

西南地区NDVI时空变化及与极端气候事件的关系

宋文杰, 李谢辉

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: 1732892087@qq.com

收稿日期: 2021年7月16日; 录用日期: 2021年8月25日; 发布日期: 2021年9月1日

摘要

为了研究在全球气候变暖背景下,西南地区归一化植被指数NDVI的时空变化特征及其与极端气候事件的关系,本文基于2000~2019年MODIS植被指数数据、温度和降水日值数据,首先对NDVI的时空变化特征进行了分析,然后对选用的9个极端气候指数与NDVI的相关性进行了讨论。结果表明:1)西南地区一年四季的植被覆盖度都较高,且四季的植被覆盖度都呈不同程度的上升趋势,其中,夏季的植被覆盖度最高,但增加速率最小,冬季的植被覆盖度最低,春秋两季的植被覆盖度相差不大,且春季的增加速率最大;2)极端气温和极端降水的强度、发生频次和持续时间等都对植被的生长有不同程度的影响作用,其中极端气温对植被生长的影响要高于极端降水,极端暖事件对植被生长有正向作用,极端冷事件对植被生长有负向作用,极端降水对植被生长的影响相对较弱;3)春夏两季极端暖事件对植被生长有促进作用,而秋冬两季极端冷事件对植被生长有抑制作用。

关键词

NDVI, 极端气候事件, 时空变化特征, 相关性, 西南地区

Spatiotemporal Change of NDVI and Its Relationship with Extreme Climate Events in Southwestern China

Wenjie Song, Xiehui Li

College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Engineering, Chengdu Sichuan
Email: 1732892087@qq.com

Received: Jul. 16th, 2021; accepted: Aug. 25th, 2021; published: Sep. 1st, 2021

Abstract

In order to study the spatio-temporal change characteristics of the normalized vegetation index (NDVI) in the southwestern China and its relationship with extreme climate events under the background of global warming, the spatio-temporal change characteristics of NDVI were firstly analyzed based on MODIS vegetation index data, daily temperature and precipitation data from 2000 to 2019. Then the correlation between NDVI and 9 selected extreme climate indices was discussed. The results showed that: 1) The vegetation coverage in Southwestern China was relatively high throughout the year, and the vegetation coverage in all four seasons showed an upward trend in varying degrees. Among them, the vegetation coverage in summer was the highest, but the increase rate was the smallest, and the vegetation coverage in winter was the lowest. The vegetation coverage in spring and autumn was similar, and the increase rate in spring was the largest; 2) The intensity, frequency and duration of extreme temperature and precipitation had different effects on the growth of vegetation. The effect of extreme temperature on the growth of vegetation was higher than that of extreme precipitation. Extreme warm events have a positive effect on vegetation growth, and extreme cold events have a negative effect on vegetation growth. The effect of extreme precipitation on the growth of vegetation was relatively weak; 3) The extreme warm events in spring and summer could promote the vegetation growth, while the extreme cold events in autumn and winter could inhibit the vegetation growth.

Keywords

NDVI, Extreme Climate Events, Spatial and Temporal Change Characteristics, Correlation, Southwestern China

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

陆地植被是联系土壤、水体和大气之间的关键桥梁,在全球气候变化中起着十分重要的作用[1]。而植被的变化又会导致气候的改变,进而会影响植被的覆盖度,两者是互相影响的[2]。中国西南地区地形地貌复杂,境内有高原、山地、盆地、丘陵等不同地形。近年来,极端降水频次和强度的显著增加,极易对地形复杂、海拔高低起伏的西南地区引发暴雨洪涝直接灾害,以及山体滑坡和泥石流等次生灾害[3]。因此,开展植被覆盖变化和极端气候事件的关系对西南地区生态系统的保护和环境改善具有重要意义。归一化植被指数(NDVI)可用于表征植被覆盖状况,常被应用于全球和区域的植被覆盖状况与气候因子的关系研究[4]。干旱会抑制温带地区和热带的植被生长,因此植被的生长极大地受水分的影响[5]。目前,对于植被和极端气候之间的关系,国内外研究学者已作出了不少研究。如, Xie 等指出霜冻、洪涝等恶劣天气会抑制植被的生长,干旱和高温会推迟植被进入休眠期的时间[6]。Liu 等发现极端降水对温带阔叶林、温带草原有较大的影响,并使 NDVI 值降低[7]。魏佳珩对青藏高原植被与极端气候事件的响应关系研究发现极端降水事件对 NDVI 有正向的促进作用,且比极端气温事件对 NDVI 的影响要显著,因此在干旱、半干旱地区,植被的生长受水分的影响更加敏感[8]。陈丽娟发现福建省极端暖事件,如全球变暖趋势的影响会导致冬季和春季 NDVI 值呈现上升趋势[9]。江珊珊等指出春季极端干旱事件会使江苏省

