

DOI: 10.20103/j.stxb.202306081217

吴欣宇, 朱秀芳. 中国不同植被区对极端气候的响应差异. 生态学报, 2023, 43(24): 10202-10215.

Wu X Y, Zhu X F. Differential analysis of vegetation response to extreme climate in different vegetation regions of China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10202-10215.

中国不同植被区对极端气候的响应差异

吴欣宇², 朱秀芳^{1,2,*}

1 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

摘要: 分析不同区域植被对极端气候的响应对于加深对植被与气候之间关系的理解以及制定应对极端气候条件的措施尤为重要。基于 2001—2020 年气候数据和归一化植被指数 (NDVI) 数据, 以植被区划为分析单元, 分析中国 8 个植被区的 NDVI 和 27 个极端气候指标的时空变化趋势, 探究各植被区植被 NDVI 对极端气候的响应特征与差异性。结果表明: (1) 整个研究区及各植被区的平均 NDVI 年最大值呈显著增加趋势, 其中, 温带针叶、落叶阔叶混交林区增加趋势最明显, 青藏高原高寒植被区增加趋势最弱。 (2) 极端高温指数多呈升高趋势。极端降水指数在研究区东部呈升高趋势, 在西南部呈减少趋势。 (3) 在不同植被区对 NDVI 影响最大的极端气候指标不同, 其中在寒温带针叶林区影响最大的指标为温暖时间持续指数 (WSDI); 在温带针叶、落叶阔叶混交林区和热带季风雨林、雨林区影响最大的指标为最高低温 (TN_x); 在暖温带落叶阔叶林区和亚热带常绿阔叶林区为简单降水强度指数 (SDII); 在温带草原区为最高高温 (TX_x); 在温带荒漠区为年总降水量 (PRCPTOT); 在青藏高原高寒植被区为结冰天数 (ID)。

关键词: 归一化植被指数; 极端气候; 植被区划; 时空变化; 相关分析; 随机森林

Differential analysis of vegetation response to extreme climate in different vegetation regions of China

WU Xinyu², ZHU Xiufang^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875, China

2 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Under the background of climate warming, extreme climate poses a serious threat to vegetation. The response of vegetation to extreme climate is spatially heterogeneous, which is influenced by factors such as vegetation type and soil composition. China has complex topographic and climatic conditions, which make the vegetation types vary in its different regions. Analyzing the response patterns of vegetation to extreme climate in different regions is of particular importance to advance our understanding of the relationship between vegetation and climate and to develop measures to address extreme climate conditions. The main purpose of this study is to explore the spatiotemporal changes in normalized difference vegetation index (NDVI) and extreme climate, and analyze the effects of extreme climate on vegetation NDVI within various vegetation regions. Based on climatic data and NDVI data, the study firstly explored the spatiotemporal changes of NDVI and 27 extreme climate indicators across different vegetation regions in China from 2001 to 2020 by the Theil Sen Median slope estimation and Mann Kendall trend test methods. Then, the correlation analysis and random forest importance ranking

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077436)

收稿日期: 2023-06-08; **网络出版日期:** 2023-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

本研究尚缺中国港澳台气象数据。

method were used to analyze the relationship between different extreme climate indicators and the NDVI and further discuss the variations in vegetation response to extreme climate across different vegetation regions. The results indicated that: (1) the annual maximum value of NDVI ($NDVI_{max}$) of the whole study area and various vegetation regions showed a significant increasing trend. Among them, the temperate coniferous and deciduous broad-leaved mixed forest area exhibited the strongest increasing trend, while the alpine vegetation area of Qinghai-Tibet Plateau showed the weakest increasing trend. (2) The extreme heat indicators increased significantly. Except for consecutive dry days (CDD), the extreme precipitation indicators showed an increasing trend in the eastern study area and a decreasing trend in the southwest. (3) The extreme climate indicators that had the greatest influence on $NDVI_{max}$ in different vegetation regions were different. In the cold temperate coniferous forest area, warm spell duration indicator (WSDI) had the greatest effect. In the temperate coniferous and deciduous broad-leaved mixed forest area and tropical monsoon rainforest and rainforest area, the maximum daily minimum temperature (TNx) had the greatest effect. In warm temperate deciduous broad-leaved forest area and subtropical evergreen broad-leaved forest area, simple daily intensity indicator (SDII) had the greatest effect. In temperate grassland area, maximum daily maximum temperature (TXx) had the greatest effect. In temperate desert area, annual precipitation total (PRCPTOT) had the greatest effect. In the alpine vegetation area of the Qinghai-Tibet Plateau, ice days (ID) had the greatest effect.

Key Words: normalized difference vegetation index; extreme climate; vegetation region; spatiotemporal changes; correlation analysis; random forest

在全球气候变暖加剧的背景下,更严重、更频繁发生的极端气候事件为全球各地区带来日趋严重的风险^[1]。极端气候所具有的变异性、突发性、破坏性使得其比气候平均态有更强的威胁^[2],对陆地生态系统造成持久、严重且不可恢复的破坏^[3]。植被作为连接陆地生态系统各要素的关键,在气候调节、生物多样性保护等生态服务中至关重要^[4-5]。极端气候与植被之间的关系是国际社会普遍关注的重大科学问题。

关于极端气候与植被关系的研究大致可以分为两类:基于极端气候事件的分析 and 基于极端指数的分析。前者识别发生的极端气候事件,例如干旱、暴雨等,进而分析极端事件对植被生态系统的影响^[6-7]。这类研究往往聚焦在单种的极端事件类型上,少数同时考虑两种或多种极端气候事件类型(比如高温干旱)。后者往往同时分析各类极端气候指标和植被生长的关系,例如植被指数与极端气候指数的相关性^[8-9]。该类方法便于比较和评价不同极端气候对植被影响的程度,然而相关分析无法捕捉植被与极端气候之间的非线性复杂关系。

从研究尺度上看,各国学者在全球尺度^[10-13]、国家尺度^[14-16]和区域尺度^[17-19]均展开了植被对气候因子变化的响应研究,而国内在进行植被对极端气候响应分析时,大多基于区域尺度,集中于中国局部地区或流域,例如针对陕西省^[5]、内蒙古^[20]、沿海地区^[21]、黄土高原^[22]等区域。不同区域的研究均表明,气候对植被生长与覆盖变化有重要意义^[23-24],但受植被类型、土壤等因素的影响,植被的具体响应机制具有区域差异和特征^[25]。中国地形地貌复杂,气候类型多样,具有多种植被类型,不同植被与气候的关系复杂且时空异质性大^[26],有必要分区理清影响不同区域植被生长的主导极端气候。然而,总体来说,目前在全国尺度的研究较少,不同区域之间的对比分析不足。

在分区探究植被变化及其驱动因素时,以往研究常常根据不同植被覆盖类型^[27-28]或生态地理分区^[29-30]对区域进行划分,探究不同区域的植被对气候的响应。然而,不同植被类型在空间上是不连续的,同一像元在不同年份的植被类型可能发生变化,需要长时间序列的每年的高精度的植被类型图作为基础数据。生态地理分区是基于地理地带分异规律并根据非生物与生物要素进行划分的,其划分方式可能造成同一植被类型在不同区域重复出现,从而缩小不同区域植被对气候的响应差异性。相比之下,植被分区是空间上完整、连续和不重复出现的植被类型或其组合的地理单位,区内部具有相对一致的植被类型。根据我国植被区划数据将全国

划分为多个植被区进行研究,既考虑了不同植被类型对气候的响应差异,又降低了对长时间序列高质量植被类型图的依赖。以植被区划的视角探讨我国范围内极端气候与植被之间的关系、深入研究不同植被区植被对极端气候的响应,可以为地区植被的开发利用、经营保护和极端气候应对措施的制定等提供理论支撑,对促进生态保护、推进可持续发展具有重要意义^[31]。

