



中国西南部地区植被对极端气候事件的响应

倪 铭 张曦月 姜 超* 王鹤松

北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

摘 要 在全球气候变化背景下, 极端气候事件频发。中国西南部地区植被对于气候变化及极端气候事件的响应较为敏感。为探究西南部地区植被对极端气候事件的响应程度, 该文采用Pettitt检验、趋势分析法对数据进行分析, 并对数据进行去趋势处理, 分析去趋势前后极端气候指数与归一化植被指数(*NDVI*)的相关关系。结果表明: (1) 1982–2015年西南部地区植被*NDVI*呈现显著上升的趋势, *NDVI*在1994年发生突变, 突变前上升不显著, 突变后呈现显著上升的趋势; (2) 去趋势前, 1982–2015年间, 极端降水指数与*NDVI*显著相关的仅有1日最大降水量, 其与*NDVI*显著正相关; 除气温日较差外, 其他极端温度指数均与*NDVI*显著相关。1994–2015年间, 1日最大降水量与*NDVI*显著正相关, 降水日数与*NDVI*显著负相关; 在极端温度指数中, 日最低气温最大值、暖昼日数、夏季日数、生长季长度和气温日较差与*NDVI*显著正相关, 冷昼日数、冰冻日数、冷夜日数和霜冻日数与*NDVI*显著负相关。1982–2015年间*NDVI*对年平均气温的响应最强, 而在1994–2015年间*NDVI*对夏季日数和气温日较差的响应强于对年平均气温的响应。(3) 去趋势后, 极端降水指数与*NDVI*的相关性在两个时段都不显著; 而日最高气温最大值、暖昼日数、夏季日数和气温日较差在这两个时段与*NDVI*显著正相关, 但其与*NDVI*的相关系数都在1994–2015年间更高。气温日较差在两个时段与*NDVI*的相关系数都最高。只在1982–2015年冷昼日数与*NDVI*显著负相关。

关键词 归一化植被指数(*NDVI*); 极端气候指数; 全球气候变化; 中国西南部地区

倪铭, 张曦月, 姜超, 王鹤松 (2021). 中国西南部地区植被对极端气候事件的响应. 植物生态学报, 45, 626-640. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0042

Responses of vegetation to extreme climate events in southwestern China

NI Ming, ZHANG Xi-Yue, JIANG Chao*, and WANG He-Song

School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Aims The occurrence of extreme climate events is becoming more frequent worldwide because of the global warming. This study investigated the responses of vegetation to climate extremes in southwestern China, in order to assess the regional eco-security of natural ecosystems related to global climate change.

Methods The normalized difference vegetation index (*NDVI*) data from the GIMMS V1.0 datasets with a resolution of $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ for the period of January 1982 to December 2015 were used in this study for analysis of the spatiotemporal dynamics of vegetation in the study region. The grid data of regional meteorological variables from the CN05.1 for the period of January 1961 to December 2016 were used to develop the overall climate extreme variables, and the values matching the data period of *NDVI* were eventually adopted in the analysis on the interrelationships between *NDVI* and the climate extremes using Pettitt test and trend analysis both before and after detrending.

Important findings Results show that in the study region, *NDVI* generally increased from 1982 to 2015, with occurrence of an abrupt change in 1994. Prior to 1994, the change in *NDVI* was not significant, but the increase became significant from this point onward. Before data detrending, only the maximum 1-day precipitation was significantly and positively correlated with *NDVI* in the precipitation-extremes during 1982–2015. The temperature-extreme variables were all significantly correlated with *NDVI* except the diel air temperature range. From 1994 to 2015, the maximum 1-day precipitation was significantly and positively correlated with *NDVI* and the number of wet days was significantly and negatively correlated with *NDVI*. none of the precipitation-extreme variables was significantly correlated with *NDVI*. The yearly maximum value of daily minimum air temperature, warm days, summer days, length of growing season and diel air temperature range were all significantly and positively

收稿日期Received: 2021-02-01 接受日期Accepted: 2021-03-26

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502104)。Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFC0502104).

* 通信作者Corresponding author (jiangchao@bjfu.edu.cn)

correlated with *NDVI*, but the cool days, frost days, cool nights and icing days were significantly and negatively correlated with *NDVI*. During 1982–2015, the *NDVI* was more strongly correlated with annual mean air temperature than with any of the temperature-extreme variables; whereas during 1994–2015, *NDVI* was more strongly correlated with summer days and diel air temperature range than with annual mean air temperature. After eliminating the trend, there was no significant correlation between the precipitation-extreme variables and *NDVI*, but the yearly maximum value of daily maximum air temperature, warm days, summer days and diel temperature range were significantly and positively correlated with *NDVI* for the entire period of 1982–2015 as well as for the period 1994–2015. The response of *NDVI* to extreme warm events was more pronounced during 1994–2015 than during 1982–2015, with the strongest correlation between diel air temperature range and *NDVI*. There was a significant and negative correlation between cool days and *NDVI* for the period 1982–2015.

Key words normalized differential vegetation index (*NDVI*); climate extremes variables; global climate change; southwestern China

Ni M, Zhang XY, Jiang C, Wang HS (2021). Responses of vegetation to extreme climate events in southwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 626–640. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0042

气候变化对生态环境的影响是众多专家学者关注的热点问题(Cook *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2016)。气候变化不仅包括平均值的变化, 还包括极端气候的变化(Fischer & Knutti, 2015)。

极端温度事件的发生随着气候变暖发生了显著的变化(Donat *et al.*, 2013)。在全球大部分地区, 极端暖事件逐渐增多, 极端冷事件逐渐减少(Boccolari & Malmusi, 2013; Keggenhoff *et al.*, 2014; Tong *et al.*, 2019)。例如, 1961–2015年期间, 兴都库什-喜马拉雅地区的极端冷事件显著减少, 极端暖事件显著增多(Sun *et al.*, 2017); 2000–2010年蒙古高原冬季极端严寒事件频发(John *et al.*, 2013); 中国西北地区呈现暖化趋势(Deng *et al.*, 2014); Qin等(2015)在其研究中指出, 1960–2009年间中国西南部地区呈暖化趋势。

极端降水的变化具有区域差异性。例如, 在北半球的中高纬度地区, 极端降水事件增加(Alexander *et al.*, 2006); 伊朗大多数地区的极端降水值、降水强度和降水频率都有明显的增加趋势(Rahimi & Fatemi, 2019); 印度极端降水事件呈现增多的趋势(Ali & Mishra, 2018)。武文博等(2016)就中国1961–2012年间的极端降水指数展开讨论, 指出极端降水指数从2000年开始呈现增加的趋势; 而1982–2015年期间内蒙古春夏的1日最大降水量和5日最大降水量呈现下降趋势, 但并不显著(Ying *et al.*, 2020); 1962–2012年间中国西南部地区年极端降水事件呈现增多趋势(袁文德等, 2014), 而王昊(2019)的研究则表示, 1971–2013年间云南、广西和贵州交界处呈现偏干的趋势。综上, 不难发现极端气候变化存在不确定性, 还需要进行更多的探究。

气候变化对植被的影响一直是众多学者关注的热点(徐浩杰和杨太保, 2014; 刘丹和于成龙, 2017), 而近些年来, 极端气候对生态系统影响的研究越来越受到重视。2003年欧洲热浪对欧洲生态系统造成了严重影响, 使其初级生产力下降了大约30%(Ciais *et al.*, 2005), 但在美国和欧洲一些地区, 日最高气温的升高使得植被展叶提前(Piao *et al.*, 2015); 鄱阳湖地区极端温度在月尺度上对植被生长影响显著(Tan *et al.*, 2015); 青藏高原地区植被对5月发生的极端温度事件响应敏感(Liu *et al.*, 2019)。极端降水有助于蒙古高原植被生长(Li *et al.*, 2018a), 在内蒙古地区, 年尺度上植被生长对极端降水敏感(Li *et al.*, 2018b); 而黄土高原地区的植被在季节尺度上对极端降水事件响应强烈(Zhao *et al.*, 2018); Yao等(2018)在研究中提到, 极端降水对新疆植被的影响分为两个阶段, 在1982–2010年期间, 极端降水对植被覆盖的影响不太强烈, 在1998年之后, 植被生长对于极端降水的响应加强。极端气候事件对农业发展也存在影响, 有学者发现, 极端温度的升高会降低农作物的产量(Hatfield & Prueger, 2015; Lesk *et al.*, 2016)。因此进行极端气候对生态系统影响的研究, 对探究未来生态系统的变化具有重要的意义。

中国西南部地区(84°–112° E, 21.25°–36.5° N)包括广西、贵州、云南、重庆、四川、青海南部以及西藏东部, 地势起伏, 包含高原、丘陵、盆地等地形, 同时分布有喀斯特地区以及干热河谷等特殊地带(Lian *et al.*, 2015), 生态系统多样。西南部地区处于季风交汇区, 气候类型多样, 包括热带季风气候、亚热带季风气候、高原山地气候等。由于特殊的地

理位置,西南部地区的陆地生态系统易受到气候变化的影响(何敏等, 2019)。目前越来越多的研究着眼于探讨气候变化背景下西南部地区的植被变化,但有关极端气候对于西南部地区植被影响的研究较少,因此,本研究将进一步探究西南部地区植被对于极端气候事件的响应,以期西南部地区的生态修复工程以及可持续发展提供一定的科学依据。