NDVI 值下降, 而夏季洪涝事件会使 NDVI 值降低[10]。岳祝研究发现在中国沿海地区, 当月极端低温会使长江以北地区的植被生长变差, 当月极端高温会使华北、东北沿海的植被生长变好; 极端降水事件, 如 Rx5day 的增加会改善长江以北地区的植被生长, 而抑制长江以南地区植被的生长[11]。周金霖等指出西南大部分地区植被覆盖与气温因子在短时期内相关性显著, 而与降水因子的相关性在不同周期下的空间差异很大[12]。总之, 极端气候事件的发生对植被有着很大的影响, 进而会影响气候的变化和生态系统的平衡, 甚至对人类的生产生活有着重大的影响。因此, 本文对西南地区 2000~2019 年植被覆盖的年际和四季时空变化特征进行分析, 并讨论 NDVI 与极端气候指数的相关性, 这对于反映西南地区极端气候变化与生态系统之间的响应关系具有重要意义。

2. 数据资料与方法

2.1. 研究区概况

西南地区是我国地形最为复杂的区域, 也是我国第三阶梯的重要过渡地带[13]。本文的研究区主要包括位于我国西南部的四川、重庆、贵州、云南和广西 5 个省市, 经纬度介于 96°21'E~112°04'E 和 20°54'N~34°19'N 之间, 主要包括若尔盖和云贵高原、横断山脉、四川盆地、广西丘陵等地貌类型。该区域由于地形复杂, 水汽较充足, 受局地因子、季风等的影响较大, 是一个典型的气候变化区。境内植被生长旺盛, 植被类型复杂多样, 形成了独特的植被分布格局, 也是我国重要的天然林区[14]。然而近年来, 西南地区普遍存在温度升高, 降水减少的气候变化趋势, 严重干旱灾害发生频繁, 春季、夏季、秋季降水趋势减少, 存在有局部和区域性长时间的气象干旱现象[15]。

2.2. 数据资料

植被指数(NDVI)数据集来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn/>), 主要是基于 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据, 并选取研究时段 2000~2019 年的年度和季度的植被指数数据。其中, 年度 NDVI 数据为每年 1~12 个月份的月 NDVI 数值最大值, 季度分为春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)、冬季(12~次年 2 月) 4 个季度, 季度 NDVI 数据为每季度 3 个月份 NDVI 数据数值的最大值。空间分辨率为 1 km, 可以准确反映出地表植被覆盖状况。

Table 1. Definition and classification of extreme climate index

表 1. 极端气候指数的定义与分类

类别	代码	名称	定义	单位
气温类指数	TX10	冷昼指数	日最高气温小于 10%分位值的日数	d
	TX90	暖昼指数	日最高气温大于 90%分位值的日数	d
	WSDI	持续暖期指数	至少连续六天最高气温大于 90%分位值的日数	d
	CSDI	持续冷期指数	至少连续六天最低气温小于 10%分位值的日数	d
	DTR	温度日较差	日最高气温与最低气温差的平均值	°C
降水类指数	CDD	连续湿日数	最长连续降水日数	d
	CWD	连续干日数	最长连续无降水日数	d
	R20 mm	大雨日数	日降水量大于等于 20 mm 的天数	d
	SDII	降水强度	降水量与降水日数比值	mm/d

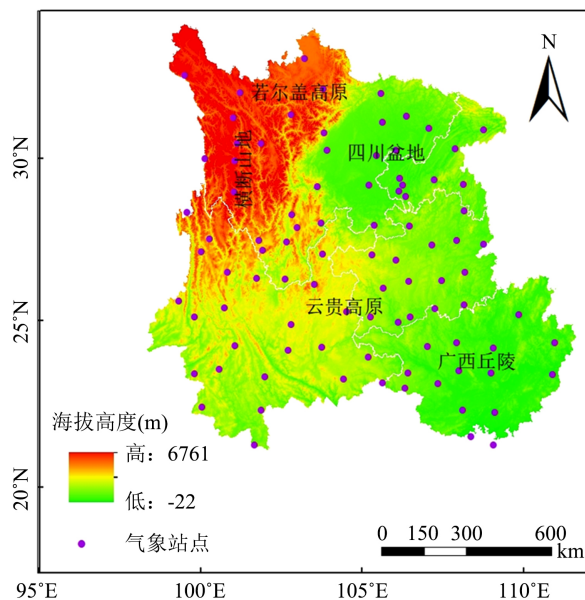


Figure 1. Distribution and elevation of meteorological stations in Southwestern China