基于上述考虑,本文以不同植被区为分析单元,基于长期历史观测气候数据、卫星遥感的归一化差异植被指数(NDVI)数据等,分析 2001—2020 年我国植被 NDVI 与极端气候指数的时空变化特征,探讨不同极端气候指数与植被 NDVI 的关系,研究各植被区的植被对极端气候的响应特征与响应差异性。

1 研究区及数据获取

1.1 研究区域

本文研究区为中国(73°33'E—135°05'E,3°51'N—53°33'N)地区。中国水热条件的时空差异明显,气候类型复杂多样。根据中国科学院资源环境科学数据中心提供的植被区划数据,将研究区域分为 8 个植被区(图 1),包括寒温带针叶林区(I),温带针叶、落叶阔叶混交林区(II),暖温带落叶阔叶林区(III),亚热带常绿阔叶林区(IV),热带季雨林、雨林区(V),温带草原区(VI),温带荒漠区(VII)和青藏高原高寒植被区(VIII)。

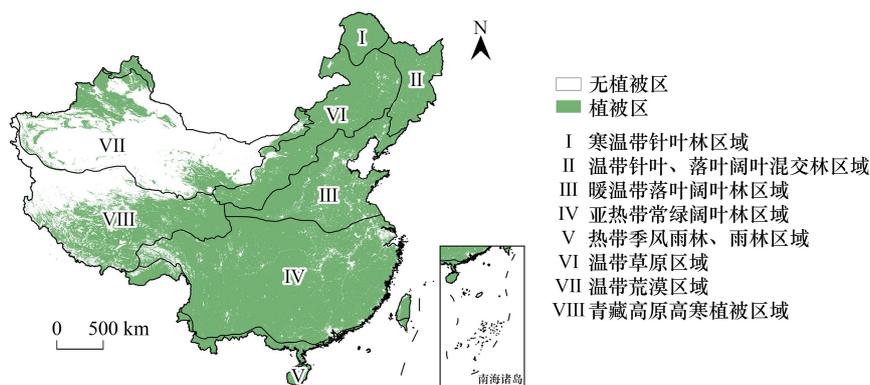


图 1 中国植被区划分和植被分布

Fig.1 Vegetation regions and vegetation distribution in China

1.2 数据来源与预处理

土地利用覆盖数据来源于美国国家航空航天局(NASA)提供的土地覆盖类型产品(MCD12Q1)。选取 2001—2020 年的土地利用覆盖数据,将其中植被区域的交集作为本文所研究的植被区域(图 1),从而保证研究区域的一致性。

归一化植被指数 NDVI 数据来源于 NASA 提供的 2001—2020 年 NDVI 栅格数据(MOD13A1),空间分辨率为 500 米,时间分辨率为 16 天。本文利用全年的 NDVI 数据,逐像元计算每年 NDVI 最大值即 $NDVI_{max}$,得到各植被像元逐年 $NDVI_{max}$ 数据。和 NDVI 平均值相比,NDVI 最大值可以移除大部分云、大气等因素的影响,能够较好地表示地表植被覆盖状况^[32]。

气象数据来源于中国气象局国家气候中心建立的一套 0.25° 分辨率的长时间序列格点化数据集 CN05.1^[33]。本文通过 2001—2020 年数据中的日平均气温、最高和最低气温、降水数据,计算出 27 个极端气候指数^[34-35](表 1),并基于年尺度,计算各像元的各极端气候指数,得到像元尺度的 27 个极端气候指数的时间序列。这些指数不仅能够对极端气候事件的不同方面进行表征,而且其稳健性较好、显著性较强、噪声较低,在国内外关于极端气候事件的变化特征研究中得到了广泛应用^[19]。

表 1 极端气候指数
Table 1 Extreme climate indicators

类别 Category	分类 Classification	指数名称 Name	标识 ID	定义 Definition	单位 Unit	
气温类指数 Extreme temperature indicators	绝对指数	霜冻天数	FD	TN(日最低气温)< 0℃的年度日数	d	
		夏季天数	SU	TX(日最高气温)> 25℃的年度日数	d	
		结冰天数	ID	TX(日最高气温)< 0℃的年度日数	d	
	相对指数	热夜天数	TR	TN(日最低气温)> 20℃的年度日数	d	
		冷昼日数	TX10p	每年/月 TX<第 10 个百分位数的天数	d	
		冷夜日数	TN10p	每年/月 TN<第 10 个百分位数的天数	d	
		暖昼日数	TX90p	每年/月 TX>第 90 个百分位数的天数	d	
		暖夜日数	TN90p	每年/月 TN>第 90 个百分位数的天数	d	
		极值指数	最高高温	TXx	日最高气温的年/月最大值	℃
			最低低温	TNx	日最低气温的年/月最大值	℃
	最低高温		TXn	日最高气温的年/月最小值	℃	
	最低低温		TNn	日最低气温的年/月最小值	℃	
	其他指数	生长季节长度	GSL	每年首次实现连续至少 6 天 TG(日平均气温)> 5℃ 和 7 月 1 日(北半球)后首次实现连续至少六天 TG(日平均气温)< 5℃ 之间的日数	d	
		温暖时间持续指数	WSDI	TX>第 90 个百分位数的情况持续至少 6 天的全年总日数	d	
		寒冷时间持续指数	CSDI	TN<第 10 个百分位数的情况持续至少 6 天的全年总日数	d	
每日温度范围		DTR	TX 和 TN 差值的年/月平均值	℃		
降水类指数 Extreme precipitation indicators		降水量指数	最大 1 日降水量	Rx1day	每年/月最大日降水量	mm
			最大 5 日降水量	Rx5day	每年/月最大连续 5 日降水量	mm
	简单降水强度指数		SDII	每个降水日的平均降水量	mm/d	
	年降水量(95p)		R95pTOT	日降水量大于第 95 个百分位数的年总降水量	mm	
	年降水量(99p)	R99pTOT	日降水量大于第 99 个百分位数的年总降水量	mm		
	年降水量(总量)	PRCPTOT	年度全部日降水量的总和	mm		
	降水日指数	降水日数(10mm)	R10mm	日降水量大于 10mm 的年度日数	d	
		降水日数(20mm)	R20mm	日降水量大于 20mm 的年度日数	d	
降水日数(25mm)		R25mm	日降水量大于 25mm 的年度日数	d		
最大干旱持续时长		CDD	日降水量小于 1mm 的最大连续天数	d		
	最大湿润持续时间	CWD	日降水量大于等于 1mm 的最大连续天数	d		

2 研究方法

2.1 趋势分析

本文采用 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 趋势检验结合的方法分析 $NDVI_{max}$ 和极端气候指数的时空变化趋势。Theil-Sen median 是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,能够降低噪声对斜率的干扰,同时能够较好地规避离散数据和测量误差的影响,常用于长时间序列数据的趋势分析中^[36]。Mann-Kendall 检验可以计算时间序列变化的显著性,能够一定程度上避免离群值影响,适用于长时间序列的趋势检验和分析,已被广泛用于检测气象和水文序列的非参数统计^[37-38]。

2.2 去趋势处理

植被 NDVI 的变化受到气候因素和人类活动的共同影响。去趋势处理可以去除长期趋势,从而得到更加平稳的时间序列,对于研究变量波动性有重要意义。为了减少人类活动对植被 NDVI 的影响,本文采用去趋势化方法对每个植被区的 $NDVI_{max}$ 数据进行处理^[39]。该方法在一定程度上可以将气候因素对植被的影响与非气候因素的影响解耦,适用于研究植被与气候因子之间的关系^[40]。对每个植被区的 $NDVI_{max}$ 时间序列进行

线性趋势去除:

$$y_i^{Tr} = \alpha_0 + \alpha_1 t \quad (1)$$

$$y_i^D = y_i - y_i^{Tr} \quad (2)$$

式中, α_0 和 α_1 分别是 $NDVI_{max}$ 与时间序列线性拟合的截距和斜率, t 为研究期内的时序数据, y_i^{Tr} 为经过线性拟合得到的 $NDVI_{max}$ 序列, y_i 为植被区 $NDVI_{max}$ 的实际值, y_i^D 为去除了线性趋势的序列数据。