1 材料和方法

1.1 数据来源

归一化植被指数(*NDVI*)为美国国家航空航天局(NASA)发布的GIMMS *NDVI* 3g V1.0数据(<https://www.nasa.gov/nex/data>),空间分辨率为 $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$,数据选取的时间长度为1982年1月–2015年12月。采用最大值合成法(MVC)合成月数据,再计算年平均*NDVI*。

气候数据来源于CN05.1格点化气候数据(吴佳和高学杰, 2013)。该数据包含日最高气温、日最低气温、日平均气温以及日降水量4个变量,数据空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。本研究利用1961年1月1日至2016年12月31日的气候数据,计算了1961–2016年的极端气候指数。为了与*NDVI*的研究时长对应,极端气候数据选取的时间长度为1982–2015年。

1.2 研究方法

世界气象组织委员会(WMO)为了有效推动世界对极端气候事件的研究,定义了27个极端指数(李红梅和李林, 2015),现已广泛应用于国内外极端气候研究中(Chen *et al.*, 2019; Fallah-Ghalhari *et al.*, 2019)。这27个指数包含16个极端温度指数以及11个极端降水指数(表1)。

本文选用27个极端气候指数,运用趋势分析法、Pearson相关性分析方法探究西南部地区植被对极端气候事件的响应。目前,植被对极端气候事件响应的研究大多采取了使用原始数据直接相关的方法(Na *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2018; Luo *et al.*, 2020),然而不可否认的是,使用原始数据直接进行简单相关分析,混淆了多种因素(而不只是极端气候)对植被的影响。为了降低这些因素对结果的影响,本研究加入了年平均气温和年降水量这两个变量,与植被对极端气候指数的响应进行对比。同时,还对极端气候指数和植被*NDVI*进行去趋势处理,计

算去趋势后的极端气候指数与*NDVI*的相关性。

1.2.1 突变分析

利用Pettitt (1979)检验判断西南部地区植被*NDVI*的突变时间。计算Mann-Whitney统计量 $U_{t,n}$ 的公式如下:

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_t - x_j) \quad t \in [1, n] \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_t - x_j) = \begin{cases} 1, x_t > x_j \\ 0, x_t = x_j \\ -1, x_t < x_j \end{cases} \quad j \in [1, t] \quad (2)$$

式中, x_t 和 x_j 为第 t 、 j 个时序样本, n 为数据资料长度。

定义统计量 k_t ,当 t 时刻满足:

$$k_t = \max |U_{t,n}| \quad (1 \leq t \leq n) \quad (3)$$

则 t 时刻很可能是突变点,对 t 时刻进行显著性检验,定义显著性检验统计量为 p_t :

$$p_t = 2\exp[-6k_t^2/(n^3 + n^2)] \quad (4)$$

若 $p_t \leq 0.05$,则认为突变点 t 具有统计学意义。

1.2.2 一阶差分法

植被的生长和发育受气候和非气候因素(人类活动)的交互影响,去趋势从统计上去除了长期变化的复杂影响(Tao *et al.*, 2008; 王柳等, 2014; Lu *et al.*, 2017),可将植被和气候的年际变化与非气候因素的长期变化解耦(Anderson *et al.*, 2012; Iler *et al.*, 2017)。一阶差分是去趋势的主要方法(徐向英, 2019),常用于评估气候因素对植被的影响,可在一定程度上减小人类活动对植被生长发育的影响(史文娇等, 2012; 王柳等, 2014),被广泛应用(任庆民, 1984; Nicholls, 1997)。公式如下:

$$\hat{y}_i' = y_i - y_{i-1} \quad (5)$$

式中, \hat{y}_i' 为第 i 年气象因素对植被的影响, y_i 为第 i 年植被实际增长量。

1.2.3 相关性分析法

利用Pearson相关系数法,计算*NDVI*与极端气候指数之间的相关系数(r),公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, x_i 为第 i 年极端气候指数, y_i 为第 i 年*NDVI*, \bar{x} 为极端气候指数的年平均值, \bar{y} 为*NDVI*的年平均值。

表1 极端气候指数的选择及定义
Table 1 Selection of and definitions on climate extreme variables

气候指数 Climate variables	缩写(单位) Abbreviation (Units)	定义 Definition
年平均气温 Mean annual air temperature	TM (°C)	日平均气温的年平均值 Yearly mean value of daily mean air temperature
日最高气温的最大值 Maximum value of daily maximum air temperature	TXx (°C)	日最高气温的年最大值 Yearly maximum value of daily maximum air temperature
暖昼日数 Warm days	TX90 (d)	日最高气温>90%分位值的日数 Number of days when daily maximum air temperature >90th percentile
夏季日数 Summer days	SU (d)	日最高气温大于25 °C的全部天数 Annual count of days when daily maximum air temperature >25 °C
日最高气温的最小值 Minimum value of daily maximum air temperature	TXn (°C)	日最高气温的年最小值 Yearly minimum value of daily maximum air temperature
冷昼日数 Cool days	TX10 (d)	日最高气温<10%分位值的日数 Number of days when daily maximum air temperature <10th percentile
冰冻日数 Icing days	ID (d)	日最高气温<0 °C的全部天数 Annual count of days when daily maximum air temperature <0 °C
日最低气温的最大值 Maximum value of daily minimum air temperature	TNx (°C)	日最低气温的年最大值 Yearly maximum value of daily minimum air temperature
暖夜日数 Warm nights	TN90 (d)	日最低气温>90%分位值的日数 Number of days when daily minimum air temperature >90th percentile
热带夜数 Tropical nights	TR (d)	日最低气温大于20 °C的全部天数 Annual count of days when daily minimum air temperature >20 °C
日最低气温的最小值 Minimum value of daily minimum air temperature	TNn (°C)	日最低气温的年最小值 Yearly minimum value of daily minimum temperature
冷夜日数 Cool nights	TN10 (d)	日最低气温<10%分位值的日数 Number of days when daily minimum air temperature <10th percentile
霜冻日数 Frost days	FD (d)	日最低气温小于0 °C的全部天数 Annual count of days when daily minimum air temperature <0 °C
持续冷期指数 Cold spell duration index	CSDI (d)	至少连续6天最低气温小于基准期内10%分位值的天数 Annual count of days with at least 6 consecutive days when daily minimum air temperature <10th percentile
持续暖期指数 Warm spell duration index	WSDI (d)	至少连续6天最高气温大于基准期内90%分位值的天数 Annual count of days with at least 6 consecutive days when daily maximum air temperature >90th percentile
生长季长度 Growing season length	GSL (d)	第一次连续6天以上日平均气温大于5 °C至第一次(6月1日后)连续6天日平均气温小于5 °C的天数 Annual count between first span of at least 6 days with daily mean air temperature >5 °C and first span after June 1 st of 6 days with daily mean air temperature <5 °C
气温日较差 Diel temperature range	DTR (°C)	日最高气温与最低气温的差的平均值 Yearly mean difference between daily maximum air temperature and daily minimum air temperature
年降水量 Annual precipitation	PRE (mm)	年总降水量 Total annual precipitation
湿日总降水量 Annual total precipitation on wet days	PRCPTOT (mm)	大于等于1 mm的日降水量的总和 Annual total precipitation on wet days (daily precipitation ≥1 mm)
强降水量 Precipitation amount on very wet days	R95 (mm)	大于基准期内95%分位点的日降水量的总和 Annual total precipitation on days when daily precipitation >95th percentile
极端强降水量 Precipitation amount on extremely wet days	R99 (mm)	大于基准期内99%分位点的日降水量的总和 Annual total precipitation on days when daily precipitation >99th percentile
降水强度 Simple daily intensity index for precipitation	SDII (mm·d ⁻¹)	降水量与降水日数的比值 Annual total precipitation divided by the number of wet days (defined as daily precipitation ≥1.0 mm) in the year
1日最大降水量 Maximum 1-day precipitation	Rx1day (mm)	最大的日降水量 Yearly maximum value of daily precipitation
5日最大降水量 Maximum 5-day consecutive precipitation	Rx5day (mm)	最大的连续5天降水量 Yearly maximum 5-day consecutive precipitation
连续湿日数 Consecutive wet days	CWD (d)	最长连续降水日数 Yearly maximum number of consecutive days with a daily precipitation ≥1 mm
连续干日数 Consecutive dry days	CDD (d)	最长连续无降水日数 Yearly maximum number of consecutive days with daily precipitation <1 mm
降水日数 Number of wet days	R1mm (d)	日降水量≥1 mm的天数 Number of days when daily precipitation ≥1 mm
中雨日数 Number of heavy precipitation days	R10mm (d)	日降水量≥10 mm的天数 Annual count of days when daily precipitation ≥10 mm
大雨日数 Number of very heavy precipitation days	R20mm (d)	日降水量≥20 mm的天数 Annual count of days when daily precipitation ≥20 mm

