季植被 NDVI 总体呈上升趋势,上升速率为 $1.7 \times 10^{-4}/a$ (图 3A),湿润地区(图 3B)

及湿润/半湿润地区(图 3C)生长季 NDVI 呈下降趋势,半湿润地区(图 3D)、半干旱地区(图 3E)及干旱地区(图 3F)呈上升趋势,其中湿润地区生长季 NDVI 下降趋势最大,干旱地区上升趋势最大,变化率分别为 $-4.6 \times 10^{-4}/a$ 及 $3.9 \times 10^{-4}/a$,由此可知,青藏高原植被状态整体趋向改善,但不同干湿地区植被 NDVI 变化趋势有所差异。

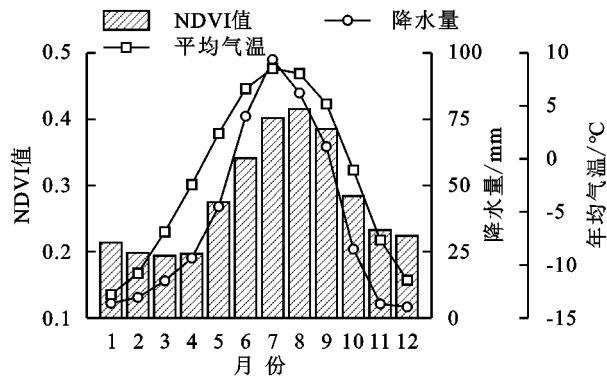


图2 青藏高原多年平均 NDVI、降水量和平均气温月际变化趋势

3.2 植被 NDVI 的空间分布规律

1982—2015 年青藏高原生长季多年平均 NDVI 的空间分布(图 4A)可知,研究区生长季 NDVI 整体上呈现“西部低、东部高”的空间分布格局,整个研究区生长季 NDVI 在 0.10~0.91 范围内变化,平均值为 0.35,NDVI 高值区主要集中在湿润地区、湿润/半湿润地区及半湿润地区,平均值分别为 0.70、0.53 及 0.49,而低值区主要集中在半干旱地区及干旱地区,平均值分别为 0.25、0.15。为进一步研究青藏高原 NDVI 空间演变特征,采用 Theil-Sen Median 趋势分析法^[24]及 Mann-Kendall 显著性检验法^[19]逐像元分析生长季 NDVI 变化趋势,即首先分别计算各像元 NDVI 变化斜率 β 和显著性统计量 Z ,然后根据变化斜率 β 和统计量 Z ,将 NDVI 变化趋势划分为 5 个等级^[24],具体划分方法见表 1。根据青藏高原生长季 NDVI 空间变化趋势(图 4B)及表 1 可知,青藏高原生长季植被整体上趋向改善,除却面积占比为 47.76% 的区域植被保持稳定不变,面积占比为 29.47% 的区域植被趋向改善,面积占比为 15.68% 的区域趋向退化,其中,明显改善、轻微改善、明显退化和轻微退化的面积占比分别为 22.20%、7.27%、7.89% 和 7.79%,植被明显改善面积占比较大。

由表 1 可知,青藏高原不同干湿地区生长季 NDVI 的变化趋势具有明显的空间差异性,湿润、湿润/半湿润、半湿润、半干旱、干旱地区植被改善面积占比分别为 17.47%、27.18%、27.79%、29.66% 和 38.60%,退化面积占比分别为 48.46%、33.72%、19.52%、6.85%

和 3.84%，干旱地区植被改善面积占比相对较大，湿润地区植被退化面积占比相对较大。根据表 2 可知，青藏高原主要植被类型 NDVI 变化也有所区别，草原、草甸、高山植被及灌丛 4 种植被类型 NDVI 稳定不变面积占比均大于植被 NDVI 变化面积占比，分别为 55.18%，47.61%，43.45% 和 41.63%；灌丛改善

面积和退化面积分别占比 28.56% 和 28.76%，差距较小，而草原、草甸、高山植被的改善面积占比分别为 23.07%，33.99% 和 35.35%，均大于各自的退化面积占比 4.03%，14.45% 和 14.09%，其中，草原稳定不变面积占比较大，草甸和高山植被改善占比相对较大，灌丛退化面积占比相对较大。

