

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.018.

孙美荣, 孙鹏森. 西南高山亚高山区植被活动变化的气候驱动效应与可持续性[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 240-250.

SUN Meirong, SUN Pengsen. Climate-Driving Effects and Sustainability of Vegetation Activity Change in Alpine and Subalpine Areas of Southwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 240-250.

西南高山亚高山区植被活动变化的气候驱动效应与可持续性

孙美荣, 孙鹏森

(中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 探究西南高山亚高山区植被活动变化的驱动因素及可持续性, 可为其生态系统管理提供一定的科学依据。[方法] 基于 2001—2018 年 MODIS NDVI 数据和气象数据, 用线性回归、Hurst 指数、相关分析等方法分析了西南高山亚高山地区植被活动的时空变化特征、植被活动的稳定性和可持续性以及对气候变化的响应。[结果] (1) 研究区以 NDVI 为代表的植被活动整体上显著增强, 其中相对稳定的区域占 63.69%, 显著增强的区域占 25.06%, 显著降低的区域占 2.73%。在植被类型中, 落叶阔叶林的显著绿化趋势最强, 而灌木的显著褐化趋势最强, 草地对气候变化的敏感性高于林地。植被活动显著增加的区域主要分布在区域东北部的嘉陵江和岷江等地。(2) 变异系数(CV)表明 NDVI 整体稳定性较强, 从植被类型看, 阔叶林和混交林的稳定性较高, 农田的稳定性最低。(3) Hurst 指数分析表明, 植被活动趋势呈反持续的比例为 69.47%, 植被活动趋势呈可持续的比例为 29.88%, 研究区植被总体出现弱反持续性特征, 在未来, 植被活动增强的趋势有降低或反转的风险。(4) 气候驱动因子分析表明, 西南高山亚高山区温度对植被的影响占主导, 即温度既是驱动植被绿化的关键因子, 同样也是植被褐化的关键因子。在植被发生显著绿化的区域, 常绿阔叶林和常绿针叶林的温度驱动效应低于落叶阔叶林和针阔混交林; 而在植被显著褐化的区域, 前两者的温度驱动效应却显著高于后两者。[结论] 气温是植被活动变化的主要气候驱动因子, 未来植被活动有弱反持续性的特征。

关键词: 植被活动; 气候驱动效应; 变异系数; Hurst 指数; 西南高山亚高山区

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0240-11

Climate-Driving Effects and Sustainability of Vegetation Activity Change in Alpine and Subalpine Areas of Southwest China

SUN Meirong¹, SUN Pengsen¹

(Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Exploring the driving factors and sustainability of vegetation activity change can provide a scientific basis for ecosystem management in alpine and subalpine areas of southwest China. [Methods] Based on the MODIS NDVI datasets and meteorological datasets from 2001 to 2018, the temporal and spatial variation characteristics, stability and sustainability of vegetation activity, and its response to climate change in the region were analyzed by using linear regression, Hurst exponent and correlation analysis methods. [Results] (1) The vegetation activity represented by NDVI increased significantly in the whole study area and the relatively stable area accounted for 63.69%, the significantly increased area accounted for 25.06%, and the significantly

收稿日期: 2022-03-11

修回日期: 2022-04-04

资助项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2021QA001); 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室及研究所科研发展专项(99803-2020); 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC0505006)

第一作者: 孙美荣(1998—), 女, 山西大同人, 博士研究生, 主要从事遥感生态水文学研究。E-mail: 18434306185@163.com;

通信作者: 孙鹏森(1971—), 男, 山东莱州人, 研究员, 主要从事遥感生态水文学、水碳耦合过程模拟研究。E-mail: sunpsen@caf.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

decreased area was 2.73%. Among the vegetation types, deciduous broad-leaved forest had the strongest significant greening trend, while shrub had the strongest browning trend. Grassland was more sensitive to climate change than forest. Vegetation activity increased significantly in the Jialing River and Minjiang River in the northeast of the region. (2) The coefficient of variation (CV) showed that the overall stability of NDVI was strong. From the perspective of vegetation types, the stabilities of broad-leaved forest and mixed forest were higher, and that of farmland was the lowest. (3) Hurst exponent analysis showed that the proportion of vegetation activity in anti-persistent trend was 69.47%. The proportion of vegetation activity in persistent trend was 29.88%. The overall vegetation in the study area showed a weak anti-persistent, and the trend of enhanced vegetation activity has the risk of decreasing or reversing in the future. (4) The analysis of climate driving factors showed that the temperature had a dominant influence on vegetation in alpine and subalpine areas of southwest China, i. e., temperature was not only the key factor promoting vegetation greening, but also the key factor of vegetation browning. In the areas of significant vegetation greening, the temperature driving effect of evergreen broad-leaved forest and evergreen coniferous forest was lower than that of deciduous broad-leaved forest and coniferous mixed forest. However, in the areas of significant vegetation browning, the temperature driving effect of the former two was significantly higher than the latter two. [Conclusion] Temperature is the main climate driver of vegetation activity change, and vegetation activity has the characteristic of weak anti-persistence in the future.

Keywords: vegetation activity; climate driving effect; coefficient of variation; Hurst exponent; alpine and subalpine areas of southwest China

植被作为陆地生态系统中重要的碳汇,对缓解气候变化产生了显著的作用^[1]。植被活动常用来表征气候变化影响的程度,指示植被对气候变化的敏感程度,其变化可以改变生态系统的碳汇强度,并对当地气候起到反馈作用^[2]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能精准反映植被活动的变化特征^[3]。

植被活动对气候变化的响应依赖于特定区域的水热组合条件,不同水热因子的组合关系决定了植被的结构和地带性分布^[4-5]。在影响植被活动的水热因子中,降水和温度是影响植被生长与分布的重要因子^[5]。近年来,很多研究发现在气候变暖的影响下,全球及区域植被活动都有增强的趋势^[4,6],这固然会增加区域碳汇,但另外一个不可否认的现实是,增强的植被活动需要更多的水分。过去 30 a 在干旱程度加剧的背景下,植被活动和温度之间的相关性逐渐减弱,但和降水的相关性却逐渐增强^[4,7-8]。个别水分敏感且水分不足的区域会出现植被活动趋势反转,甚至退化的趋势^[9]。

近几十年来,关于植被活动变化及其与气候关系的研究在全球、全国和区域等不同的尺度上均有了显著的进展^[10]。在全球尺度上,研究表明植被活动在北半球中高纬度地区主要受温度影响^[11]。在全国尺度上,之前的研究表明植被活动增加主要由于升温的作用^[12]。在区域尺度上,研究表明植被活动主要受局地气候的影

响。在湿润、半湿润地区,气温是植被活动变化的主要驱动因子;在干旱、半干旱地区,降水则是主要驱动因子^[13-14]。西南高山亚高山地区是响应气候变化极其敏感的区域^[15],是多条国内和国际河流的上游和源头区域,是维持区域、中国、毗邻地区乃至全球生态安全、水资源安全、促进经济可持续发展的重要生态屏障。西南地区植被活动变化和气候驱动因子的关系也有较多研究。王春雅等^[5]研究表明在藏东南三江并流核心区植被 NDVI 增加主要与气候暖化有关,而与降水量相关性较小。张勃等^[16]研究表明西南地区由于季风环流的影响加上流域内水系较发达,降水较多,因此植被在生长季时期水分较为充足,但热量差异较大。熊巧利等^[17]研究表明植被活动与月平均温的相关性要比与月降水量的相关性高,且植被活动对温度的响应没有明显的滞后效应。其他在西南林区、西南喀斯特地区等的诸多研究也都表明植被活动变化与温度的相关性高于降水^[18-20]。