2 结果和分析

2.1 西南部地区植被NDVI的动态变化

西南部地区植被NDVI在空间上表现为东高西低(图1A), 其中, NDVI的高值(0.8–0.9)主要集中在云南南部地区以及西藏的东南部地区, 低值(0–0.1)集中在青藏高原的西北部地区。图1B为西南部地区区域平均NDVI的变化趋势, 从图中可以看出, 西南部地区1982–2015年间NDVI的最低值出现在1983年(0.445), 最高值出现在2013年(0.477), 西南部地区区域平均NDVI在1982–2015年间呈现显著上升的趋势(每10年0.006, $p < 0.001$)。为进一步了解西南部地区植被NDVI的变化, 对其进行突变分析, 结果表明西南部地区NDVI在1994年发生了突变, 1994年以前NDVI上升不显著, 1994年以后NDVI呈现显著增加的趋势($p < 0.05$), 增加速率为每10年0.005。Hou等(2015)发现西南喀斯特地区的NDVI也在1994年发生了变化。1959–1993年期间, 有5个时间段西南部地区旱灾频繁发生且时间最长(刘建刚等, 2011), 即在1994年以前西南部地区频繁发生的旱灾可能是植被活动不强的原因。

1982–2015年西南部地区105° E以东的NDVI以显著增长为主要变化, 以西虽也以显著增长为主要表现, 但增长速率较低(图2A)。NDVI在青藏高原中部地区(90°–95° E, 26°–35° N)的北部呈现显著增长趋势, 但增长速率较低, 南部表现为显著负增长, 与蒋元春等(2020)在同一区域、同一时间段内生长季NDVI的变化相反。蒋元春等(2020)是对生长季NDVI的变化进行探究, 而本研究则是在年尺度上对NDVI的变化进行探究, 这可能是产生差异的原

因。1982–1993年西南部地区植被NDVI在空间上主要呈现显著增加的趋势(图2B)。

1994–2015年间, 105° E以东的NDVI整体表现为显著增加的趋势(图2C), 这与1982–2015年间105° E以东的NDVI变化类似, 不同的是, 1994–2015年的NDVI增长速率比1982–2015年的增长速率大。而在105° E以西, 四川中部和西部、云南中部和西北部、喜马拉雅山脉东部、山南错那县南部、林芝察隅县和墨脱县南部的NDVI的变化趋势以显著下降为主, 这与1982–2015年和1982–1993年NDVI的变化存在差异。彭文甫等(2019)在其研究中指出, 2000–2015年NDVI减少的区域主要集中在川西北高原和成都平原; 2000–2016年云南植被覆盖减少的区域主要在中部的大理、玉溪和昆明等迅速发展的城市以及西北部的高海拔地区(何云玲等, 2019); 喜马拉雅山脉东部的植被在2001–2015年间退化较为严重(马磊等, 2017); 山南错那县的植被覆盖在2002–2013年间呈下降趋势(白淑英等, 2015); 1983–2012年林芝察隅县因人类活动和自然因素导致森林资源减少较多, 墨脱县则以耕地资源减少为主(魏梦莹, 2018)。

2.2 西南部地区区域平均极端气候事件的变化特征

正如之前提到的, 西南部地区区域平均植被NDVI在1994年发生突变, 1982–2015、1982–1993和1994–2015年区域平均NDVI的变化和其在空间上的变化存在差异, 因此本节将探究1982–2015、1982–1993和1994–2015年极端气候事件的变化是否也存在不同。

表2为西南部地区区域平均极端气候指数变化趋势。1982–2015年间, 极端降水指数均变化不显著, 极端温度指数除日最高气温最小值(TXn)和气温日

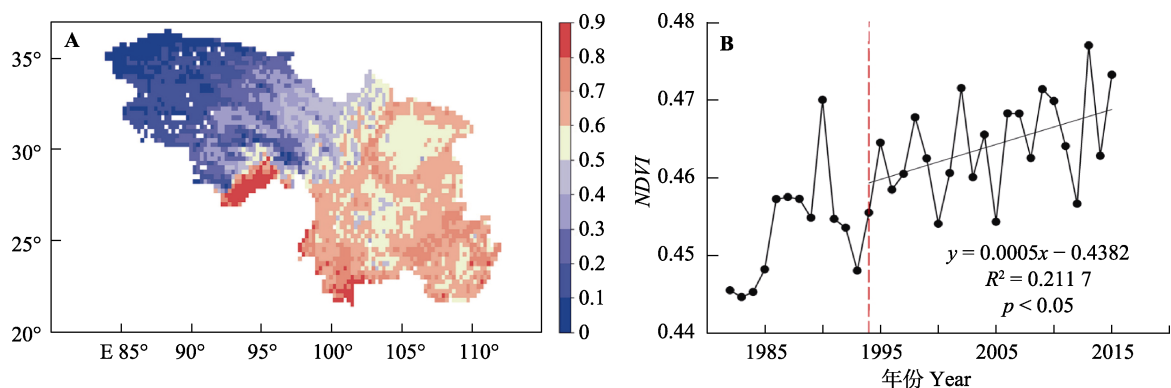


图1 1982–2015年中国西南部地区归一化植被指数(NDVI)多年平均空间分布(A)和区域平均多年变化(B)。

Fig. 1 Spatial pattern of mean annual normalized differential vegetation index (NDVI)(A) and inter-annual variations in regional average NDVI (B) in southwestern China from 1982 to 2015.

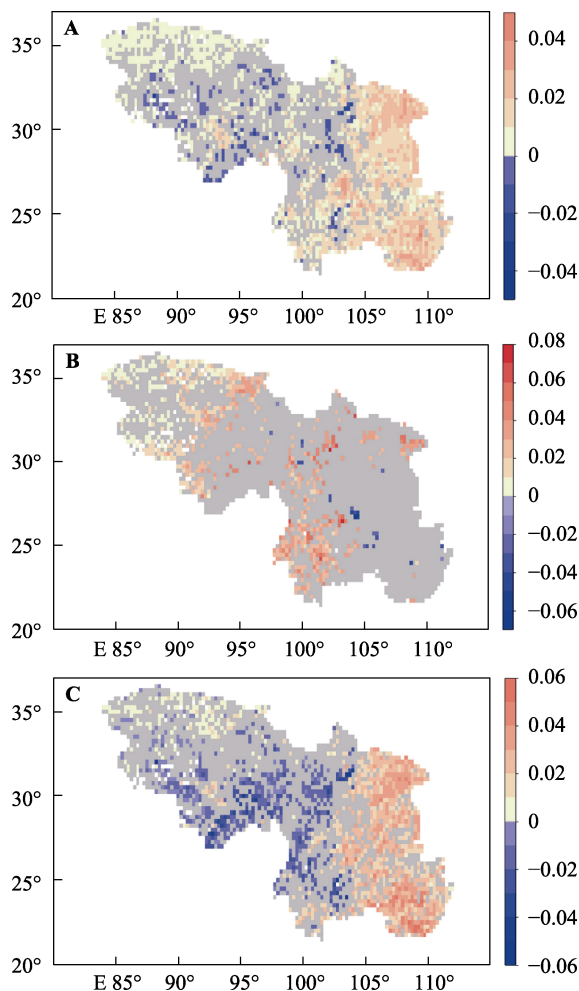


图2 1982–2015 (A)、1982–1993 (B)和1994–2015年(C)中国西南部地区归一化植被指数(NDVI)变化趋势的空间分布。灰色表示未通过显著性检验($p > 0.05$)。

Fig. 2 Spatial patterns of changes in normalized differential vegetation index (NDVI) in southwestern China during periods 1982–2015 (A), 1982–1993 (B) and 1994–2015 (C). Gray-coded areas are where no significant changes in NDVI were detected ($p > 0.05$).

较差(DTR)外, 其他指数均变化显著, 日最高气温最大值(TXx)、日最低气温最大值(TNx)、日最低气温最小值(TNn)显著增高; 暖昼日数(TX90)、暖夜日数(TN90)、夏季日数(SU)和热带夜数(TR)分别以每10年6.840、9.127、3.387和1.753 d的速率显著增加; 冷昼日数(TX10)、冷夜日数(TN10)、冰冻日数(ID)和霜冻日数(FD)则以每10年6.077、6.239、3.338和5.374 d的速率显著下降; 持续暖期指数(WSDI)以每10年0.950 d的速率显著增加, 持续冷期指数(CSDI)以每10年0.807 d的速率显著减少, 生长季长度(GSL)以每10年4.316 d的速率显著增加。

1982–1993年间年平均气温(TM)、年降水量(PRE)和极端气候指数的变化都不显著。1994–2015

表2 1982–2015、1982–1993和1994–2015年中国西南部地区区域平均极端气候指数的变化趋势

Table 2 Trends of regional average climate extreme variables in southwestern China during periods 1982–2015, 1982–1993 and 1994–2015

