

2001—2020 年川西高原植被 EVI 时空变化特征及气候因子驱动力分析

钟鼎杰^{1,2}, 杨存建^{1,2}

(1.四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室,
成都 610068; 2.四川师范大学 地理与资源科学学院, 成都 610068)

摘 要:为了了解川西高原植被 EVI 的时空变化特征,以 MODIS-EVI 数据、DEM 数据和气象格点数据为基础,基于相关性分析、趋势分析和最大值合成等方法,探讨了川西高原 2001—2020 年植被 EVI 时空变化特征及不同海拔高程下植被 EVI 分布和变化规律。在此基础上,对研究区植被 EVI 时空变化的气候因子驱动力进行了分析研究。结果表明:(1) 川西高原 20 年间植被 EVI 均值介于 0~0.88,空间分布具有明显的地域分异。(2) 近 20 a 来,川西高原植被 EVI 整体增长趋势,速率为 1.0%/10 a,植被 EVI 的相对年际变化率介于-4.26%~13.58%。有 13.09%的地区植被 EVI 变化通过显著性检验,其中约 10.18%的区域植被 EVI 呈增加趋势。(3) 川西高原近 20 a 不同海拔高程下植被 EVI 都呈波动增加趋势,变化速率以及增加趋势的显著性都有明显的差异。在<2 500 m,2 500~3 000 m,4 500~5 000 m 3 个海拔高程区间内,植被 EVI 增加趋势显著。(4) 川西高原植被 EVI 与气温和降水呈正向相关的区域面积占比分别为 56.42%,64.09%。在 0.05 显著性水平下,川西高原植被 EVI 变化受气候因子驱动的地区约占研究区总面积的 21.87%。整体而言,近 20 a 来川西高原植被 EVI 呈增加趋势,且具有明显空间差异,EVI 与气温和降水整体呈正向相关。川西高原大部分地区的植被 EVI 变化受非气候因子驱动。

关键词:MODIS-EVI; 趋势分析; 相关性分析; 川西高原; 气候变化

中图分类号:Q948; TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0223-08

Spatiotemporal Variation Characteristics of Vegetation EVI and Driving Forces of Climate Factors in Western Sichuan Plateau from 2001 to 2020

ZHONG Dingjie^{1,2}, YANG Cunjian^{1,2}

(1.Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest,
Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China;

2.Faculty of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

Abstract: In order to understand the temporal and spatial variation characteristics of vegetation EVI in western Sichuan Plateau, based on MODIS-EVI, DEM and meteorological grid data, the temporal and spatial variation characteristics of vegetation EVI and the distribution and variation processes of vegetation EVI at different altitudes in western Sichuan Plateau from 2001 to 2020 were discussed by using the methods of maximum synthesis, trend analysis and correlation analysis. On this basis, the response of vegetation EVI change to climate change in western Sichuan Plateau was studied. The results showed that: (1) the average EVI of vegetation in the western Sichuan Plateau ranged from 0 to 0.88 in 20 years, and the spatial distribution showed obvious regional differentiation; (2) in the past 20 years, vegetation EVI increased at a rate of 1.0%/decade, and the relative interannual variation rate of vegetation EVI ranged from -4.26 to 13.58; in 13.09% of the areas, vegetation EVI changed through significant test, and about 10.18% of the regional vegetation

收稿日期:2021-06-04

修回日期:2021-06-30

资助项目:国家重点研发计划(2018YFB0505303);四川省科技厅重点研发项目(2020YFG0146)

第一作者:钟鼎杰(1996—),男,四川成都人,硕士,主要从事资源环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail:zhongdingjie@126.com

通信作者:杨存建(1967—),男,四川成都人,博士,教授,主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail:yangcj2008@126.com

EVI showed an increasing trend; (3) in the past 20 years, vegetation EVI at different altitudes in western Sichuan Plateau showed a fluctuating increasing trend, and the change rate and the significance of the increasing trend were significantly different; in the three altitudes of $<2\,500\text{ m}$, $2\,500\sim3\,000\text{ m}$ and $4\,500\sim5\,000\text{ m}$, the vegetation EVI increased significantly; (4) the proportions of EVI positively correlated with temperature and precipitation were 56.4% and 64.1%, respectively; at 0.05 significance level, about 21.87% of vegetation EVI changes in western Sichuan Plateau were driven by climate factors. Overall, the vegetation EVI in western Sichuan Plateau had been increasing in the past 20 years, and there was obvious spatial difference. EVI was positively correlated with temperature and precipitation. The variation of vegetation EVI in western Sichuan Plateau was driven by non-climatic factors.