过去 30 多年,西南地区是中国最大的陆地碳汇^[21],然而近些年来随着西南地区季节性干旱和气候极端事件的增加^[22],使得西南地区的植被生产力和碳汇能力受到影响^[23],同时植被在应对这些环境胁迫时的敏感性、适应性和恢复力又受到很多因素的影响,这增加了西南亚高山森林水源涵养功能的不确定性^[24-25]。在以往的研究中,对于不同植被类型组成及多气候条件对植被活动的共同影响还缺乏较为细致

的分析。因此,本文主要利用遥感与GIS技术,基于MODIS NDVI数据,结合DEM数据、植被类型数据、气象数据,利用线性回归、相关分析、Hurst指数分析等方法探究近18年西南高山亚高山植被活动的时空格局变化特征及对气候驱动因子的响应,并对未来植被活动变化进行预测。拟解决的科学问题是:温度和降水两种关键因子对植被变化的贡献率多大?两种因子驱动方式及协同机制是什么?当前植被活动的趋势是否具有可持续性?研究结果将有助于加深对气候变化背景下区域植被生长潜力与演变方向的认知,并为实现植被恢复与管理、森林质量精准提升以及国家“双碳”战略目标提供相应的科学依据。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

西南高山亚高山区位于西藏、四川、云南、青海、甘肃的交界地区(25.38°—34.63°N, 91.25°—105.32°E),位于横断山区核心地带,与四川盆地、云贵高原、青藏高原东南缘及黄土高原相接,面积64万km²,海拔200~7000m,海拔垂直高差近6000m,地势呈现东南低、西北高的特点,年平均气温分布不均,年降水量较高,年平均温大约是-5~18℃,年降水量大约是300~1300mm,植被类型丰富,垂直分带特点显著,区域植被类型主要以草地、常绿针叶林、落叶阔叶林为主^[26],草地大约占该区域总面积的60%(图1)。该区有雾、霜、雪等特殊的降水事件,同时伴随着长期的积雪、融雪、冻结及解冻等,是金沙江、雅砻江、大渡河等的源头,也是“天保工程”核心区及川滇生态屏障带的重要组成部分,具有重要的生态防护功能,是响应气候变化的敏感区^[27]。

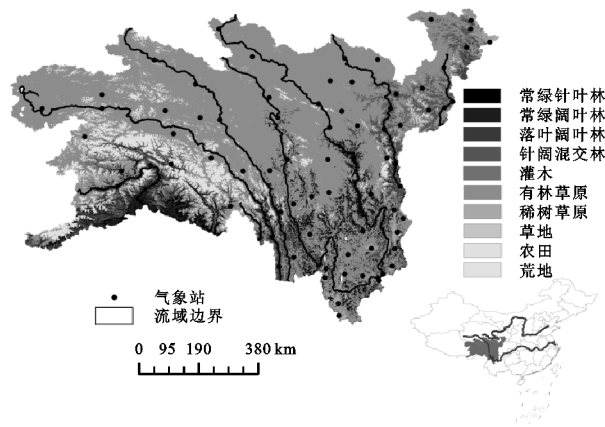


图1 研究区概况

1.2 数据来源与预处理

遥感数据中的NDVI数据集获得于美国航空航天局(NASA)的MODIS NDVI(MOD13Q1)数据集(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/>),时

间范围是2001年1月—2018年12月,空间分辨率是250m,时间分辨率是16d,共计414幅影像。该数据集已进行了几何纠正、辐射和大气校正等处理过程,然后用MRT(MODIS Reprojection Tool)批处理软件对得到的数据进行裁剪、拼接、格式及投影转换等一系列处理,用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)所得到的最大NDVI值来表征植被活动最好的状态^[5]。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),选择包含研究区及周边共147个地面气象观测站的逐日降水量、平均气温数据。采用反距离权重内插法(Inverse Distance Weighted, IDW)插值。高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)的SRTM DEM数据集,其空间分辨率是90m。植被类型数据来源于美国国家航天局(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)土地覆被数据MOD12Q1,空间分辨率为500m,该数据被广泛用于土地覆盖动态监测^[28]。我们选取2010年的土地覆盖数据,根据研究区实际情况对土地利用状况进行了筛选和合并,最终选择常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶、混交林、灌木、有林草原、稀树草原、草地、农田、荒地10种植被类型进行分析。对气象数据、植被类型数据、地形数据进行重采样使其与NDVI数据具有相同的空间分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 变化趋势分析 利用一元线性回归分析计算研究区2001—2018年NDVI逐像元的变化趋势,根据最小二乘算法来计算变化趋势斜率Slope,公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times M_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n M_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:Slope代表NDVI变化趋势的斜率; n 代表时间; M_i 代表第 i 年NDVI值。如果 $\text{Slope} > 0$,则表示植被在研究期间表现出NDVI增加的趋势,即植被活动增强,植被得到了改善;相反,当 $\text{Slope} < 0$ 时,则表示植被在研究期间表现出NDVI减少的趋势,即植被发生了退化; $\text{Slope} = 0$ 表示植被活动无明显变化趋势。

本文采用F检验反映NDVI趋势变化的显著性,公式为:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

式中: $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2$ 是回归平方和; $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 是误差平方和; y_i 是第 i 年的NDVI值; \hat{y}_i 是对应的回归值; \bar{y} 是NDVI多年的均值; n 是研究时间段。根据变化趋势及显著性检验结果,将NDVI变化趋势分成以下等级:显著增加($\text{Slope} > 0$ 且 $p < 0.05$),

略有增加($\text{Slope}>0$ 且 $0.05\leq p<0.1$),基本不变($p\geq 0.1$),略有减少($\text{Slope}<0$ 且 $0.05\leq p<0.1$),显著减少($\text{Slope}<0$ 且 $p<0.05$)。

1.3.2 基于像元的植被 NDVI 变异系数(CV)分析

变异系数是表示数据离散程度的一个指标,用来指示植被 NDVI 变化的稳定性,公式如下:

$$CV=\frac{STD_{x_i}}{Mean_{x_i}} \tag{3}$$

式中:CV 表示 NDVI 的变异系数;Mean_{*x_i*} 表示 2001—2018 年 NDVI 均值;STD_{*x_i*} 表示 2001—2018 年 NDVI 的标准差;CV 值越小表示 NDVI 变化越小,植被活动越稳定, CV 值越大表示 NDVI 变化越大,植被活动的稳定性越差。这里根据 CV 值将波动性分为 5 类,0~0.1 为最低波动,0.1~0.2 为较低波动,0.2~0.5 为适中波动,0.5~1 为较高波动,>1 为最高波动。

1.3.3 Hurst 指数分析 Hurst 指数(H)可定量表征时间序列的长期依赖性,来预测未来的发展趋势^[29-30]。本研究采用重标极差(R/S)分析方法^[31]计算 Hurst 指数来分析区域植被活动未来的变化趋势。计算步骤如下:

(1) 对于 NDVI 的时间序列 $NDVI(i)$, $i=1,2,\cdots,n$,均值序列定义如下:

$$\overline{NDVI}_{(\theta)}=\frac{1}{\theta}\sum_{i=1}^{\theta}NDVI_{(i)} \quad \theta=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