气候指数 Climate variables	气候指数变化趋势(每10年) Trends of climate indicators (per 10 a)		
	1982–2015	1982–1993	1994–2015
TM (°C)	0.375**	0.221	0.368**
TXx (°C)	0.305**	-0.243	0.248
TX90 (d)	6.840**	-1.209	8.914**
SU (d)	3.387**	0.671	4.129**
TXn (°C)	0.262	0.391	-0.099
TX10 (d)	-6.077**	-4.626	-5.243
ID (d)	-3.338**	-3.583	-3.795**
TNx (°C)	0.359**	0.356	0.486**
TN90 (d)	9.127**	6.265	10.896**
TR (d)	1.753**	-1.061	2.159**
TNn (°C)	0.462**	0.660	0.287
TN10 (d)	-6.239**	-5.590	-4.777*
FD (d)	-5.374**	-4.716	-4.468**
CSDI (d)	-0.807*	-1.164	-1.058
WSDI (d)	0.950**	-0.620	1.012
GSL (d)	4.316**	0.273	3.482**
DTR (°C)	-0.005	-0.085	0.012
PRE (mm)	0.699	-21.112	-11.668
PRCPTOT (mm)	2.825	-20.346	-6.832
R95 (mm)	2.461	-17.008	-3.946
R99 (mm)	1.567	-13.383	5.835
SDII (mm·d ⁻¹)	0.014	-0.068	-0.041
Rx1day (mm)	0.623	-1.490	1.752*
Rx5day (mm)	0.652	-3.921	1.102
CWD (d)	0.141	0.745	-0.042
CDD (d)	-0.603	-5.610	3.480*
R1mm (d)	-0.002	0.454	-1.947
R10mm (d)	-0.215	-1.307	-0.702
R20mm (d)	0.092	-0.724	-0.088

气候指数含义参照表1。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。
Definitions of climate variables see Table 1. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

年间TNx显著增加, 暖指数(TX90、SU、TN90、TR)也呈现显著增加的趋势, 而冷指数(TN10、ID、FD)则呈现显著降低的趋势, GSL以每10年3.482 d的速率显著增加。极端降水指数仅有1日最大降水量(Rx1day)和最长连续干日数(CDD)呈现显著增长的趋势, 其他极端降水指数变化不显著, 即1994–2015年间西南部地区单日降水量在增加, 但同时连续无降水日在延长。

1982–2015和1994–2015年两个时段都表现为暖指数(TX90、TN90、SU、TR)显著上升, 冷指数(TN10、

ID、*FD*)显著降低, *TXn*和*DTR*变化不显著。刘琳和徐宗学(2014)指出, 在1951–2010年期间, 西南部5省(区)市的*TX90*上升不显著, *TN90*显著上升, *TX10*、*TN10*和*DTR*显著降低, 其结果与本研究存在差异, 这些差异可能是由研究区域和研究时长不一致引起的。

与1982–2015年对比, 1994–2015年期间*TNx*、*TX90*、*SU*、*TN90*、*TR*以及*ID*的变化速率更大。1982–2015和1994–2015年*TNx*的增长速率分别为每10年0.359、0.486 °C, *TX90*的增长速率分别为每10年6.840和8.914 d, *SU*的增长速率分别为每10年3.387和4.129 d, *TN90*的增长速率分别为每10年9.127、10.896 d, *TR*的增长速率分别为每10年1.753、2.159 d, 1982–2015年期间*ID*以每10年3.338 d的速率在减少, 1994–2015年期间*ID*的减少速率为每10年3.795 d。相对于1982–2015年, 植被*NDVI*发生突变后, 西南部地区的极端暖事件发生的天数增加、程度加强, 0 °C以下的日数减少。Zhou等(2019)在其研究中提到, 在中国东部南北样带, 大部分植被活动的增强可能与极端暖事件的增多和极端冷事件的减少有关, 1994年以后西南部地区植被活动增强可能也与极端暖事件的频发和极端冷事件的减少有关。

2.3 西南部地区植被*NDVI*对极端气候事件的响应

为探究植被对极端气候事件的响应, 将*NDVI*与极端气候指数进行相关性分析。同时, 为了进一步评价西南部地区植被*NDVI*对极端气候事件的响应程度, 还对极端气候指数和*NDVI*进行去趋势处理, 在此基础上对去趋势后的极端气候指数与*NDVI*进行Pearson相关性分析, 深入探究植被*NDVI*对极端气候事件的响应。

表3为1982–2015、1982–1993和1994–2015年去趋势前后极端气候指数与*NDVI*的相关性分析结果。去趋势前, 1982–2015年间极端降水指数仅*Rx1day*与*NDVI*显著相关($p < 0.05$), 相关系数为0.366, 即西南部地区植被对单日强降水有积极的响应, 这与冯磊等(2020)在其研究中得出的结论类似。极端温度指数除*DTR*之外, 其他极端温度指数和年平均气温都与*NDVI*显著相关, 年平均气温与*NDVI*的相关性最强, 相关系数为0.743。 *TXx*、*TNx*、*TNn*和*TXn*与*NDVI*显著正相关(0.547、0.544、0.622、0.395), 极端暖指数(*TX90*、*SU*、*TN90*、*TR*)与*NDVI*呈现显著正相关的关系, 极端冷指数(*TX10*、*ID*、*TN10*、*FD*)

与*NDVI*显著负相关, *CSDI*与*NDVI*显著负相关(–0.342), *WSDI*和*GSL*与*NDVI*显著正相关(0.481、0.695)。1982–1993年间极端降水指数和年降水量与*NDVI*的相关性都不显著, *TNn*与*NDVI*显著正相关(0.600), *TN10*与*NDVI*显著负相关(–0.606)。1994–2015年间, *Rx1day*与*NDVI*显著正相关, *R1mm*与*NDVI*显著负相关, *TM*与*NDVI*显著正相关, *TNx*、*TX90*、*SU*、*GSL*和*DTR*与*NDVI*显著正相关, *TX10*、*ID*、*TN10*和*FD*与*NDVI*显著负相关。1994–2015年间, 年平均气温与*NDVI*的相关系数为0.589, 而*SU*和*DTR*与*NDVI*的相关系数分别为0.648、0.617, *TM*与*NDVI*的相关系数低于*SU*和*DTR*与*NDVI*的相关系数。可以发现在1994年以后, 植被对年平均气温的响应弱于其对暖指数的响应, 冯磊(2020)也发现, 在川渝地区, 2000–2018年间, *NDVI*与年平均气温的相关系数低于其与暖指数的相关系数。

对比1982–2015和1994–2015年两个时段, 可以发现大多数指数在1994–2015年段与*NDVI*的相关性减弱(相关系数降低), 仅有*DTR*与*NDVI*的相关性由不显著转换为显著, 且相关性很强(0.617)。

去趋势后极端降水指数和年降水量与*NDVI*的相关性在1982–2015、1982–1993和1994–2015年3个时段都不显著。1982–2015年去趋势后*NDVI*与*TM*、*TXx*、*TX90*、*SU*和*DTR*都呈现显著正相关的关系(0.348、0.357、0.504、0.437、0.670), 而*NDVI*与*TX10*呈现显著负相关的关系(–0.346)。去趋势后, *TM*与*NDVI*的相关系数低于*TXx*、*TX90*、*SU*和*DTR*与*NDVI*的相关系数。

1982–1993年去趋势后仅*TNn*与*NDVI*显著正相关(0.634)。1982–1993年间去趋势前后*TNn*都与*NDVI*显著相关, 且去趋势后*TNn*与*NDVI*的相关系数比去趋势前的相关系数高。

1994–2015年去趋势后*TXx*、*TX90*、*SU*和*DTR*与*NDVI*显著正相关(0.449、0.552、0.546、0.749), *TM*与*NDVI*的相关性不显著(0.408)。1994–2015年间*TXx*与*NDVI*的相关性在去趋势前为不显著正相关, 去趋势后为显著正相关。

可以发现在1982–2015和1994–2015这两个时段在去趋势前后*TXx*和暖指数(*TX90*、*SU*)对植被的生长具有促进作用, 冷指数(*TX10*)会抑制植被的生长。相对于其他指数与*NDVI*相关分析的结果, *TXx*与*NDVI*的相关分析的结果较为不同, 去趋势前, 其

表3 1982–2015、1982–1993和1994–2015年中国西南部地区去趋势前后区域平均尺度上极端气候指数与归一化植被指数(*NDVI*)的相关性
Table 3 Correlations between regional average normalized differential vegetation index (*NDVI*) and climate extreme variables in southwestern China during periods 1982–2015, 1982–1993 and 1994–2015 before and after data detrending.