图 1. 西南地区气象站点分布和高程

气象数据是基于 2000~2019 年地面气候资料温度和降水日值数据集, 并选出西南地区共 92 个气象站点的日降水量, 日最高气温和日最低气温数据来计算各个站点的 9 个极端气候指数值, 图 1 为所选气象站点的地理位置分布和高程图。主要利用 R 语言中的 RCLimDex 模型[16]计算获得冷昼指数、暖昼指数、温度日较差、持续暖期指数和持续冷期指数 5 个极端气温指数以及连续干日数、连续湿日数、大雨日数和降水强度 4 个极端降水指数。其中冷昼指数、暖昼指数、持续暖期指数和持续冷期指数代表了极端气温的发生频次以及持续时间, 温度日较差表示对植被生长发育有重要影响的阈值; 连续干日数、连续湿日数和大雨日数表示极端降水的发生频次及持续时间, 降水强度可表征降水的强度特征, 具体 9 个指标的定义和描述见表 1 所示。

2.3. 数据资料

2.3.1. 趋势分析

利用一元线性回归方法分析西南地区 NDVI 的年际变化趋势[17], 该公式适用于研究两个变量之间的数量变化关系呈近似线性关系的分析, 因而能很好的反映出 NDVI 的年际变化趋势, 其计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i t_i - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (1)$$

式中, i 为年份序号, 取值 1~20; n 为时间序列长度 20 (2000~2019 年); t_i 表示第 i 年的 NDVI 值, t_i 的不同就决定了变化趋势 Slope 的不同; $\text{Slope} > 0$, 表示 NDVI 值或指数呈上升趋势, 反之为下降趋势。

2.3.2. 相关性分析

利用 Pearson 相关系数来分析 NDVI 与极端气候指数之间的相关性[18], 并进行显著性检验, 该公式适用于研究两变量为连续数据、服从正态分布, 且呈直线相关关系的分析, 计算公式为:

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

式中, R_{xy} 是两个变量 x 与 y 之间的相关系数, \bar{x} 与 \bar{y} 是这两个变量的均值, R_{xy} 的取值范围为-1 到 1, 大小主要取决于两变量的相关程度, 绝对值越大, 说明相关性越强。利用该系数来表明 NDVI 与极端气候指数之间的相关性程度, 以此来分析 NDVI 和不同极端气候事件之间的关系。