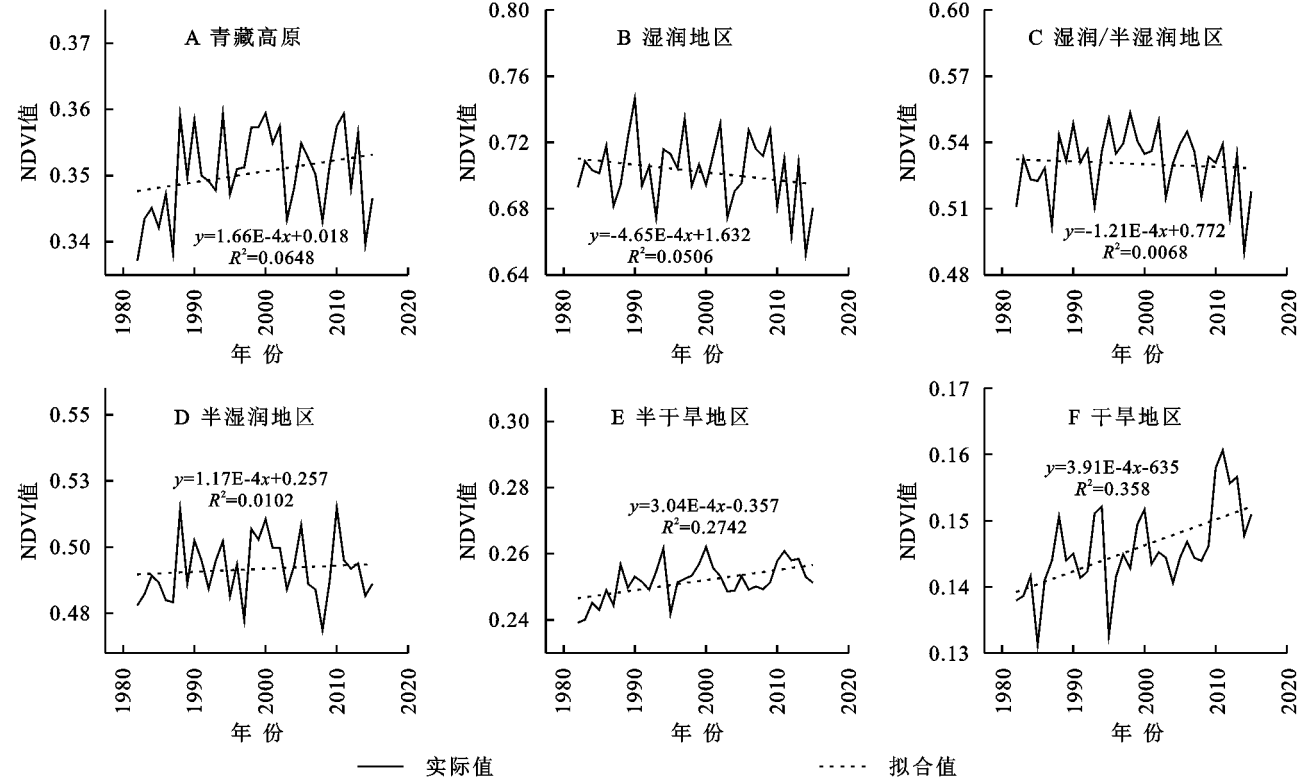


图 3 青藏高原及其各干湿地区生长季 NDVI 年际变化趋势

表 1 青藏高原生长季不同干湿地区 NDVI 变化趋势面积占比

斜率 β	Z 值	NDVI 变化趋势	变化面积占比/%					
			青藏 高原	湿润 地区	湿润/ 半湿润地区	半湿润 地区	半干旱 地区	干旱 地区
$\beta \geq 0.0005$	$ Z > 1.96$	明显改善	22.20	6.85	13.00	18.28	25.29	35.04
$\beta \geq 0.0005$	$ Z \leq 1.96$	轻微改善	7.27	10.62	14.18	9.51	4.37	3.56
$ \beta < 0.0005$	$ Z \leq 1.96$	稳定不变	47.76	34.00	39.03	52.26	51.32	43.62
$\beta \leq -0.0005$	$ Z \leq 1.96$	轻微退化	7.79	24.00	17.86	11.56	2.62	1.00
$\beta \leq -0.0005$	$ Z > 1.96$	明显退化	7.89	24.46	15.86	7.96	4.23	2.84

