

川西高原植被时空格局及其对气候变化的响应

伍良旭, 王 晗, 邵怀勇, 周思彤

(成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059)

摘 要:地处青藏高原东缘且作为重要生态屏障的川西高原生态环境脆弱,属全球变化敏感区,但由于 2000 年之前 MODIS 数据的缺失,限制了川西高原针对大范围较高分辨率数据进行植被气候响应的研究。为研究其长期的植被时空格局及其对气候变化的响应,基于增强型自适应反射率时空融合模型(Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model, ESTARFM),根据 MODIS NDVI(500 m)数据得到研究区 1995 年 GIMMS NDVI3g(8 km)的高空间分辨率数据(500 m),并结合年均气温和年降水量开展川西高原 1995—2015 年植被时空格局及其对气候变化响应的研究。结果表明:(1) ESTARFM 模型融合的 GIMMS NDVI3g 与真实 MODIS NDVI 数据吻合度较高,融合结果可用于地形复杂的川西高原植被变化的研究。(2) 1995—2015 年川西高原植被覆盖呈现沿海拔梯度先升高后降低的垂直分布特点,植被变化趋势稳定;(3) 1995—2015 年川西高原年均气温和年降水量空间分布特征主要表现为西部年均气温和年降水量低于东部。植被覆盖对年降水量的变化较年均气温更加敏感,植被覆盖与年均气温呈正相关的区域占 14.9%,与年降水量呈正相关的区域约占 35.4%。总体而言,川西高原总体植被覆盖程度较好,且变化趋势稳定。年降水量相较于年均气温影响植被变化更明显。

关键词:植被覆盖; ESTARFM; 数据融合; 气候变化

中图分类号:Q948.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0171-08

Spatiotemporal Pattern of Vegetation and Its Response to Climate Change in the Western Sichuan Plateau

WU Liangxu, WANG Han, SHAO Huaiyong, ZHOU Sitong

(School of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The western Sichuan Plateau, as an important ecological barrier located on the eastern edge of the Qinghai—Tibet Plateau, is eco-environmental fragile and belongs to a sensitive area in globally change. However, due to the lack of MODIS data before 2000, studies on vegetation climate response in the western Sichuan Plateau were restricted based on a large range of higher resolution data. In order to study its long-term spatiotemporal pattern of vegetation and its response to climate change from 1995 to 2015, we employed MODIS NDVI (500 m) data to obtain high spatial resolution data (500 m) of 1995 GIMMS NDVI3g (8 km) of the study area based on the Enhanced Adaptive Reflective Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model (ESTARFM), combined annual average temperature with annual precipitation to study the spatial and temporal pattern of vegetation and its response to climate change in the Western Sichuan Plateau from 1995 to 2015. The results show that: (1) the GIMMS NDVI3g fused by ESTARFM is in relatively good agreement with the actual MODIS NDVI data; the fusion results can be applied in estimating the vegetation of the Western Sichuan Plateau with complex terrain; (2) from 1995 to 2015, the vegetation cover of the Western Sichuan Plateau distributed a vertical characteristic which increased first and then decreased and its variation presented the trend to become stable along the elevation gradient; (3) with respect to the spatial distribution of annual average temperature and annual precipitation in the

收稿日期:2020-04-16

修回日期:2020-05-15

资助项目:国家自然科学基金“区域矿产资源开发的生态地质环境安全过程分析和预警——以攀西地区为例”(41302282);成都理工大学 2019 年度大学生课外科技立项项目“基于高光谱的草原鼠害遥感定量监测与分析——以石渠县为例”

第一作者:伍良旭(1998—),女,四川泸州人,在读本科生,研究方向遥感技术应用。E-mail:wuliangxu@foxmail.com

通信作者:邵怀勇(1978—),男,山东泰安人,博士,教授,主要从事“3S”技术与数字国土、遥感技术应用等方面的教学与科研工作。E-mail:huaiyongshao@163.com

Western Sichuan Plateau from 1995 to 2015, annual average temperature and annual precipitation in the west were lower than east; vegetation coverage was more sensitive to annual precipitation change than annual average temperature change; the area where vegetation coverage was positively related to annual average temperature accounted for 14.9%, the area where vegetation coverage was positively related to annual precipitation accounted for about 35.4%. In general, the vegetation coverage of Western Sichuan Plateau is in good condition and has a stable change tendency. The influence caused by annual precipitation on vegetation change is more obvious than by average annual temperature.

Keywords: vegetation coverage; ESTARFM; fusion data; climate change

植被是地球生态系统主要的组成部分,是连接气候与土壤的纽带,在全球物质能量交换和气候变化中具有不可替代的作用^[1]。植被动态变化在高原生态环境中具有敏感的指示作用,合理利用区域资源和有效治理生态环境提供依据,已成为生态环境研究的热点^[2]。NDVI是表征植被动态变化的一个重要指标,能较精确地反映地表植被的生长状态及演变特征,在区域植被退化、湿地景观格局等领域发挥着重要的作用^[3]。川西高原位于我国青藏高原向川西南山地和四川盆地的过渡地区,是我国生态安全战略格局中青藏高原生态屏障和黄土高原—川滇生态屏障的重要组成部分,地形复杂,且受高原背风坡和西南季风等系统的共同影响,是典型的生态环境脆弱区和生态气候敏感区^[2],但目前针对该区域植被时空格局与气候因子的相关研究较少,因此对该地区的植被时空格局及其对气候变化响应的研究具有重要意义。