气候指数 Climate variables	1982–2015		1982–1993		1994–2015	
	去趋势前	去趋势后	去趋势前	去趋势后	去趋势前	去趋势后
	Before data detrending	After data detrending	Before data detrending	After data detrending	Before data detrending	After data detrending
<i>TM</i> (°C)	0.743**	0.348*	0.536	0.154	0.589**	0.408
<i>TXx</i> (°C)	0.547**	0.357*	0.193	0.213	0.400	0.449*
<i>TX90</i> (d)	0.638**	0.504**	0.291	0.382	0.533*	0.552**
<i>SU</i> (d)	0.692**	0.437*	0.056	0.003	0.648**	0.546*
<i>TXn</i> (°C)	0.395*	0.255	0.482	0.566	0.131	0.119
<i>TX10</i> (d)	−0.670**	−0.346*	−0.586	0.475	−0.460*	−0.288
<i>ID</i> (d)	−0.616**	−0.241	−0.299	−0.040	−0.522*	−0.348
<i>TNx</i> (°C)	0.662**	0.022	0.382	−0.388	0.524*	0.222
<i>TN90</i> (d)	0.551**	−0.100	0.098	−0.459	0.364	0.037
<i>TR</i> (d)	0.496**	−0.087	−0.063	−0.046	0.318	−0.106
<i>TNn</i> (°C)	0.544**	0.298	0.600*	0.634*	0.164	0.114
<i>TN10</i> (d)	−0.688**	−0.329	−0.606*	−0.414	−0.448*	−0.312
<i>FD</i> (d)	−0.710**	−0.075	−0.487	0.253	−0.470*	−0.219
<i>CSDI</i> (d)	−0.342*	−0.038	−0.531	−0.320	−0.106	0.062
<i>WSDI</i> (d)	0.481**	0.229	0.230	0.260	0.287	0.234
<i>GSL</i> (d)	0.695**	0.242	0.522	0.176	0.482*	0.273
<i>DTR</i> (°C)	0.283	0.670**	0.015	0.494	0.617**	0.749**
<i>PRE</i> (mm)	0.033	−0.028	−0.128	0.043	−0.024	−0.063
<i>PRCPTOT</i> (mm)	0.071	−0.011	−0.118	0.043	0.024	−0.035
<i>R95</i> (mm)	0.132	0.049	−0.219	−0.041	0.156	0.081
<i>R99</i> (mm)	0.209	0.154	−0.038	0.029	0.355	0.191
<i>SDII</i> (mm·d ^{−1})	0.164	0.044	−0.026	0.016	0.133	0.053
<i>Rx1day</i> (mm)	0.366*	0.281	−0.038	0.117	0.522*	0.320
<i>Rx5day</i> (mm)	0.144	0.046	−0.437	−0.265	0.294	0.147
<i>CWD</i> (d)	−0.009	−0.267	0.029	−0.321	−0.125	−0.252
<i>CDD</i> (d)	−0.122	−0.022	−0.355	−0.307	0.342	0.113
<i>R1mm</i> (d)	−0.103	−0.243	0.022	−0.087	−0.455*	−0.354
<i>R10mm</i> (d)	−0.016	0.100	−0.213	0.158	0.037	0.077
<i>R20mm</i> (d)	0.156	0.161	−0.368	0.195	0.192	0.150

气候指数含义参照表1。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。
Definitions of climate variables see Table 1. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

与*NDVI*的相关性在1982–2015年间显著正相关,而在1994–2015年间的相关性不显著,但去趋势后两个时段都与*NDVI*显著相关。

在1982–2015年以及1994–2015年两个时段植被生长对*TX90*、*SU*去趋势前后都有积极的响应。本研究结论和Chen等(2018)以及王晓利和侯西勇(2019)分别在湖南和江淮以南水资源相对丰富的区域得出的结论类似。这可能是因为这两个地区与本研究区

都属于降水充沛的地区,高温促进水分蒸发,能够防止植被水分过多,避免因土壤水分过多造成缺氧,根系呼吸作用减弱,CO₂积累过多,产生多种有毒物质,土壤养分流失,从而对植被生长造成不利影响。同时,在全球CO₂浓度逐年升高(何江浩等, 2020)的背景下,在较高温度下生长的植被通常具有较高的光合能力(Hikosaka *et al.*, 2006),这可能是因为,高温会增强光合酶的活性,从而使得植被的光饱和点

和光补偿点更高(Xu *et al.*, 2018), 能够促进植被积累干物质, 从而对植被的生长起到积极作用。除此之外, 生长季前发生高温事件能够促进冰雪消融, 降低植被遭受冻害的风险, 对植被组织起到保护作用(He *et al.*, 2018)。Inouye (2008)的研究中提到, 在生长季前发生极端低温事件会造成植被的芽死亡, 从而导致植被生长遭受不利影响。

相对于其他指数与NDVI相关分析的结果, DTR与NDVI的相关分析的结果很特殊。去趋势前, 1982–2015年间DTR与NDVI的相关性不显著, 在1994–2015年间显著正相关; 去趋势后, 两个时段DTR与NDVI的关系都为显著正相关。1994–2015年DTR与NDVI的相关系数高于1982–2015年DTR与NDVI的相关系数, 且这两个时段DTR与NDVI的相关系数都高于其他极端温度指数和年平均气温与NDVI的相关系数。即在去趋势前, DTR对植被的影响分为两个阶段, 在1982–2015年间DTR对植被的影响程度弱, 但在植被NDVI发生突变后, DTR对植被的影响加强, 且影响程度高。去趋势后, 在两个时段内DTR对植被的影响都很强, 且在1994–2015年, DTR对植被的影响更强。本研究结果与王昊(2019)在同一研究区得出的结果并不完全一致, 存在差异的原因可能与研究时长有关。DTR对植被的光合器官有着调节的作用, 能够促进植被的光合作用、降低呼吸作用, 净光合积累高(江爱良等, 1990; 吴姝等, 1998; 朱凯, 2014), 为植被的生长提供有利的条件。但过大的温差可能会不利于植被的生长(朱凯, 2014)。

根据去趋势后极端气候指数与NDVI相关分析的结果, 在1982–2015 (1994–2015)年间TM、TXx、TX90、SU、TX10以及DTR (TM、TXx、TX90、SU以及DTR)与NDVI显著相关(由于1982–1993年间去趋势后与NDVI的显著相关的极端气候指数仅有TNn, 所以不在此部分进行讨论), 为了进一步探讨其与NDVI的关系, 图3和图4展示了去趋势后极端气候指数与NDVI相关系数的空间分布特征。图3为1982–2015年去趋势后年平均气温和极端温度指数与NDVI相关系数的空间分布, TM与NDVI的相关性在空间上以显著正相关为主(显著正相关的面积占比为40%, 显著负相关的面积占比为1.44%); DTR与植被NDVI的关系以正相关为主, 正相关的面积占比为93.31%, 其中有53.37%的面积通过了显著性检

验, 指数与NDVI间呈显著负相关关系的面积占比仅0.29%。TXx、TX90、SU与NDVI的相关性在空间上都以正相关为主, 通过显著性的区域分别占研究区域的12.82%、18.33%、12.67%, 显著负相关分别占7.24%、3.52%、1.47%。TX10与NDVI的相关性在空间上表现为以负相关为主, 显著负相关占区域的40.79%, 显著正相关仅为0.35%。在NDVI与极端温度相关性的空间分布图上发现, TXx、TX90和SU在云南干热河谷地区与NDVI的相关性主要表现为显著负相关, 在此区域TXx与NDVI显著负相关的面积比最大。

3 结论

本研究利用1982年1月–2015年12月的GIMMS NDVI 3g V1.0数据, 以及1961年1月1日–2016年12月31日CN05.1格点化的日最高气温、日最低气温、日平均气温和日降水量数据集计算1961–2016年的极端气候指数, 选取1982–2015年的极端气候指数数据, 采用趋势分析法、相关系数法、一阶差分去趋势法以及Pettitt突变探究西南部地区植被与极端气候事件的关系。得出的主要结论如下:

(1) 1982–2015年西南部地区植被NDVI呈现显著上升的趋势(每10年0.006, $p < 0.001$), 在1994年发生突变, 突变前变化不显著, 突变后呈现显著上升趋势(每10年0.005, $p < 0.05$)。

(2) 1982–2015年间, 极端降水指数均变化不显著; 极端温度指数除TXn和DTR外, 其他指数均变化显著, TXx、TNx、TNn、暖指数(TX90、TN90、SU、TR)、WSDI以及GSL呈现显著增高的趋势, 冷指数(TX10、TN10、ID、FD)以及CSDI呈现显著降低的趋势。

(3) 1994–2015年间, 极端降水指数仅有Rx1day和CDD呈现显著增长的趋势, 其他极端降水指数变化不显著。极端温度指数中TNx、TX90、SU、TN90、TR以及GSL呈现显著增加的趋势, TN10、ID以及FD呈现显著降低的趋势。

(4) 去趋势前, 1982–2015年间极端降水指数仅Rx1day与NDVI显著相关, 其与NDVI显著正相关, 其他极端降水指数与NDVI的相关性不显著; 1994–2015年Rx1day与NDVI显著正相关, R1mm与NDVI显著负相关, 去趋势后, 两个时段的极端降水指数与NDVI的相关性都不显著。

(5) 去趋势前, 1982–2015年间, *TM*与*NDVI*的相关系数最高, *NDVI*的变化主要是由年平均气温引起的。而在1994–2015年, *SU*和*DTR*与*NDVI*的相关系数高于*TM*与*NDVI*的相关系数, 即在1994–2015年间, *NDVI*的变化主要是由*SU*和*DTR*引起的。

(6) 去趋势后, 年平均气温在1982–2015年和1994–2015年两个时段对植被的影响都低于*TXx*、*TX90*、*SU*和*DTR*对植被的影响; *TXx*、*TX90*、*SU*和*DTR*在1982–2015年间对植被生长有积极的影响,

且在1994–2015年间其对植被生长的影响加强; *DTR*在两个时段与*NDVI*的相关系数都最高, 是*NDVI*变化的主要因素。

(7) 空间上, 热量的增加对西南部地区105° E以东的林地、耕地、云贵高原和四川接壤地区的灌木, 以及青藏高原西北部(85°–87° E, 34°–36° N)地区的高山草原有积极的作用。而极端暖事件对云南干热河谷地区植被的生长起抑制作用, *TXx*对此区域的负面影响尤为强烈。