表 2 青藏高原生长季主要植被类型 NDVI 变化趋势面积占比

斜率 β	Z 值	NDVI 变化趋势	变化面积占比/%			
			草原	草甸	高山植被	灌丛
$\beta \geq 0.0005$	$ Z > 1.96$	明显改善	20.97	25.80	27.02	15.87
$\beta \geq 0.0005$	$ Z \leq 1.96$	轻微改善	2.10	8.19	8.33	12.69
$ \beta < 0.0005$	$ Z \leq 1.96$	稳定不变	55.18	47.61	43.45	41.63
$\beta \leq -0.0005$	$ Z \leq 1.96$	轻微退化	0.99	7.72	7.30	15.50
$\beta \leq -0.0005$	$ Z > 1.96$	明显退化	3.04	6.73	6.79	13.26

3.3 植被 NDVI 的未来趋势分析

根据青藏高原生长季年均 NDVI 时序序列的 Hurst 指数空间分布 (图 5A) 可知, 整个研究区 Hurst 指数在 0.18~1.00 范围内变化, Hurst 指数平

均值为 0.71, 大于 0.5 的区域面积占比为 94.78%, 小于 0.5 的面积占比为 5.22%, 研究区生长季 NDVI 变化趋势大部分呈持续性, 少部分区域呈反持续性^[25]。为进一步探究青藏高原植被 NDVI 变化趋势的未来

可持续性,将 Hurst 指数趋势预测法与 Theil-Sen Median趋势分析法结合,根据 H 值和变化斜率 β ,将研究区植被生长季 NDVI 未来变化趋势划分为 4 个等级^[26],具体划分方法见表 3。根据青藏高原生长季 NDVI 未来变化趋势分布(图 5B)可知,面积占比为 62.25%的区域未来生长季 NDVI 呈上升趋势,面积占比为 37.58%的区域呈下降趋势,植被整体朝改善方向发展^[27]。由表 3 可知,青藏高原不同干湿地区生长季 NDVI 未来变化趋势有所差异,半湿润地区、

半干旱地区及干旱地区生长季 NDVI 呈上升趋势的面积占比分别为 54.52%,69.81%和 79.26%,均大于呈下降趋势的面积占比,分别为 45.34%,30.03%和 20.47%;湿润地区与湿润/半湿润地区生长季 NDVI 呈上升趋势的面积占比分别为 32.15%与 46.09%,均小于各自下降趋势的面积占比,分别为 67.69%和 53.73%,由此可知,半湿润地区、半干旱地区及干旱地区未来植被趋向改善,而湿润地区与湿润/半湿润地区未来植被趋向退化。