3. NDVI 时空变化特征

3.1. 年际及四季变化趋势分析

图 2 是年际和四季的 NDVI 在 2000~2019 年内的变化趋势图, 且年际和各季节的线性拟合趋势都通过了 0.05 的显著性水平检验。

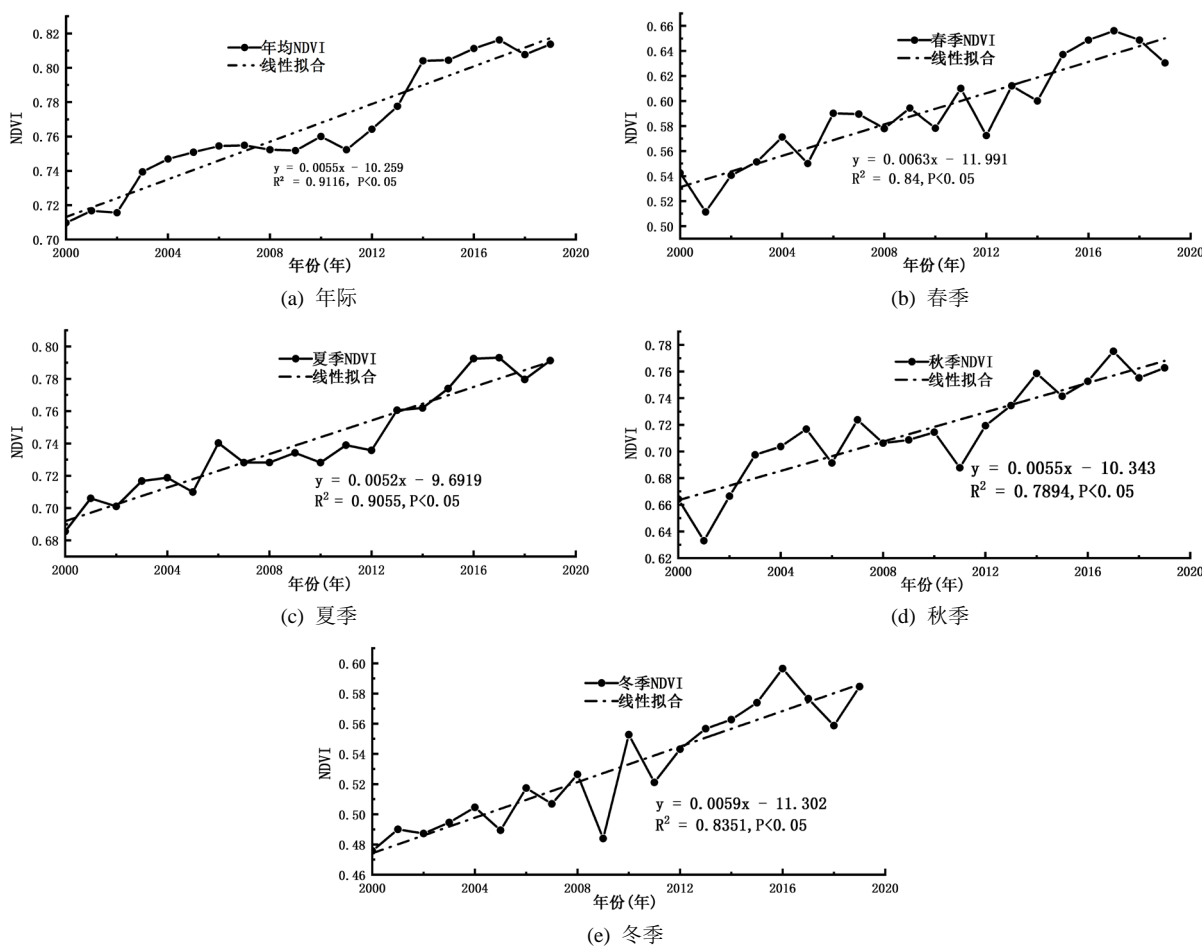


Figure 2. NDVI interannual and seasonal linear change trends from 2000 to 2019

图 2. 2000~2019 年 NDVI 年际和四季线性变化趋势图

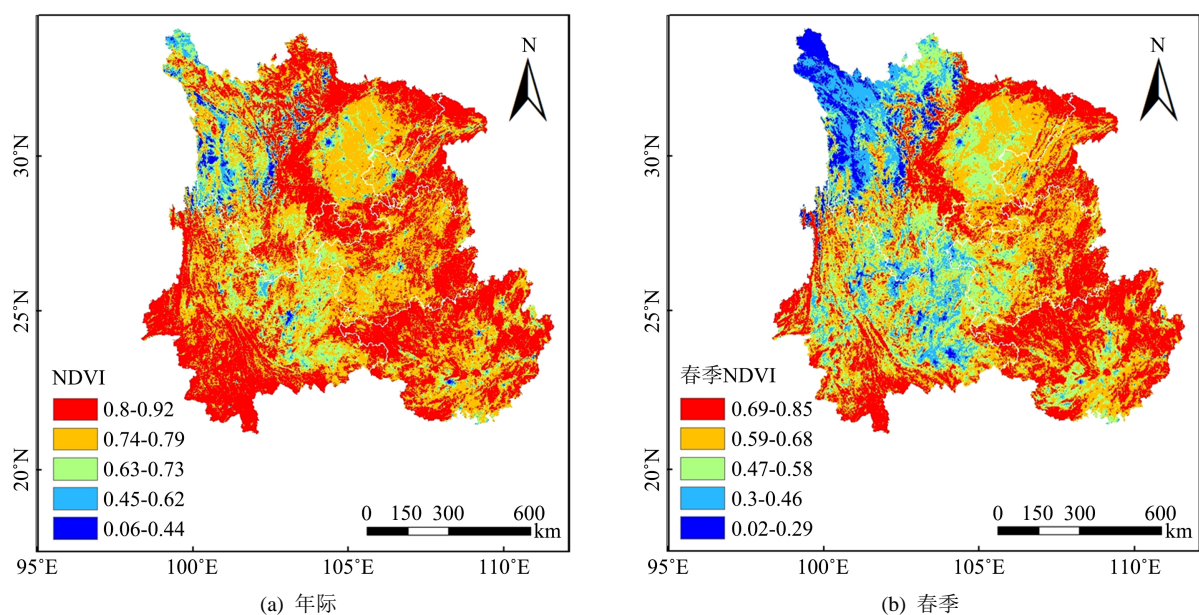
可以看出, 西南地区年平均 NDVI 值在 0.71~0.82 之间(图 2(a)), 多年均值为 0.7652, 说明植被覆盖状况较好。近 20 年来西南地区植被呈波动上升趋势, 但上升趋势较缓慢, 上升速率为 5.5%/10a, 并且都