此外,现在的遥感数据通常不能同时具备较长的时间序列和较高的空间分辨率,如 GIMMS NDVI3g 是目前最长时间序列的 NDVI 数据集之一^[4],前人利用其进行了 1982—2009 年东北地区^[5]、1982—2006 年蒙古高原^[6]和 1982—2013 年新疆地区^[7]的植被变化研究,但 8 km 的空间分辨率应用在区域植被变化研究中过于粗糙。虽然如今高分辨率辐射计(AVHRR)、地球观测系统(SPOT)-VEGETATION、MODIS 和 ENVISAT 中分辨率成像光谱仪(MERIS)等卫星传感器所采集的数据有较高的时间分辨率,通过合成一定时间内的图像,能够减少甚至消除云污染^[4],遥感数据质量不断提高,使得区域植被趋势分析在全球范围内得到广泛应用^[8-10],但如何提高数据的空间分辨率仍是亟待解决的问题。相对于 GIMMS NDVI3g 数据精度更高、更能表达植被时序变化的 MODIS NDVI 产品,却因其时间覆盖范围(2001 年 7 月至今)无法针对长时间序列进行研究。因此,如何提高早期遥感数据的分辨率对于长时间序列的植被变化监测研究显得尤为重要。

针对遥感数据时空尺度的融合问题,前人做了大量的研究。如 Gao 等^[11]提出的 STARFM 模型(spatial and temporal reflection fusion Model)可融合 Landsat 和 MODIS 地表反射率,生成具有高时空分辨率的合成反射率数据。Singh 等^[12]利用 STARFM 融合模型充分提取了农作物 8 a 生长季节的物候。Bhandari 等^[13]和 Schmidt 等^[14]评估了 STARFM 合成长期时间序列数据的能力,并获取不同植被的物候特征进行研究。Meng 等^[15]和 Zhu 等^[16]对 STARFM 算法改进,分别提出了时空融合自适应植被指数模型(STAVFM)和增强型自适应时空融合模型 ESTARFM,以更准确地表征地表的时空变化。由于在地形复杂地区,ESTARFM 的融合效果比 STARFM 较好,使得 ESTARFM 算法被频繁用于生成高时空分辨率的合成遥感图像^[17-18]。然而,目前较少有学者针对川西高原使用 ESTARFM 模型将 GIMMS NDVI3g 与 MODIS NDVI 进行时空融合并开展 1995 年至今植被时空格局的相关研究,为此本文基于 ESTARFM 模型开展川西高原 GIMMS NDVI3g 和 MODIS NDVI 数据的时空融合,这对开展其长期的植被变化监测具有重要意义。

本研究尝试基于 ESTARFM 模型建立川西高原 GIMMS NDVI3g 与 MODIS NDVI 数据的函数关系,以提高 GIMMS NDVI3g 数据的空间分辨率。在此基础上分析川西高原长时间的植被变化特征及其对气候变化的响应,为当地的环境保护决策提供基础数据和科学参考。

1 研究区概况

川西高原(27.59°—34.31°N, 97.36°—104.62°E)地属青藏高原与四川过渡地带,覆盖阿坝州和甘孜州等高原藏区,区域面积约为 25.38 万 km²。研究区内地势高,地形起伏大,平均海拔约 4 000 m。境内属亚热带高原季风气候,地域差异明显,多年降水量约 435.6~1 584.1 mm。近年来,由于全球气候变化以

及人类活动的增加,当地植被覆盖逐渐变化,植被的退化对境内生态系统安全会造成极大威胁^[19],因此,研究分析川西高原植被覆盖时空分布特征,并掌握主要气候因素对植被变化的影响非常必要^[20]。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

(1) 遥感数据:MODIS 13Q1 植被指数数据集产品,空间分辨率 500 m×500 m,时间分辨率 30 d。首先进行 Savitzky-Golay 滤波处理降低异常值等噪声影响,随后利用最大值合成法合成 2005 年和 2015 年 MODIS NDVI 数据。该方法能减少云雾等大气效应对数据的影响,提高数据精度^[21]。

1995 年、2005 年和 2015 年的 GIMMS NDVI3g 数据空间分辨率为 8 km×8 km,时间分辨率为 15 d。采用最大值合成法合成 3 个时间段的年 GIMMS NDVI3g 数据,并将其空间分辨率重采样为 500 m×500 m,为后续使用 ESTARFM 模型进行数据融合做准备。

(2) 气象数据:年均气温、年降水量空间插值数据集产品。薄板光顺样条法采用平滑样条函数对多变量数据进行分析 and 插值,即使用函数逼近曲面,是一种较好的气候要素插值的方法^[22]。因此,该数据集采用基于薄板光顺样条法开发的 ANUSPLIN 插值软件(Hutchinson, 2001)对气候要素进行插值,其中将气象站点的经度、纬度和海拔高程作为年降水量空间插值的自变量,而年均温度空间插值则考虑了温度随垂直高度的变化^[22]。

MODIS NDVI 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>);GIMMS NDVI3g 数据来源于 ECOCAST 网站(https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3_g.v1/);气象数据和高程数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);为提高试验结果精度,转换所有数据到统一的投影坐标系 WGS_1984_Zone_48N。

2.2 研究方法

2.2.1 ESTARFM 算法 为生成高时空分辨率的遥感图像,使用 ESTARFM 模型融合 MODIS NDVI 和 GIMMS NDVI3g 数据。ESTARFM 模型是在 STARFM 模型^[11]基础上根据像元的异质性调整赋权方法,通过设置转换系数来改进预测结果,异质性越大,预测精度越高,可以保存更多的空间特征细节^[23]。

