

DOI: 10.5846/stxb201907101451

李美丽,尹礼昌,张园,苏旭坤,刘国华,王晓峰,奥勇,伍星.基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究.生态学报,2021,41(3):1138-1147.

Li M L, Yin L C, Zhang Y, Su X K, Liu G H, Wang X F, Au Y, Wu X. Spatio-temporal dynamics of fractional vegetation coverage based on MODIS-EVI and its driving factors in Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1138-1147.

基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究

李美丽^{1,2}, 尹礼昌^{1,2}, 张园^{1,3}, 苏旭坤¹, 刘国华^{1,3}, 王晓峰², 奥勇², 伍星^{1,3,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710064

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 基于 MODIS-EVI 和气象数据, 利用最大值合成法、像元二分模型、趋势分析和相关分析等方法, 探讨了西南地区 2001—2015 年植被覆盖时空变化特征及其对气候因子的响应, 并分析了温度和降水对植被覆盖时空变化的驱动作用。结果表明: (1) 2001—2015 年, 西南地区植被 EVI 以 0.1%/a 的变化率呈波动增加趋势, 但空间异质性显著, 呈现出从东南向西北逐渐递减的趋势; (2) 西南地区以高和极高植被覆盖度为主, 极低植被覆盖度区域约占研究区总面积的 8.6%, 植被覆盖度增加的区域集中在广西省北海-钦州、贵州省邵通-毕节-遵义、四川省广元-广安以及西藏那曲等地区, 植被覆盖度呈减少趋势区域主要集中在西藏拉萨-阿里地区和四川成都-阿坝州-甘孜州等地区; (3) 植被 EVI 与同期温度和降水相关性较好, 均以正相关为主。在 0.05 显著水平下, 受降水驱动的区域呈斑块状分布在西藏自治区和青海省交界处, 以及云南和广西部分地区, 约占研究区总面积的 3.4%; 受温度驱动的区域零星分布在各省、自治区, 约占研究区总面积的 1.6%; 受温度和降水共同驱动的区域约占研究区总面积的 7.2%, 主要分布在西藏自治区的阿里地区北部, 青海省的三江源地区以及四川和贵州两省交界处的小部分地区; 西南地区大部分区域的植被 EVI 指数变化表现为非气候因素驱动。

关键词: MODIS-EVI; 西南地区; 植被覆盖; 驱动因素; 时空动态

Spatio-temporal dynamics of fractional vegetation coverage based on MODIS-EVI and its driving factors in Southwest China

LI Meili^{1,2}, YIN Lichang^{1,2}, ZHANG Yuan^{1,3}, SU Xukun¹, LIU Guohua^{1,3}, WANG Xiaofeng², AU Yong², WU Xing^{1,3,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 School of Earth Science and Resources, Chang An University, Xi'an 710064, China

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

Abstract: Based on MODIS-EVI and meteorological data, methods of Maximum Value Composite (MVC), dimidiate pixel model, trend analysis, and correlation analysis were used to investigate the temporal and spatial changes of Fractional Vegetation Coverage (FVC) and to clarify driving factors on dynamic changes of enhanced vegetation index (EVI) from 2001 to 2015 in Southwest China. Our results showed that: (1) from 2001 to 2015, the EVI in Southwest China showed a

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502102); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0308); 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA20020402); 中国科学院青年创新促进会(2018056)

收稿日期: 2019-07-10; **网络出版日期:** 2020-12-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xingwu@rcees.ac.cn

volatility increasing trend with the change rate of 0.1%/a. However, the spatial heterogeneity of EVI dynamic was significant, showing a trend of gradually decreasing from southeast to northwest of the study area. (2) Southwest China was dominated by the high and extremely high FVC types, while the areas of extremely low FVC only accounted for about 8.6% of the study area. The areas with increased FVC were concentrated in Beihai-Qinzhou of Guangxi Autonomous Region, Shaotong-Bijie-Zunyi of Guizhou Province, Guangyuan-Guang'an of Sichuan Province and Naqu of Tibet Autonomous Region. The areas with decreased FVC were mainly located in the Lhasa-Ali of Tibet Autonomous Region and Chengdu-Abagazê of Sichuan Province. (3) The changes of the EVI had positive correlations with temperature and precipitation from 2001 to 2015. At a significant level of 0.05, the areas with EVI changes mainly driven by precipitation accounted for about 3.4% of the study area, which were distributed in patches at the junction of Qinghai Province and Tibet Autonomous region, as well as some parts of Yunnan and Guangxi Province. The areas with EVI changes mainly driven by temperature accounted for about 1.6% of the study area, which were distributed sporadically throughout Southwest China. Moreover, the areas with EVI changes mainly driven by both temperature and precipitation accounted for approximately 7.2% of the study area, which were distributed in the northern Ali area of Tibet Autonomous region, the Sanjiangyuan headwater area of Qinghai Province, and the junction of Sichuan and Guizhou Provinces. Therefore, the EVI dynamics were mainly driven by non-climate factors in most areas of Southwest China.