2.3 相关分析

Pearson 相关系数表示两个变量之间的相关性,可以用来表征植被 $NDVI_{max}$ 与极端气候指数间的线性相关关系。本文将 $NDVI_{max}$ 数据聚合至 0.25° 分辨率后,在两个尺度(植被区内逐栅格和逐植被区)计算了 $NDVI_{max}$ 与各极端气候指数的 Pearson 相关关系,并进行显著性检验。

2.4 随机森林重要性排序

随机森林回归模型可以基于决策树以变量重要性评分来评价各个自变量对因变量的影响程度,是一种集成学习算法^[41]。本文通过随机森林重要性排序的方法,以均方误差增加的百分比表示植被区中各极端气候指数的重要程度并对其进行排序,以评估每个极端气候指数对植被 $NDVI_{max}$ 的影响。在同一植被区中,均方误差增加的百分比数值越大,表示该极端气候指数对 $NDVI_{max}$ 的影响越大;不同植被区的均方误差增加的百分比数值没有可比性。

3 结果分析

3.1 植被 $NDVI$ 的时空格局分析

2001—2020 年研究区 $NDVI_{max}$ 的均值空间分布和整体趋势如图 2、图 3 所示。研究区植被 $NDVI_{max}$ 自东南

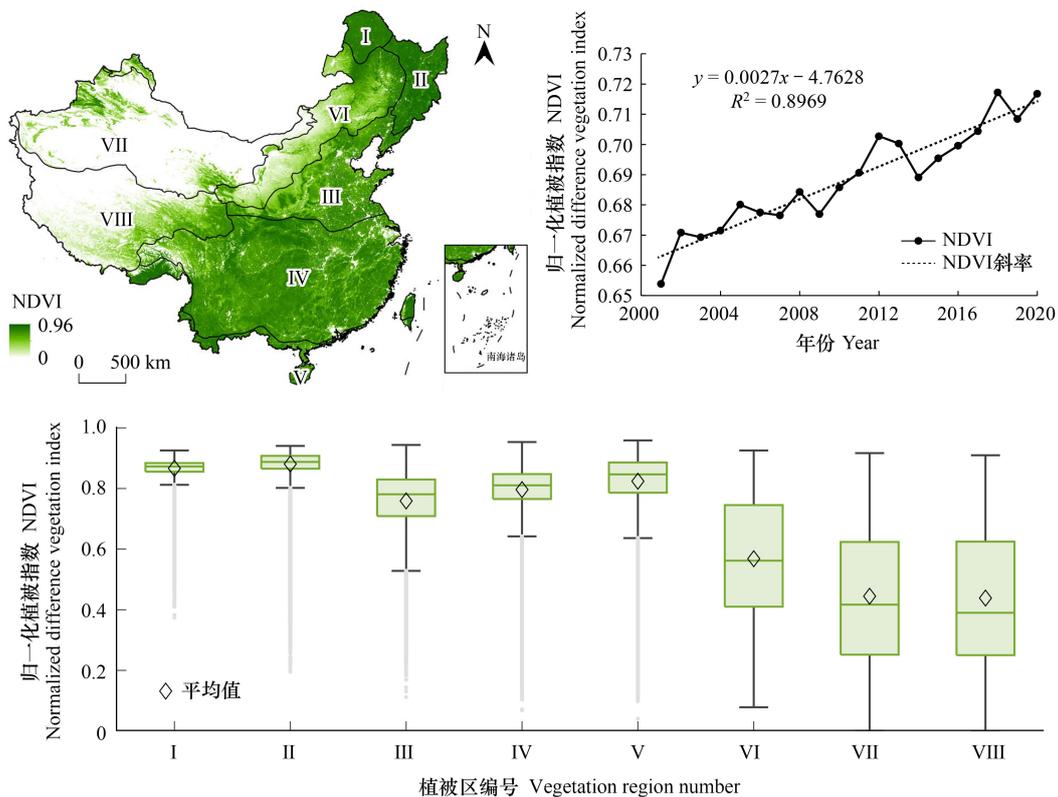


图 2 2001—2020 年 $NDVI_{max}$ 的空间分布与年际变化

Fig. 2 The spatial distribution and interannual variation trend of $NDVI_{max}$ from 2001 to 2020

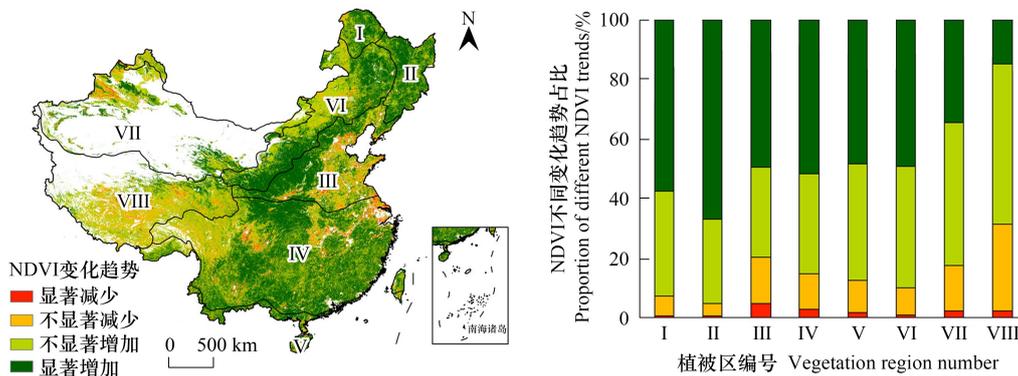


图 3 2001—2020 年 $NDVI_{max}$ 的趋势空间分布及各植被区不同趋势的像元个数占总像元的比例

Fig.3 The spatial distribution of $NDVI_{max}$ variation trend, and the proportion of pixels with different $NDVI_{max}$ variation trends to the total number of pixels in different vegetation regions of the study area from 2001 to 2020

向西北逐渐减少,其中 II 区多年平均 $NDVI_{max}$ 最高,为 0.88,而 VIII 区最低,为 0.44。在各植被区中,I 区多年平均 $NDVI_{max}$ 的方差最小,仅为 0.0007,相比之下 VIII 区方差最大,为 0.0448,表明 VIII 区植被生长状况整体较差且在区域内部存在比较大的差异。另外,全国和各植被区的 $NDVI_{max}$ 均呈显著上升趋势,其中全国的增长速率为 0.027/10a。呈增加趋势的栅格占整个研究区总栅格数量的 59.75%,其中显著增加的占 32.62%,大多分布在中部、东北部和南部地区。呈减少趋势的栅格占总栅格数量的 11.47%,其中显著减少的仅占 1.66%。各植被区中, $NDVI_{max}$ 增加最为明显的为 II 区,而 VIII 区的增加趋势最弱。整体而言,我国超过一半的植被区域的植被生长状况得到改善,各植被区 $NDVI_{max}$ 均呈增长趋势,其中 II 区植被改善最为明显。

3.2 极端气候指数的变化趋势分析

3.2.1 极端气温指数的变化趋势分析

由图 4 可知,表征高温的 SU、TR、TX90p、TN90p、TNx 等指数在研究区内多呈增加趋势,其中 TN90p 的增加趋势最为明显,呈显著增加趋势的栅格数量占 41.42%,主要分布于 II 区、IV 区、VIII 区,表明这些区域的夜间温度升高显著,暖夜日数明显增加。表征低温的 FD、TN10p、CSDI 在研究区内多呈减少趋势,其中 FD 呈显著减少的栅格数量占比为 16.35%,主要分布于 VIII 区和 IV 区西北部,表明这些地区的霜冻天数减少。其余低温指数的变化趋势大多未通过显著性检验。除 II 区、III 区外,其余植被区的气温日较差 DTR 大多呈减少趋势。总体而言,大多极端高温指数在研究区内呈明显升高趋势,部分极端低温指数呈下降趋势,整个研究区处于变暖状态,其中 III 区、IV 区南部变暖较为明显,VIII 区夜间温度明显上升。