本文根据第 1 时期 m 时刻 MODIS NDVI 与 t_p 时刻的 GIMMS NDVI3g 得到融合后 t_p 时刻的 GIMMS NDVI3g 数据,记为 $m_m = (X_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B)$,或利用第 2 时期 n 时刻的观测数据得到融合后的 t_p 时刻 GIMMS NDVI3g 数据,记为 $m_n = (X_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B)$ 。通过 t_m 和 t_n 与时刻 t_p 间检测到的 GIMMS NDVI3g 变化幅度来计算权重,如公式(1)所示^[16]:

$$T_k = \frac{1/\sum_{j=1}^W \sum_{i=1}^W G(x_i, y_j, t_k, B) - \sum_{j=1}^W \sum_{i=1}^W G(x_i, y_j, t_p, B)}{\sum_{k=m,n} (1/\sum_{j=1}^W \sum_{i=1}^W G(x_i, y_j, t_k, B) - \sum_{j=1}^W \sum_{i=1}^W G(x_i, y_j, t_p, B))} \quad (k=m, n)$$

由公式(2)计算中心像元的值:

$$M(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) = T_m \cdot M_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) + T_n \cdot M_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) \quad (2)$$

由于篇幅限制,具体融合原理请见参考文献^[16]。统计 2005 年和 2015 年融合后的 GIMMS NDVI3g 和 MODIS NDVI 对应的像元值绘制散点图(图 1)。融合的 GIMMS NDVI3g 数据与 MODIS NDVI 数据具有高度相似性,各像元值大致相同,两者基本分布在 $y=x$ 的趋势线上($p<0.01$),预测效果较好。

对比 2005 年和 2015 年 GIMMS NDVI3g、融合后的 GIMMS NDVI3g 和真实 MODIS NDVI 数据细节(图 2)可以看出,融合后的 GIMMS NDVI3g 与真实 MODIS NDVI 数据像元分辨率较好,地物纹理清晰,部分特征地区的细节能够凸现出来,能较好地再现区域植被覆盖细节特征。

2.2.2 一元线性回归模型 基于融合处理后的 GIMMS NDVI3g 数据(值域为 $[-1, 1]$),使用像元二分模型计算植被覆盖度,由于篇幅限制,具体的植被覆盖度计算公式和原理请见参考文献^[24]。

植被覆盖度变化主要用于分析植被覆盖度随时间变化的关系,他们的关系满足一元线性回归模型的条件,以局部像元时间变化特征表示整个空间的变化规律^[24],其计算方式见公式(3):

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times f_i) - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n f_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: n 为总监测年数; f_i 为第 i 年植被覆盖度;Slope 为植被覆盖度线性拟合斜率。利用两者的相关关系来判断植被覆盖度时间变化的显著性,斜率为负表示植被覆盖度下降,反之则表示植被覆盖度上升,拟合斜率绝对值越大,变化越明显^[24-25]。