Key Words: MODIS-EVI; Southwest China; fractional vegetation coverage; driving factors; spatio-temporal dynamics

地表植被是陆地生态系统的重要组成部分,不仅是连接大气、土壤和水体等自然元素的“纽带”,也是其他生物赖以生存的基础^[1-2],显著影响着陆地生态系统的碳水循环和能量交换^[3],并在全球生态系统变化的研究中起着重要的“指示器”作用^[4-5]。随着全球气候变化和人类活动的不断加剧,地表植被的动态变化以及对变化环境的响应是生态学等领域重点关注的热点之一。植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage, FVC)是指植被(包括叶、茎、枝)在地面上垂直投影的面积占研究区总面积的百分比^[6],是监测地表植被生长状况的重要指标之一,能够直观反映地表植被的丰度,不仅为分析全球生态环境的演变提供了可靠的手段^[7],也可作为评估区域气候变化、土地沙漠化和区域生态安全等方面的重要参数^[8-9]。

归一化差值植被指数(Normalization Difference Vegetation Index, NDVI)和增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)是目前反映植被生长状况常用的两个植被指数^[10-12]。虽然 NDVI 已经被广泛使用,但是其本身存在一些缺陷,特别是针对大气噪声、土壤背景及饱和度等问题的处理上存在一定的误差^[11]。近年来,一些研究发现相比于 NDVI, EVI 在 NDVI 的基础上改进了算法和合成方法,进一步减少了大气、土壤背景以及像元异常值的影响,并解决了 NDVI 易饱和等问题^[13-16],使得 EVI 不仅能反映高植被覆盖区植被的生长状况^[13, 17-18],还能在低植被覆盖区对植被有更强的区分能力^[14, 19-21]。

我国西南地区植被覆盖景观连续性差、异质性高,山区石漠化和水土流失严重,地震和泥石流等地质灾害频繁,是我国典型的气候变化敏感区和生态环境脆弱区^[22]。为了有效遏制该地区生态环境退化,构建西南地区生态安全屏障,国家和地方政府实施了一系列生态恢复工程。植被覆盖的动态监测和评价是生态恢复工程治理成效的重要参考指标之一,但由于西南地区地形地貌复杂多样,人类活动强度的区域异质性显著,植被受地形等因子的影响较为突出,动态监测的难度较大^[2]。目前,该地区的植被变化研究主要集中在区域尺度的 NDVI 空间变异性^[2]、季节和年际变化与气候因子等关系的探讨上^[21, 23-25],而针对整个西南地区运用 EVI 在长时序上从稳定性等方面来分析植被覆盖时空分异特征的研究还较少^[26]。因此,基于 MODIS-EVI 和气象数据,利用最大值合成法、像元二分模型和趋势分析等方法探讨西南地区植被覆盖的时空演变规律,揭示植被覆盖变化的时空异质性以及关键驱动因素,以期西南地区植被覆盖监测与评估和生态环境恢复提供科学依据。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

本研究所指西南地区(21°08′—36°29′N, 87°22′—112°03′E), 主要包括贵州、广西、重庆、云南和四川五省(市、自治区)全境以及青海省南部和西藏东南部的部分县市, 总面积约 213.24 万 km²(图 1)。该地区地形地貌复杂, 地势西高东低, 横跨青藏高原东南部、横断山脉、若尔盖高原、四川盆地和广西丘陵等地貌, 并且也是我国喀斯特和冰川地貌分布最为广泛的地区^[26]。该地区气候类型以亚热带季风气候, 热带季风雨林气候和青藏高原独特的高原气候为主, 垂直气候差异显著, 年均气温在 0—24℃ 之间, 年降水量在 600—2300 mm 范围内, 由东南向西北递减^[27]。该地区复杂的地貌和气候分布特征形成了独特的植被分布格局以及丰富的生态系统类型和生物多样性^[25]。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 数据来源

MODIS-EVI 数据集来源于 NASA MODIS 陆地产品根据统计算法开发的 MODIS 数据, 即全球 250 m 分辨率 16 d 合成的植被指数产品, 数据的行列号为 h24v05, h25v05, h25v06, h26v05, h26v06, h27v05, h27v06, h28v06, 数据版本为 V006。本研究中所选取的数据为 2001 年 1 月至 2015 年 12 月的 EVI 数据, 每年 23 期, 共 345 期影像。气象数据来源于国家气象局信息中心的中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的西南地区及周边 242 个有效气象站点 2001—2015 年逐日平均气温和降水数据, 利用 Universal Kriging 法插值成 250 m 分辨率的栅格。

1.2.2 数据处理

利用 MRT(MODIS Reprojection Tool)对下载的 EVI 数据进行批量拼接和重采样, 转化为 WGS-84_UTM-zone-48 坐标下 tiff 格式的影像。然后以西南地区边界为掩膜进行裁剪, 生成西南地区 EVI 影像。综合植被覆盖时间及空间的变化特征将 15 年的影像以 5 年为间隔, 分为 2001—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年 3 期数据, 基于 MATLAB 软件采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)获取逐年 EVI 的最大值。采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行气象数据格式的转换, 应用 MATLAB 软件进行重采样和影像的裁剪, 应用 Python 语言在 ArcGIS 10.2.2 软件中定义投影并进行插值。