通过了 0.05 的显著性水平检验。其中, 2017 年植被覆盖度最高, 为 0.8162。从 2002~2004 年 NDVI 有较明显的增加趋势, 说明植被生长较好, 2004~2007 年 NDVI 上升趋势较慢, 植被也处于缓慢生长阶段, 2007~2009 年 NDVI 下降趋势较慢, 植被生长处于缩减状态, 2010 年前后 NDVI 有较小的上升和下降趋势, 2011~2014 年又有明显的增加趋势, 表明植被变化有明显的改善, 2014 年之后 NDVI 上升趋势也较为缓慢。春季, 西南地区 2000~2019 年 NDVI 值呈波动缓慢上升趋势(图 2(b)), 无较大的波动, 增加速率是四季中最高, 为 6.3%/10a。年平均 NDVI 值在 0.51~0.64 之间, 多年均值达到 0.5906, 植被覆盖度较好。夏季, 西南地区 NDVI 值依然呈波动缓慢上升趋势(图 2(c)), 上升趋势较平缓, 没有太大的波动, 夏季 NDVI 值线性增加速率为四季中最低, 为 5.2%/10a; 夏季西南地区 20 年来年平均 NDVI 值在 0.68~0.79 之间, 多年均值可达 0.7412, 植被覆盖度较高, 其中 2000 年植被覆盖度最低, 为 0.6856, 2017 年植被覆盖度最高, 为 0.7931。秋季, 西南地区 2000~2019 年 NDVI 值呈缓慢波动上升趋势(图 2(d)), 上升速率为 5.5%/10a, 但在上升过程中, 有两次较大的波动, 表现在 2001~2003 年间和 2011~2014 年间, 西南地区 NDVI 上升趋势较明显; 秋季西南地区 20 年来年平均 NDVI 值在 0.63~0.77 之间, 多年均值为 0.7156, 植被生长状况较好, 其中 2001 年植被覆盖度最低, 为 0.633, 2017 年植被覆盖度最高, 为 0.7752。冬季, 西南地区 2000~2019 年 NDVI 值呈缓慢波动上升趋势(图 2(e)), 上升速率为 5.9%/10a, 2009 年前后 NDVI 值有较大的波动, 2008~2009 一年里 NDVI 值呈较明显的下降趋势, 从 0.5264 下降到 0.4839; 2009~2010 一年间 NDVI 值又有明显的上升趋势, 从 0.4839 上升至 0.5527; 冬季西南地区 20 年来年平均 NDVI 值在 0.48~0.59 之间, 多年均值为 0.5301, 植被覆盖度不如春季和秋季高。

以上分析综合表明, 西南地区一年四季的植被覆盖度都较高, 且四季的植被覆盖度都呈不同程度的上升趋势, 其中, 夏季的植被覆盖度最高, 多年均值可达 0.7412, 但夏季植被覆盖度增加的速率最小, 冬季的植被覆盖度最低, 多年均值为 0.5301, 春秋两季的植被覆盖度相差不大, 且春季植被覆盖度增加的速率最大。