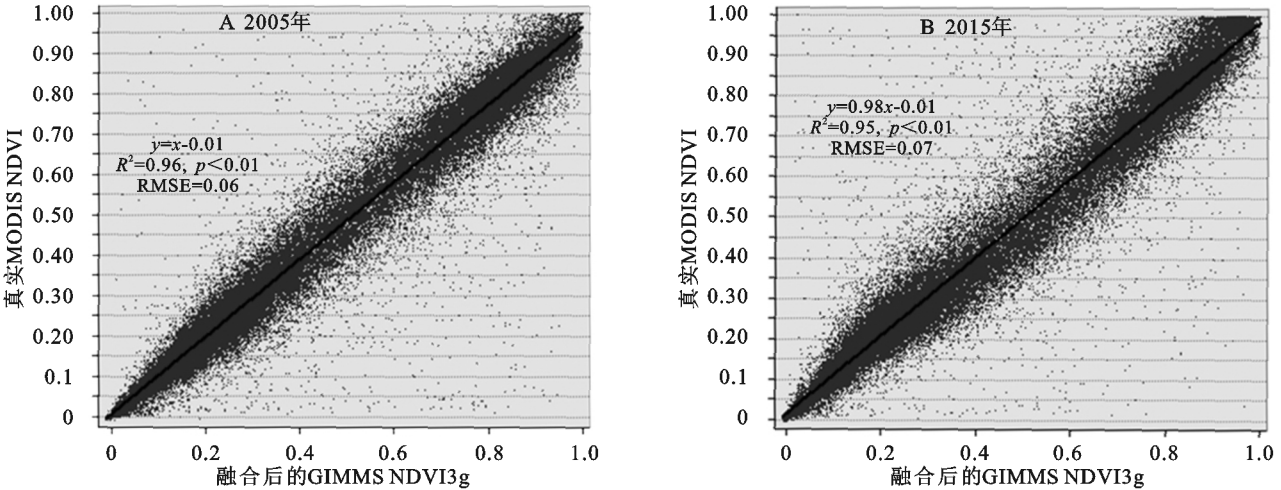
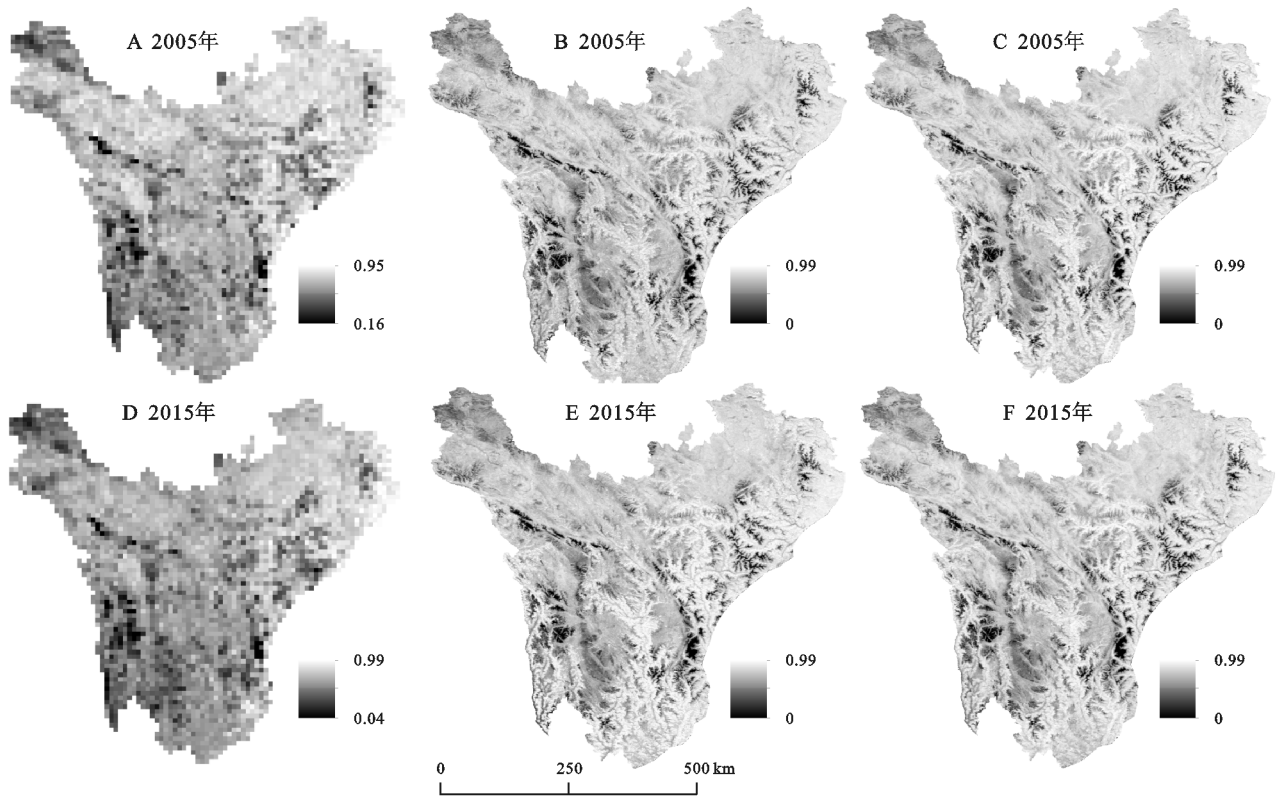


图 1 真实 MODIS NDVI 与融合后的 GIMMS NDVI3g 数据散点图



注:A 为 2005 年 GIMMS NDVI3g;B 为 2005 年融合后的 GIMMS NDVI3g;C 为 2005 年 MODIS NDVI;D 为 2015 年 GIMMS NDVI3g;E 为 2015 年融合后的 GIMMS NDVI3g;F 为 2015 年 MODIS NDVI。

图 2 融合数据对比图

2.2.3 偏相关性分析法 地理系统是一个由多要素组成的复杂系统,偏相关分析可剔除其他变量的影响,只研究一个因素与另一个因素的相关程度^[25]。本文基于像元对川西高原 1995 年、2000 年、2015 年植被覆盖度与年降水量、年均气温两个气候因素进行偏相关性研究,见公式(4)^[25]:

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1-r_{ac}^2)(1-r_{bc}^2)}}$$

(4)

式中: $r_{ab,c}$ 表示控制变量 c 的值不变,变量 a, b 间的偏相关系数。 r_{ab}, r_{bc}, r_{ac} 分别表示变量 a 和 b, b 和 c, a 和 c 的简单相关系数。其中 a, b 和 c 分别为植被覆盖度、年均温度和年降水量。 $r_{ab,c} > 0$ 时表示两变量呈正相关, $r_{ab,c} < 0$ 时表示两变量呈负相关, $r_{ab,c}$ 的绝对值越大,两变量的相关性越大。

简单相关系数计算见公式(5)^[25]:

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

(5)

式中: r_{xy} 为 x, y 两个变量的简单相关系数,变化范围为 $[-1, 1]$; x_i 是第 i 个年份变量 x 的值; y_i 是第 i 个年份变量 y 的值。

年份变量 y 值。 \bar{x} 为 1995 年、2005 年、2015 年三年间变量 x 的平均值; \bar{y} 为三年间变量 y 的平均值。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖特征分析

3.1.1 植被覆盖空间分布特征 参照前人研究^[26]将川西高原植被覆盖度分为极低覆盖度(0~0.2)、低覆盖度(0.2~0.4)、中覆盖度(0.4~0.6)、中高覆盖度(0.6~0.8)和高覆盖度(0.8~1.0)5 个等级,得到川西高原 1995 年、2005 年和 2015 年植被覆盖度空间分布图(图 3)。