2 研究方法

2.1 最大值合成法

最大值合成法(MVC)是目前国际上通用的最大化合成法。用于将月数据进一步消除云、大气、太阳高度角的部分干扰^[28-30], 基于最大值合成法获取逐年 EVI 最大值, 以使 EVI 更真实的反应地表植被覆盖状况。计算公式为:

$$MEVI_{ij} = \text{MAX}(EVI_{ij}) \quad (1)$$

式中, i 为年序号, 取值范围是 1—15; j 是月序号, 取值范围为 1—12, EVI_{ij} 为第 i 年第 j 月的最大 EVI 值。

2.2 像元二分模型

像元二分模型是估算植被覆盖度常用的模型之一, 其理论假设是任意像元所包含的光谱信息均为土壤和植被的两部分, 即 EVI 是由土壤的信息 EVI_{soil} 和植被信息 EVI_{veg} 两部分组成, 计算公式为:

$$EVI = EVI_{\text{soil}} + EVI_{\text{veg}} \quad (2)$$

式中, EVI_{soil} 是指纯土壤的像元值; EVI_{veg} 则是指纯植被的像元值。该模型在一定程度上减少大气、土壤背景等的影响。

基于像元逐年计算 EVI 年均值, 其计算公式:

$$\overline{\text{EVI}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{EVI}}{n} \quad (3)$$

式中, n 为年序号, 从 2001—2015 年; $\overline{\text{EVI}}$ 为 2001—2015 年 EVI 年均值。

利用 EVI 计算植被覆盖度, 公式如下:

$$\text{FVC} = \frac{\text{EVI} - \text{EVI}_{\text{soil}}}{\text{EVI}_{\text{veg}} - \text{EVI}_{\text{soil}}} \quad (4)$$

EVI_{soil} 理论上多数情况下应该约为零, 但在不同地表环境, EVI_{soil} 变化范围一般为 -0.1—0.2。同理, 随着植被类型和季节等因素的变化, EVI_{veg} 也会随之改变。因此, 采用某一固定的 EVI_{soil} 和 EVI_{veg} 值, 显然是不准确的。本研究根据西南地区的特点和前人的研究^[31-34], 选取 0.5% 的置信度, 即累积百分比 0.5% 的为纯土壤像元, 99.5% 的为纯植被像元, 其对应的 EVI 值分别为 EVI_{soil} 和 EVI_{veg} , 并将植被覆盖度分为极低、低、中、高、极高 5 个等级 (表 1)。

表 1 2001—2015 年西南地区不同植被覆盖度分类等级及面积比例

Table 1 Classification and the percentage of area for different FVC levels in Southwest China from 2001 to 2015

等级 Level	极低 Extremely low	低 Low	中 Medium	高 High	极高 Extremely high
植被覆盖度 Fractional Vegetation Coverage (FVC)	<0.1	0.1—0.3	0.3—0.5	0.5—0.7	>0.7
面积比例 Percentage of area/%	8.6	15.4	11.2	36.1	28.7

2.3 趋势分析法

利用一元线性回归分析法逐像元计算时序范围内的空间分异特性来反映植被的整体空间变化规律^[22]。计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{\sum_{i=1}^n i \times \text{FVC}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{FVC}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

式中, n 为年序号, 2001—2015 年; FVC_i 为第 i 年的年均植被覆盖度值, θ_{slope} 是植被覆盖度变化的回归斜率, 反映了近 15 年西南地区年植被覆盖度的变化趋势及变化幅度。 $\theta_{\text{slope}} = 0$ 表示植被覆盖无明显变化, $\theta_{\text{slope}} > 0$ 表示植被覆盖度呈增加趋势, 即植被覆盖得到了改善, $\theta_{\text{slope}} < 0$ 表示植被覆盖度呈减少的趋势, 即植被覆盖发生了退化。

2.4 相关分析

2.4.1 偏相关分析

采用偏相关分析法对逐个像元研究近 15 年西南地区植被 EVI 与气候因素 (年均气温、年均降水量) 的关系, 计算出偏相关系数, 利用相关系数的大小来判断两者之间的密切程度, 分析讨论不同气候因子对植被覆盖的影响程度。其计算公式为:

$$r_{x,yz} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中, $r_{x,yz}$ 为先把变量固定, 求变量 z 与 y 的偏相关系数, r_{xy} , r_{xz} , r_{yz} 分别代表 x 与 y 变量、 x 与 z 变量、 y 与 z 变量的相关系数。采用 T 检验法进行显著性检验。

2.4.2 复相关分析

通过讨论两个气候因素同时对植被指数影响的方法来分析气候因素与植被指数的相关性。设 x 为因变量, y, z 为自变量, 将 x 与 y, z 间的复相关系数记为 r_{xyz} , 其计算公式为:

$$r_{xyz} = \sqrt{1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{yz}^2)} \quad (7)$$

式中, r_{xyz} 表示因变量 x 和自变量 y, z 的复相关系数; r_{xy} 为变量 x 和 y 相关系数, r_{yz} 为固定变量 y 之后变量 x 和 z 的偏相关系数。

复相关系数的显著性检验, 采用 F 检验法。其统计量计算公式为:

$$F = \frac{r_{xyz}^2}{1 - r_{xyz}^2} \times \frac{n - m - 1}{m} \quad (8)$$

式中, r_{xyz} 为复相关系数, n 为样本数, m 为自变量个数。

3 结果与分析

3.1 西南地区植被 EVI 分布和变化特征

基于西南地区 2001—2015 年 MODIS EVI 年均值分析了该地区植被指数的年际变化趋势, 结果表明西南地区近 15 年的 EVI 呈现出波动增长的趋势, 其线性增长速率约为 0.1%/a。2013 年达到植被 EVI 的最高值 (0.449), 而最低值 (0.424) 则出现在 2004 年。根据西南地区 2001—2015 年植被 EVI 的多年平均空间分布格局, 该地区 EVI 年均值介于 -0.26—0.85 之间, 且植被覆盖的空间异质性显著, 呈现出从东南向西北逐渐递减的趋势 (图 1)。