Keywords: MODIS-EVI; trend analysis; correlation analysis; western Sichuan Plateau; climate change

植被作为地球生态系统的基础构成,在地表物质和能量的转换过程中充当重要角色^[1],是维系地球生态系统和人类生存环境不可或缺的条件^[2],在地球生态系统研究中充当“指示器”的作用。近年来,在全球气候变化以及社会经济快速发展的背景下,生态环境问题日益突出,植被覆盖动态变化监测及其对气候变化的响应成为目前全球变化的主流研究方向^[3]。归一化差值植被指数(NDVI)和增强植被指数(EVI)是目前最常用的两种植被指数,它们都能反映植被生长变化情况^[4]。NDVI 目前应用较为广泛,但其在植被变化的研究中存在一定问题。植被 EVI 对 NDVI 的算法进行了改进,改善了 NDVI 大气噪声去除不彻底、低植被覆盖区易受土壤背景的干扰、高植被覆盖区的易饱和现象、“最大值合成法”难以选取最佳像元等问题^[5-6]。使得 EVI 不仅能对低植被覆盖区的植被进行很好的区分^[7],还能对高植被覆盖区植被的生长变化情况进行监测^[8]。

近年来,随着全球生态环境问题的加剧,国内外众多学者基于 MODIS-EVI 数据对不同地区的植被覆盖时空变化进行了研究。Setiawan 等^[9]基于 2001—2007 年 MODIS-EVI 数据对印度尼西亚爪哇岛植被覆盖变化进行了研究,得出 MODIS 数据的高时间分辨率对于研究植被覆盖变化及未来变化趋势预测都具有显著优势的结论。朱林富等^[10]对重庆市的植被覆盖度时空分布特征进行了分析,得出不同植被覆盖类型存在较大的季节和空间分布差异的结论。李美丽等^[11]对西南地区近 15 a 植被覆盖和 EVI 时空变化特征进行分析,得出 2000—2015 年西南地区植被 EVI 整体呈波动增加趋势的结论。

川西高原位于青藏高原东南缘,由第一台阶向第二台阶的过渡地带,区域内海拔高差大、地形复杂,气候区域差异明显。同时,川西高原是长江、黄河上游的水源涵养地^[12],生态环境脆弱、气候变化敏感

性高^[13]。在全球气候变化和区域气候变化的背景下,植被变化引起的自然、社会效应,将对川西高原生态、环境安全和社会经济产生巨大影响。在此背景下,亟需对该地区植被覆盖时空变化进行研究。目前,已有学者在该地区开展了相关研究。李元春等^[14]基于 NDVI 数据对甘南和川西北地区草地植被变化趋势及驱动因素进行研究,得出 2000—2018 年生长期 NDVI 呈上升趋势,气温、降水对研究区 NDVI 变化主要呈正向驱动的结论。谢慧君等^[15]通过 MOD09A1 数据对川西高原植被 NDVI 进行反演,得出川西高原整体 NDVI 以不显著改善趋势为主的结论。郑勇等^[16]基于 2000—2017 年川西高原 MODIS-NDVI 数据,对植被覆盖度的变化及其与气候因子的关系进行研究,得出川西高原植被覆盖度整体上呈小幅度波动增加的趋势的结论。以上学者的研究大多采用 NDVI 数据,且并未结合地形因子来研究植被的垂直分布特征,存在一定的局限性。因此,本文基于 MODIS-EVI 数据集、DEM 数据,对川西高原 2001—2020 年植被 EVI 时空变化特征进行分析,并探究不同海拔高程下植被 EVI 的分布和变化特征。以期对川西高原植被覆盖监测与评估,以及区域生态环境保护研究提供科学依据。

1 研究区概况

川西高原位于四川盆地以西,地处青藏高原东南缘,介于 $97^{\circ}21'\sim104^{\circ}26'E$, $27^{\circ}58'\sim34^{\circ}19'N$,面积约 $2.37\times10^5\text{ km}^2$,主要包括川西北高原和川西山。研究区内地形起伏大,海拔介于 $770\sim7\,556\text{ m}$,平均海拔 $4\,090\text{ m}$,南北走向的高山与深切河谷平行延伸。受地形影响,川西高原气候区域差异明显。整体来看,川西高原光照充足,干湿季分明,年均温 $4\sim12^{\circ}\text{C}$,年降水量 $500\sim900\text{ mm}$ ^[17]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据与预处理

本研究使用的 MODIS-EVI 数据来源于美国航空航天局(NASA)提供的陆地植被产品 MOD13Q1 数据集。时间尺度为 2001—2020 年,空间分辨率为 250 m,共 922 景影像。通过 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具对数据进行预处理,并采用最大值合成法(MVC)计算川西高原逐月 EVI 值及逐年生长季 EVI 值。

气象格点数据采用 ERA5-Land 再分析数据,来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF),空间分辨率为 0.1°。选取 2001—2020 年每月气温、降水数据,并将其气空间分辨率插值到 250 m。该数据集在青藏高原的可信度已得到验证^[18],并已被部分国内学者应用于冰雪融化时间、地表温度等研究。

地形数据采用 NASA 发布的 ASTER GDEM V2 版数据,空间分辨率为 30 m。为保证试验结果的准确性,将所有数据空间分辨率重采样至 250 m,并转换到统一的投影坐标系(WGS-84-UTM-zone-47)下。本文考虑到 5 000 m 以上区域为山岳冰川和永久性积雪分布区,不参与研究,通过 DEM 数据将该区域划分为无值区。

2.2 研究方法

2.2.1 最大值合成法 通过最大值合成法(MVC)合成月数据、年数据,能降低云、大气、太阳高度角对数据质量的影响。本研究采用最大值合成法获取川西高原生长季植被 EVI 的年最大值,公式为:

$$\text{MEVI}_{ij} = \max(\text{EVI}_{ij}) \quad (1)$$

式中:MEVI_{ij} 为第 *i* 年第 *j* 月的最大 EVI 值;EVI_{ij} 为第 *i* 年第 *j* 月的 EVI 值,*i* 的取值范围为 1~20,*j* 的取值范围为 1~12。