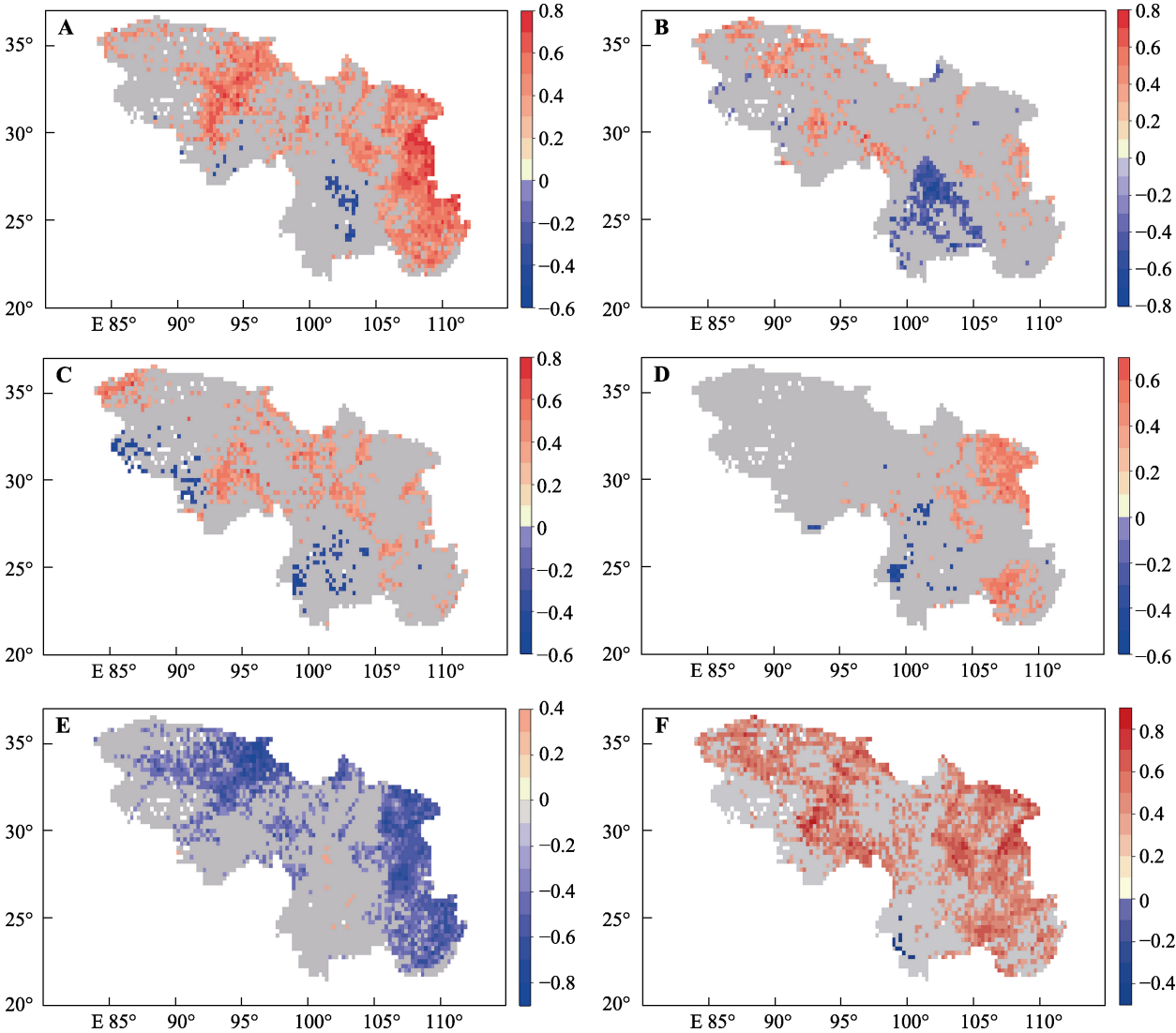


图3 中国西南部地区1982–2015年归一化植被指数(*NDVI*)与极端温度指数去趋势后的相关关系空间分布。A, 年平均气温。B, 日最高气温的最大值。C, 暖昼日数。D, 夏季日数。E, 冷昼日数。F, 气温日较差。灰色表示没有通过显著性检验($p > 0.05$), 暖色表示显著正相关($r > 0, p < 0.05$), 冷色表示显著负相关($r < 0, p < 0.05$)。

Fig. 3 Spatial patterns of correlation between normalized differential vegetation index (*NDVI*) and temperature-extreme variables after data detrending in southwestern China from 1982 to 2015. A, Mean annual air temperature. B, Maximum value of daily maximum air temperature. C, Warm days. D, Summer days. E, Cool days. F, Diel temperature range. Gray-coded areas are where no significant correlation was detected between *NDVI* and temperature-extreme variables ($p > 0.05$). The warm tone indicates positive significance ($r > 0, p < 0.05$), and the cold tone indicates negative significance ($r < 0, p < 0.05$).

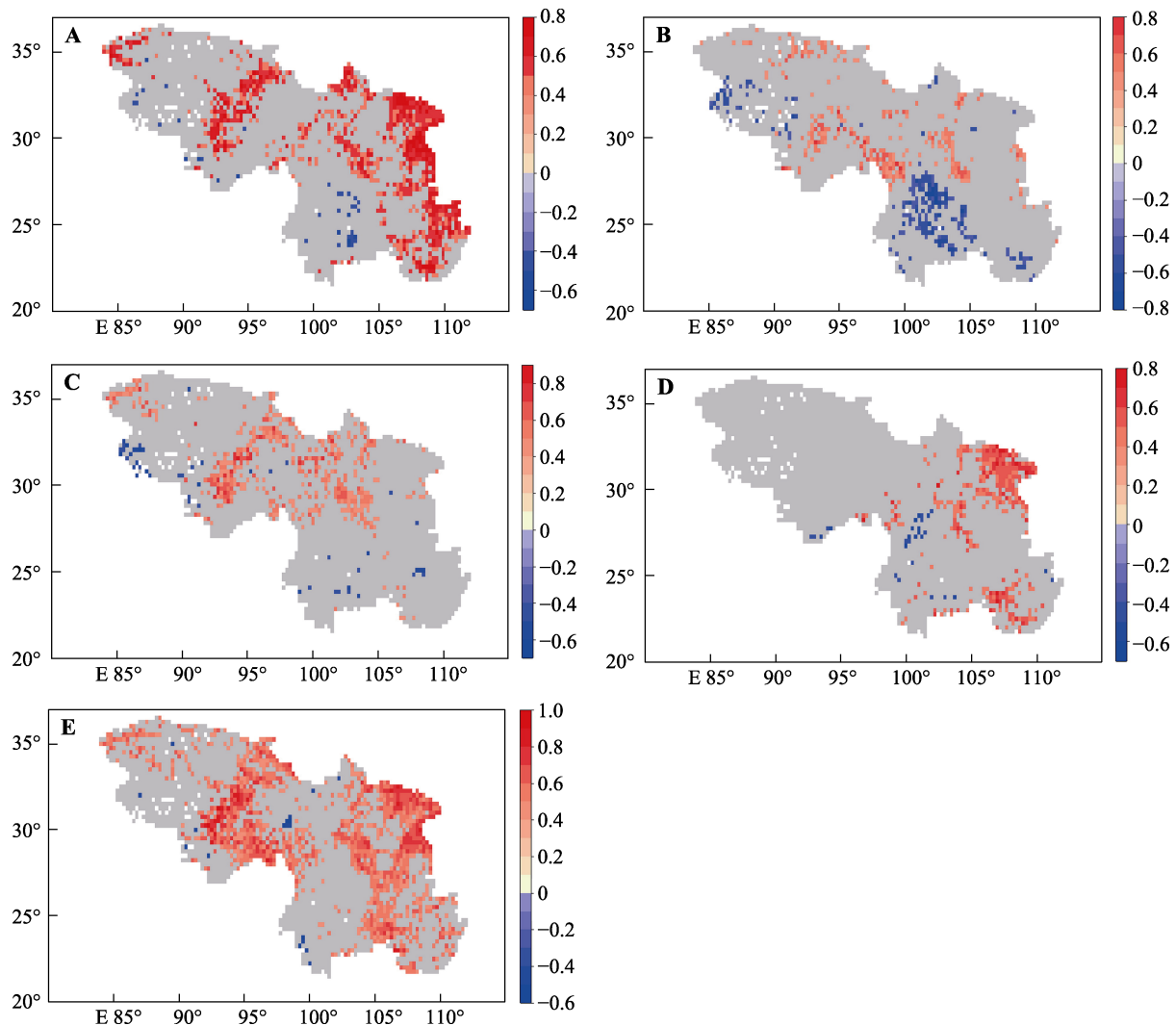


图4 中国西南部地区1994–2015年归一化植被指数(NDVI)与极端温度指数去趋势后的相关关系空间分布。A, 年平均气温。B, 日最高气温的最大值。C, 暖昼日数。D, 夏季日数。E, 冷昼日数。F, 气温日较差。灰色表示没有通过显著性检验($p > 0.05$), 暖色表示显著正相关($r > 0, p < 0.05$), 冷色表示显著负相关($r < 0, p < 0.05$)。

Fig. 4 Spatial patterns of correlation between normalized differential vegetation index (NDVI) and temperature-variables after data detrending in southwestern China from 1994 to 2015. **A**, Mean annual air temperature. **B**, Maximum value of daily maximum air temperature. **C**, Warm days. **D**, Summer days. **E**, Diel temperature range. Gray-coded areas are where no significant correlation was detected between NDVI and temperature-extreme variables ($p > 0.05$). The warm tone indicates positive significance ($r > 0, p < 0.05$), and the cold tone indicates negative significance ($r < 0, p < 0.05$).