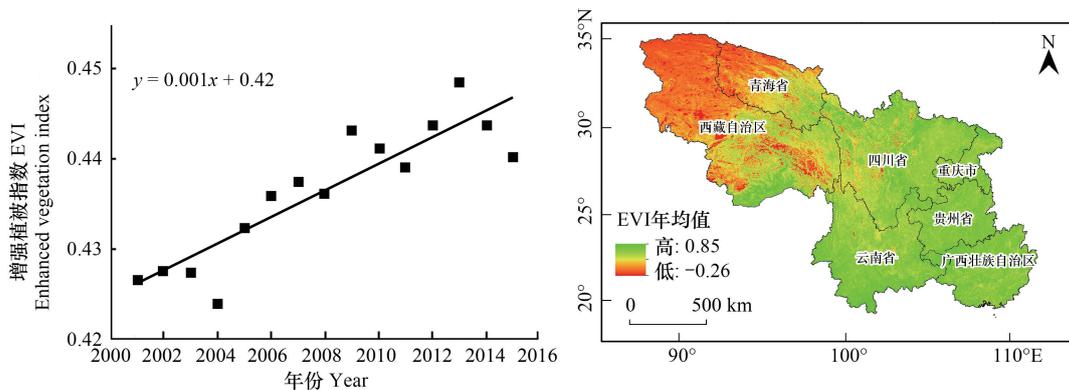


图 1 2001—2015 年西南地区植被 EVI 年均值变化趋势和空间分布

Fig.1 Temporal variation and spatial distribution of annual mean EVI values in Southwest China from 2001 to 2015

3.2 西南地区植被覆盖时空变化特征

西南地区植被覆盖度的空间分布以高植被覆盖度为主, 约占研究区总面积的 36.1%, 极高植被覆盖度次之, 约占研究区总面积的 28.7%, 低植被覆盖区域面积约为研究区总面积的 15.4% (图 2)。极低植被覆盖主要分布在西藏自治区的那曲市-阿里地区等地和青海省治多县-曲麻莱县等区域, 约为研究区总面积的 8.6%。

西南地区植被覆盖得到改善的区域主要分布于广西省北海市-钦州市、贵州省昭通-毕节-遵义市的西北部、四川省广元-广安小部分地区、西藏自治区那曲市、阿里地区的北部、青海省小部分地区以及重庆市。这些地区自 2000 年以来加强了生态环境保护等方面的措施, 特别是那曲市、阿里地区、及青海省的部分高寒草原地区, 过度放牧得到了有效的控制。而且这些地区人口

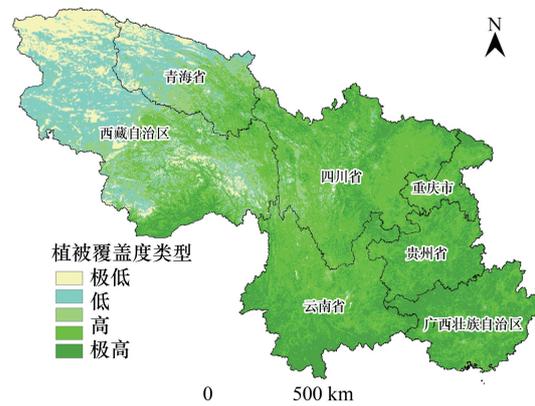


图 2 2001—2015 年西南地区不同植被覆盖度类型空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of different FVC levels in Southwest China from 2001 to 2015

FVC: 植被覆盖度 Fractional vegetation coverage

密度较低,人为干扰较少,自然生态系统功能得到较好地保护,从而使得植被覆盖明显改善。西南地区植被覆盖退化的区域主要集中在西藏自治区的拉萨市-阿里地区、四川省的成都-阿坝藏族羌族-甘孜藏族自治州和云南省的昆明市-玉溪市等地区(图 3)。植被覆盖退化的地区大多数为省会城市或者旅游业发达的地区,这可能主要是由于这些地区人口快速增长和建筑用地扩张等人为干扰因素显著增加,从而导致了植被覆盖度的显著下降。

与 2001—2005 年相比,西南地区 2006—2010 年植被覆盖改善明显,植被覆盖度改善的面积约占研究区总面积的 6.8%,植被覆盖退化区域的面积有所减少。然而,在 2011—2015 年间,西南地区植被覆盖退化区域的面积有一定程度增加(图 3)。由表 2 可知,2001—2015 年西南地区植被覆盖出现显著退化的面积约占研究区总面积的 7.8%左右,而植被覆盖呈现显著改善的面积则为研究区总面积的 10.2%。