2.2.2 趋势分析 基于一元线性回归分析方法分析 2001—2020 年川西高原植被 EVI 动态变化趋势。

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

式中: θ_{slope} 是回归方程的斜率;*n* 为统计时段的累计年数,若 $\theta_{\text{slope}} > 0$,表示过去 20 a 植被 EVI 呈上升趋势;反之,植被 EVI 有下降趋势;若 $\theta_{\text{slope}} = 0$ 则认为植被 EVI 无变化。采用 F 检验法对植被 EVI 的变化趋势进行显著性检验,根据检验结果将变化趋势分为 6 个等级。

2.2.3 相对年际变化率 本文采用 EVI 相对年际变

化率表征近 20 a 来川西高原生长季植被 EVI 的总体变化情况,计算公式如下:

$$\text{RC}_{\text{EVI}} = \frac{\theta_{\text{slope}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{EVI}_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中:RC_{EVI} 为 EVI 相对年际变化率; θ_{slope} 为 EVI 变化斜率;*n* 为统计时段的累计年数;EVI_i 为 EVI 年均值。

2.2.4 相关性分析 本文基于像元尺度进行川西高原 EVI 与气候因子的相关性分析研究,线性相关系数计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中:*n* 为累年数;*x_i*,*y_i* 为相关分析的两个变量; \bar{x} , \bar{y} 为两个变量的 *n* 年平均值。当 $R_{xy} > 0$ 时,代表正相关; $R_{xy} < 0$ 时,代表负相关。 R_{xy} 的绝对值接近于 1,则两个变量的相关性较高。

本文基于线性相关分析结果,对与植被 EVI 相关性较强的气温、降水因子分别进行偏相关分析,计算公式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)}\sqrt{(1-R_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中:*x* 为 EVI 值;*y* 为气温;*z* 为降水量; R_{xy} , R_{xz} , R_{yz} 分别为 EVI 与气温、EVI 与降水以及气温与降水的线性相关系数。本文采用 t 检验法进行偏相关系数的显著性检验。

复相关分析结合两个或多个影响因子进行计算,综合考虑各类影响因素的共同作用^[19]。计算公式为:

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

式中: R_{xy} 为 EVI 与气温的线性相关系数; $R_{xz,y}$ 为 EVI 与降水的偏相关系数。本文采用 F 检验法进行复相关系数的显著性检验。

3 结果与分析

3.1 川西高原植被 EVI 空间分布特征

川西高原 2001—2020 年生长季植被 EVI 空间分布特征如图 1 所示,近 20 a 来该地区植被 EVI 均值介于 0~0.88。川西高原植被 EVI 受地形起伏的影响,整体上呈现出由西南向东北递增的空间分布格局,具有明显的空间异质性。植被 EVI 低值区主要分布于雀儿山、峨山、大雪山、沙鲁里山、邛崃山等高海拔山地,这些区域海拔相对较高,EVI 均值偏低。植被 EVI 高值区主要分布于川西高原北部山原地区、沙鲁里山脉两侧以

及高原东部靠近盆地的河谷地区。这些区域海拔较低,EVI 值较高。

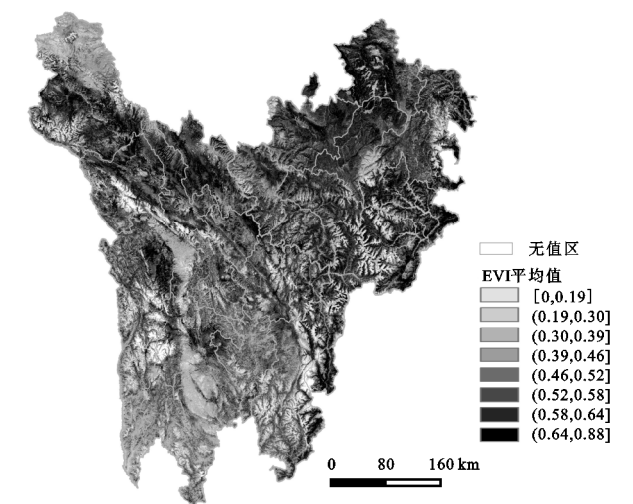
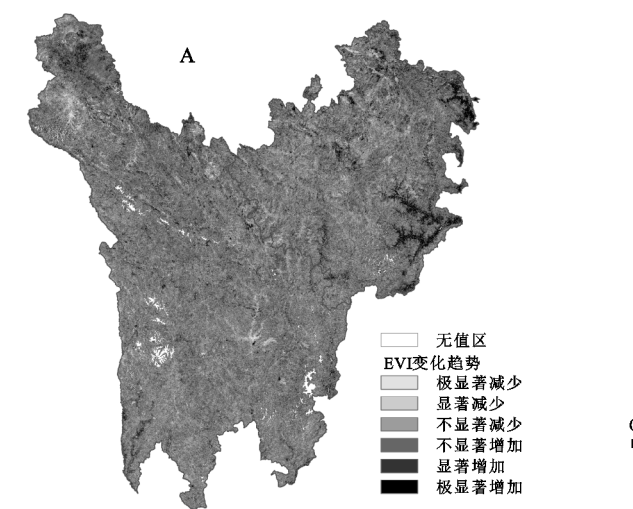