参考文献

- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, *et al.* (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05109. DOI: 10.1029/2005JD006290.
- Ali H, Mishra V (2018). Contributions of dynamic and thermodynamic scaling in subdaily precipitation extremes in India. *Geophysical Research Letters*, 45, 2352-2361.
- Anderson JT, Inouye DW, McKinney AM, Colautti RI, Mitchell-Olds T (2012). Phenotypic plasticity and adaptive

evolution contribute to advancing flowering phenology in response to climate change. *Proceedings of the Royal Society B*, 279, 3843-3852.

- Bai SY, Wu Q, Shi JQ, Lu Y (2015). Analysis on vegetation coverage change in Shannan, Tibet, China based on remotely sensed data. *Journal of Desert Research*, 35, 1396-1402. [白淑英, 吴奇, 史建桥, 陆源 (2015). 基于时间序列遥感数据的西藏山南地区植被覆盖变化特征分析. *中国沙漠*, 35, 1396-1402.]
- Boccolari M, Malmusi S (2013). Changes in temperature and precipitation extremes observed in Modena, Italy. *Atmospheric Research*, 122, 16-31.
- Chen T, Ao TQ, Zhang X, Li XD, Yang KB (2019). Climate change characteristics of extreme temperature in the

- Minjiang River Basin. *Advances in Meteorology*, 2019, 1935719. DOI: 10.1155/2019/1935719.
- Chen WZ, Huang CJ, Wang LC, Li DM (2018). Climate extremes and their impacts on interannual vegetation variabilities: a case study in Hubei Province of central China. *Remote Sensing*, 10, 477. DOI: 10.3390/rs10030477.
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogée J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, de Noblet N, Friend AD, Friedlingstein P, Grünwald T, *et al.* (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529-533.
- Cook BI, Smerdon JE, Seager R, Coats S (2014). Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, 43, 2607-2627.
- Deng HJ, Chen YN, Shi X, Li WH, Wang HJ, Zhang SH, Fang GH (2014). Dynamics of temperature and precipitation extremes and their spatial variation in the arid region of northwest China. *Atmospheric Research*, 138, 346-355.
- Donat MG, Alexander LV, Yang H, Durre I, Vose R, Dunn RJH, Willett KM, Aguilar E, Brunet M, Caesar J, Hewitson B, Jack C, Klein Tank AMG, Kruger AC, Marengo J, *et al.* (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: the HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research*, 118, 2098-2118.
- Fallah-Ghalhari G, Shakeri F, Dadashi-Roudbari A (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 1539-1562.
- Feng L (2020). *Study on the Characteristics of Extreme Climate Change in Sichuan-Chongqing Region and Its Impact on NDVI*. Master degree dissertation, Northwest Normal University, Lanzhou. [冯磊 (2020). 川渝地区极端气候变化特征及其对NDVI的影响研究. 硕士学位论文, 西北师范大学, 兰州.]
- Feng L, Yang D, Huang YY (2020). Vegetation NDVI characteristics and response to extreme climate in Sichuan and Chongqing from 2000 to 2017. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 2316-2326. [冯磊, 杨东, 黄悦悦 (2020). 2000-2017年川渝地区植被NDVI特征及其对极端气候的响应. 生态学杂志, 39, 2316-2326.]
- Fischer EM, Knutti R (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 5, 560-564.
- Hatfield JL, Prueger JH (2015). Temperature extremes: effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10.
- He JH, Cai YL, Qin P (2020). Spatial and temporal variations of carbon dioxide and its influencing factors. *Chinese Science Bulletin*, 65, 194-202. [何江浩, 蔡玉林, 秦鹏 (2020). 二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析. 科学通报, 65, 194-202.]
- He M, Wang HS, Sun JX (2019). Characters of ecosystem vulnerability in southwestern China based on vegetation productivity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 429-438. [何敏, 王鹤松, 孙建新 (2019). 基于植被生产力的西南地区生态系统脆弱性特征. 应用生态学报, 30, 429-438.]
- He YL, Xiong QL, Yu L, Qu XX, Yan WB (2019). Adaptability of vegetation ecosystem to climate change based on the NDVI in Yunnan Province, China. *Ecological Science*, 38, 165-172. [何云玲, 熊巧利, 余岚, 屈新星, 闫文波 (2019). 基于NDVI云南地区植被生态系统对气候变化的适应性分析. 生态科学, 38, 165-172.]
- He ZB, Du J, Chen LF, Zhu X, Lin PF, Zhao MM, Fang S (2018). Impacts of recent climate extremes on spring phenology in arid-mountain ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261, 31-40.
- Hikosaka K, Ishikawa K, Borjigidai A, Muller O, Onoda Y (2006). Temperature acclimation of photosynthesis: mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate. *Journal of Experimental Botany*, 57, 291-302.
- Hou WJ, Gao JB, Wu SH, Dai EF (2015). Interannual variations in growing-season NDVI and its correlation with climate variables in the southwestern Karst region of China. *Remote Sensing*, 7, 11105-11124.
- Iler AM, Inouye DW, Schmidt NM, Høye TT (2017). Detrending phenological time series improves climate-phenology analyses and reveals evidence of plasticity. *Ecology*, 98, 647-655.
- Inouye DW (2008). Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers. *Ecology*, 89, 353-362.
- Jiang AL, Chen SB, Gong SX (1990). Characteristics of diurnal temperature range in Xishuangbanna and its significance in Agriculture. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 11, 44-46. [江爱良, 陈沈斌, 宫世贤 (1990). 西双版纳气温日较差的特点及其在农业上的意义. 中国农业气象, 11, 44-46.]
- Jiang SS, Chen X, Smettem K, Wang TJ (2021). Climate and land use influences on changing spatiotemporal patterns of mountain vegetation cover in southwest China. *Ecological Indicators*, 121, 107193. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107193.
- Jiang YC, Li DL, Zheng R (2020). Variation characteristics of snow cover and frozen soil and their relationships with vegetation in the Tibetan Plateau from 1971 to 2016. *Transactions Atmospheric Sciences*, 43, 481-494. [蒋元春, 李栋梁, 郑然 (2020). 1971-2016年青藏高原积雪冻土变化特征及其与植被的关系. 大气科学学报, 43, 481-494.]
- John R, Chen JQ, Ouyang ZT, Xiao JF, Becker R, Samanta A, Ganguly S, Yuan WP, Batkhisig O (2013). Vegetation

DOI: 10.17521/cjpe.2021.0042

- response to extreme climate events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010. *Environmental Research Letters*, 8, 035033. DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/035033.
- Keggenhoff I, Elizbarashvili M, Amiri-Farahani A, King L (2014). Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971–2010. *Weather and Climate Extremes*, 4, 75–85.
- Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529, 84–87.
- Li CL, Filho WL, Wang J, Yin J, Fedoruk M, Bao G, Bao YH, Yin S, Yu S, Hu RC (2018a). An assessment of the impacts of climate extremes on the vegetation in Mongolian Plateau: using a scenarios-based analysis to support regional adaptation and mitigation options. *Ecological Indicators*, 95, 805–814.
- Li CL, Wang J, Hu RC, Yin S, Bao YH, Ayal DY (2018b). Relationship between vegetation change and extreme climate indices on the Inner Mongolia Plateau, China, from 1982 to 2013. *Ecological Indicators*, 89, 101–109.
- Li HM, Li L (2015). Mean and extreme climate change on the Qinghai-Tibetan Plateau with a 2 °C global warming. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis*, 11, 157–164. [李红梅, 李林 (2015). 2 °C 全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化. 气候变化研究进展, 11, 157–164.]
- Lian Y, You GJY, Lin K, Jiang Z, Zhang C, Qin X (2015). Characteristics of climate change in southwest China karst region and their potential environmental impacts. *Environmental Earth Sciences*, 74, 937–944.
- Liu D, Wang T, Yang T, Yan ZJ, Liu YW, Zhao YT, Piao SL (2019). Deciphering impacts of climate extremes on Tibetan grasslands in the last fifteen years. *Science Bulletin*, 64, 446–454.
- Liu D, Yu CL (2017). Effects of climate change on the distribution of main vegetation types in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 6511–6522. [刘丹, 于成龙 (2017). 气候变化对东北主要地带性植被类型分布的影响. 生态学报, 37, 6511–6522.]
- Liu JG, Wan JH, Tan XM, Ma JM, Zhang NQ (2011). Drought in southwest China from autumn 2009 to spring 2010 and its comparative analysis with historical drought events. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 31, 196–200. [刘建刚, 万金红, 谭徐明, 马建明, 张念强 (2011). 2009年秋至2010年春我国西南地区干旱及与历史场次干旱对比分析. 防灾减灾工程学报, 31, 196–200.]
- Liu L, Xu ZX (2014). Spatiotemporal distribution of the extreme climate indices in the five southwestern provinces of China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 23, 294–301. [刘琳, 徐宗学 (2014). 西南5省市极端气候指数时空分布规律研究. 长江流域资源与环境, 23, 294–301.]
- Lu JY, Carbone GJ, Gao P (2017). Detrending crop yield data for spatial visualization of drought impacts in the United States, 1895–2014. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238, 196–208.
- Luo M, Sa CL, Meng FH, Duan YC, Liu T, Bao YH (2020). Assessing extreme climatic changes on a monthly scale and their implications for vegetation in Central Asia. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122396. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122396.
- Ma L, Yan HW, He Y, Zhang Q, Liu B (2017). Vegetation changes in south Himalayas areas based on remote sensing monitoring during 2001–2015. *Arid Land Geography*, 40, 405–414. [马磊, 闫浩文, 何毅, 张乾, 刘波 (2017). 2001–2015年喜马拉雅南麓地区植被变化遥感监测. 干旱区地理, 40, 405–414.]
- Ming QZ, Shi ZT (2007). New discussion on dry valley formation in the Three Parallel Rivers Region. *Journal of Desert Research*, 27, 99–104. [明庆忠, 史正涛 (2007). 三江并流区干热河谷成因新探析. 中国沙漠, 27, 99–104.]
- Na L, Na RS, Zhang JQ, Tong SQ, Shan Y, Ying H, Li XQ, Bao YL (2018). Vegetation dynamics and diverse responses to extreme climate events in different vegetation types of Inner Mongolia. *Atmosphere*, 9, 394. DOI: 10.3390/atmos9100394.
- Nicholls N (1997). Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 387, 484–485.
- Peng WF, Zhang DM, Luo YM, Tao S, Xu XL (2019). Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province. *Acta Geographica Sinica*, 74, 1758–1776. [彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 陶帅, 徐新良 (2019). 自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测. 地理学报, 74, 1758–1776.]
- Pettitt AN (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28, 126–135.
- Piao S, Tan J, Chen A, Fu YH, Ciais P, Liu Q, Janssens IA, Vicca S, Zeng Z, Jeong SJ, Li Y, Myneni RB, Peng S, Shen M, Peñuelas J (2015). Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 6, 6911. DOI: 10.1038/ncomms7911.
- Qin NX, Wang JN, Yang GS, Chen X, Liang HY, Zhang JB (2015). Spatial and temporal variations of extreme precipitation and temperature events for the Southwest China in 1960–2009. *Geoenvironmental Disasters*, 2, 4. DOI: 10.1186/s40677-015-0014-9.
- Rahimi M, Fatemi SS (2019). Mean versus extreme precipitation trends in Iran over the period 1960–2017. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 3717–3735.
- Ren QM (1984). Crop “Climate Yield” algorithm: discussion on difference method. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 5, 59–62. [任庆民 (1984). 作物“气候产量”算法: 差值