分析可得,1995 年、2005 年和 2015 年研究区极低、低和中覆盖度区域主要分布在西部高海拔的白玉、巴塘、理塘和东部低海拔的泸定、康定、九龙、理县

等县区,南部的稻城、和西北部的玛多县主要为中高覆盖度,其余地区多属于高覆盖度区域。西部地区海拔较高,多为高山植被,西部德格、甘孜一带和东部泸定县区有荒漠和草甸区,其余地区水热条件良好,主要为针叶林和阔叶林。2005 年川西高原高覆盖度区域面积相对 1995 年有所减少,中植被覆盖和中高植被覆盖区域面积增加。2015 年高植被覆盖区域覆盖面积继续降低,但趋势减缓,中、中高植被覆盖区域面积增加,且后者相对前者增加明显。

川西高原整体的植被覆盖较高,呈现较为明显的区域差异。高植被覆盖区主要分布在北部和南部地区,低值区分布在中部地区,此外沿海拔梯度,植被覆盖呈先升高后降低的垂直分布特点。

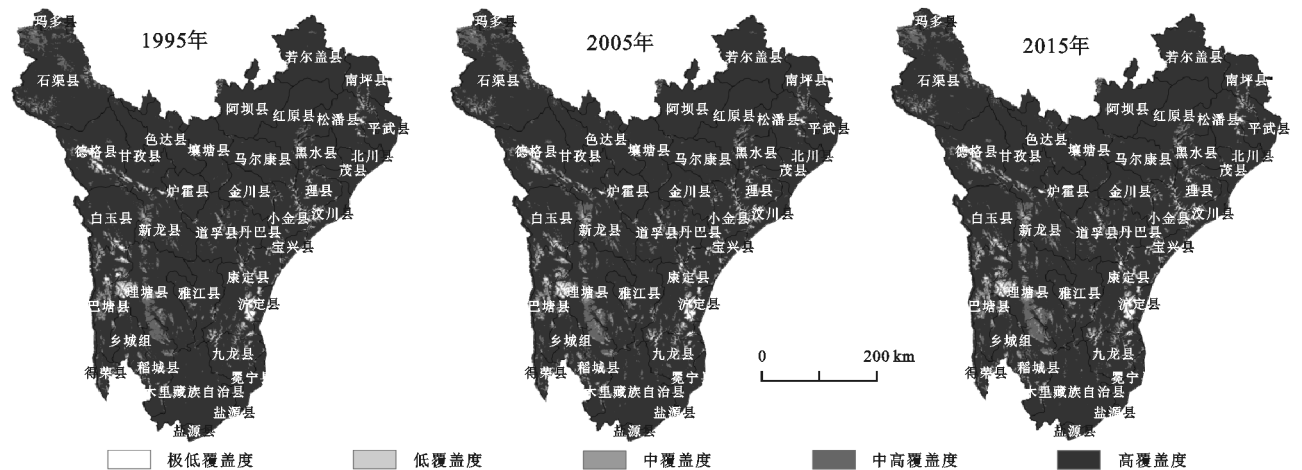


图 3 不同等级植被覆盖度空间分布

3.1.2 植被覆盖变化趋势特征 为研究 1995—2015 年川西高原植被覆盖的时间变化规律,对植被覆盖与时间进行一元线性回归分析(图 4),根据趋势变化的方向和程度,划分为 5 个等级(表 1)^[24]。植被覆盖呈增长趋势的面积占 17.63%,其中明显增加面积占 15.53%,轻度增加面积占 2.10%,主要分布在高海拔地区的玛多、石渠、白玉等县区,以玛多县分布尤为密集。植被覆盖呈减少趋势的面积占 27.36%,其中明显减少面积占 18.29%,轻度减少面积占 9.07%,减少区域广泛分布在各个区域,以理塘、康定县区分布较广,结合前人研究分析认为^[3],理塘县自 20 世纪 80 年代开始,因过度挖采、放牧等人为因素、鼠虫害、气候变化、暴雨冲刷等多种因素综合并长期作用使理塘县草原退化、沙源裸露导致植被覆盖减少;康定县由于乱砍滥伐,开荒种地,旅游开发等人为干扰因素和自然灾害等多因素引起大面积土地退化,山坡地水土流失十分严重,植被减少趋势明显。植被覆盖基本稳定的区域面积占 55.01%,分布广泛,主要在研究区的东北部的阿坝、若尔盖县区,该地区主要为沼泽、草甸等,植被生长状况稳定,植被变化不明显。总体而言,

1995—2015 年川西高原植被覆盖呈增长趋势面积占 17.63%,呈增长趋势面积占 27.36%,基本稳定面积占 55.01%,植被整体变化趋势稳定。

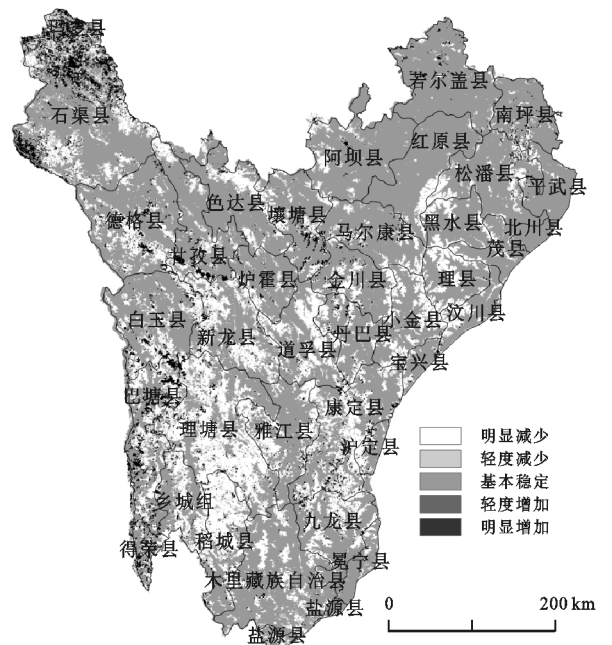


图 4 川西高原 1995—2015 年植被覆盖变化趋势

表 1 1995—2015 年川西高原植被覆盖变化面积及比例

变化等级	Slope	面积/km ²	占比/%
明显减少	≤−0.015	54150.35	18.29
轻度减少	−0.015~−0.005	26855.02	9.07
基本稳定	−0.005~0.005	162863.10	55.01
轻度增加	0.005~0.015	6222.52	2.10
明显增加	>0.015	45995.36	15.53