3.2. 多年及四季平均空间分布

图 3 为西南地区 2000~2019 年年际和四季的多年平均空间分布图, 对每个图都选取了 5 个等级来表征 NDVI 的空间分布状况。



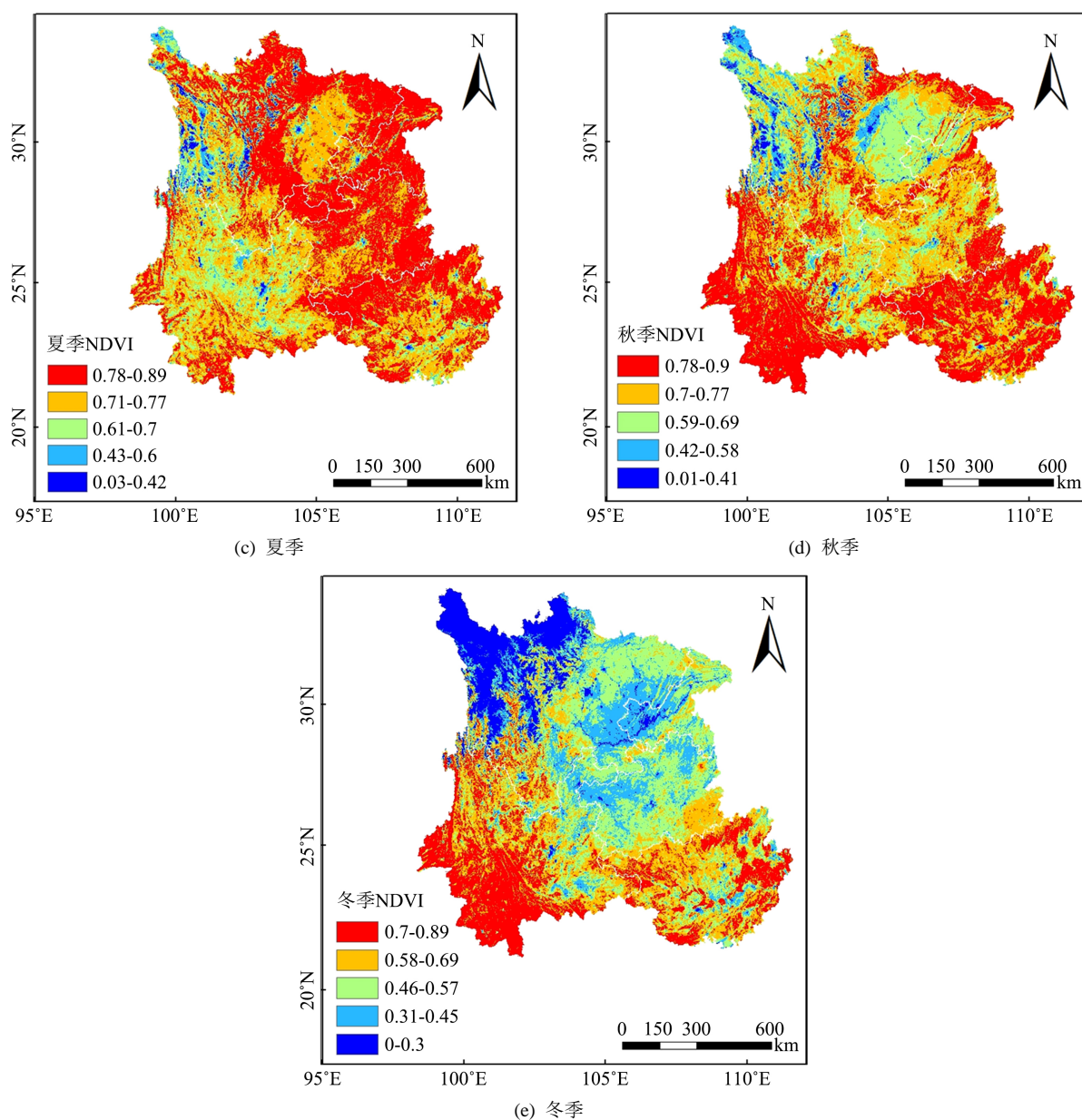


Figure 3. Average spatial distribution of NDVI for many years and four seasons from 2000 to 2019

图 3. 2000~2019 年 NDVI 多年及四季平均空间分布图

从 NDVI 多年平均空间分布图 3(a)来看, 四川盆地外围一周、若尔盖高原、云南西南部和南部、广西以北和贵州东部地区植被覆盖度最高, NDVI 值为 0.8 以上; 成都平原及附近盆地、云南东部、贵州大部分地区 and 广西南部地区植被覆盖度也较好, NDVI 值为 0.74~0.79 之间; 横断山地北部植被覆盖度较低, 有的地区 NDVI 值甚至在 0.4 以下。从春季多年平均空间分布图 3(b)来看, 春季横断山地北部 NDVI 值较高, 基本都在 0.59 以上; 成都平原部分地区、云南东部及以东地区 NDVI 值不高, 在 0.47~0.68 之间, 仅有零散的部分区域 NDVI 值达到 0.7 以上, 植被覆盖度一般; 成都平原到整个四川盆地外围一周、云南南部、贵州东部以及广西丘陵一带 NDVI 值最低, 在 0.3 以下, 说明春季时期植被覆盖度偏低。整体来说, 春季西南地区的植被覆盖度不高, 只有少部分地区的 NDVI 值可达到 0.7 以上, 大部分地区的 NDVI

值在 0.5 以下。从夏季西南地区 NDVI 多年平均空间分布图 3(c)可以看出, 成都平原及其附近至四川盆地外围一周、贵州东部广西北部以及云南南部少部分地区的 NDVI 值较高, 可达到 0.8 以上。根据春季的分析来看, 夏季这些区域的 NDVI 值较高, 而春季的 NDVI 值较低, 说明在春季至夏季的过渡期时, 这些区域的植被受到温度和降水等外界因素的影响, 植被生长较为快速, 以至于在夏季时植被覆盖度较高。夏季时只有较小的区域, 在横断山地部分地区 NDVI 值偏低, 在 0.4 以下。整个西南地区普遍 NDVI 值可达到 0.6 以上, 尤其是西南东部地区 NDVI 值可达 0.8 以上, 西南地区整体植被覆盖度较高, 夏季植被生长较为旺盛。从秋季西南地区多年平均空间分布图 3(d)来看, 云南南部、贵州东部、四川盆地北部及其东南部、重庆一带以及广西丘陵一带的 NDVI 值较高, 在 0.78~0.9 之间, 植被覆盖度高, 植被生长旺盛; 四川盆地中部地区、云南东部至贵州一带, 植被生长状况也较好, 在 0.6~0.77 之间; 秋季横断山地一带的植被状况较夏季而言有下降趋势, 植被覆盖度偏低。秋季整个西南地区普遍 NDVI 值较高, 植被生长状况较好。从冬季西南地区多年平均空间分布图 3(e)来看, 云南西南部及其南部、广西部分地区植被覆盖度较高, 可达 0.7 以上, 横断山地以北地区、若尔盖高原地区植被覆盖度最低, NDVI 值在 0.3 以下, 其余四川盆地、云南东部以东至贵州一带, NDVI 值为 0.3~0.57 之间, 植被覆盖度较低, 总体来看, 冬季西南地区 NDVI 值普遍偏低。

以上分析综合表明, 西南地区各季节的 NDVI 值空间分布特征大体一致, 云南、广西、贵州和四川东部地区 NDVI 值较高, 说明这些地区的植被覆盖度较好; 横断山地及若尔盖高原区域 NDVI 较低, 植被覆盖度也相应较低。