表 1 植被活动未来变化趋势分类标准

NDVI 变化趋势	H	变化类型	未来趋势
$\text{Slope}>0, p<0.05$	$0<H<0.5$	反持续性 & 显著增加	减少
$\text{Slope}>0, 0.05\leq p<0.1$	$0<H<0.5$	反持续性 & 轻微增加	减少
$p>0.1$	$0<H<0.5$	反持续性 & 稳定	不确定
$\text{Slope}<0, 0.05\leq p<0.1$	$0<H<0.5$	反持续性 & 轻微减少	增加
$\text{Slope}<0, p<0.05$	$0<H<0.5$	反持续性 & 严重减少	增加
$\text{Slope}>0, p<0.05$	$0.5<H<1$	可持续性 & 显著增加	增加
$\text{Slope}>0, 0.05\leq p<0.1$	$0.5<H<1$	可持续性 & 轻微增加	增加
$p>0.1$	$0.5<H<1$	可持续性 & 稳定	稳定
$\text{Slope}<0, 0.05\leq p<0.1$	$0.5<H<1$	可持续性 & 轻微减少	减少
$\text{Slope}<0, p<0.05$	$0.5<H<1$	可持续性 & 严重减少	减少
	$H=0.5$	随机	不确定

1.3.4 相关分析 基于像元来计算植被 NDVI 与温度和降水的相关系数,以此代表植被活动与气候因子的相关性,公式如下:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^n[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2}} \tag{10}$$

式中: R_{xy} 是 x 与 y 的相关系数; x_i 是第 i 年每个栅格的降水或温度的值; y_i 是第 i 年每个栅格的 NDVI

(2) 确定累积离差

$$X_{(i,\theta)}=\sum_{i=1}^{\theta}(X_i-\overline{X_{\theta}}) \quad 1\leq i\leq \theta \tag{5}$$

(3) 计算极差

$$R_{(\theta)}=\max(i,\theta)-\min(i,\theta) \quad \theta=1,2,\cdots,n \tag{6}$$

(4) 计算样本标准差

$$S_{(\theta)}=\left(\frac{1}{\theta}\sum_{i=1}^{\theta}(NDVI_{(i)}-NDVI_{(\theta)})^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad \theta=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

(5) 计算 Hurst 指数

$$\frac{R_{(\theta)}}{S_{(\theta)}}=k\times\theta^H \tag{8}$$

$$\lg(\frac{R_{(\theta)}}{S_{(\theta)}})=\lg k+H\times\lg\theta \tag{9}$$

Hurst 指数($0<H<1$)取值范围包括 3 种情况:

(1) 当 $0.5<H<1$ 时,植被活动的时间序列有长期相关的特征,植被 NDVI 未来变化趋势与过去一致,即该过程有一定的持续性,且随着 H 越接近于 1,趋势增加的强度越大;(2) 当 $H=0.5$ 时,植被活动时间序列是相互独立且随机的;(3) 当 $0<H<0.5$ 时,植被活动时间序列呈现一定的反持续性特征,即植被活动未来的变化趋势与过去相反,且这种反持续性取决于 H 与 0 的距离,如果距离越小,则说明反持续性越强^[32]。将 NDVI 变化趋势与 Hurst 指数叠加,按表 1 分类标准对 NDVI 未来变化趋势进行分类。

值; \bar{x} 与 \bar{y} 分别是对应的平均值; n 是年份。基于简单线性相关,进一步计算偏相关系数,公式如下:

$$R_{xy,z}=\frac{R_{xy}-R_{xz}-R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)}\sqrt{(1-R_{yz}^2)}} \tag{11}$$

式中: R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 分别是 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 的相关系数; $R_{xy,z}$ 是固定一个自变量 z 之后的因变量 x 与另一个自变量 y 的偏相关系数。之后采用 t 检验对偏相关系数进行显著性检验,公式如下:

$$t_p = \frac{R_{xy,z}}{\sqrt{(1-R_{xy,z}^2)}} \sqrt{n-m-1} \quad (12)$$

式中: t_p 是偏相关系数中进行显著性检验时的统计量; m 是自变量的个数; n 是样本量; $R_{xy,z}$ 是偏相关系数。

然而由于气候因子之间存在非常复杂的相互作用关系,各因子对植被活动的影响都不是独立存在的,因此进一步用多元回归的分析方法来表征降水和温度对植被活动的综合影响,采用 F 检验进行显著性检验。复相关分析的公式如下:

$$F_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy,z}^2)(1 - R_{xz,y}^2)} \quad (13)$$

式中: $F_{x,yz}$ 代表复相关系数; x 代表因变量; y, z 代表自变量。

$$F_k = \frac{F_{x,yz}^2}{1 - F_{x,yz}^2} \frac{n - m - 1}{m} \quad (14)$$

式中: F_k 代表显著性检验的统计量; n 为样本量; m 为自变量的个数。

我们参考关于气候要素对植被活动变化的驱动分区方法^[33],并考虑研究区的气候本底特征,对植被 NDVI 变化的类型进行了驱动因素敏感性分析,按表 2 分类准则进行分类。

2 结果与分析

2.1 植被活动的变化趋势

由图 2 和图 3 得,研究区总体呈 NDVI 显著增加趋势($p < 0.01$),增长率为 0.001 2/a。NDVI 显著增加($\text{Slope} > 0, p < 0.05$)、略有增加($\text{Slope} > 0, 0.05 \leq$

$p < 0.1$)、基本不变($p > 0.1$)、略有减少($\text{Slope} < 0, 0.05 \leq p < 0.1$)与显著减少($\text{Slope} < 0, p < 0.05$)的面积比例分别为:25.06%, 7.43%, 63.69%, 1.09% 和 2.73%。植被活动增强的面积大于植被活动降低的面积,其中植被活动增强的区域主要分布在研究区东北方向嘉陵江和岷江流域。植被活动稳定的区域所占比例最高,且分布较为分散,基本上全区域都有分布。植被活动降低的区域主要分布在研究区中南部金沙江、澜沧江、怒江等流域的中下游段及较低海拔段,这些区域受人类活动影响较大。对不同植被类型 NDVI 变化趋势进行统计分析发现,除了落叶阔叶林、稀树草原和草地 NDVI 显著增加的比例大于稳定状态的比例外,其他植被类型都是稳定状态植被所占的比例最高;除了灌木 NDVI 显著减少比例高于显著增加比例外,其他植被类型都是显著增加面积所占比例高于显著减少比例。这说明落叶阔叶林、稀树草原和草地绿化趋势最高,而灌木则显著褐化趋势最高。

表 2 植被活动敏感性类型分区准则

NDVI 变化类型	$R_{\text{NDVI},P}$	$R_{\text{NDVI},T}$	$R_{\text{NDVI},TP}$
温度敏感型	$t \geq t_{0.05}$		$F \geq F_{0.05}$
降水敏感型		$t \geq t_{0.05}$	$F \geq F_{0.05}$
温度降水强敏感型	$t \geq t_{0.05}$	$t \geq t_{0.05}$	$F \geq F_{0.05}$
温度降水弱敏感型	$t < t_{0.05}$	$t < t_{0.05}$	$F \geq F_{0.05}$
温度降水不敏感型			$F < F_{0.05}$

注:表中 $R_{\text{NDVI},TP}$ 是 NDVI 与温度和降水的复相关系数; $R_{\text{NDVI},P}$ 是 NDVI 与温度的偏相关系数; $R_{\text{NDVI},T}$ 是 NDVI 与降水、温度的偏相关系数; $F_{0.05}, t_{0.05}$ 是 F 检验和 t 检验的 0.05 显著性水平。