3.2 植被对气候变化的响应

3.2.1 年均气温与年降水量空间分布特征 植被的变化受到多方面因素的影响,其中年降水量和年均气温是对植被变化影响较大的两个气候因素^[25]。计算 1995 年、2005 年和 2015 年的年均气温和年降水量(图 5)。

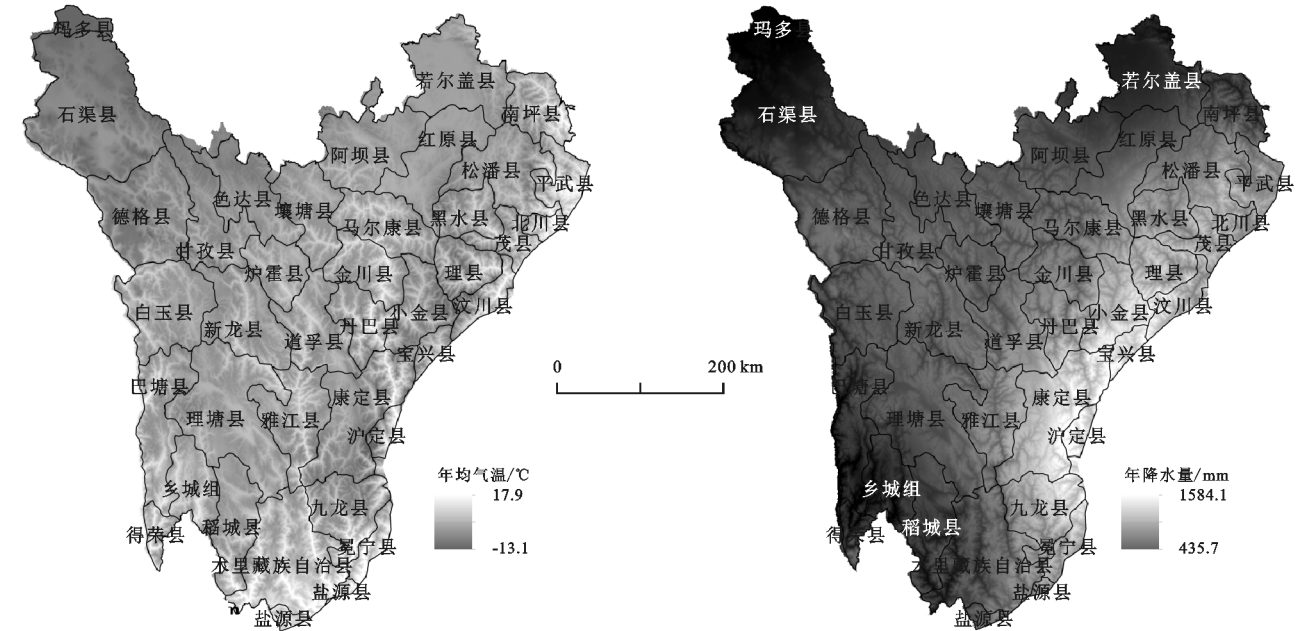


图 5 1995—2015 年年均气温和年降水量分布

3.2.2 植被覆盖对气候变化的响应 计算 1995—2015 年年均气温和年降水量与植被覆盖的偏相关系数(图 6A—B)。年植被覆盖与年均气温的偏相关系数变化范围为 $[-0.71, 0.71]$,年植被覆盖与年降水量的偏相关系数变化范围为 $[-0.71, 0.71]$ 。统计分析可得年植被覆盖与年均气温呈正相关的区域面积占 14.9%,年植被覆盖与年降水量呈正相关的区域面积占 35.4%。根据年均气温和年降水量与年植被覆盖的偏相关系数方向,对研究区域进行分区讨论^[27],年植被覆盖与年均气温负相关,与年降水量负相关,归于分区一;年植被覆盖与年均气温负相关,与年降水量正相关,归于分区二;年植被覆盖与年均气温正相关,与年降水量负相关,归于分区三;年植被覆盖与年均气温正相关,与年降水量正相关,归于分区四;年植被覆盖与年均气温和年降水量的偏相关系数较低(都为 0),归于分区五(图 6C)。

分析可得,1995 年、2005 年和 2015 年川西高原年均气温为 3.3℃,最高温度为 17.9℃,位于最南部的盐源县,最低温度为−13.1℃,位于西北部的玛多县;年均降水量为 848.6 mm,最大降水量为 1 584.1 mm,位于西南部的泸定县;最小降水量为 435.7 mm,位于西北部的玛多县。研究区内年均气温和年降水量的分布具有空间异质性,玛多县所在的西北部和泸定县所在的东南部区域气温整体低于中部地区,泸定县所在的东南地区,位于青藏高原和四川盆地过渡区,受东南季风和西南季风影响,降水充沛,气温不高;玛多县地区靠近青藏高原,从研究区中部到西北部地势逐渐增高,气温逐渐下降。