3.2.2 极端降水指数的变化趋势分析

由图 5 可知,表征降水量的 Rx1day、Rx5day、SDII、R95pTOT、R99pTOT、PRCPTOT 均在研究区东北部和中部地区呈增加趋势,在西部呈减少趋势。表征降水日数的 R10mm、R20mm、R25mm 在东南部地区大多呈增加趋势,其中显著增加的栅格数量占比分别为 17.69%、7.49%、5.04%,表明极端降雨日数增多。CDD 在东南部地区呈减少趋势,表明东南部的最大干旱持续时长减少,即降水频率增加,而 CWD 的变化趋势则与 CDD 相反。综上,除 CDD 之外,各极端降水指数的空间变化趋势相对一致,均显示研究区降水量和降水频率在东部增加、西南部减少。

3.3 植被 NDVI 对极端气候的响应

3.3.1 植被 NDVI 与极端气候指数的相关性

通过极端气温指数与各植被区的相关分析(图 6 和图 7)可知,总体而言,极端高温指数 SU、TX90p、TXx、TNx 与植被 $NDVI_{max}$ 相关性较高的区域大多集中分布在 VI 区且为负相关,表明极端高温的发生对 VI 区植被造成不利影响,另外,部分极端低温指数,如 FD、TN10p,与 IV 区南部存在较为明显的负相关关系。具体来

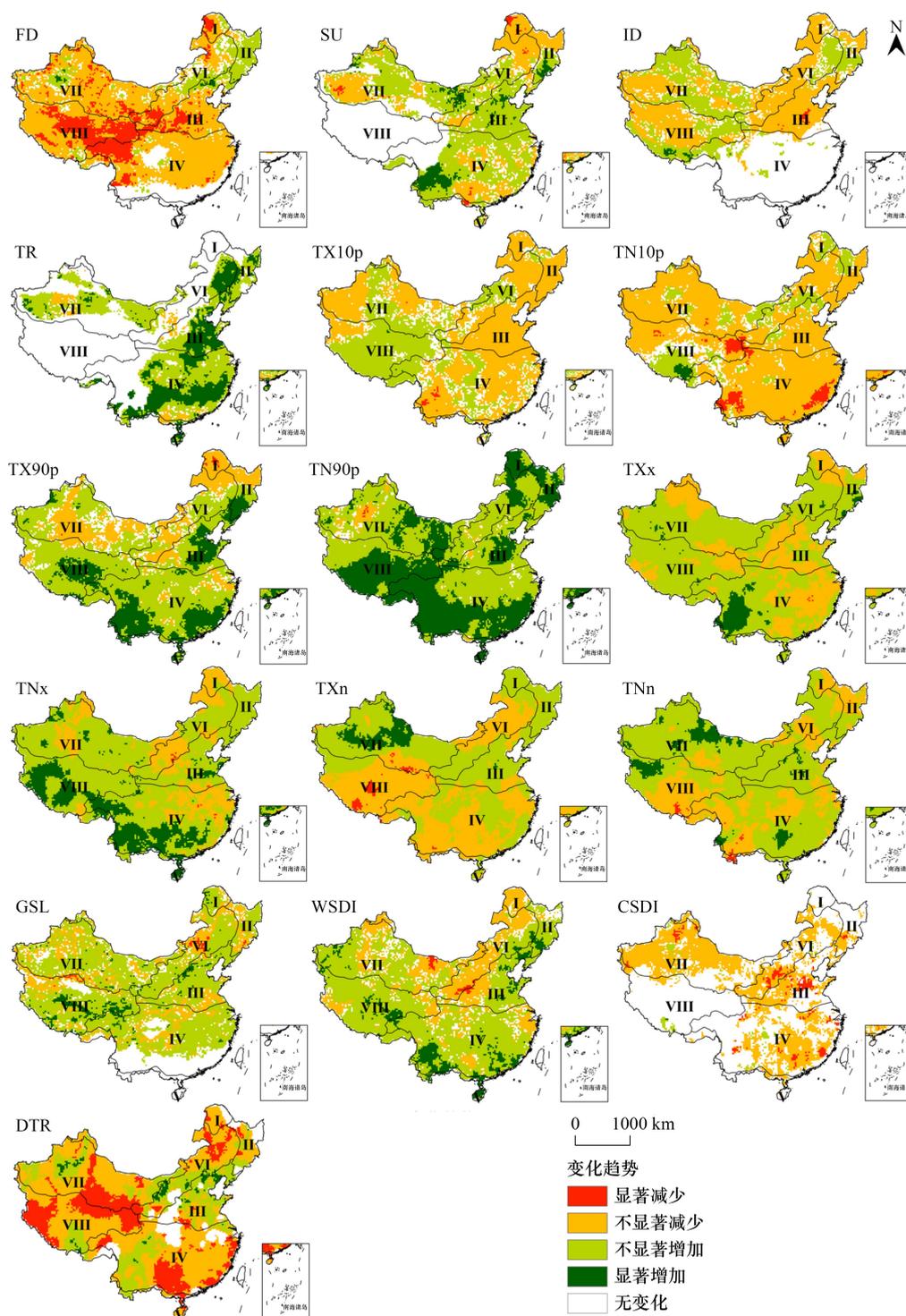


图 4 极端气温指数变化趋势

Fig.4 Variation trends in extreme temperature indicators

FD: 霜冻天数; SU: 夏季天数; ID: 结冰天数; TR: 热夜天数; TX10p: 冷昼日数; TN10p: 冷夜日数; TX90p: 暖昼日数; TN90p: 暖夜日数; TXx: 最高高温; TNx: 最高低温; TXn: 最低高温; TNn: 最低低温; GSL: 生长季节长度; WSDI: 温暖时间持续指数; CSDI: 寒冷时间持续指数; DTR: 每日温度范围

说,在 I 区,植被 $NDVI_{max}$ 与 SU、TXx、TX90p、WSDI 等极端高温指数呈显著正相关关系,其中,与 WSDI 相关性最高,相关系数为 0.656。I 区纬度较高,气温较低,极端高温的发生在一定程度上为植被生长提供了热量条