4. NDVI 与极端气候指数的相关性

4.1. 年际相关性

表 2 是西南地区 2000~2019 年 NDVI 与 5 个极端气温指数和 4 个极端降水指数之间的年际相关性。

Table 2. Inter-annual correlation between NDVI and extreme climate index

表 2. NDVI 与极端气候指数的年际相关性

极端气温指数	TX10	TX90	WSDI	CSDI	DTR
相关性	-0.402	0.467*	0.311	-0.528*	0.187
极端降水指数	CDD	CWD	R20 mm	SDII	
相关性	-0.077	-0.016	0.281	0.336	

*为通过 0.05 的显著性水平检验。

由表 2 可知, 整体来说, 西南地区 NDVI 与极端气温指数的相关性比与极端降水指数的相关性相对较好。NDVI 除了与极端气温指数中的暖昼指数(TX90)和持续冷期指数(CSDI)之间呈显著相关外, 与其余指数均呈不显著相关关系。表现为 NDVI 与 TX90 之间呈显著的正相关关系, 相关性接近于 0.5, NDVI 与 CSDI 呈显著的负相关关系, 相关性可达 0.528; NDVI 与 4 个极端降水指数之间都呈不显著的相关关系, 且相关性较弱。以上结果表明, 极端气温和极端降水的强度、发生频次和持续时间等都对植被的生长会有不同程度的影响作用, 在西南地区植被生长受极端气温的影响比极端降水更加敏感, 这一结果与王昊[19]研究西南地区(包括西藏、青海) NDVI 与极端气候指数之间相关性的分析一致。极端暖事件对植被生长有正向的促进作用, 极端冷事件对植被的生长有负向的抑制作用, 而极端降水对植被的生长起到的作用相对较弱。

4.2. 季节相关性

表 3 和表 4 分别是西南地区 2000~2019 年 NDVI 与 5 个极端气温指数和 4 个极端降水指数之间的季节相关性。

Table 3. Seasonal correlation between NDVI and extreme temperature index

表 3. NDVI 与极端气温指数的季节相关性

极端气温指数	春季	夏季	秋季	冬季
TX10	-0.311	-0.066	-0.209	-0.473*
TX90	0.322	0.581*	0.269	0.174
WSDI	0.432*	0.251	0.136	0.042
CSDI	0.127	0.045	-0.083	-0.527*
DTR	0.035	0.327	-0.273	-0.041

*为通过 0.05 的显著性水平检验。

Table 4. Seasonal correlation between NDVI and extreme precipitation index

表 4. NDVI 与极端降水指数的季节相关性

极端降水指数	春季	夏季	秋季	冬季
CDD	-0.217	0.152	-0.139	-0.225
CWD	-0.378	-0.216	-0.157	-0.426*
R20 mm	0.217	-0.093	0.131	-0.046
SDII	-0.176	-0.096	-0.105	-0.042

*为通过 0.05 的显著性水平检验。

由表 3 可知, 整体来说, 西南地区 NDVI 与极端气温指数各季节之间的相关程度不高, 其相关性在各季节也不一样。其中, NDVI 与冷昼指数(TX10)之间一年四季都呈较弱的负相关关系, 春季和秋季相关系数的绝对值在 0.4 以下, 在夏季两者的相关性更弱, 冬季两者呈显著的负相关关系, 且相关系数的绝对值为 0.473。NDVI 与暖昼指数(TX90)之间一年四季呈较弱的正相关关系, 在春季、秋季和冬季两者的相关性差别不大, 相关系数都在 0.35 以下, 在夏季两者具有显著的正相关性, 且相关系数可达 0.581。NDVI 与持续暖期指数(WSDI)之间在一年四季都呈较弱的正相关关系, 两者在春夏两季的相关性比在秋冬两季的相关程度较高。NDVI 与持续冷期指数(CSDI)之间除了在冬季的相关性较高外, 其他三季的相关性都较弱, 且两者在冬季呈显著的负相关关系, 相关系数的绝对值可达 0.527。由表 4 可知, 西南地区 NDVI 与极端降水指数之间的季节相关程度更弱, 且在不同季节普遍呈弱的不显著的负相关关系。

以上分析综合表明, 西南地区 NDVI 与极端气候指数的季节相关性整体上基本都较弱。相比较而言, NDVI 与极端气温之间的季节相关性要高于极端降水, 这和 NDVI 与极端气候指数之间的年际相关性大体一致。在春季和夏季, NDVI 与 TX90 和 WSDI 之间的相关程度较高, 且都呈正相关关系, 说明极端暖事件对植被的生长起促进作用, 在春夏两季极端高温的频次和持续时间对植被的生长影响较大。在秋季和冬季, NDVI 与 TX10 和 CSDI 之间的相关性较高, 且都呈负相关关系, 说明极端冷事件对植被的生长起抑制作用, 在秋冬两季极端低温的频次和持续时间对植被的生长影响较大。NDVI 与极端降水之间的季节相关性整体都较弱, 且大体都呈不显著的负相关性。