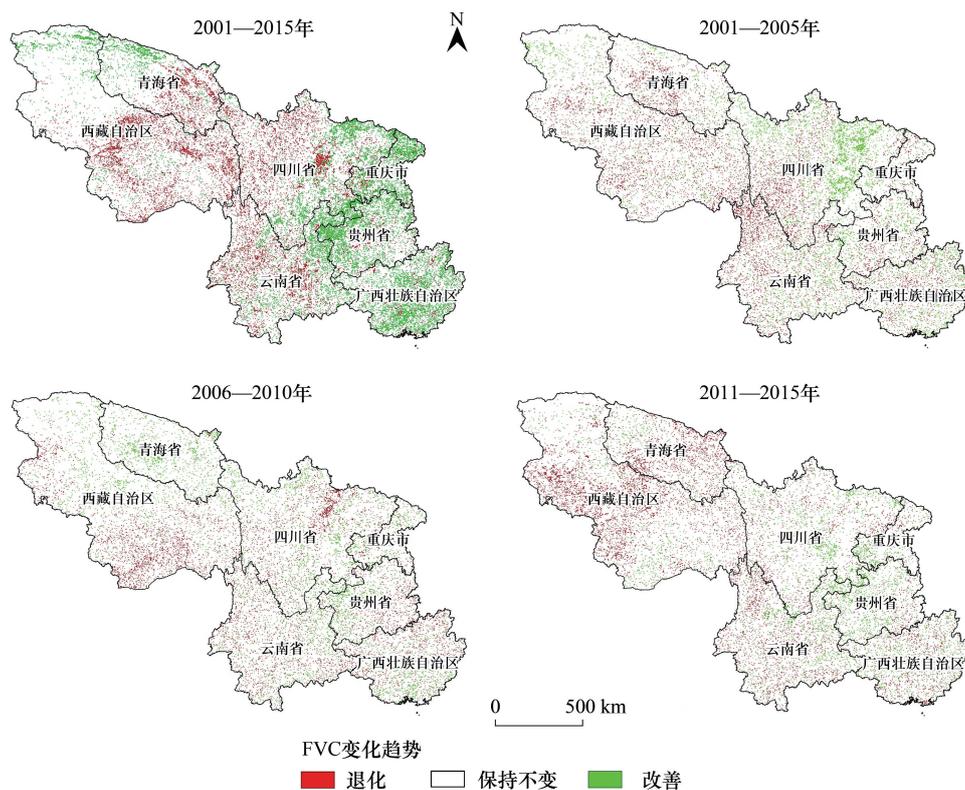


图 3 西南地区不同时期植被覆盖变化趋势图

Fig.3 Trends of FVC change during different study periods in Southwest China

表 2 西南地区不同时期植被覆盖度变化面积比例/%

Table 2 The percentage of area for different FVC trends during different study periods in Southwest China

变化趋势 Trend	时期 Period			
	2001—2005	2006—2010	2011—2015	2001—2015
退化 Degraded	5.8	5.6	6.1	7.8
保持不变 Without change	87.8	87.6	88.1	82.0
改善 Improved	6.4	6.8	5.8	10.2

3.3 西南地区植被 EVI 与气候因子相关性

西南地区年均气温在 2001—2015 年间总体呈现波动增加的趋势,升温速率约为 $0.02^{\circ}\text{C}/\text{a}$,而年降水量则呈现波动减小的趋势,减少速率约为 $-1.34\text{ mm}/\text{a}$ (图 4)。由此可见,西南地区的气候在研究期间呈现一定程度的暖干化趋势。在 2001—2015 年间,西南地区的多年平均气温和平均降水量分别为 7.58°C 和 877.64 mm 。

整个研究区内年降水量的空间异质性显著,总体表现出从东南向西北逐渐递减的特点。

西南地区植被 EVI 与年均气温偏相关分析的结果表明,两者的偏相关系数介于-0.94—0.99 之间,显著正相关和负相关的区域分别占整个研究区面积的 31.2% 和 23.7%,整体以正相关为主。偏相关系数高值集中分布在四川省的巴中-南充-遂宁-眉山一带,四川省、贵州省和重庆市三地交界处以及青海省的三江源地区。虽然研究区植被 EVI 与年均降水量的偏相关也以正相关为主,但在空间上呈现不均匀分布的特征(图 5)。植被 EVI 与降水偏相关系数介于-0.93—0.96 之间,显著正相关和负相关的区域分别占整个研究区面积的22.3% 和 14.8%,西藏自治区阿里地区北部和青海省中部地区植被 EVI 与降水的偏相关系数最高。

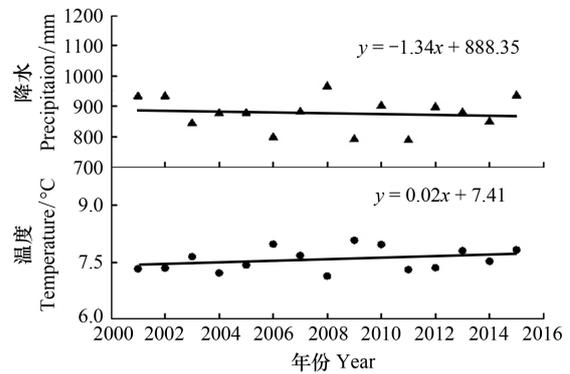


图 4 西南地区 2001—2015 年年均降水量和年均气温变化趋势
Fig.4 Trends of annual mean temperature and precipitation in Southwest China from 2001 to 2015