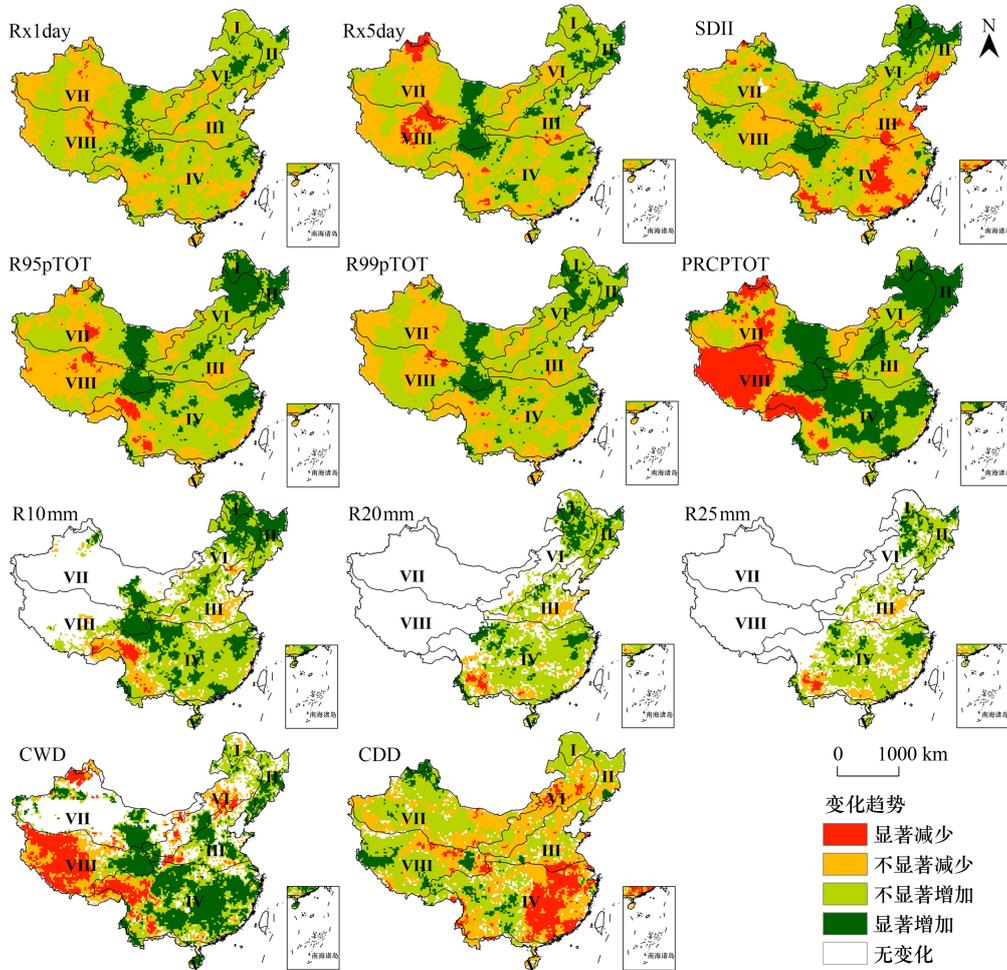


图 5 极端降水指数变化趋势

Fig.5 Change trends of extreme precipitation indicators

Rx1day:最大 1 日降水量; Rx5day:最大 5 日降水量; SDII:简单降水强度指数; R95pTOT:年降水量(95p); R99pTOT:年降水量(99p); PRCPTOT:年降水量(总量); R10mm:降水日数(10mm); R20mm:降水日数(20mm); R25mm:降水日数(25mm); CWD:最大湿润持续时长; CDD:最大干旱持续时间

件,从而促进植被 $NDVI_{max}$ 提高。在 II 区, TN_x 与植被 $NDVI_{max}$ 呈正相关关系且相关性最高,这表明最高低温的增加有利于 II 区植被生长。另外,与 I 区相比,气温对 II 区植被生长的限制已大大减弱。在 III 区,植被 $NDVI_{max}$ 与 TX_x 、 $TX90p$ 、 $WSDI$ 等极端高温指数呈负相关关系,其中与 $WSDI$ 相关性最强,相关系数为 -0.426 ,表明部分极端高温的发生对 III 区植被生长起一定的制约作用。在 IV 区,植被 $NDVI_{max}$ 与极端气温指数的相关性较低,表明温度对 IV 区植被的影响较弱。在 V 区,植被 $NDVI_{max}$ 与 TN_n 相关性最强且呈正相关,相关系数为 0.404 。在 VI 区,植被 $NDVI_{max}$ 与 TX_x 、 $TX90p$ 、 $WSDI$ 等极端高温指数呈显著负相关,其中与 TX_x 相关性最强,相关系数 -0.605 。VI 区水分条件较差,极端高温事件会造成土壤水分蒸发,引发干旱,对植被生长造成不利影响。在 VII 区,植被 $NDVI_{max}$ 与 $TN90p$ 相关性最强,相关系数为 0.586 。VII 区暖夜日数的增加,即夜间温度的升高,能够促进荒漠植被的生长^[42]。在 VIII 区,植被 $NDVI_{max}$ 与 $TN90p$ 呈显著正相关,与 FD 呈显著负相关,表明暖夜日数的增加和霜冻日数的减少都对植被 $NDVI$ 的增加起到积极影响。

通过极端降水指数与各植被区的相关分析(图 8 和图 9)可知,总体来看,除 CDD、CWD 外,其余极端降水指数与中国北方地区植被 $NDVI_{max}$ 的相关性较强,其中与 VI 区呈显著正相关,表明极端降水对北方地区影响较大且在一定程度上有利于 VI 区植被的生长。具体来说,在 I 区,除 CDD 之外,植被 $NDVI_{max}$ 与极端降水指

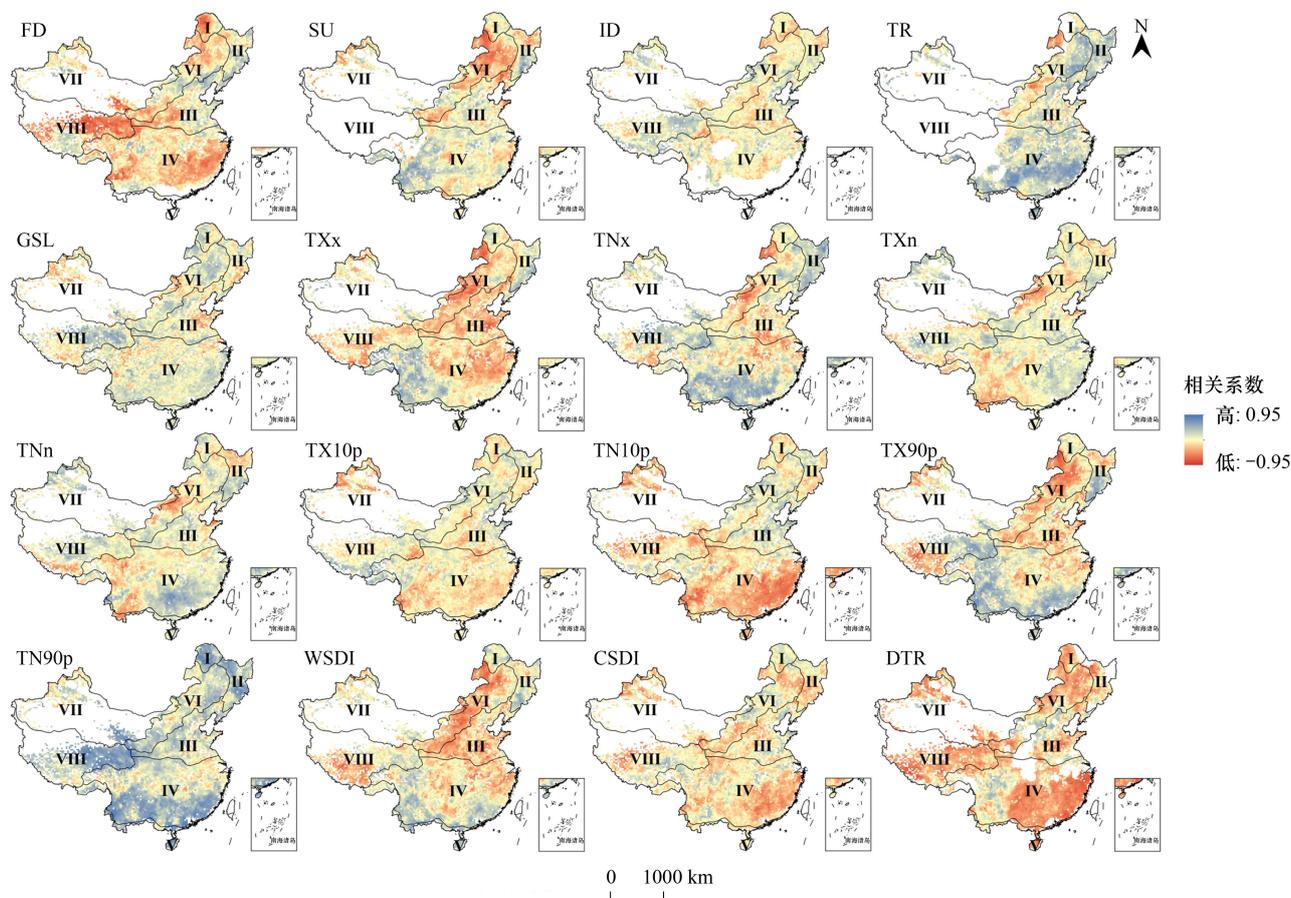


图6 极端气温指数与 $NDVI_{max}$ 的相关性的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of correlation between extreme temperature index and $NDVI_{max}$