5. 结论

本文根据西南地区 2000~2019 年的植被指数数据集和地面气温和降水日值数据资料, 首先对 NDVI 的年际和四季时空变化特征进行了分析, 然后探讨了 NDVI 与极端气候指数之间的相关性, 得到以下一些主要结论:

1) 西南地区整体植被覆盖度普遍呈上升趋势, 多年 NDVI 均值可达 0.7652, 植被的生长状况较好。一年四季的 NDVI 值都达到了 0.5 以上, 且四季的 NDVI 值都呈不同程度的上升趋势。夏季的植被生长状况最好, 其 NDVI 值最高; 冬季的植被生长有所变差, 其 NDVI 值最低。西南地区东部及南部大部分地区植被生长状况较好, 西北部地区植被生长状况较差。

2) 在西南地区植被的生长受极端气温的影响比极端降水更加显著。极端暖事件在一定作用下有利于植被的生长, 但极端高温事件会导致干旱的发生, 从而不利于植被的生长, 甚至会大面积降低植被覆盖度; 极端冷事件则不利于植被生长, 因而冬季的植被覆盖度最低; 极端降水对植被的生长起到的作用较弱。在春夏两季极端高温对植被的生长起促进作用, 秋冬两季极端低温对植被的生长起抑制作用。

6. 讨论

将以上结论与已有周金霖[12]、张勃[13]、王昊[19]等的相关研究成果进行对比后发现, 本文对西南地区 NDVI 的时空变化特征及与极端气候指数相关性的研究结果虽然在研究区范围、研究时间尺度和研究方法上与他们的研究有些区别, 但所得结论基本一致。即, 整体上西南地区的植被覆盖度是呈上升趋势的, 植被生长状况较好, 植被有所改善; 西南地区 NDVI 与气温因子和极端气温指数的相关性较高, 而与降水因子和极端降水指数的相关性较弱。然而, 本文的研究时间尺度最长(20 年), 研究时间最新(到 2019 年), 并主要侧重于对 NDVI 和极端气候指数的相关性分析, 这对于在全球变暖背景下, 针对极端气候事件的增加会给植被生态系统带来的影响研究尤为重要和有现实意义。

参考文献

- [1] 张晋霞, 徐长春, 杨秋萍. 2001-2017 年新疆 NDVI 变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 250-256.
- [2] 陈效述, 王恒. 1982-2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 84-94.
- [3] 丁文荣. 西南地区极端降水的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1071-1079.
- [4] Stow, D., Daeschner, S., Hope, A., et al. (2003) Variability of the Seasonally Integrated Normalized Difference Vegetation Index across the North Slope of Alaska in the 1990s. *International Journal of Remote Sensing*, **24**, 111-117. <https://doi.org/10.1080/0143116021000020144>
- [5] 李鹏. 青藏高原植被枯黄期的时空变化及其对极端气候事件的响应[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [6] Xie, Y.Y., Wang, X.J. and Silander Jr., J.A. (2015) Deciduous Forest Responses to Temperature, Precipitation, and Drought Imply Complex Climate Change Impacts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 13585-13590. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509991112>
- [7] Liu, G., Liu, H.Y. and Yin, Y. (2013) Global Patterns of NDVI-Indicated Vegetation Extremes and Their Sensitivity to Climate Extremes. *Environmental Research Letters*, **8**, Article ID: 025009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/025009>
- [8] 魏佳珩. 青藏高原植被的时空变化及其对极端气候事件的响应[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [9] 陈丽娟. 近半个世纪以来福建省极端气候事件及其植被 NDVI 响应[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2017.
- [10] 江珊珊, 张增信, 王玮琳, 等. 江苏省植被动态演变规律及其与极端气候事件的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 74-80.
- [11] 岳祝. 中国大陆沿海地区极端气温和降水时空趋势及其对植被生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范

- 大学, 2019.
- [12] 周金霖, 马明国, 肖清, 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.
- [13] 张勃, 王东, 王桂钢, 等. 西南地区近 14a 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.
- [14] 庞瑞, 顾峰雪, 张远东, 等. 西南高山地区净生态系统生产力时空动态[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7844-7856.
- [15] 徐海亮. 六十年来西南地区气象干旱灾害及气候环境变化[J]. 玉溪师范学院学报, 2020, 36(3): 92-103.
- [16] 王思远, 刘纪远. 中国土地利用时空特征分析[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 631-639.
- [17] 李学梅, 任志远. 近十年重庆市 NDVI 变化及对气温降水的旬响应特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 101-108.
- [18] Li, C.L., Wang, J., Hu, R.C., *et al.* (2018) Relationship between Vegetation Change and Extreme Climate Indices on the Inner Mongolia Plateau, China, from 1982 to 2013. *Ecological Indicators*, **89**, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.066>
- [19] 王昊. 西南地区极端气候指数时空变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2019.