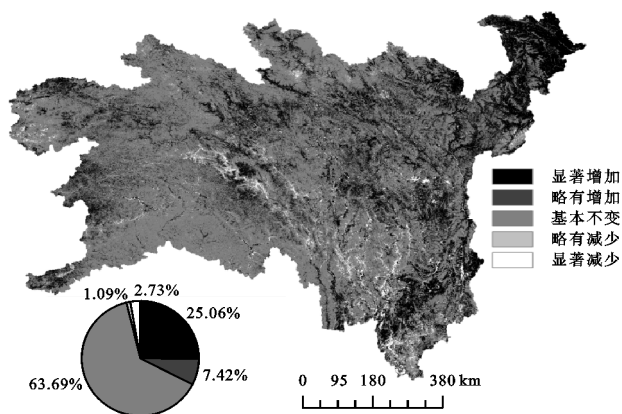
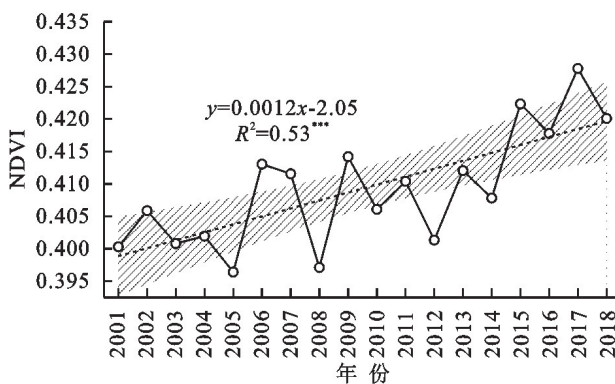


图 2 2001—2018 年 NDVI 变化趋势空间分布及统计

利用变异系数对研究区植被 NDVI 进行稳定性分析(图 4),总体来说,研究区植被活动较稳定。68.31%, 19.31% 的区域处于最低波动和较低波动,高波动的区域占比不到 3%,且高波动主要分布于研究区西南部,包括青藏高原、雅鲁藏布江和藏南部分地区等,这些地区植被容易受到外界影响。对不同植被类型的变异系数进行比较发现:阔叶林 < 混交林 < 针叶



注:*** 代表 $p < 0.01$,下同。

图 3 2001—2018 年 NDVI 随时间变化趋势

林 < 草地 < 灌木 < 荒地 < 农田,即植被维持稳定性的能力逐渐降低,其中阔叶林和混交林的稳定性较高,农田的稳定性最差。

2.2 植被活动变化的可持续性及其气候因子的时空变化特征

根据 2001—2018 年西南高山亚高山地区植被 NDVI 数据,利用重标极差(R/S)理论对 Hurst 指数

进行逐像元的空间计算,得到植被活动的持续性分布情况。将 Hurst 指数(H)分为强反持续($0 \leq H \leq 0.3$)、弱反持续($0.3 < H < 0.5$)、随机不确定($H = 0.5$)、弱持续性($0.5 < H \leq 0.7$)、强持续性($0.7 < H \leq 1$)共 5 个类型,得到研究区 Hurst 指数范围(图 5A)及空间分级(图 5B)。Hurst 指数结果表明,18 a 间研究区 Hurst 指数呈正态分布,在 0.4~0.5 区间的像元数量最多, H 均值为 0.45,说明植被活动整体略趋向于反持续性;5 种类型的比例分别为 5.16%,64.31%,0.65%,28.58%,1.3%。即植被活动反持续的比例为 69.47%,可持续的比例为 29.88%。这表明研究区总体植被活动易出现弱反持续性的特征,植被活动未来的变化趋势与过去相反。

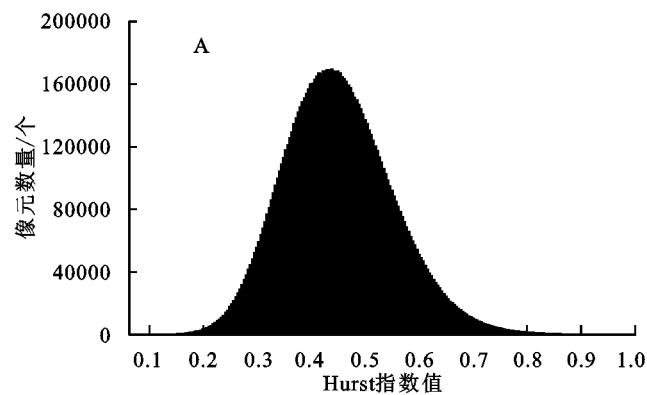


图 5 Hurst 指数范围(A)及空间分布(B)特征与统计

利用 Hurst 指数叠加 NDVI 变化趋势对未来 NDVI 变化特征进行预测,按表 1 的分类准则进行分类。可得未来 NDVI 变化中(图 6)增加、减少、稳定、不确定的比例分别为 9.47%,18.27%,20.08%,51.99%。植被在未来呈现 NDVI 减少趋势的植被比例高于增加趋势的比例,说明未来植被可能有褐化的风险。对不同植被类型与 NDVI 未来变化趋势进行叠加得出,所有植被类型都是未来变化不确定的情况所占比例最高。其次在确定的情况中,所有植被类型都是未来 NDVI 增加的比例小于 NDVI 减少的比例。

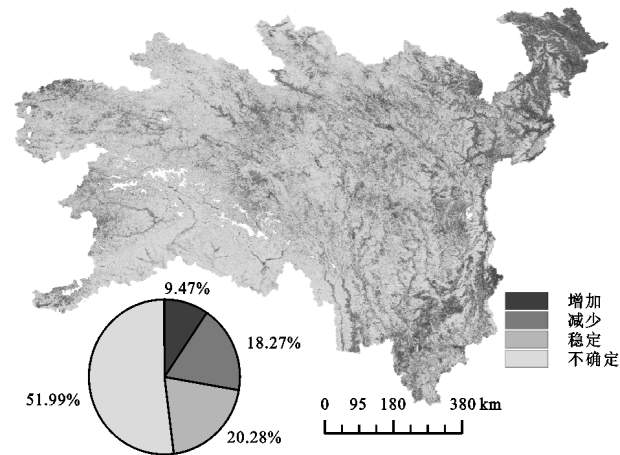


图 6 植被 NDVI 未来变化特征空间分布及统计

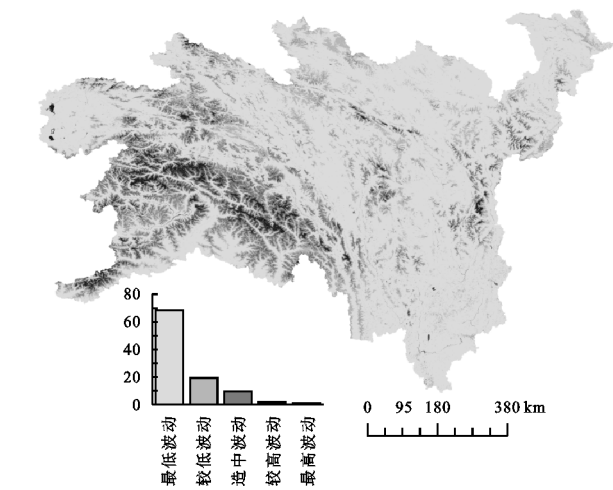
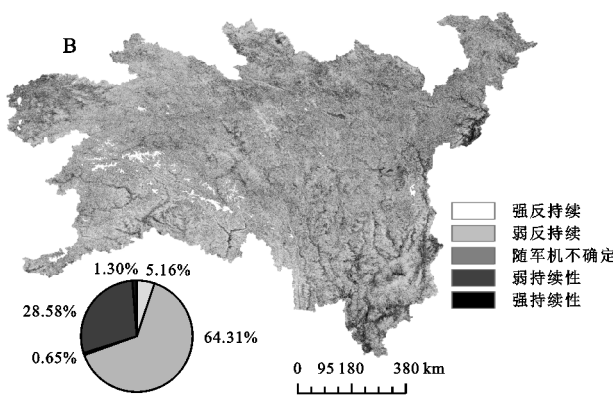