数均呈负相关关系,其中,与 $R10mm$ 负相关性最强,相关系数为 -0.430 。I区植被生长主要受温度制约,而极端降水可能会造成温度进一步降低等不利影响,进而限制植被生长。在II区,植被 $NDVI_{max}$ 与极端降水指数相关性较弱。在III区,植被 $NDVI_{max}$ 与极端降水指数多呈正相关关系,其中,与 $SDII$ 相关性最强,相关系数为 0.621 ,而与 CDD 呈负相关。极端降水能够为III区提供植物生长所需的水分,促进植被生长。在IV区,植被 $NDVI_{max}$ 与极端降水指数多呈正相关关系,其中与 $SDII$ 相关性最强,表明极端降水在一定程度上有利于IV区植被生长。在V区,植被 $NDVI_{max}$ 与 $Rx5day$ 、 $R99pTOT$ 呈负相关关系。在VI区,植被 $NDVI_{max}$ 与极端降水指数均呈较强正相关关系,其中,与 $R10mm$ 相关性最强,相关系数为 0.620 。VI区水分条件较差,极端降水有利于VI区植被 $NDVI$ 的提高。在VII区,植被 $NDVI_{max}$ 与极端降水指数多呈较强正相关关系,与 CDD 呈负相关。VII区气候干旱,降水稀少,水分为植被覆盖变化的主要影响因素,极端降水可以缓解当地水资源匮乏的状况。在VIII区,植被 $NDVI_{max}$ 与 $R95pTOT$ 、 $PRCPTOT$ 呈正相关,即强降水量和年降水总量的增加对VIII区植被生长具有一定的正效应。

3.3.2 极端气候指数对不同植被区植被 $NDVI$ 的影响

本文通过随机森林重要性排序法,以均方误差增加的百分比表示27个极端气候指数对 $NDVI_{max}$ 影响的相对大小程度并进行排序,结果如图10所示。对于研究区整体而言, $SDII$ 对 $NDVI_{max}$ 的影响最大,即降水量的增加有利于我国植被 $NDVI_{max}$ 整体的增加。在I区, $WSDI$ 对植被 $NDVI_{max}$ 的影响最大, SU 、 TXx 次之,表明对于气温相对偏低的I区来说, $WSDI$ 等暖指数的增加为植被创造了更良好的生长条件。在II区, TNx 、 DTR 、 GSL 等极端气温指数对植被 $NDVI_{max}$ 影响较大。在III区, $SDII$ 、 $R10mm$ 、 $R20mm$ 对植被 $NDVI_{max}$ 影响最大,即极端降

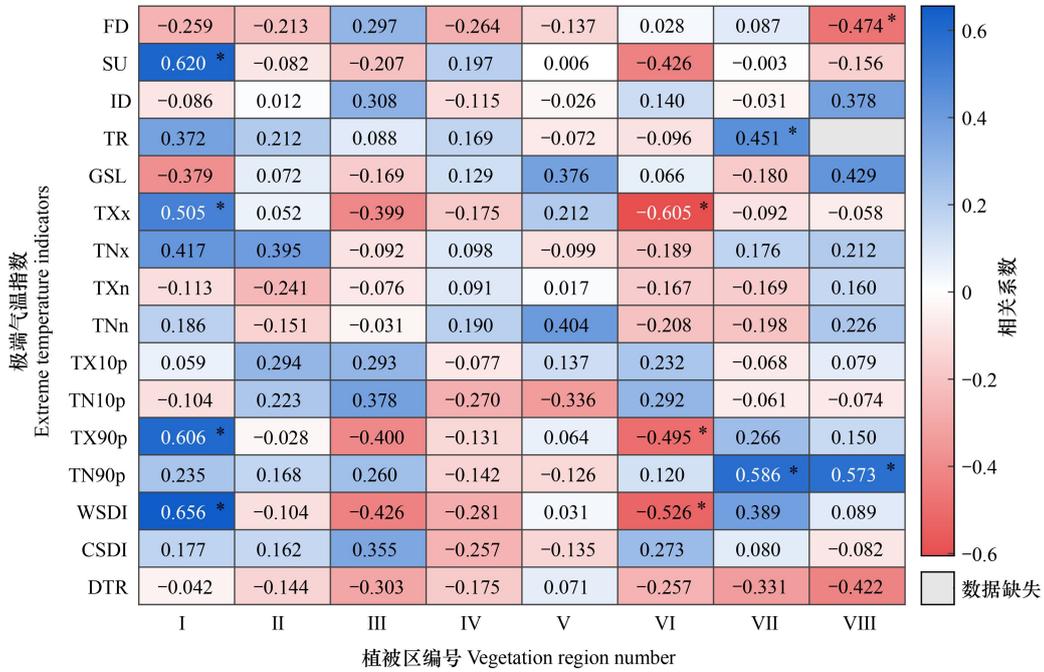


图 7 极端气温指数与各植被区 NDVI_{max} 的相关性

Fig.7 Correlation between extreme temperature indicators and NDVI_{max} in each vegetation region

* 代表显著性水平 $P < 0.05$

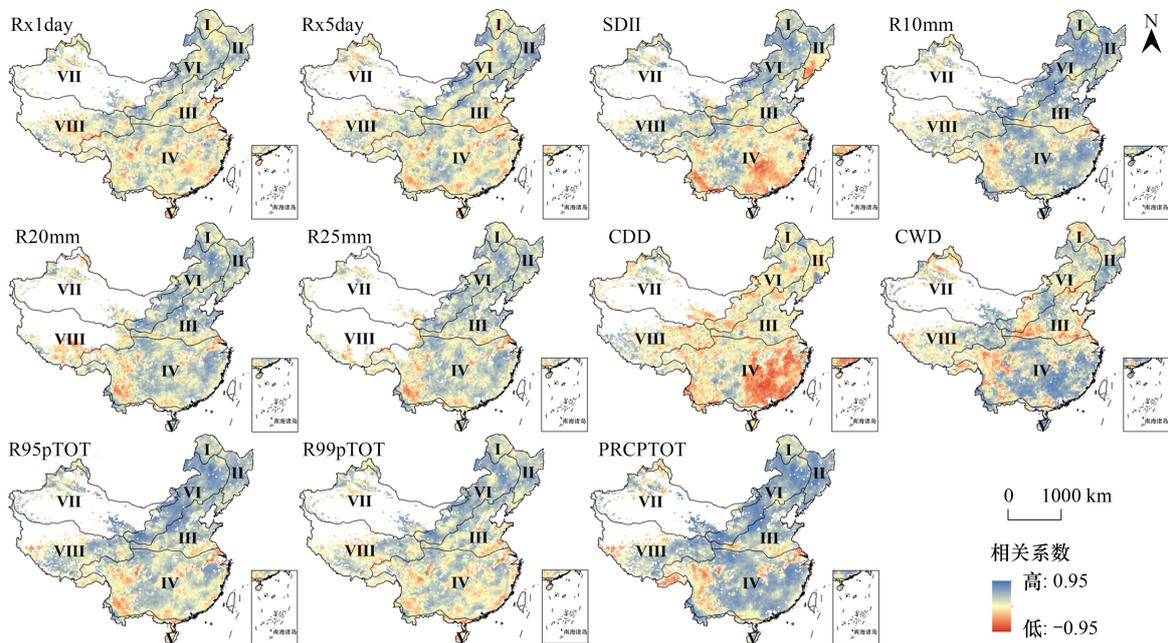
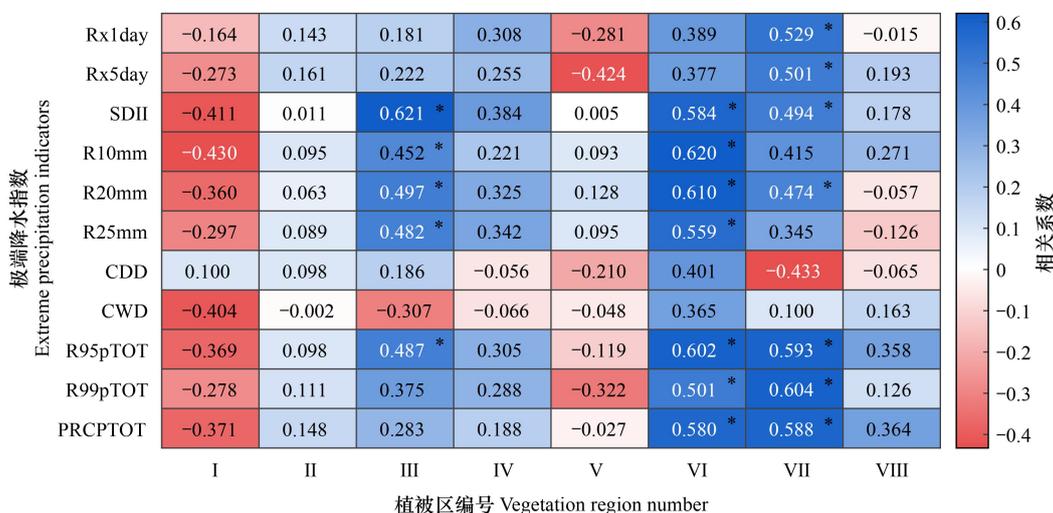