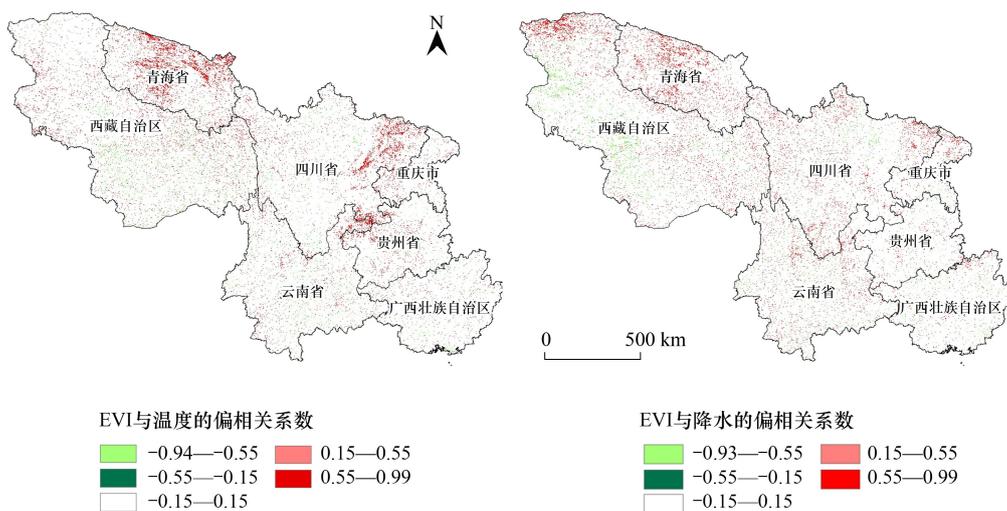


图 5 2001—2015 年西南地区年均植被 EVI 与年均降水量和年均气温的偏相关系数空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of partial correlation coefficient between annual mean EVI and temperature and precipitation in Southwest China from 2001 to 2015

3.4 西南地区植被 EVI 变化的驱动因素分析

气候因子是影响区域植被分布和生长的重要环境因素,其中以气温和降水的影响最为显著^[28]。根据西南地区植被年均 EVI 与年均气温和降水量的复相关分析可知,植被 EVI 与温度和降水的复相关系数在 0—0.97 之间,复相关系数较高的区域主要分布在西藏自治区的那曲市、阿里地区北部,青海省的三江源地区以及四川省的达州-巴中-广安市一带,而复相关系数较低的区域则零星分布在西藏自治区的中部和南部等地区(图 6)。

为了进一步揭示气候因子对西南地区植被覆盖时空变化的驱动作用,本文参考多数研究者关于气候要素对植被定量因子变化的驱动分区方法^[28, 34],并结合西南地区的气候背景和特点,对研究区的植被 EVI 变化进行驱动因素分析(表 3)。结果表明,西南地区植被 EVI 受气候因素驱动的区域约为研究区总面积的 12.2% (图 6)。其中,受温度和降水共同驱动的区域主要分布在西藏自治区的阿里地区北部,青海省三江源地区以及四川和贵州两省交界处的部分地区,约占整个研究区面积的 7.2%。这些地区冬季干冷漫长,而夏季温凉多

雨,因此植被的生长受到温度和降水的共同驱动。西南地区植被 EVI 主要受降水驱动的地区呈斑块状分布在西藏自治区的西北部以及青海省交界处,约占整个研究区面积的 3.4%。这些地区基本都位于青藏高原,由于光照资源较为丰富但降水量较少,植被生长对降水的反应较其他地区更为敏感。此外,西南地区植被 EVI 主要受温度驱动的区域零散分布在整个研究区内,分布特征不明显,其面积约占研究区面积的 1.6%。然而,从整体来看西南地区大部分区域的植被 EVI 变化表现为非气候因素驱动。

表 3 植被 EVI 变化驱动因素分类依据

Table 3 Classification basis of driving factors for dynamic change of EVI

驱动因素类型 Type of driving factor	分类依据 Classification basis		
	R_{EVI-T}	R_{EVI-P}	$R_{EVI-T-P}$
温度和降水共同驱动 Driven by both temperature and precipitation	$t \leq t_{0.05}$	$t \leq t_{0.05}$	$F \geq F_{0.05}$
降水驱动 Driven by precipitation	$t \geq t_{0.05}$		$F \geq F_{0.05}$
温度驱动 Driven by temperature		$t \geq t_{0.05}$	$F \geq F_{0.05}$
非气候因素驱动 Driven by non-climate factors			$F \geq F_{0.05}$

R_{EVI-T} : EVI 与温度的偏相关系数; R_{EVI-P} : EVI 与降水的偏相关系数; $R_{EVI-T-P}$: EVI 与温度和降水的复相关系数; $t_{0.05}$: t 检验的 0.05 显著性水平; $F_{0.05}$: F 检验的 0.05 显著性水平

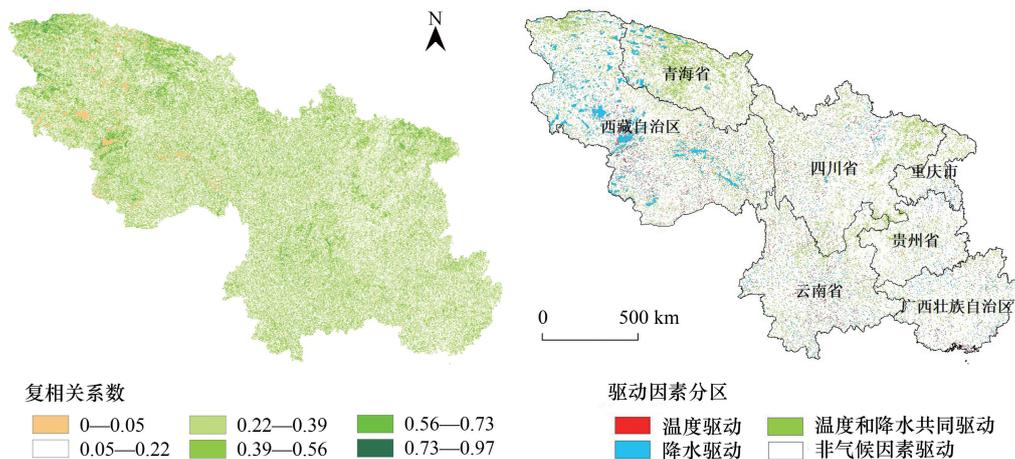


图 6 2001—2015 年西南地区年均植被 EVI 与温度-降水的复相关系数和驱动因素分区

Fig.6 The spatial distribution of multiple correlation between EVI and air temperature-precipitation and EVI driving factors in Southwest China from 2001 to 2015