图 1 川西高原 2001—2020 年生长季植被 EVI 空间分布

3.2 川西高原植被 EVI 时空变化特征

3.2.1 生长季植被 EVI 年际变化特征 为分析研究区生长季植被 EVI 年际变化特征,本文基于一元线性回归分析方法,对川西高原 2001—2020 年生长季植被 EVI 的变化趋势进行分析,并对其进行显著性检验(表 1)。显著性统计结果共分为 6 级:极显著减少、显著减少、不显著减少、不显著增加、显著增加、极显著增加(图 2A)。近 20 a 来,川西高原 EVI 整体上呈波动增加趋势,增长速率为 1.0%/10 a(图 3A),植被 EVI 年际变化率介于 -4.26%~13.58%(图 2B)。对于植被 EVI 变化趋势的



近 20 a 来,不同海拔高程下川西高原生长季植被 EVI 变化都呈增加趋势,变化速率以及增加趋势的显著性都有明显的差异(图 4)。其中,在<2 500 m, 2 500~3 000 m 两个海拔高程区间,植被 EVI 呈显著增加趋势,增长速率为分别为 3.7%/10 a,1.9%/10 a。该区域海拔相对较低,水热条件良好,适宜于植被的生

整体空间分布特征而言,川西高原有 63.92%的区域植被 EVI 呈增加趋势。其中 EVI 呈极显著增加、显著增加的区域分别占川西高原总面积的 4.02%,6.09%,主要分布于高原东部海拔较低的河谷地带以及高原西北部巴颜喀拉山南麓等地区。EVI 呈极显著减少、显著减少区域面积占比分别为 1.11%,1.82%,集中分布于高原西北部雅砻江上游以及南部雅砻江中游的两河口地区,零星分布于高原内部城镇地区。

3.2.2 不同海拔高程下 EVI 分布与变化特征 川西高原地形起伏较大,南北走向的高山与深切河谷平行延伸。同时,不同海拔高程下水热条件在存在较大差异。基于此,为进一步探究川西高原生长季植被 EVI 分布的地形差异,将研究区分为 6 个高程带:<2 500 m, 2 500~3 000 m,3 000~3 500 m,4 000~4 500 m, 4 500~5 000 m(本文将海拔 5 000 m 以上地区视为无值区)。整体上,川西高原植被 EVI 随着海拔的增高而降低(图 3B)。

表 1 川西高原 EVI 变化趋势显著性统计结果

变化程度	分级标准	面积/km ²	百分比/%
极显著减少	slope<0, $p<0.01$	2639.28	1.11
显著减少	slope<0, $0.01\leq p<0.05$	4322.73	1.82
不显著减少	slope<0, $p\geq 0.05$	80283.13	33.78
不显著增加	slope>0, $p\geq 0.05$	126373.08	53.18
显著增加	slope>0, $0.01\leq p<0.05$	14476.07	6.09
极显著增加	slope>0, $p<0.01$	9551.71	4.02

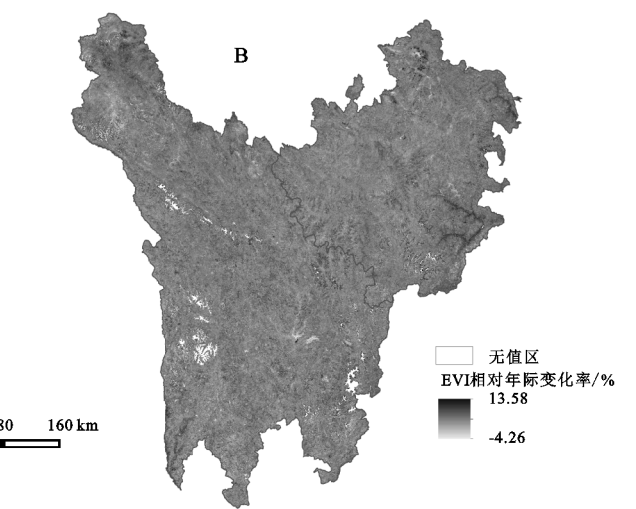


图 2 川西高原 2001—2020 年生长季植被 EVI 变化趋势及年际变化率空间分布

长,近 20 a 来 EVI 增加较快。在 3 000~4 500 m 的海拔范围内,随着海拔的增高,温度逐渐降低,热量条件不充分,植被生长受到一定限制,3 000~3 500 m, 3 500~4 000 m,4 000~4 500 m 3 个海拔高程区间内植被增长速率分别为 0.8%/10 a,0.6%/10 a, 0.8%/10 a,增加趋势不显著。

研究区内 4 500~5 000 m 的高海拔地区,近年来随着全球气候变暖导致的冰川和永久性积雪消融加剧,水热条件得到一定改善,增加趋势较为显著,增长速率为 1.2%/10 a。