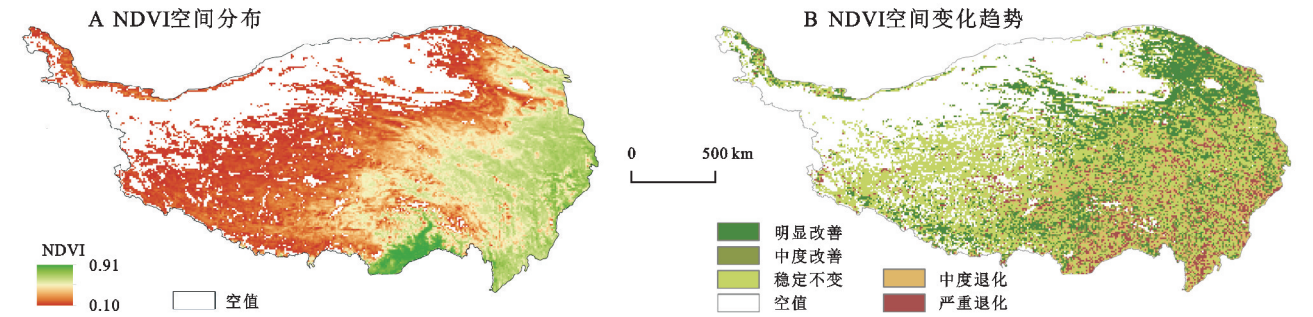


图 4 青藏高原多年平均生长季 NDVI 空间分布及 NDVI 变化趋势空间分布

表 3 青藏高原生长季 NDVI 未来变化趋势面积占比

斜率 β	H 值	NDVI 未来 变化趋势	变化面积占比/%					
			青藏 高原	湿润 地区	湿润/ 半湿润地区	半湿润 地区	半干旱 地区	干旱 地区
$\beta>0$	$H>0.5$	持续上升	60.52	30.69	42.24	52.87	68.60	78.63
$\beta<0$	$H>0.5$	上升变下降	3.49	0.92	4.13	3.35	3.54	3.44
$\beta>0$	$H<0.5$	持续下降	34.09	66.77	49.60	41.99	26.49	17.03
$\beta<0$	$H<0.5$	下降变上升	1.73	1.46	3.85	1.65	1.21	0.63

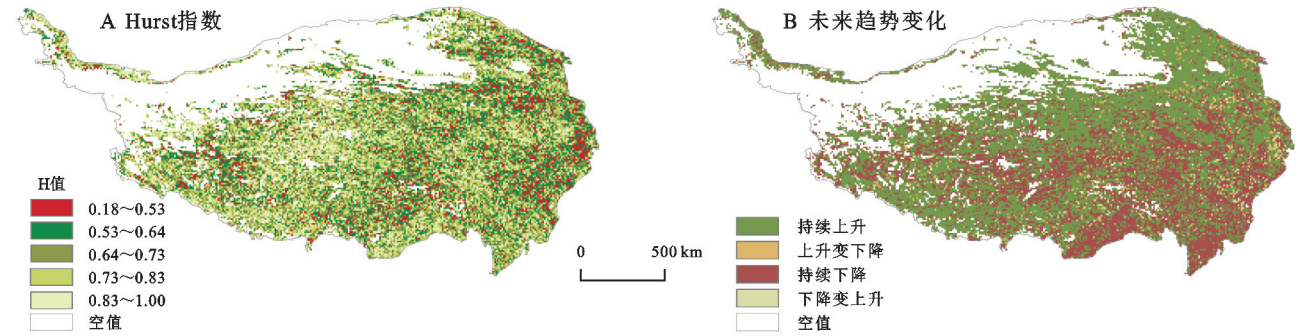


图 5 青藏高原生长季植被 Hurst 指数及未来趋势变化

3.4 植被 NDVI 对气候因子的滞后响应分析

图 6 统计了青藏高原生长季 NDVI 对降水量 P 、平均气温 T 、相对湿度 RH 及日照时数 SD 共 4 个气候因子的滞后响应时间面积占比(通过 95%置信水平检验),由图 6 可知,青藏高原植被 NDVI 对各气候因子的滞后响应面积具有一定的差异性,NDVI 对 P, T, RH 和 SD 共 4 个气候因子的滞后响应面积占比分别为 56%,33%,31%和 90%,植被对 SD 的滞后响应面积占比最大,对 RH 的滞后响应面积占比最小。比较生长季 NDVI 对各气候因子的滞后响应时间的空间分布可知,NDVI 对各气候因子的滞后响

应时间也有所区别,NDVI 主要当月或滞后 1 个月响应 P ,滞后响应区域面积占比分别为 44%和 33%,大部分分布于湿润/半湿润地区、半湿润地区、半干旱地区和干旱地区;NDVI 主要当月响应 T 和 RH ,滞后响应区域面积占比分别为 67%和 69%,大部分分布于湿润/半湿润地区、半湿润地区和半干旱地区;NDVI 主要滞后为 3 个月响应 SD ,滞后响应区域面积占比为 80%,大部分分布于湿润/半湿润地区、半湿润地区、半干旱地区和干旱地区。进一步统计青藏高原 4 种主要植被类型对各气候因子的滞后响应时间面积占比(图 7)可知,草原、草甸、高山植被及灌丛主要