图 4 变异系数空间分布特征及统计



在年际尺度上,研究区温度总体呈显著增加趋势($Slope=0.038\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, $R^2=0.359\text{ }1$, $p<0.01$)(图 7A),其中显著增加、略有增加和基本不变所占的面积比例分别为 75.38%,10.36%,14.26%,降低的比例仅占 0.000 1%(图 8A),显著增加的区域分布于研究区的大部分地区;降水呈不显著增加趋势($Slope=0.412\text{ }8\text{ mm/a}$, $R^2=0.002\text{ }9$, $p>0.05$)(图 7B),其中显著增加、略有增加、基本不变的比例分别为 6.53%,8.15%,84.92%,降低的比例不到 0.4%(图 8B),嘉陵江、岷江、大渡河、雅鲁藏布江部分上游段降水增加明显,其余流域均不显著。

2.3 植被活动对气候因子的响应

对西南高山亚高山区 NDVI 与温度、降水的相关性进行分析,由图 9A,B 可知,研究区植被活动与温度的相关性要高于植被活动与降水的相关性。NDVI 与温度的相关系数平均值是 0.20,呈现显著正相关($p<0.05$)的区域占比为 17.85%,大部分位于研究区东北和西北部,即嘉陵江、岷江及怒江、雅鲁藏布江的上游段,呈现显著负相关($p<0.05$)的区域占比为 1.71%,大部分位于研究区南部流域的下游段。NDVI 与降水的相关系数平均值是 -0.01,呈现显著正相关($p<0.05$)的区域占比为 5.12%,大部分位于东北和南部,即嘉陵江、岷江、大渡河上游及雅鲁藏布

江下游段。呈现显著负相关($p < 0.05$)的区域占比为4.69%,大部分位于研究区西北和西南部。总体来看,研究区的温度对植被活动变化的影响更加明显。

进一步采用偏相关分析来探究温度和降水对植被NDVI的影响,见图9C,D所示,可以得到,NDVI和温度的偏相关系数均值为0.20,显著正相关的区域占总面积的15.86%,位于研究区的东北和西北部,1.33%的区域呈现显著负相关,位于研究区的东南部;NDVI和降水的偏相关系数均值为0.03,呈现显著正相关的区域比例为5.13%,主要位于研究区中北部和东北部。呈现显著负相关的区域比例为2.84%,

主要位于研究区的西北部和西南部。

利用偏相关系数分析温度和降水对植被活动的单独作用后,进一步采用复相关系数分析温度和降水对植被活动的共同作用,由图9E,F可得,植被NDVI与温度和降水的复相关系数在0~0.98,复相关系数较高的区域主要位于研究区北部及东北部流域的上游段,复相关系数较低的区域主要位于研究区中南部流域的中下游段。NDVI与温度和降水的复相关系数平均值是0.39,有16.90%的像元通过了显著性检验,复相关系数比相关系数和偏相关系数都更高,这意味着气候因子对植被生长的复合作用更大。

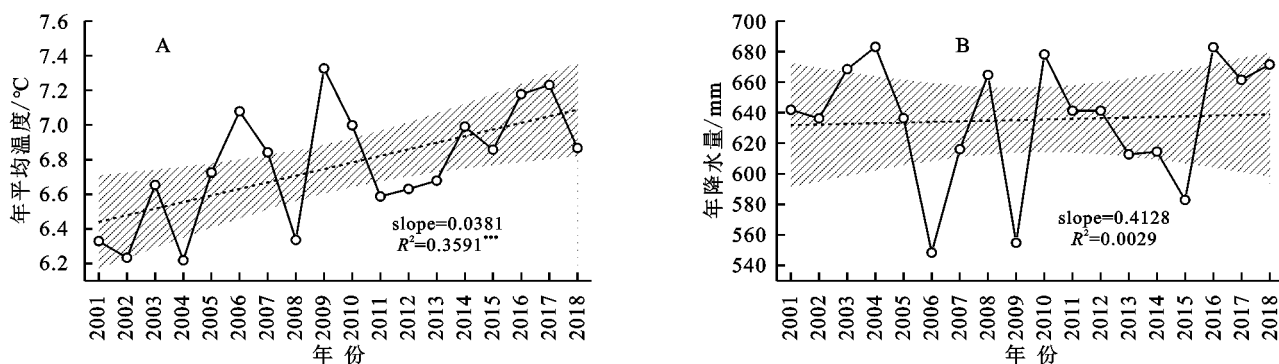


图7 研究区2001—2018年温度(A)和降水(B)随时间变化趋势

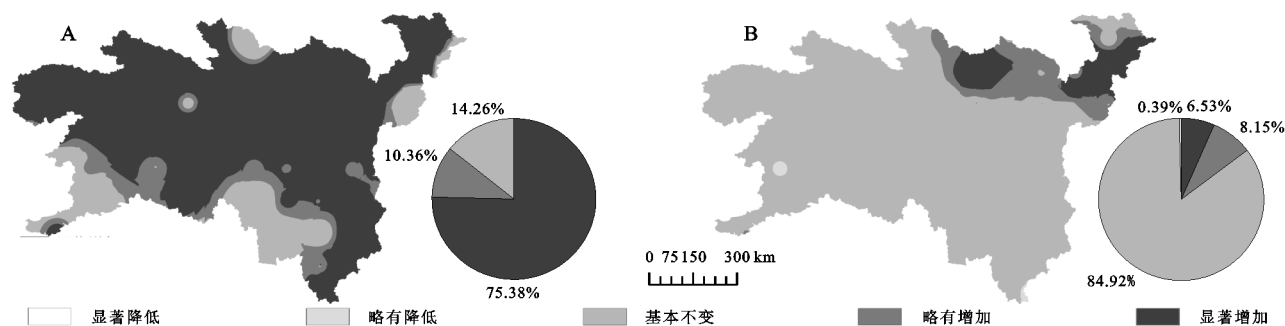


图8 2001—2018年温度(A)和降水(B)变化特征的空间分布

为了进一步揭示气候因子对西南高山亚高山地区植被活动的驱动作用,我们依据表2植被NDVI变化对驱动因素的敏感性进行分析(图10)得出:温度对植被NDVI的影响要大于降水对植被NDVI的影响。植被NDVI对气候敏感的面积约占研究区总面积的16.9%。其中温度降水强敏感型、温度敏感型、降水敏感型、温度降水弱敏感型的比例占整个研究区面积的比例分别为2.32%,9.83%,3.72%,1.03%。对温度和降水双敏感的区域主要分布三江源地区及四川与贵州交界的部分地区,对温度敏感的区域主要位于研究区东北部嘉陵江流域及西北部流域的上游段,这些地区基本都位于青藏高原,主要是西藏自治区和青海省的交界处以及甘肃和四川的交界处。对降水敏感的区域主要零星分布于研究区中部、南部和东北部。