图 8 极端降水指数与 NDVI_{max} 的相关性的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of correlation between extreme precipitation index and NDVI_{max}

水指数的增加对植被生长具有一定的正效应。在 IV 区, SDII、TX10p、R99pTOT 等极端降水指数对植被 NDVI_{max} 影响最大。在 V 区, TNx 对植被 NDVI_{max} 的影响最大, GSL、TNn 次之。在 VI 区, TXx 对植被 NDVI_{max} 的

图9 极端降水指数与各植被区 NDVI_{max} 的相关性Fig.9 Correlation between extreme precipitation indicators and NDVI_{max} in each vegetation region* 代表显著性水平 $P < 0.05$

影响最大, WSDI、R99pTOT 次之。在 VII 区, PRCPTOT、R99pTOT、R95pTOT 对植被 NDVI_{max} 的影响最大, 表明年降水总量等降水量指数的增加能够缓解 VII 区干旱少雨的情况, 对植被生长提供一定水分从而有利于植被 NDVI_{max} 的增加。在 VIII 区, ID、R99pTOT、TN90p 对植被 NDVI_{max} 的影响最大。

4 讨论

4.1 与已有研究结果的对比

通过对我国 NDVI_{max} 时空变化分析发现, 我国植被 NDVI_{max} 呈上升趋势, 其中 III 区西北部与 VI 区南部 NDVI_{max} 存在显著的上升趋势, 这与以往研究所发现的黄土高原 NDVI 显著增加的结果一致^[43-44]。极端气温指数中, TN90p 的变化趋势最为显著, 其变化趋势表明我国超过 40% 的地区的暖夜日数呈显著增加趋势, 与以往发现的全球 70% 陆地呈暖夜日数持续增加的结论^[35] 相符。任正果等^[45] 对我国南方地区极端降水事件的研究结果表明, 极端降水指数变化具有一致性且在我国南方地区呈增加趋势, 这一发现与本文中降水指数变化的研究结果十分吻合。

与其他区域相比, 极端气候指数尤其是极端降水指数与 VI 区 NDVI_{max} 存在最强的相关关系。VI 区 NDVI_{max} 与表征高温的指数多呈负相关, 与表征降水的指数多呈较强正相关, 表明极端高温制约了 VI 区植被生长, 而降水的增加则对其产生有利影响, 这与许旭等^[46] 发现的内蒙古温带草原生长季平均盖度与降水呈显著正相关性的结果相符。另外, Guo 等^[47] 通过对东亚东北部植被与极端气候关系的分析发现, 该地区植被对受降水影响显著, 极端降水对该地区东部植被起抑制作用、有利于中西部植被生长, 这一结论与本研究中极端降水指数与 NDVI_{max} 关系的研究结果一致, 表明我国北方地区植被对极端降水的响应较为敏感。

4.2 研究特色

植被对气候的响应具有区域差异性, 分区进行植被的响应研究能更好反映植被与气候的关系。以往的研究或根据不同的植被覆盖类型^[27-28], 或基于生态地理分区^[29-30] 等来进行划分。而植被区划既考虑了植被本身的特点和空间分布的规律性, 又能充分指示植被与环境的关系。因此, 本文使用我国植被区划数据, 将全国划分为 8 个植被区, 探究各植被区对极端气候的响应差异。

在植被 NDVI 与极端气候指数的关系研究方面, 以往研究多使用相关分析来评估植被对气候的响应^[47], 而本文将相关分析和随机森林重要性排序两种方法的结果进行对比, 进而发现植被与极端气候之间更复杂的

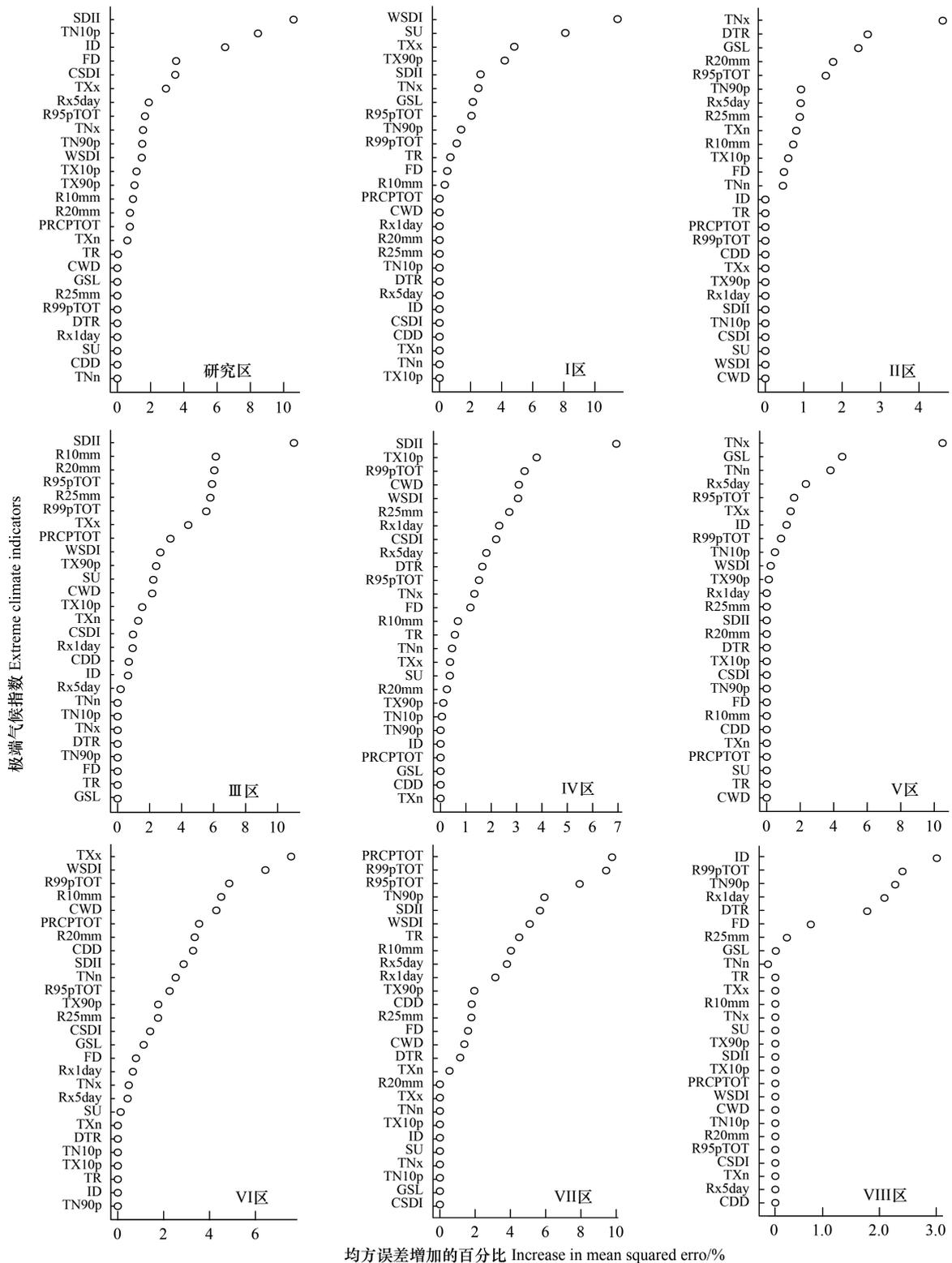


图 10 基于随机森林的极端气候指数重要性排序

Fig.10 Importance ranking of extreme climate index based on random forest

响应关系。对比结果发现,二者之间存在一定的异同点。在 I 区、II 区、III 区和 IV 区,两种方法得出的对 NDVI_{max} 影响最大的极端气候指数相同,分别为 WSDI、TNx、SDII、SDII。而在 V 区、VI 区、VII 区和 VIII 区,二