当月或滞后 1 个月响应 P , 当月响应 T 和 RH , 滞后 3 个月响应 SD 。

3.5 植被 NDVI 变化的气候驱动因子分析

植被对气候变化的响应存在一定的滞后性,为了准确量化青藏高原植被对降水量 P 、平均气温 T 、相对湿度 RH 及日照时数 SD 等 4 个气候因子对的响应程度,本文利用主成分回归分析法对全部像元建立 NDVI 与考虑滞后效应的气候因子的多元回归方程,并逐个像元计算 P 、 T 、 RH 及 SD 对植被 NDVI 变化的相对贡献率,将相对贡献率最大的气候因子作为该像元的植被 NDVI 变化主要气候驱动因子。根据青藏高原植被生长季主要气候驱动因子空间分布(图 8A)可得,各主要气候驱动因子的面积占比分别为 59.40%,23.86%,9.44%及 7.30%,其面积占比大小顺序为: $T>P>RH>SD$,其中,气温和降水是湿润/半湿润地区、半湿润地区、大部分半干旱地区及干旱地区植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子,日照和

相对湿度是湿润地区及少部分半干旱地区植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子。进一步统计青藏高原 4 种主要植被类型的主要气候驱动因子面积占比(图 8B)可知,草原、草甸和高山植被和灌丛 4 种植被以 T 和 P 为主要气候驱动因子的面积占比较大,表明 T 和 P 是导致青藏高原主要植被类型植被 NDVI 变化的关键气候因子。将全部像元各气候因子对植被的相对贡献率求平均,可得各气候因子对整个青藏高原生长季 NDVI 变化的相对贡献率,比较各气候因子对青藏高原植被 NDVI 变化的相对贡献率可知, P 、 T 、 RH 及 SD 对植被 NDVI 变化的相对贡献率分别为 37.19%,27.53%,20.30%和 14.97%, T 对植被 NDVI 变化的相对贡献最大,其次为 P , RH 和 SD 的相对贡献率相对较小,表明 T 是导致青藏高原植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子, P 对青藏高原植被 NDVI 变化的驱动作用仅次于 T , RH 和 SD 对青藏高原植被 NDVI 变化的驱动作用不如 T 和 P 。