为了进一步定量探索气候因子到底对植被活动产

生了什么影响这一问题,我们将植被活动的驱动力空间分布图与NDVI变化空间分布图进行叠加,探索了各驱动因子对植被绿化和褐化的影响程度(图11),结果表明,非气候因子对植被活动显著增强和显著降低的作用大于温度和降水的作用,这可能是由于人类活动产生的植被恢复效应。在此,我们不考虑非气候因素的影响,对气候因素产生的影响进行单独分析发现(图12),在气候因子驱动植被活动显著增强的像元中,温度降水共同驱动植被活动显著增强、温度驱动植被活动显著增强、降水驱动植被活动显著增强所占的比例分别为:19%,67.93%,13.07%。在气候因子驱动植被活动显著降低的像元中,温度降水共同驱动植被活动显著降低、温度驱动植被活动显著降低、降水驱动植被显著退化所占的比例分别为18.36%,72.07%,9.57%。可见在西南高山亚高山区温度对植被活动的影响占主导,即温度既是驱动

植被绿化的关键因子,同样也是植被褐化的关键因子。将植被类型与气候因子对植被活动影响的结果叠加(表 3),分析得出在植被 NDVI 显著增加和显著降低的像元中,所有植被类型均是受温度驱动的比例最高,温度降水共同驱动次之、降水单独驱动作用的影响所占比例最低。其中草地 NDVI 变化受每种驱动类型影响的比例都是最高的,可见气候变化对草地的影响大于其他植被

类型,草地对气候变化的敏感性更高。对常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林进行比较发现,在植被绿化的过程中,后两者对温度的敏感性高于前两者,对降水的需求也相应高;在植被褐化的过程中,温度和降水对落叶阔叶林和针阔混交林却均无较大影响,说明落叶阔叶林和混交林更适应现在气候变化规律,对当前气候变化具有更强的调节能力。

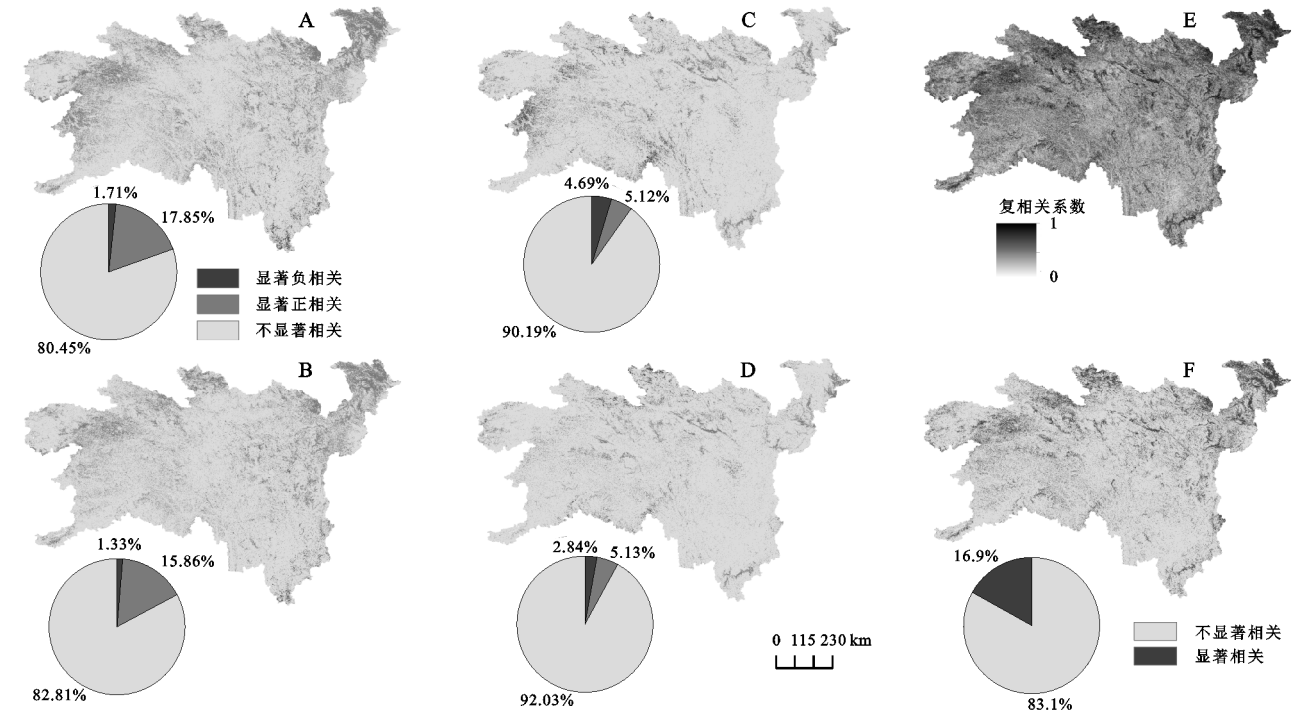


图 9 研究区 NDVI 与温度、降水的相关(A,B)、偏相关(C,D)及复相关(E,F)空间分布

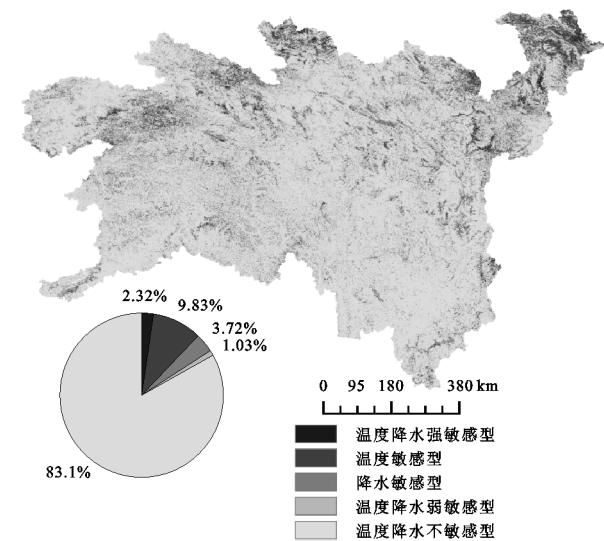


图 10 驱动因子空间分布及贡献

3 讨论

3.1 区域植被活动趋势及其稳定性

本文的研究结果表明,2001—2018 年以来,研究区植被 NDVI 呈显著增加趋势,植被活动增强面积占比 32.49%,退化面积占比 3.82%,稳定不变面积占

比 63.69%。表明研究区从 2001 年以来经历了一个持续的植被绿化过程。这与之前的研究结果一致^[20,34-35]。近 18 年的气候变化趋势说明研究区的年均温呈现显著上升的趋势,并且变暖趋势的空间分布格局与 NDVI 增加趋势的空间分布格局较为一致,说明了气候变暖对植被活动产生的积极影响^[5]。研究区年降水量呈不显著上升趋势,之前的研究也表明近几十年来中国西南地区气温显著上升,降水量略有增加,西南地区总体表现为“暖湿化”的趋势,这和我们的结论较为一致^[36]。从 NDVI 的变异系数来看,研究区区域处于最低波动和较低波动的比例分别为 68.31%,19.31%,高波动的区域占比不到 3%,说明研究区植被稳定性较强,高波动的区域主要分布于雅鲁藏布江和藏南部分地区,之前的研究也表明,在这些地方人类干扰较为严重^[34]。