分区一占总面积的 6.4%,主要分布在石渠县、甘孜县和色达县的北部,植被类型主要为高寒草甸,分析认为该区域鼠灾泛滥和人为过度放牧导致植被覆盖稀疏,气温和降水反而加速了水土流失,抑制植被生长。分区二占总面积的 30.8%,主要分布在西部的白玉县、理塘县和东北部的黑水县等地,植被类型主要为草甸、常绿阔叶林、针叶林和灌丛,地形复杂,气温较高而降水量低,水土蒸发量大,水土流失较严重^[28],气温升高减弱其光合作用,抑制植被的生长,适当的降水可增加土壤含水量,促进植被生长。分区三占总面积的 10.3%,主要分布在马尔康县、道孚县、九龙县一带,该区域气温相对较低而降水量高,降水持续增加引发泥石流、滑坡等地质灾害,并使植被光照条件下降,减弱其光合作用,抑制植被生长,从而使植被覆盖降低^[29-30]。分区四占总面积的 4.6%,主要分布在西北部的玛多县及东南部的汶川县和康定县地区。汶川地区自 2008 年汶川地震

后,该区域的地质活动较为频繁,生态系统也在逐渐恢复,气温和降水作为植被生长的两个重要因素,促进该区域生态重建^[31]。玛多县位于高海拔地区,气温低、降水量少、人类活动影响程度小,气温和降水成为植被覆盖变化的主要诱因^[32]。分区五占总面积的 43.8%,主要分布在若尔盖县和红原县等东北部高寒高纬度地区,土地沙化严重,植被变化的主导驱动因素是人类活动,因此,该区域的年植被覆盖变化与年

均气温和年降水量的相关性不大^[33]。

在研究区不同的区域,年植被覆盖与年均气温的偏相关性和年植被覆盖与年均降水量的偏相关性的方向与程度不同,整体而言,植被覆盖对降水的变化相较于气温更加敏感,此外研究区内年植被覆盖与年降水量呈负相关的区域,往往与年均气温呈正相关,这与仙巍等^[20]研究川西高山高原过渡带植被对气候变化响应的结果相符。

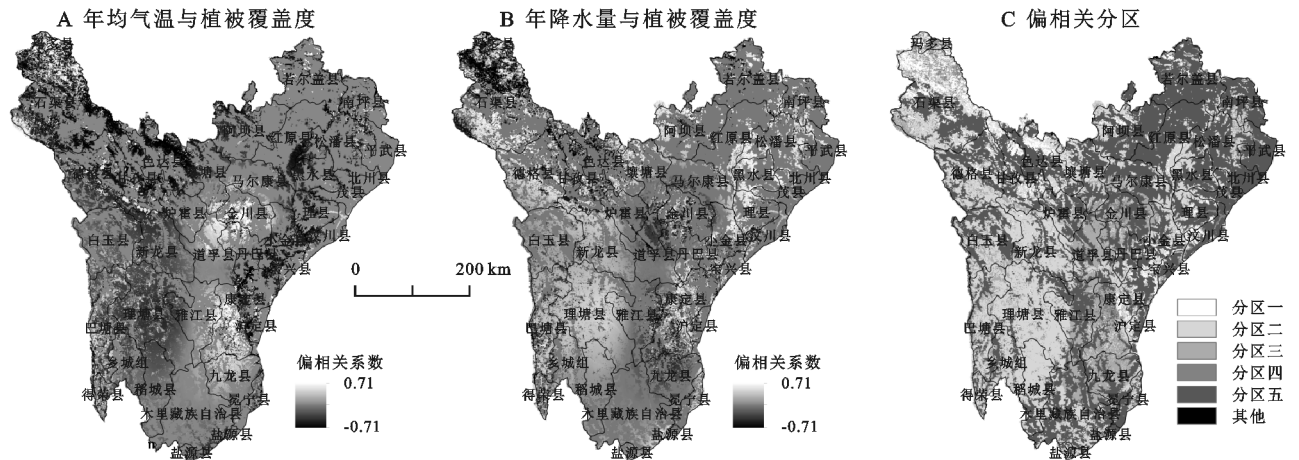


图 6 1995—2015 年年均气温和年降水量与植被覆盖度偏相关分析及偏相关性分区

4 结论

(1) 运用 ESTARFM 模型融合的 2005 年和 2015 年的 GIMMS NDVI3g 数据与对应的真实 MODIS NDVI 数据吻合度较高,能凸显地区特征,融合结果可用于地形复杂的川西高原植被变化的研究,为早期的大尺度植被变化研究提供了一种新的思路。

(2) 1995 年、2005 年和 2015 年川西高原植被覆盖结构整体较好,空间上呈现沿海拔先升高后降低的垂直分布特点,时间上植被变化趋势稳定。植被覆盖度较低的区域主要分布在低海拔区,近 20 a 来研究区植被覆盖度整体变化趋势比较稳定,其中以高覆盖度区域面积的逐年减少和较低覆盖度区域面积的逐年增加趋势较为明显。

(3) 1995 年、2005 年和 2015 年川西高原年均气温和年降水量存在空间异质性,气温空间差异表现为研究区北部气温低于南部、西部气温低于东部,降水空间差异表现为研究区西部降水量低于东部。

(4) 年植被覆盖与年均气温呈正相关的区域面积占 14.9%,年植被覆盖与年均降水量呈正相关的区域面积占 35.4%,此外研究区内年植被覆盖与年降水量呈负相关的区域,往往年植被覆盖与年均气温呈正相关,植被覆盖度对降水的变化相较于气温的变化更加敏感。