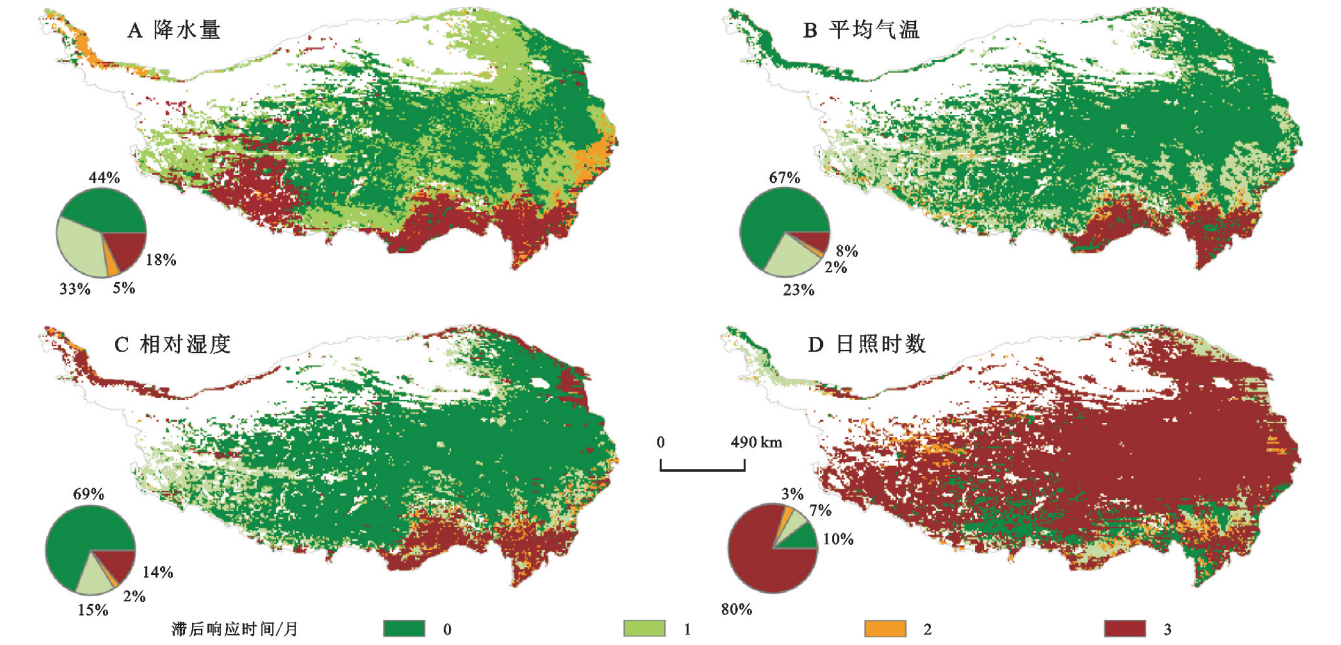


图 6 青藏高原生长季 NDVI 对各气候因子滞后响应时间空间分布

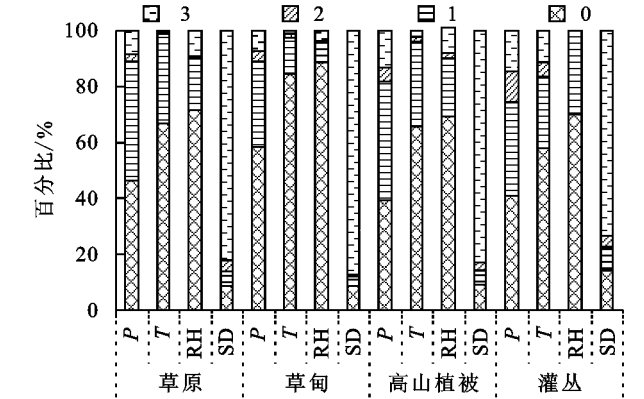


图 7 青藏高原主要植被类型生长季 NDVI 对各气候因子滞后响应时间面积占比

4 讨论

青藏高原植被类型丰富,生长状况差异显著,本研究基于 1982—2015 年 GIMMS NDVI 数据分析了青藏高原生长季植被时空变化规律,结果表明,青藏高原生长季植被整体趋向改善,局部趋向退化,这与前人所得的结论相符^[28]。青藏高原生长季植被总体趋向改善可能是自然因素和人为因素共同作用的结果。就自然因素而言,根据青藏高原植被 NDVI 变化主要气候驱动因子分析可知,气温对青藏高原植被 NDVI 变化的驱动作用最强,降水对青藏高原植被 NDVI 变化的驱动作用仅次于气温,而气温升高和降

水量增加会促进青藏高原的植被生长^[29],因此,近年来,随着气温和降水的增加,整个青藏高原的植被覆盖状况趋向改善。除自然因素外,人为因素也对青藏高原植被覆盖有重要影响,多年来,青藏高原地区陆续实施了退耕还林、封山育林等政策,这些政策对青藏高原生态环境的改善起到了重要作用^[30]。

青藏高原局部区域生长季植被趋向退化,这可能是由于人类活动及地质灾害的影响。由植被 NDVI 变化空间分布(图 4)可知,植被退化的区域主要位于四川、云南及西藏东部等湿润及半湿润地区,在这些区域,气候温暖湿润,人口众多,人类活动加剧可能会