- 法的探讨. 中国农业气象, 5, 59-62.]
- Shi PJ, Sun S, Gong DY, Zhou T (2016). World regionalization of climate change (1961–2010). *International Journal of Disaster Risk Science*, 7, 216-226.
- Shi WJ, Tao FL, Zhang Z (2012). Identifying contributions of climate change to crop yields based on statistical models: a review. *Acta Geographica Sinica*, 67, 1213-1222. [史文娇, 陶福祿, 张朝 (2012). 基于统计模型识别气候变化对农业产量贡献的研究进展. 地理学报, 67, 1213-1222.]
- Sun XB, Ren GY, Shrestha AB, Ren YY, You QL, Zhan YJ, Xu Y, Rajbhandari R (2017). Changes in extreme temperature events over the Hindu Kush Himalaya during 1961–2015. *Advances in Climate Change Research*, 8, 157-165.
- Tan ZQ, Tao H, Jiang JH, Zhang Q (2015). Influences of climate extremes on NDVI (normalized difference vegetation index) in the Poyang Lake Basin, China. *Wetlands*, 35, 1033-1042.
- Tao F, Yokozawa M, Liu J, Zhang Z (2008). Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends. *Climate Research*, 38, 83-94.
- Tong SQ, Li XQ, Zhang JQ, Bao YH, Bao YB, Na L, Si A (2019). Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960–2017. *Science of the Total Environment*, 649, 75-89.
- Wang H (2019). *Temporal and Spatial Variation of Extreme Climate Indices and Its Impact on NDVI in Southwestern China*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [王昊 (2019). 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. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Wang L, Xiong W, Wen XL, Feng LZ (2014). Effect of climatic factors such as temperature, precipitation on maize production in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30, 138-146. [王柳, 熊伟, 温小乐, 冯灵芝 (2014). 温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响. 农业工程学报, 30, 138-146.]
- Wang XL, Hou XY (2019). Variation of normalized difference vegetation index and its response to extreme climate in coastal China during 1982–2014. *Geographical Research*, 38, 807-821. [王晓利, 侯西勇 (2019). 1982–2014年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应. 地理研究, 38, 807-821.]
- Wei MY (2018). *Study on Forest Vegetation Distribution and Forest Resources Change Monitoring in Linzhi Area*. Master degree dissertation, Chang'an University, Xi'an. [魏梦莹 (2018). 林芝地区森林植被分布及动态变化监测研究. 硕士学位论文, 长安大学, 西安.]
- Wei XC, Zhou QW, Cai MY, Wang YJ (2021). Effects of vegetation restoration on regional soil moisture content in the humid Karst areas—A case study of southwest China. *Water*, 13, 321. DOI: 10.3390/w13030321.
- Wu J, Gao XJ (2013). A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets. *Chinese Journal of Geophysics*, 56, 1102-1111. [吴佳, 高学杰 (2013). 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. 地球物理学报, 56, 1102-1111.]
- Wu S, Zhang SY, Shen YG (1998). The effect of day and night temperature difference on photosynthetic characteristics in wheat. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 18, 103-109. [吴姝, 张树源, 沈允钢 (1998). 昼夜温差对小麦光合特性的影响. 西北植物学报, 18, 103-109.]
- Wu WB, You QL, Wang D (2016). Characteristics of extreme precipitation in China based on homogenized precipitation data. *Journal of Natural Resources*, 31, 1015-1026. [武文博, 游庆龙, 王岱 (2016). 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析. 自然资源学报, 31, 1015-1026.]
- Xu HJ, Yang TB (2014). Spatial-temporal variations of vegetation activities and its responses to climatic factors in the Qaidam Basin. *Journal of Natural Resources*, 29, 398-409. [徐浩杰, 杨太保 (2014). 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应. 自然资源学报, 29, 398-409.]
- Xu JP, Sun M, Wang H, Zhang Y, Zhang XT, Tian K (2018). Photosynthetic response of *Scirpus validus* and *Typha orientalis* to elevated temperatures in Dianchi Lake, Southwestern China. *Journal of Mountain Science*, 15, 2666-2675.
- Xu XY (2019). *Prediction and Analysis of Wheat Yield Changes Based on an Integrated Climatic Assessment Indicator for Wheat Production in Jiangsu Province*. PhD dissertation, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu. [徐向英 (2019). 江苏小麦综合气象指数构建与产量变化预测和分析. 博士学位论文, 扬州大学, 江苏扬州.]
- Yao JQ, Chen YN, Zhao Y, Mao WY, Xu XB, Liu Y, Yang Q (2018). Response of vegetation NDVI to climatic extremes in the arid region of Central Asia: a case study in Xinjiang, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 131, 1503-1515.
- Ying H, Zhang HY, Zhao JJ, Shan Y, Zhang ZX, Guo XY, Wu RH, Deng GR (2020). Effects of spring and summer extreme climate events on the autumn phenology of different vegetation types of Inner Mongolia, China, from 1982 to 2015. *Ecological Indicators*, 111, 105974. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105974.
- Yuan WD, Zheng JK, Dong K (2014). Spatial and temporal variation in extreme precipitation events in southwestern China during 1962–2012. *Resources Science*, 36, 766-772. [袁文德, 郑江坤, 董奎 (2014). 1962–2012年西南地区极端降水事件的时空变化特征. 资源科学, 36, 766-772.]
- Zhang D, He GX, Long HY (2020). Characteristics of grassland plants and protection and utilization of grassland resources in the dry-hot valley river of Yunnan. *Chinese Journal of*

- Tropical Agriculture*, 40, 38-46. [张德, 何光熊, 龙会英 (2020). 云南干热河谷草地植物特征及草地资源保护和利用. 热带农业科学, 40, 38-46.]
- Zhang YY, Guo Y, Liu HH, Liu YX, Liu XL, Li J (2018). Content and impact factors of soil organic carbon and total nitrogen on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 27, 866-872. [张亚亚, 郭颖, 刘海红, 刘胤序, 刘小龙, 李军 (2018). 青藏高原表土有机碳、全氮含量分布及其影响因素. 生态环境学报, 27, 866-872.]
- Zhao AZ, Zhang AB, Liu XF, Cao S (2018). Spatiotemporal changes of normalized difference vegetation index (NDVI) and response to climate extremes and ecological restoration in the Loess Plateau, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 132, 555-567.
- Zhou Y, Pei FS, Xia Y, Wu CJ, Zhong R, Wang K, Wang HL, Cao Y (2019). Assessing the impacts of extreme climate events on vegetation activity in the north south transect of eastern China (NSTEC). *Water*, 11, 2291. DOI: 10.3390/w11112291.
- Zhu K (2014). *Effects of Difference Between Day and Night Temperature on Photosynthetic Characteristics and Antioxidant Enzyme Activity of Greenhouse Tomatoes*. Master degree dissertation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing. [朱凯 (2014). 昼夜温差对设施番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响. 硕士学位论文, 南京信息工程大学, 南京.]

责任编辑: 周广胜 编辑: 赵航