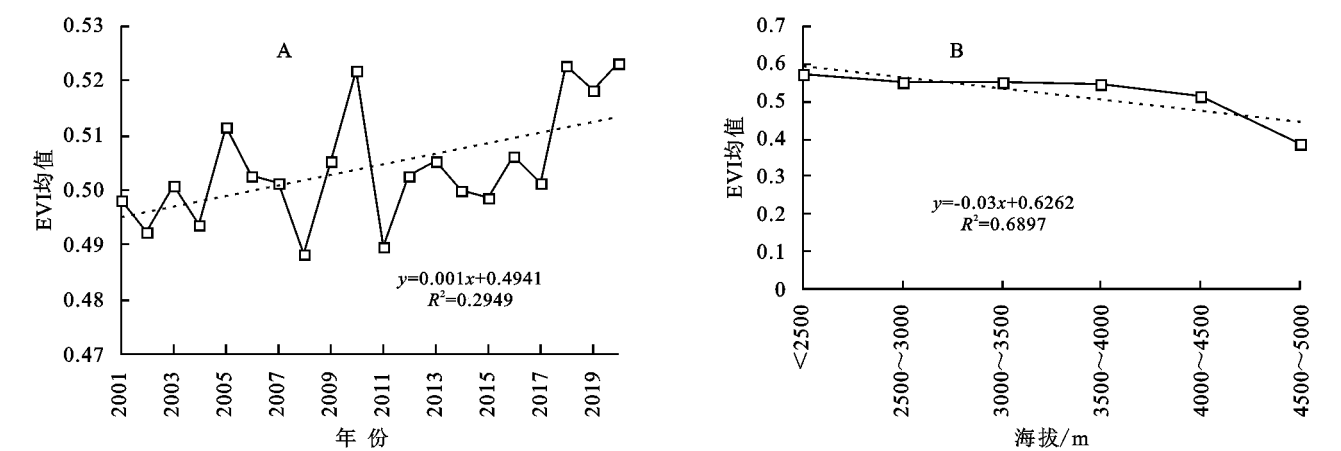


图 3 川西高原 2001—2020 年生长季植被 EVI 变化趋势和多年 EVI 均值随海拔变化情况

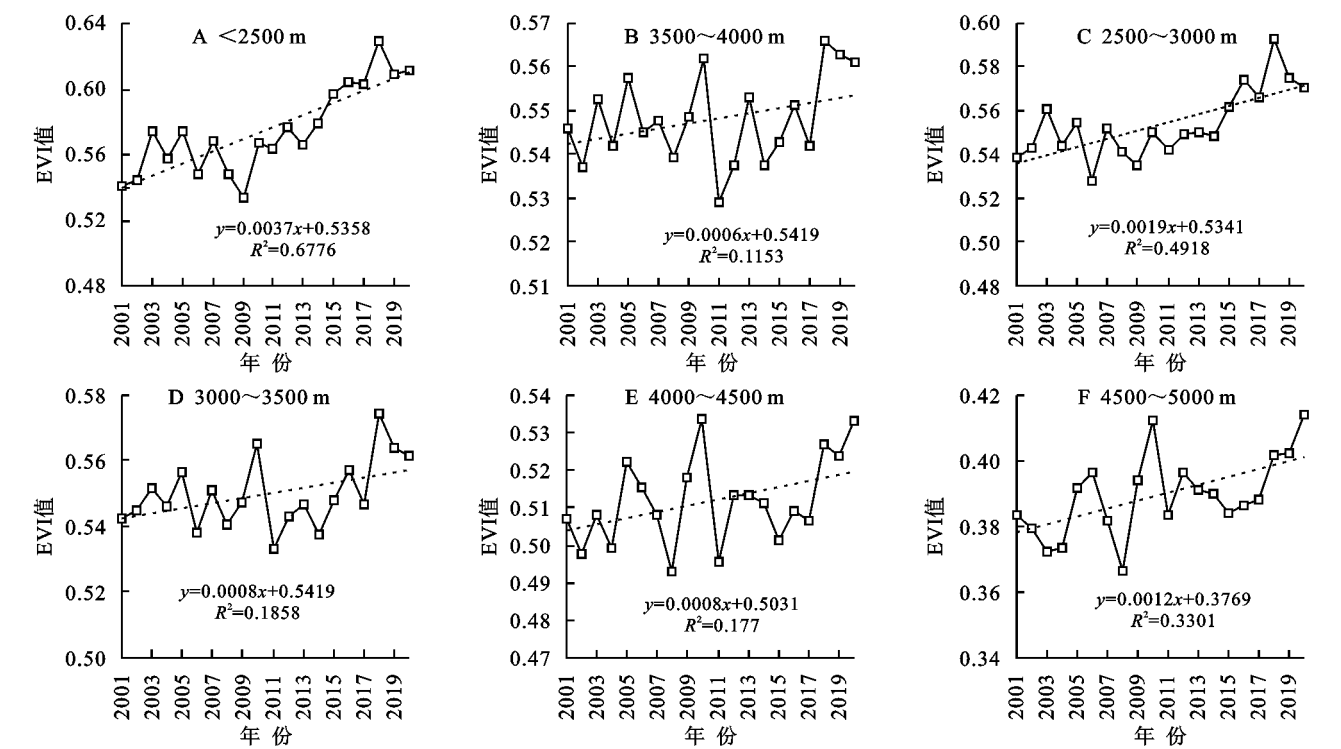


图 4 川西高原 2001—2020 年各海拔高程区间内植被 EVI 变化情况

3.3 川西高原植被 EVI 对气候因子的响应

通过一元线性回归分析方法对 2001—2020 年川西高原气温、降水动态变化逐像元进行趋势分析,可知近 20 a 川西高原来年均温整体呈增加的趋势,增温速率约为 0.31℃/10 a;年累积降水量同样呈增加趋势,整体以 6.46 mm/10 a 的速度增加。