3.2 植被活动增强的可持续性

利用 Hurst 指数对 NDVI 未来可持续性分析发现,研究区未来植被活动有弱反持续性的特征,即植被未来变化趋势将与过去趋势相反。在未来,NDVI 变化趋势不确定的区域所占比例约 51.99%,增加的

比例为 9.47%，减少的比例为 18.27%，可见未来的变化趋势不确定的类型占比最高，植被 NDVI 减少趋势的比例高于增加趋势的比例，说明未来植被可能有褐化的风险，对未来植被变化趋势不确定或持续性植被褐化的区域应该进一步加强生态系统管理，提升生态系统服务^[32]。此外，虽然 Hurst 指数可以用来预测未来植被动态的趋势，但它不能提供明确的持续时间，这使得植被预测更像是一种可能的风险指示^[30]。因此，确定可能的持续时间是一个更重要的问题，需要在未来进一步研究。

3.3 植被活动的气候驱动效应

气候驱动因子分析表明，西南高山亚高山区温度对植被的影响占主导，即温度既是驱动植被绿化的关键因子，同样也是植被褐化的关键因子。这一研究结果与之前得到的“在西南地区气温是影响植被生长最重要的条件之一”的结论一致^[5,17]。这主要是由于研究区流域水系发达，水资源较为丰富，植被对降水的

依赖性较小，对热量资源的依赖性较高，植被活动变化受气温影响作用高于降水^[20,37]。

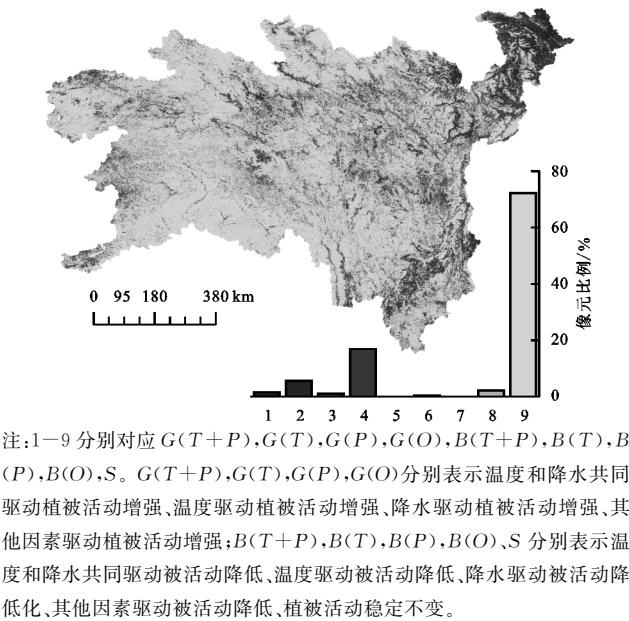


图 11 各驱动因子对植被活动变化的贡献

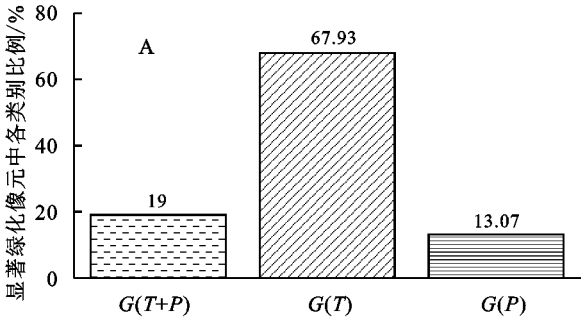


图 12 植被显著绿化(A)和显著退化(B)的像元中气候驱动因子的贡献

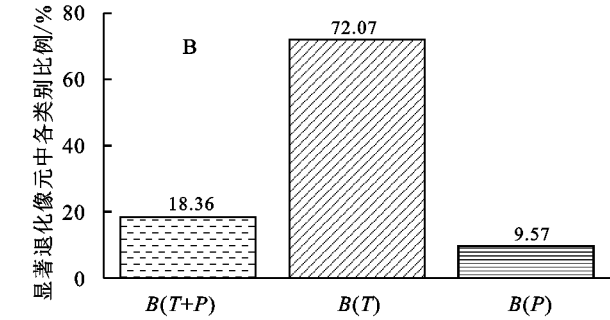


表 3 各驱动因子对不同植被类型 NDVI 变化的影响

植被类型	温度降水共同驱动 植被活动显著增强	温度驱动植被 活动显著增强	降水驱动植被 活动显著增强	温度降水共同驱动 植被活动显著降低	温度驱动植被 活动显著降低	降水驱动植被 活动显著降低
常绿针叶林	12.12	50.96	4.50	10.19	19.72	2.51
常绿阔叶林	10.18	37.82	7.58	15.87	23.95	4.59
落叶阔叶林	15.73	71.53	12.20	0.10	0.38	0.07
针阔混交林	16.94	70.90	9.35	0.55	1.97	0.28
灌木	5.88	20.00	2.35	12.94	57.65	1.18
有林草原	16.71	63.78	7.79	2.27	8.80	0.66
稀树草原	22.37	56.86	11.61	1.13	7.31	0.72
草地	18.40	62.93	14.47	0.76	2.89	0.54
农田	23.76	32.43	27.55	1.92	12.25	2.10
荒地	10.90	83.58	4.99	0.09	0.40	0.05

NDVI 对气温和降水的响应又表现出空间上的差异。流域植被 NDVI 和温度呈正相关的区域主要分布在研究区的东北和西北部，即川西高原及青藏高原的东部，这些地区温度较低，植被类型以草原为主，气温升高有助于植被的光合作用，从而促进植被生长，这与之前的研究结果一致^[38]。流域植被 NDVI 和温度呈负相关的区域主要在研究区的东南部，海拔

较低，同时温度又比较高，使得植被蒸散发也较高，不利于植被生长^[39]。流域的降水和植被 NDVI 呈正相关的区域多为横断山脉的干热河谷区，在焚风的影响下区域径流和降水量较少^[5]，相对干燥的环境限制植被生长的水分供应，因此使这些地区的植被对可利用水非常敏感，尤其是在气候持续变暖的趋势下，降水增加可显著促进植被生长^[20,33]；相比之下，在流域的

北部和西北部地区,水资源丰富,可以抵消气温上升导致的干旱,同时由于太阳辐射减少,降水增加,这会降低植被的光合作用进一步限制植被的生长,因此这些地区的植被活动与降水表现为负相关关系^[16]。

对于不同的植被类型,我们发现,在植被显著绿化的区域,常绿阔叶林和常绿针叶林的温度与降水驱动效应低于落叶阔叶和针阔混交林;而在植被显著褐化的区域,前两者却显著高于后两者,说明比起常绿阔叶林和常绿针叶林,落叶阔叶林和针阔混交林对当前气候变化具有更强的适应能力。这主要是由于常绿阔叶林和常绿针叶林分布在水热条件较好的区域,水热条件的平衡对于植被生长至关重要,如果温度升高较快但水分不能满足植被的需求时,温度会抑制植被生长,相反,如果降水量显著增加但温度升高达不到植被需求的时候,就会对植被的光合和呼吸作用产生影响,这和之前的研究结果类似^[40-42]。

我们采用温度和降水来量化对植被活动产生影响的重要环境因子,并分析了它们与植被动态的关系。然而,其他因素(如极端气候、太阳辐射、日照时数、地形地貌、土壤等)也可能对植被活动产生重要影响^[43],在今后的研究中,应综合考虑其他因素对植被的影响。