本研究中使用的数据时间间隔较长,可能会忽略

一些细节。此外,由于数据获取等原因,仅选取了年均气温和年降水量两个主要的气候要素与植被进行响应分析,未考虑地表因素和人为因素等其他因素对植被的响应。未来的研究将会考虑更短的时间间隔和更多因素对植被变化的影响研究。

参考文献:

- [1] 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[J].生态学报,2016,36(13):3960-3968.
- [2] 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.
- [3] 郑杰,冯文兰,牛晓俊,等.四川省植被变化及其与气象因子的相关性分析[J].水土保持通报,2016,36(2):99-104.
- [4] Stellmes M, Udelhoven T, Roeder A, et al. Dryland observation at local and regional scale-Comparison of Landsat TM/ETM plus and NOAA AVHRR time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114(10):2111-2125.
- [5] 毛德华,王宗明,罗玲,等.基于 MODIS 和 AVHRR 数据源的东北地区植被 NDVI 变化及其与气温和降水间的相关分析[J].遥感技术与应用,2012,27(1):77-85.
- [6] 包刚,覃志豪,包玉海,等.1982—2006 年蒙古高原植被覆盖时空变化分析[J].中国沙漠,2013,33(3):918-927.
- [7] 刘洋,李诚志,刘志辉,等.1982—2013 年基于 GIMMS-

- NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J].生态学报,2016,36(19):6198-6208.
- [8] 曹博,张勃,马彬,等.2000—2014 年甘肃省 NDVI 时空变化特征[J].中国沙漠,2018,38(2):418-427.
- [9] Sarmah S, Jia G, Zhang A, et al. Assessing seasonal trends and variability of vegetation growth from NDVI3g, MODIS NDVI and EVI over South Asia[J]. Remote Sensing Letters, 2018,9(12):1195-1204.
- [10] 郭辉,黄粤,李向义,等.基于多尺度遥感数据的塔里木河干流地区植被覆盖动态[J].中国沙漠,2016,36(5):1472-1480.
- [11] Gao F, Masek J, Schwaller M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance; Predicting daily Landsat surface reflectance[J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006,44(8):2207-2218.
- [12] Singh D. Evaluation of long-term NDVI time series derived from Landsat data through blending with MODIS data [J]. Atmosfera, 2012,25(1):43-63.
- [13] Bhandari S, Phinn S, Gill T. Preparing Landsat Image Time Series(LITS) for monitoring changes in vegetation phenology in Queensland, Australia[J]. Remote Sensing, 2012,4(6):1856-1886.
- [14] Schmidt M, Udelhoven T, Gill T, et al. Long term data fusion for a dense time series analysis with MODIS and Landsat imagery in an Australian Savanna[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012,6(1):1-18.
- [15] Meng J, Du X, Wu B. Generation of high spatial and temporal resolution NDVI and its application in crop biomass estimation[J]. International Journal of Digital Earth, 2013,6(3):203-218.
- [16] Zhu X, Chen J, Gao F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114(11):2610-2623.
- [17] Knauer K, Gessner U, Fensholt R, et al. An ESTARFM Fusion Framework for the Generation of Large-Scale Time Series in Cloud-Prone and Heterogeneous Landscapes[J]. Remote Sensing, 2016,8:425-446.
- [18] 郝贵斌,吴波,张立福,等. ESTARFM 模型在西藏色林错湖面积时空变化中的应用分析(1976—2014 年)[J]. 地球信息科学学报,2016,18(6):833-846.
- [19] 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(3):16-21.
- [20] 仙巍,季建万,何彬彬,等.川西高山高原过渡带植被对气候变化的响应[J].西南师范大学学报:自然科学版,2016,41(9):1-6.
- [21] 李艳,张成才,罗蔚然,等.基于改进最大值法合成 NDVI 的夏玉米物候期遥感监测[J].农业工程学报,2019,35(14):159-165.
- [22] 阎洪.气候时空数据的样条插值与应用[J].地理与地理信息科学,2003(5):27-31.
- [23] 陈梦露,李存军,官云兰,等.基于 ESTARFM 模型的区域农田高时空分辨率影像产生与应用[J].作物学报,2019,45(7):1099-1110.
- [24] 熊俊楠,彭超,程维明,等.基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1830-1840.
- [25] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [26] 张宇婷,张振飞,张志.新疆大南湖荒漠区 1992—2014 年植被覆盖度遥感研究[J].国土资源遥感,2018,30(1):187-195.
- [27] 韩继冲,喻舒琳,杨青林,等.1999—2015 年长江流域上游植被覆盖特征及其对气候和地形的响应[J].长江科学院院报,2019,36(9):51-57.
- [28] 张穗,姜莹,李喆.3S 技术支持下的汝溪河水土流失动态监测及分析[J].长江科学院院报,2016,33(11):21-27.
- [29] 倪化勇,陈绪钰,周维,等.高寒高海拔山原区沟谷型泥石流成因与特征:以四川省雅江县祝桑景区为例[J].水土保持通报,2013,33(1):211-215.
- [30] 王强,张勃,戴声佩,等.三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析[J].中国环境科学,2012,32(7):1302-1308.
- [31] 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.
- [32] 范微维,易桂花,张廷斌,等.黄河源区青海省玛多县 2000—2014 年 NDVI 变化及气候驱动因子[J].水土保持通报,2017,37(1):335-340.
- [33] 李晓英,姚正毅,王宏伟,等.若尔盖盆地沙漠化驱动机制[J].中国沙漠,2015,35(1):51-59.