4 结论与讨论

本文基于 2001—2015 年 MODIS-EVI 遥感数据集分析了西南地区近 15 年植被覆盖和 EVI 的时空变化特征,并结合西南地区 242 个气象站点的气温和降水数据,开展了西南地区植被 EVI 对气候变化的响应及驱动因素研究,得出以下结论:

(1)从时间动态来看,西南地区 2001—2015 年植被 EVI 整体呈现波动增长的趋势,其线性增长速率约为 0.1%/a。因此,西南地区的植被覆盖呈稳中向好趋势,显著改善的面积大于退化面积,这与郑朝菊等^[26]在西南地区的研究结果基本一致。西南地区生态系统复杂多样,是我国森林和水资源等自然资源最为丰富的地区之一,也是我国长江和珠江等诸多河流的发源地,是我国重要的生态屏障区^[35]。因此,在西南地区长期实施的天然林保护、退耕还林、长防林建设、生物多样性保护和退牧还草等生态恢复工程,有效地推进了该地区的生态屏障建设,使得三江源等局部地区的植被明显改善^[36-37],这可能是西南地区植被 EVI 整体呈现波动增长

趋势的主要原因之一。然而,由于西南地区兼跨我国地势第一和第二阶梯,地形地貌类型复杂,是我国生态极为敏感和脆弱的区域,也是我国少数民族和贫困人口集中分布的区域。随着社会经济发展和人类活动范围与强度的不断增加,西南地区的石漠化、水土流失等一系列生态问题也日益严重,从而造成局部地区的植被覆盖出现一定程度的退化^[26]。另外,西南地区近 15 年来自然灾害的频繁发生,也在一定程度上影响着植被覆盖的变化^[23]。

(2)从空间分布特征看,西南地区植被覆盖空间异质性显著,呈现出从东南向西北逐渐递减的趋势。虽然西南地区植被覆盖度的空间分布以高和极高植被覆盖度类型为主,但这些类型主要分布在云南省西双版纳傣族自治州-红河哈尼族彝族自治州、广西壮族自治区的百色-河池-桂林、贵州省的大部分地区及四川省的乐山-宜宾等地区。这些地区大部分都是常年雨水充沛,阳光充足,气候适宜,植被生长茂盛,特别是西双版纳和桂林等地区,森林覆盖率达到 70% 以上。而极低植被覆盖度类型主要分布在青海省和西藏自治区的西北部区,这些地区年均气温较低,降水量较少,自然环境相对其他地区恶劣。而且青海省和西藏自治区是我国重要的牧区,长期的过度放牧也会导致植被退化和水土流失等生态问题。另外,由于西南地区近几十年来气候变化呈现一定程度的暖干化趋势^[27],对植被覆盖度较低区域的植被生长和恢复可能产生一些不利的影响,从而增加这些地区植被覆盖出现退化的风险^[26, 38]。

(3)通过西南地区植被 EVI 与年均气温和年均降水量的相关分析可知,植被 EVI 与年均气温和年均降水量均以正相关为主,并且植被 EVI 与年均气温显著相关的区域面积稍大于与年均降水量呈显著相关的面积。何奕萱等^[28]在红河流域的研究结果表明,生长季植被 EVI 与同期气温相关性较好,但与降水量呈现一定的滞后性。张勃等^[24]和丁瑞等^[39]在西南地区的研究也表明,温度对该地区植被覆盖变化的影响稍大于降水等其他因素。这主要是由于西南地区河流水系发达,受季风环流和地形等因素的共同影响,在云南、广西和贵州等大部分区域降水量相对较为丰富,植被生长期水分充足,而热量差异较为明显^[24],因此在这些地区植被 EVI 变化对温度变化的响应更为敏感。然而,在西藏自治区西北部等降水量较少的干旱半干旱地区,植被 EVI 变化受降水量的影响则更明显。此外,西南地区植被 EVI 变化的驱动因素分析表明,虽然气温和降水对植被 EVI 变化有显著的驱动作用,但在 0.05 置信水平检验下,西南地区大部分区域的植被 EVI 变化表现为非气候因素驱动。这与王强等^[40]在横断山区和荣欣等^[41]在川西高原的研究结果基本一致。近几十年来,西南地区的人口迅速增长,人类活动的范围与强度也不断增加,对该地区的生态环境和植被生长产生了一定的负面影响。为了遏制西南地区生态系统逐渐退化的趋势,自 20 世纪 70 年代以来,在该地区实施了多项重大生态恢复工程,正在逐步引导人口分布和活动与当地的资源环境承载力协调发展。因此,在人类活动对植被覆盖造成的正面和负面影响相互叠加的背景下,西南地区植被生长对气温和降水等气候因素的响应程度和速度可能会受到一定程度的影响。

参考文献 (References):