4 结论

(1) 近 18 年来,研究区植被活动整体表现出显著增强的趋势。植被呈绿化趋势的区域主要分布在研究区东北部的嘉陵江和岷江流域,植被呈褐化趋势的区域主要分布在研究区中南部的金沙江、澜沧江、怒江等流域的中下游段及较低海拔段。落叶阔叶林的显著绿化趋势比例最高,灌木的显著褐化趋势比例最高。

(2) 研究区植被活动平均变异系数较小,植被稳定性较高,对外界干扰的抵抗力较强。从植被类型看,落叶阔叶林和针阔混交林的稳定性较高,农田的稳定性最低。基于 Hurst 指数的未来植被动态显示,植被 NDVI 未来变化趋势与过去趋势相反。未来呈现 NDVI 减少趋势的比例高于增加趋势的比例,植被有褐化的风险。

(3) 研究区温度总体呈显著增加趋势,降水呈不显著增加趋势。气候因子对 NDVI 的正面影响大于负面影响,其中温度的影响要大于降水的影响。植被对气候变化表现敏感的区域约占研究区总面积的 16.9%,其中温度敏感型所占的比例最高。

(4) 温度既是驱动植被绿化的关键因子,同样也是植被褐化的关键因子。在气候因子驱动植被显著绿化和显著褐化的像元中,温度驱动所占的比例均最高。落叶阔叶林和针阔混交林在气候因子驱动植被显著绿化

的像元中所占比例高于其他类型,而在气候因子驱动植被显著褐化的像元中所占比例低于其他类型,这两种类型对当前气候变化具有更强的适应能力。

参考文献:

- [1] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): DOI: 10. 1038/s41467-017-02810-8.
- [2] Zeng Z, Piao S, Li L Z X, et al. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 432-436.
- [3] Li J, Peng S, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260-270.
- [4] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [5] 王春雅, 王金牛, 崔霞, 等. 藏东南三江并流核心区植被时空动态变化及其气候驱动力分析[J]. *地理研究*, 2021, 40(11): 3191-3207.
- [6] Yu Z, Sun P, Liu S, et al. Sensitivity of large-scale vegetation greenup and dormancy dates to climate change in the north-south transect of eastern China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(20): 7312-7328.
- [7] Piao S, Yin G, Tan J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [8] Piao S, Nan H, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-7.
- [9] Clifford M J, Royer P D, Cobb N S, et al. Precipitation thresholds and drought-induced tree die-off: insights from patterns of *Pinus edulis* mortality along an environmental stress gradient [J]. *New Phytologist*, 2013, 200(2): 413-421.
- [10] 李茂华, 都金康, 李皖彤, 等. 1982—2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系[J]. *地理科学*, 2020, 40(5): 823-832.
- [11] Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982—1990 [J]. *International Journal Remote Sensing*, 2002, 23(18): 3873-3878.
- [12] Piao S, Fang J, Ji W, et al. Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15(2): 219-226.
- [13] 杨雪梅, 杨太保, 刘海猛, 等. 气候变暖背景下近 30 年北半球植被变化研究综述[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 379-391.
- [14] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和

- 人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.
- [15] Zhang M, Wang K, Liu H, et al. Spatio-temporal variation and impact factors for vegetation carbon sequestration and oxygen production based on rocky desertification control in the Karst Region of Southwest China [J]. Remote Sensing, 2016,8(2):DOI:10.3390/rs8020102.
- [16] 张勃,王东,王桂钢,等.西南地区近14年植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J].长江流域资源与环境,2015,24(6):956-964.
- [17] 熊巧利,何云玲,李同艳,等.西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应[J].水土保持研究,2019,26(6):259-266.
- [18] 曹云,钱永兰,孙应龙,等.基于MODIS NDVI的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J].生态环境学报,2020,29(5):857-865.
- [19] 靖娟利,王永锋.西南岩溶区NDVI时空变化及其与气候因子的关系[J].水土保持研究,2016,23(5):169-174.
- [20] 周金霖,马明国,肖青,等.西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系[J].遥感技术与应用,2017,32(5):966-972.
- [21] Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. Nature, 2009,458(7241):1009-1013.
- [22] Zhao X, Wei H, Liang S, et al. Responses of natural vegetation to different stages of extreme drought during 2009—2010 in Southwestern China [J]. Remote Sensing, 2015,7(10):14039-14054.
- [23] Li X, Li Y, Chen A, et al. The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in Southwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,269:239-248.
- [24] Sun P, Liu S, Jiang H, et al. Hydrologic effects of NDVI time series in a context of climatic variability in an upstream catchment of the minjiang River [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008,44(5):1132-1143.
- [25] Tong X, Brandt M, Yue Y, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering [J]. Nature Sustainability, 2018,1(1):44-50.
- [26] 周雄,孙鹏森,张明芳,等.西南高山亚高山区植被水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,2020,44(6):628-641.
- [27] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in southwest China: impacts, causes, and restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2014,132:1-12.
- [28] Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, et al. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets [J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114(1):168-182.
- [29] 孙锐,陈少辉,苏红波.2000—2016年黄土高原不同土地覆盖类型植被NDVI时空变化[J].地理科学进展,2019,38(8):1248-1258.
- [30] Chen J, Yan F, Lu Q. Spatiotemporal variation of vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau and the influence of climatic factors and human activities on vegetation trend (2000—2019) [J]. Remote Sensing, 2020, 12(19):DOI:10.3390/rs12193150.
- [31] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence [J]. Water Resources Research, 1969,5(5):967-988.
- [32] 顾羊羊,邹长新,乔旭宁,等.2000—2015年黔西南州植被覆盖时空变化及影响因素分析[J].生态与农村环境学报,2021,37(11):1413-1422.
- [33] 李美丽,尹礼昌,张园,等.基于MODIS EVI的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J].生态学报,2021,41(3):1138-1147.
- [34] Yin L, Dai E, Zheng D, et al. What drives the vegetation dynamics in the Hengduan Mountain region, southwest China: Climate change or human activity? [J]. Ecological Indicators, 2020,112:DOI:10.1016/j.ecolind, 2019.106013.
- [35] 郑朝菊,曾源,赵玉金,等.近15年中国西南地区植被覆盖度动态变化[J].国土资源遥感,2017,29(3):128-136.
- [36] Liu H, Zhang M, Lin Z, et al. Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in southwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018,256:10-21.
- [37] 刘海,黄跃飞,郑粮.气候与人类活动对丹江口水源区植被覆盖变化的影响[J].农业工程学报,2020,36(6):97-105.
- [38] 潘学鹏,吴喜芳,沈彦俊,等.三江并流河源区植被覆盖度对气候要素的响应[J].山地学报,2015,33(2):218-226.
- [39] Mokhtar A, He H, Alsafadi K, et al. Evapotranspiration as a response to climate variability and ecosystem changes in southwest, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2020,79(12):1-21.
- [40] 张曦月.西南地区不同植被类型对气候变化及季风系统的响应[D].北京:北京林业大学,2020.
- [41] Sun H, Wang X, Fan D, et al. Contrasting vegetation response to climate change between two monsoon regions in Southwest China: The roles of climate condition and vegetation height [J]. Science of the Total Environment, 2022, 802: DOI: 10.1016/j.scitotenv, 2021.149643.
- [42] 何敏,王鹤松,孙建新.基于植被生产力的西南地区生态系统脆弱性特征[J].应用生态学报,2019,30(2):429-438.
- [43] 易扬,胡昕利,史明昌,等.基于MODIS NDVI的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系[J].生态学报,2021,41(19):7796-7807.