基于川西高原植被 EVI 与年均温的偏相关分析得出,二者的偏相关系数介于-0.85~0.90(图 5A)。植被 EVI 与气温呈正相关、不显著正相关的区域分别占研究区总面积的 6.93%,49.49%;与气温呈负相关、不显著负相关的区域面积占比分别为 3.42%,40.16%。从空间分布上来看,植被 EVI 与气温呈正相关的区域

主要分布于川西高原东北部、东南部等海拔较低的地区;植被 EVI 与气温呈负相关的区域集中分布于雅砻江流域,并零散分布于整个高原内部(图 5C)。川西高原植被 EVI 与年累积降水量的结果表明,两者的偏相关系数介于-0.86~0.89(图 5B)。整体上,植被 EVI 与降水呈正相关、不显著正相关的区域分别占研究区总面积的 11.21%,52.88%;与气温呈负相关、不显著负相关的区域面积占比分别为 2.54%,33.37%。从空间分布上来看,植被 EVI 与降水呈正相关的区域主要分布于川西高原西北部以及高原内部河谷地带;植被 EVI 与气温呈负相关的区域零散分布于整个高原内部(图 5D)。

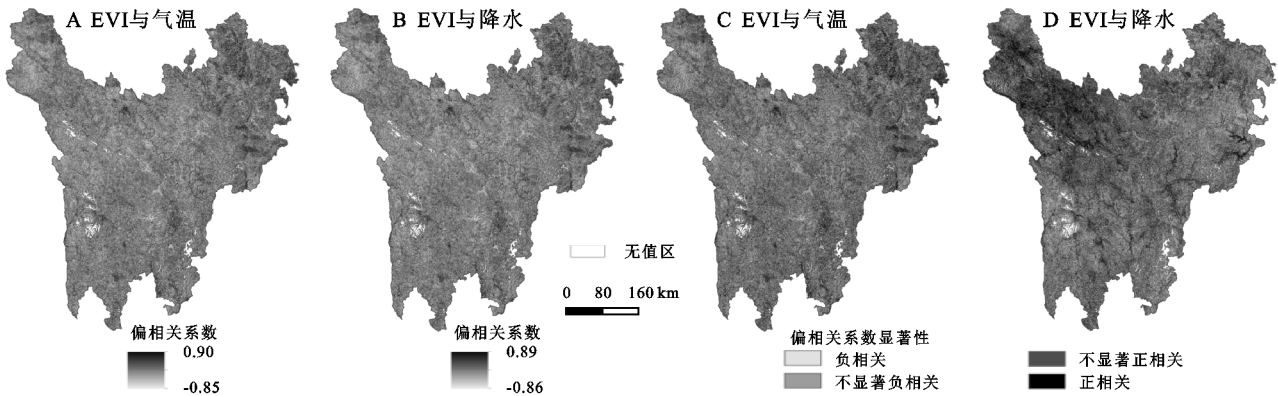


图 5 川西高原 2001—2020 年植被 EVI 与气温、降水的偏相关系数及显著性检验结果

3.4 川西植被 EVI 变化的驱动因素分析

气候条件是影响植被覆盖生长与分布的主要环境因子,其中以气温和降水对植被影响最为重要。川西高原植被 EVI 与气温、降水的复相关系数介于 0~0.91(图 6A)。复相关系数高值区主要分布于川西高原西北部、东北部河流上游源区以及研究区东部、南部河谷地区。为进一步研究气温、降水与植被 EVI 变化的关系,本文采用植被定量因子变化的驱动分区方法(表 2),对与川西高原的植被 EVI 变化有关的影响因子进行驱动力分析。驱动分区结果表明(图 6B),川西高原约有 21.87%的地区,植被 EVI 受气候因子驱动。其中受气温驱动的区域,约占川西高原总面积的 7.05%,主要分布于高原东北部的若尔盖湿地以及东部河谷地带。受降水驱动的区域范围相对较大,面积占比约 10.08%,主要分布于研究区西北部河

流上游源区、高原东部和南部的河谷地区。研究区内受温度和降水共同强驱动的区域相对较少,面积占比约 2.00%,零散分布于整个研究区内。受气温、降雨共同(弱)驱动的区域零散分布整个川西高原,面积占比约 2.74%,分布特征不明显。整体而言,川西高原大部分地区植被 EVI 变化受非气候因子的驱动,面积占比约 78.13%。

表 2 川西高原植被 EVI 变化驱动因素分区准则

EVI 驱动类型	分区准则		
	t 检验(气温)	t 检验(降水)	F 检验
气温驱动	$ t > t_{0.05}$		$F > F_{0.05}$
降水驱动		$ t > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
气温降水共同强驱动	$ t > t_{0.05}$	$ t > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
气温降水共同驱动	$ t < t_{0.05}$	$ t < t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
非气温降水驱动			$F \leq F_{0.05}$