- [1] Cui L L, Shi J. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in eastern China. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 163-176.
- [2] 高江波, 吴绍洪, 蔡运龙. 区域植被覆盖的多尺度空间变异性——以贵州喀斯特高原为例. *地理研究*, 2013, 32(12): 2179-2188.
- [3] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [4] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 599-600: 967-980.
- [5] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.
- [6] 张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 85-93.
- [7] 甘春英, 王兮之, 李保生, 梁钊雄, 李志文, 温小浩. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析. *地理科学*, 2011, 31(8): 1019-1024.
- [8] Pabi O. Understanding land-use/cover change process for land and environmental resources use management policy in Ghana. *GeoJournal*, 2007, 68

- (4): 369-383.
- [9] Moreau S, Bosseno R, Gu X F, Baret F. Assessing the biomass dynamics of Andean *bofedal* and *titora* high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 516-529.
- [10] Dutta D, Das P K, Paul S, Sharma J R, Dadhwal V K. Assessment of ecological disturbance in the mangrove forest of Sundarbans caused by cyclones using MODIS time-series data (2001-2011). *Natural Hazards*, 2015, 79(2): 775-790.
- [11] 陈燕丽, 罗永明, 莫伟华, 莫建飞, 黄永璘, 丁美花. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1802-1812.
- [12] Otto M, Höpfer C, Curio J, Maussion F, Scherer D. Assessing vegetation response to precipitation in northwest Morocco during the last decade: an application of MODIS NDVI and high resolution reanalysis data. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(1/2): 23-41.
- [13] 王正兴, 刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987.
- [14] 王正兴, 刘闯, 陈文波, 林昕. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2006, 31(5): 407-410, 427-427.
- [15] 程乾, 黄敬峰, 王人潮. MODIS 和 NOAA/AVHRR 植被指数差异初步分析. *科技通报*, 2005, 21(2): 205-209.
- [16] 李红军, 郑力, 雷玉平, 李春强, 周戡. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 26-32.
- [17] 叶琦, 赵萍, 孙静. 基于 MODIS/NDVI 与 EVI 的皖江流域植被覆盖比较分析. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(3): 361-368.
- [18] Qiu B W, Zeng C Y, Tang Z H, Chen C C. Characterizing spatiotemporal non-stationarity in vegetation dynamics in China using MODIS EVI dataset. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(11): 9019-9035.
- [19] 李文梅, 覃志豪, 李文娟, 杨强. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 的比较分析. *遥感信息*, 2010, (6): 73-78.
- [20] 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 汪潇. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 167-172.
- [21] 朱林富, 谢世友, 杨华, 马明国. 基于 MODIS-EVI 的 2000—2015 年重庆植被覆盖季节变化. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(12): 2146-2155.
- [22] 王东. 西南地区植被覆盖变化及对不同时间尺度气候特征的响应分析[D]. 西安: 西北师范大学, 2014.
- [23] 周金霖, 马明国, 肖青, 闻建光. 西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系. *遥感技术与应用*, 2017, 32(5): 966-972.
- [24] 张勃, 王东, 王桂钢, 马琼, 张国斌, 季定民. 西南地区近 14a 植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(6): 956-964.
- [25] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 高文文, 赵旦, 吴炳方. 20 世纪 90 年代以来中国西南地区土地覆被变化. *生态学报*, 2016, 36(23): 7858-7869.
- [26] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 赵旦, 吴炳方. 近 15 年中国西南地区植被覆盖度动态变化. *国土资源遥感*, 2017, 29(3): 128-136.
- [27] 董谢琼, 段旭. 西南地区降水量的气候特征及变化趋势. *气象科学*, 1998, 18(3): 239-247.
- [28] 何奕萱, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 闫利, 郑飞鸽. 红河流域“通道-阻隔”作用下 2000—2014 年植被 EVI 变化趋势与驱动力. *生态学报*, 2018, 38(6): 2056-2064.
- [29] Li H, Renssen H, Roche D M. Global vegetation distribution driving factors in two Dynamic Global Vegetation Models of contrasting complexities. *Global and Planetary Change*, 2019, 180: 51-65.
- [30] Hope A S, Boynton W L, Stow D A, Douglas D C. Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(17): 3413-3425.
- [31] 马骏, 马朋, 李昌晓, 张雯. 2000—2011 年三峡库区重庆段植被覆盖景观格局变化. *西南大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(12): 141-147.
- [32] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 杨艳昭. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1425-1435.
- [33] 赵丽苹. 基于 MODIS 数据的喀斯特地区石漠化时空演变特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [34] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 716-720.
- [35] 刘国华. 西南生态安全格局形成机制及演变机理. *生态学报*, 2016, 36(22): 7088-7091.
- [36] 朱林富, 谢世友, 杨华, 马明国. 基于 MODIS-EVI 的重庆植被覆盖时空分异特征研究. *生态学报*, 2018, 38(19): 6992-7002.
- [37] Zhang L, Guo H D, Ji L, Lei L P, Wang C Z, Yan D M, Li B, Li J. Vegetation greenness trend (2000 to 2009) and the climate controls in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073572.
- [38] 郭冻, 杜世宏, 薛达元, 蔡亮. 长江源区土地覆盖变化与草地退化格局的时空分异. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1219-1225.
- [39] 丁瑞, 王兆礼, 陈晓宏. 西南河流域区归一化植被指数时空动态变化及其与气候因子的关系. *水电能源科学*, 2018, 36(2): 15-19.
- [40] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [41] 荣欣, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 覃艺, 夏杰. 2000—2015 年川西高原植被 EVI 海拔梯度变化及其对气候变化的响应. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(12): 3014-3028.