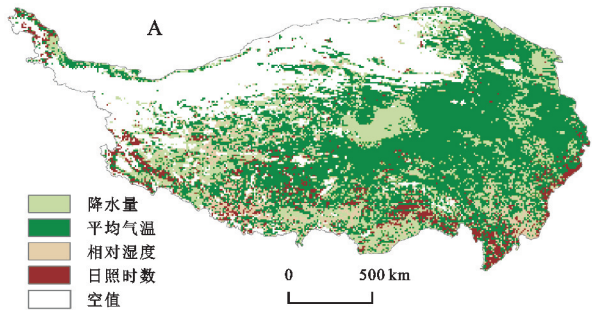


图 8 青藏高原生长季 NDVI 主要气候驱动因子空间分布及不同植被类型主要气候驱动因子面积占比

植被 NDVI 变化与气候变化之间存在响应关系,本研究分析了青藏高原生长季植被 NDVI 变化与 P , T , RH 及 SD 之间的相关关系,结果表明, T 为青藏高原植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子, P 对青藏高原植被 NDVI 变化的驱动作用仅次于 T , 且植被 NDVI 对 T 无明显滞后响应,对 P 无明显滞后响应或滞后 1 个月响应。与 RH 及 SD 相比, T 和 P 对青藏高原植被 NDVI 变化的影响更为显著,且 T 对青藏高原植被 NDVI 变化的驱动作用更强,这一结论与杨达等^[6]的研究结果基本一致。植被对 P , T 的滞后效应表现出一定的差异性,这可能与 P , T 对植被生长的作用方式及植被生长的外部条件不同有关^[33]。李洪军等^[34]认为温度变化会直接对植被的光合作用产生影响,进而影响植被的生长,因此植被对气温变化较为敏感(无明显滞后响应)。徐兴奎等^[35]认为土壤可为植被生长提供所需水分,因此降水并不会立刻对植被生长产生影响,植被对降水变化存在一定程度的滞后响应。

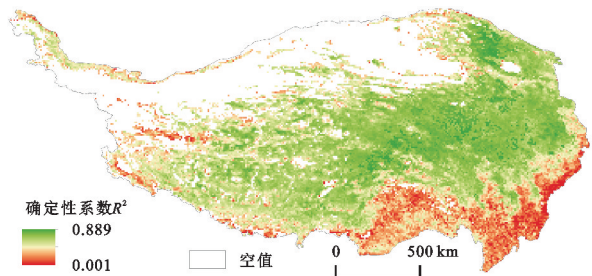
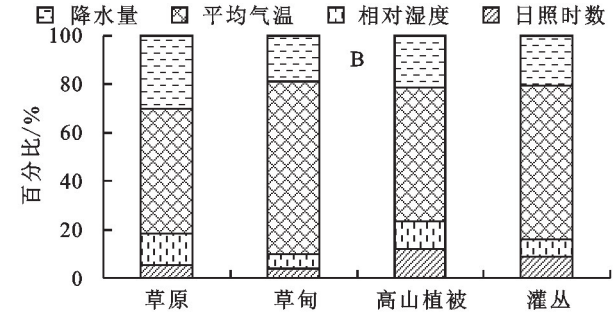


图 9 生长季 NDVI 与气候因子回归方程
确定性系数 R^2 的空间分布

导致生长季植被退化^[31]。除人类活动外,地质灾害也是影响四川、云南及西藏东部等植被覆盖度的重要因素^[30],如 2008 年汶川地震导致周围大面积的草地、森林及草甸等损毁,植被趋向退化^[32]。根据生长季 NDVI 与各气候因子多元线性回归方程的确定性系数 R^2 的空间分布(图 9)可知,在云南、四川及西藏东部等地区, R^2 值较小,表明植被 NDVI 变化与气候因素的相关程度相对较小,气候要素并非该地区植被 NDVI 变化的主要因素,这也进一步证明了在云南、四川及西藏东部等局部地区,植被退化可能主要是受人类活动及地质灾害等非气候因素的影响。



5 结论

基于降水、气温、相对湿度和日照时数等气象数据及植被 NDVI 数据,本文对青藏高原生长季植被时空变化特征及其与气候因子的响应规律进行了研究,得到了以下结论:

- (1) 1982—2015 年,青藏高原生长季多年平均 NDVI 整体上呈现“西部低、东部高”的空间分布格局,NDVI 高值区主要集中在湿润地区、湿润/半湿润地区及半湿润地区,而低值区主要集中在半干旱地区及干旱地区。
- (2) 33 年来,青藏高原生长季植被整体趋向改善,不同干湿地区,植被 NDVI 变化趋势有所差异。就 4 种主要植被类型而言,草原保持稳定不变的面积占比较大,草甸和高山植被改善面积占比相对较大,灌丛退化面积占比相对较大。
- (3) 青藏高原生长季植被未来总体朝改善方向发展,未来生长季植被趋向改善面积大于退化面积。
- (4) 青藏高原生长季植被对各气候因子的响应存在一定程度的滞后,植被对日照时数的滞后响应面积占比最大,对相对湿度的滞后响应面积占比最小;4 种主要植被对不同气候因子的滞后响应时间有所差异。
- (5) 气温和降水是湿润/半湿润地区、半湿润地区、大部分半干旱地区及干旱地区植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子,日照和相对湿度是湿润地区及少部分半干旱地区植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子,整个青藏高原植被 NDVI 变化的主要气候驱动因子为气温。