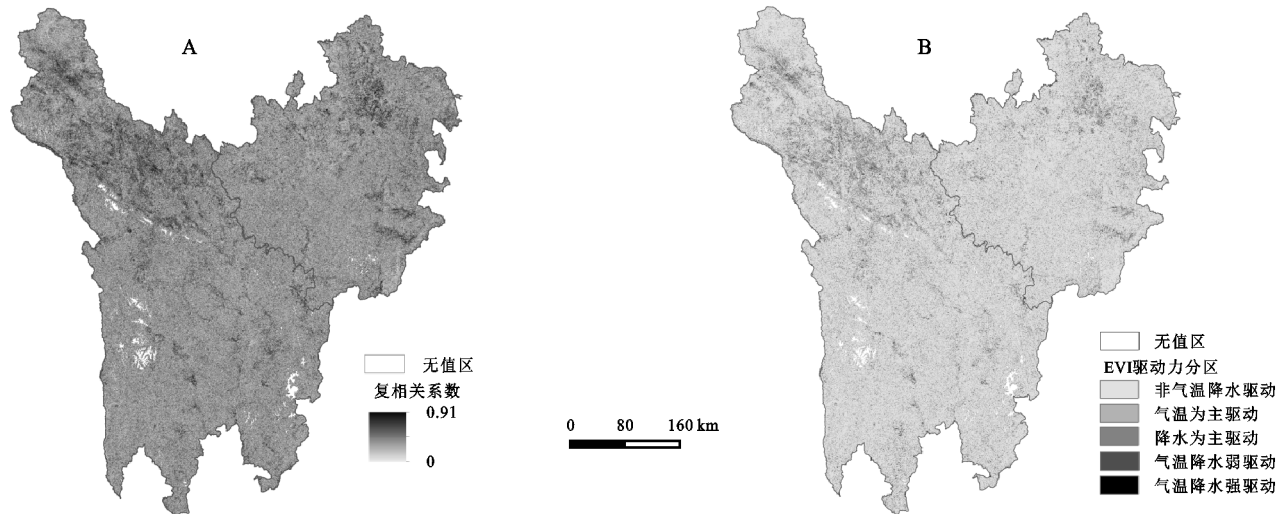


图 6 川西高原 2001—2020 年生长季植被 EVI 与气温—降水的复相关系数和驱动因素分区

4 讨论

本研究发现近 20 a 来,在青藏高原整体呈“暖湿化”发展趋势下^[20-21],川西高原植被 EVI 呈波动上升趋势。与荣欣等^[12]研究结果基本一致。川西高原是

四川省退耕还林政策实施的重点区域,近 20 a 来,在天然林保护工程的实施下,以及退耕还林、还草生态建设政策工作的推行下^[15],川西高原的植被覆盖得到了一定改善。植被改善较为明显的区域主要集中于高原东北部、岷江上游以及嘉陵江上游的河谷地

区^[22-23]。受人类活动的影响,川西高原部分区域植被退化明显。其中,雅砻江上游石渠县地势平坦,是本文研究区内畜牧业最发达的区域^[24],长期的过度放牧导致了该地草地退化严重^[25]。雅砻江中游两河口地区植被退化较为严重,与该地兴修大型水利工程密切相关^[26]。川西高原部分城镇及周边人口密集地区近年来受人口增长、城镇扩张等因素的影响,植被退化也相较明显^[15,27]。

气温、降水是川西高原植被生长的主要影响因素,本文通过植被EVI变化与气温、降水的偏相关分析,得到研究区植被EVI整体上受气温、降水共同影响,但具有一定的空间异质性的结论。在本文研究区内,一些研究认为气温对植被变化的影响更大^[12,15]。也有研究认为,植被覆盖对降水变化更加敏感^[13,16,28]。本研究发现,川西高原生长季植被EVI变化受降水影响的范围更广。杨达等^[28]认为在青藏高原气候相对湿润的区域植被变化主要受气温影响;而在气候相对干旱的区域,降水对植被变化的影响更明显。川西高原西北部年降水量相对较少、年均温较低^[29],近20a来该地区降水量显著增加,对植被EVI变化产生正向影响。川西高原东部、南部的干暖河谷,年均温相对较高,生态环境脆弱,降水是该地区植被生长的主要气候因子^[30]。川西高原东北部若尔盖湿地、西北部长沙贡玛湿地、北部果根塘湿地、南部塔公草原、西部毛垭草原等高寒草地分布区域,植被EVI变化受气温的影响较大。本文植被EVI变化的驱动因素分析表明,在0.05置信水平检验下,川西高原植被受气温、降水驱动的区域仅占整个研究区的21.87%,大部分地区受非气候因子驱动。说明人类活动在川西高原生态环境演变的过程中起到了重要作用^[12,16,24,28]。近年来,随着川西高原各项重大生态修复工程的不断开展,植被生长在人类活动的正向和负向作用的影响下,对气候变化响应的敏感程度具有一定差异。在未来川西高原的社会发展过程中,继续加强植被生态保护措施、提升百姓生态保护意识、实施植被覆盖“网格化”管理、建立智能化的植被覆盖变化监测平台是需要重点关注的内容。

5 结论

本文基于川西高原2001—2020年MODIS-EVI数据集,结合DEM数据,分析近20a来川西高原植被EVI的时空变化特征,并探究不同海拔高程下植被EVI的分布和变化特征。在此基础上,结合气象

格点数据,进行川西高原植被EVI对气候变化的响应及驱动因素研究,得出以下结论:

(1) 从植被EVI空间分布特征来看,近20a来川西高原植被EVI均值介于0~0.88。整体上植被EVI呈现出由西南向东北递增的空间分布格局,具有明显的空间异质性。从垂直分布特征来看,植被EVI随着海拔的增高而降低。

(2) 川西高原近20a植被EVI呈波动增长趋势,增长速率为1.0%/10a,植被EVI的相对年际变化率介于-4.26%~13.58%。在整个研究区内,有86.91%的区域EVI基本保持不变。植被EVI增加显著的区域占川西高原总面积的10.18%,主要分布于海拔较低的河谷地带。植被EVI减少显著的区域占川西高原总面积的2.91%,主要分布于受人类活动影响较大的地区。

(3) 近20a,川西高原不同海拔高程下植被EVI都呈波动增加趋势,变化速率以及增加趋势的显著性都有明显的差异。在<2500m,2500~3000m,4500~5000m这3个海拔高程区间内,植被EVI增加趋势显著。

(4) 通过川西高原植被EVI与气温和年累积降水量的偏相关分析可知,植被EVI与气温和降水呈正向相关的区域面积占比分别为56.42%,64.09%。川西高原植被EVI变化的气候因子驱动力分析表明,在0.05置信水平检验下,川西高原大部分地区植被EVI变化受非气候因子的驱动,植被受气候因子驱动的地区面积仅占研究区总面积的21.87%。其中,受气温驱动的区域面积占比约7.05%,受降水驱动的区域面积占比约10.08%,受温度和降水共同驱动的区域面积占比约2.00%,受温度和降水共同(弱)驱动的区域面积占比约2.74%。

参考文献:

- [1] 杨存建,周其林,任小兰,等.基于多时相MODIS数据的四川省森林植被类型信息提取[J].自然资源学报,2014,29(3):507-515.
- [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[J].地理研究,2013,32(12):2179-2188.
- [3] 伍良旭,王晗,邵怀勇,等.川西高原植被时空格局及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(1):171-178.
- [4] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J].自然资源学报,2014,29(10):1802-1812.

- [5] 王正兴,刘闯, HUETE A. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [6] Matsushita B, Yang W, Chen J, et al. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest[J]. Sensors, 2007, 7(11): 2636-2651.
- [7] Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(3/4): 366-374.
- [8] Brando P M, Goetz S J, Baccini A, et al. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(33): 14685-14690.
- [9] Setiawan Y, Yoshino K, Prasetyo L B. Characterizing the dynamics change of vegetation cover on tropical forestlands using 250 m multi-temporal MODIS EVI[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26(1): 132-144.
- [10] 朱林富,谢世友,杨华,等.基于 MODIS-EVI 的 2000—2015 年重庆植被覆盖季节变化[J].长江流域资源与环境, 2017, 26(12): 2146-2155.
- [11] 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.
- [12] 荣欣,易桂花,张廷斌,等. 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[J].长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 3014-3028.
- [13] 伍良旭,王晗,邵怀勇,等.川西高原植被时空格局及其对气候变化的响应[J].水土保持研究, 2021, 28(1): 171-178.
- [14] 李元春,侯蒙京,葛静,等.甘南和川西北地区草地植被 NDVI 变化及其驱动因素研究[J].草地学报, 2020, 28(6): 1690-1701.
- [15] 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.
- [16] 郑勇,杨武年,刘冲,等.川西高原近 20 a 植被覆盖变化遥感动态监测及驱动力分析[J].遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1447-1456.
- [17] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J].地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776.
- [18] Liu L, Gu H, Xie J, et al. How well do the ERA-Interim, ERA-5, GLDAS-2.1 and NCEP-R2 reanalysis datasets represent daily air temperature over the Tibetan Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(2): 1484-1505.
- [19] 叶红,张廷斌,易桂花,等.2000—2014 年黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子关系[J].地理学报, 2018, 73(11): 2117-2134.
- [20] 张江,袁旻舒,张婧,等.近 30 年来青藏高原高寒草地 NDVI 动态变化对自然及人为因子的响应[J].生态学报, 2020, 40(18): 6269-6281.
- [21] 丁佳,刘星雨,郭玉超,等.1980—2015 年青藏高原植被变化研究[J].生态环境学报, 2021, 30(2): 288-296.
- [22] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].生态学报, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [23] 张婷,薛东剑,段金亮,等.2000—2019 嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征及气候响应分析[J].长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1110-1120.
- [24] 李波,邵怀勇.气候变化与人类活动对川西高原草地变化相对作用的定量评估[J].草学, 2017, 38(3): 16-21.
- [25] 仙巍,向芷莹,陶诗祺,等.川西北江河源区草地退化遥感监测研究[J].测绘科学, 2015, 40(7): 49-53.
- [26] 陈安,李景吉,黎文婷,等.2001—2018 年雅砻江流域植被 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应[J].水土保持研究, 2022, 29(1): 169-175, 183.
- [27] 杨桂山,徐昔保,李平星.长江经济带绿色生态廊道建设研究[J].地理科学进展, 2015, 34(11): 1356-1367.
- [28] 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.
- [29] 张虹娇.川西北高原气候变化特征研究[J].西南大学学报:自然科学版, 2014, 36(12): 148-156.
- [30] 刘凯,曹昌楷,王守强,等.四川省干旱半干旱地区造林类型区划及植被恢复技术[J].四川林业科技, 2015, 36(4): 59-64.