参考文献:

- [1] Aly A A, Al-Omran A M, Sallam A S, et al. Vegetation cover change detection and assessment in arid environment using multi-temporal remote sensing images and ecosystem management approach[J]. *Solid Earth*, 2016, 7(2): 713-725.
- [2] Zhao X, Tan K, Zhao S, et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 946-952.
- [3] IPCC. Climate Change 2007: the physical science basis.: Working Group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]: Cambridge U K: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Piao S, Mohammad A, Fang J, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(4): 340-348.
- [5] Hao F, Zhang X, Ouyang W, et al. Vegetation NDVI linked to temperature and precipitation in the upper catchments of Yellow River[J]. *Environmental Modelling & Assessment*, 2012, 17(4): 389-398.
- [6] 杨达, 易桂花, 张廷斌, 等. 青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1361-1372.
- [7] Xu Y, Yang J, Chen Y. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126(1): 213-222.
- [8] 魏榕, 刘冀, 张特, 等. 雅砻江流域生长季植被时空变化特征及对气象因子的响应分析[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(3): 512-522.
- [9] 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.
- [10] Xie B, Jia X, Qin Z, et al. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China: 1982—2011[J]. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(6): 1583-1594.
- [11] 纪迪. 青藏高原气候变化及其 NDVI 的响应[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [12] 王涛, 赵元真, 王慧, 等. 基于 GIMMS NDVI 的青藏高原植被指数时空变化及其气温降水响应[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 641-652.
- [13] 王青霞, 吕世华, 鲍艳, 等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 301-312.
- [14] 黄祥麟. 青藏高原生长季植被 NDVI 对气候变化的响应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [15] 周玉科. 青藏高原植被 NDVI 对气候因子响应的格兰杰效应分析[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(5): 718-730.
- [16] 林振耀, 吴祥定. 青藏高原气候区划[J]. *地理学报*, 1981, 36(1): 22-32.
- [17] 彭思岭. 气象要素时空插值方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [18] 徐勇, 黄雯婷, 靖娟利, 等. 京津冀地区植被 NDVI 动态变化及其与气候因子的关系[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 319-327.
- [19] 管晓祥, 刘翠善, 鲍振鑫, 等. 黄河源区植被 NDVI 演变及其与降水、气温的关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 268-277.
- [20] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.
- [21] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 449-460.
- [22] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1425-1435.
- [23] 黄瑞霞, 王建光, 刘志帅, 等. 基于主成分回归的草坪蒸散量与其影响因素的研究[J]. *草地学报*, 2018, 26(6): 1454-1457.
- [24] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018 年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 415-424.
- [25] 李茜荣, 杨东, 冯磊, 等. 成渝经济圈 2000—2018 年植被 NDVI 的动态变化[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(9): 2967-2977.
- [26] 庞家泰, 段金亮, 张瑞, 等. 2000—2019 年渭河流域植被覆盖度时空演变特征及气候响应[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 230-237.
- [27] 桑国庆, 唐志光, 邓刚, 等. 基于 MODIS NDVI 时序数据的湖南省植被变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1100-1109.
- [28] 李艳芳, 孙建. 青藏高原 NDVI 时空变化特征研究(1982—2008)[J]. *云南农业大学学报: 自然科学*, 2015, 30(5): 790-798.
- [29] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842-2855.
- [30] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 20 世纪 90 年代以来中国西南地区土地覆被变化[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7858-7869.
- [31] 柴立夫, 田莉, 奥勇, 等. 人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 382-388.
- [32] 谢慧君, 张廷斌, 易桂花, 等. 川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 286-294, 328.
- [33] 张新悦, 冯禹昊, 曾辉, 等. 1982—2014 年华北及周边地区生长季 NDVI 变化及其与气候的关系[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2021, 57(1): 153-161.
- [34] 李洪军, 吴玉环, 张志祥, 等. 温度变化对木本植物光合生理生态的影响[J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(9): 39-42, 45.
- [35] 徐兴奎, 林朝晖, 薛峰, 等. 气象因子与地表植被生长相关性分析[J]. *生态学报*, 2003, 23(2): 221-230.