者得出的对 $NDVI_{max}$ 影响最大的极端气候指数则存在差异。相关分析结果显示与上述四个植被区 $NDVI_{max}$ 相关性最高的极端指数分别是 $Rx5day$ 、 $R10mm$ 、 $R99pTOT$ 和 $TN90p$ ，而随机森林的结果则显示为 TNx 、 TXx 、 $PRCPTOT$ 和 ID 。由于皮尔逊相关只能反映变量间的线性关系，无法捕捉和描绘变量间复杂的非线性关系，因此可以看出 TNx 、 TXx 、 $PRCPTOT$ 和 ID 和植被 $NDVI_{max}$ 之间不是简单的线性关系，而是存在更复杂的非相关性关系。相比 I 区、II 区、III 区和 IV 区，极端气候指数和 $NDVI_{max}$ 之间的关系在 V 区、VI 区、VII 区和 VIII 区更复杂。

4.3 研究不足

本文仍然存在一些不足之处。首先，植被 $NDVI$ 在植被覆盖度较高的地区容易出现过饱和现象，该现象可能对热带季风雨林、雨林区域(V)等区域 $NDVI_{max}$ 的变化趋势以及对极端气候响应的结果造成影响。因此，今后可选择适合表征热带地区植被覆盖的指数来进一步评估我国热带地区植被对极端气候的响应，例如增强型植被指数 $EVI^{[48]}$ 能够克服过饱和现象，利用 EVI 表征高植被覆盖度地区的植被生长状况并对植被生长进行监测。另外，植被 $NDVI$ 的变化与多种因素有关。除气温和降水外，极端气候所带来的太阳辐射^[49]等因素的变化也会对植被 $NDVI$ 产生重要的影响。今后可综合考虑多种因素对植被 $NDVI$ 的影响。

5 结论

本文以不同植被区为分析单元，通过趋势分析探讨 2001—2020 年我国植被 $NDVI_{max}$ 以及极端气候的时空变化基本特征，采用相关分析和随机森林重要性排序分析不同极端气候指数与植被 $NDVI_{max}$ 的关系，研究各植被区植被对极端气候的响应特征与响应差异性，得到以下结论：

(1) 研究区及各植被区的 $NDVI_{max}$ 均呈显著上升趋势。研究区内 $NDVI_{max}$ 呈增加趋势的栅格数量占 59.75%，其整体增长速率为 0.027/10a。各植被区中， $NDVI_{max}$ 增加最为明显的为 II 区，而 VIII 区的增加趋势最弱。

(2) 极端高温指数在研究区内多呈明显的升高趋势，表明研究区整体处于变暖状态，其中 III 区、IV 区南部变暖较为明显。除表示干旱的 CDD 外，极端降水指数大多在东部地区呈升高趋势，在西南部呈减少趋势，表明降水量和降水频率在东部增加、西南部减少。

(3) 植被 $NDVI_{max}$ 对极端气候的响应具有空间差异。纬度较高的 I 区、II 区对表征高温的指数较为敏感，表征降水的指数对 III 区、IV 区的影响最大，气候相对干旱的 VI 区、VII 区与降水指数呈显著正相关，VIII 区与 $TN90p$ 显著正相关、与 FD 显著负相关，表明 VIII 区植被对夜间温度较为敏感。

(4) 相关分析与随机森林两种方法的结论在 V 区、VI 区、VII 区和 VIII 区中存在差异。相关分析结果显示在上述区域中与 $NDVI_{max}$ 相关性最高的极端指数分别是 $Rx5day$ 、 $R10mm$ 、 $R99pTOT$ 和 $TN90p$ ，而随机森林的结果为 TNx 、 TXx 、 $PRCPTOT$ 和 ID ，说明在上述区域极端气候指数和 $NDVI_{max}$ 之间可能存在更加复杂的关系。

参考文献 (References) :

- [1] IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [2] Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. *Climatic Change*, 1992, 21(3): 289-302.
- [3] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogee J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend A D, Friedlingstein P, Grünwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival J M, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana J F, Sanz M J, Schulze E D, Vesala T, Valentini R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, 437(7058): 529-533.
- [4] Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Investigating the spatially heterogeneous relationships between climate factors and $NDVI$ in China during 1982 to 2013. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(10): 1597-1609.
- [5] 高滢, 孙虎, 徐嵩尧, 张世芳. 陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应. *生态学报*, 2022, 42(3): 1022-1033.
- [6] 张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 徐昆, 郭锐. 气候变化下中国不同植被区总初级生产力对干旱的响应. *生态学报*, 2022, 42(8): 3429-3440.
- [7] Zhu X F, Zhang S Z, Liu T T, Liu Y. Impacts of heat and drought on gross primary productivity in China. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 378.
- [8] Islam A R M T, Touhidul Islam H M, Shahid S, Khatun M K, Ali M M, Rahman M S, Ibrahim S M, Almoajel A M. Spatiotemporal nexus between vegetation change and extreme climatic indices and their possible causes of change. *Journal of Environmental Management*, 2021, 289: 112505.

- [9] Luo M, Sa C L, Meng F H, Duan Y C, Liu T, Bao Y H. Assessing extreme climatic changes on a monthly scale and their implications for vegetation in Central Asia. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271: 122396.
- [10] Craine J M, Ocheltree T W, Nippert J B, Towne E G, Skibbe A M, Kembel S W, Fargione J E. Global diversity of drought tolerance and grassland climate-change resilience. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 63-67.
- [11] 李皖彤. 全球 1982-2015 年植被动态及其与水热条件关系的研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [12] 李茂华, 都金康, 李皖彤, 李闰洁, 吴森垚, 王姗姗. 1982—2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系. *地理科学*, 2020, 40(5): 823-832.
- [13] Gao Q Z, Schwartz M, Zhu W Q, Wan Y F, Qin X B, Ma X, Liu S, Williamson M, Peters C, Li Y E. Changes in global grassland productivity during 1982 to 2011 attributable to climatic factors. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 384.
- [14] Ndayisaba F, Guo H, Isabwe A, Bao A M, Nahayo L, Khan G, Kayiranga A, Karamage F, Muhire E N. Inter-annual vegetation changes in response to climate variability in Rwanda. *Journal of Environmental Protection*, 2017, 8(4): 464-481.
- [15] 刘伟光. 中国区域植被对气候变化的响应及其对区域气候反馈的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [16] 卢乔倩, 江涛, 柳丹丽, 刘智勇. 中国不同植被覆盖类型 NDVI 对气温和降水的响应特征. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 23-34.
- [17] John R, Chen J Q, Ou-Yang Z T, Xiao J F, Becker R, Samanta A, Ganguly S, Yuan W P, Batkhisig O. Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 35033.
- [18] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.
- [19] 张清雨, 赵东升, 吴绍洪, 戴尔阜. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究. *地理科学*, 2013, 33(5): 594-601.
- [20] 苏日罕, 郭恩亮, 王永芳, 银山, 顾锡羚, 康尧, 包山虎. 1982—2020 年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的影响. *生态学报*, 2023, 43(1): 419-431.
- [21] 王晓利. 中国沿海极端气候变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
- [22] 刘盼. 黄土高原植被覆盖和总初级生产力变化特征及其对极端气候的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [23] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. *地理学报*, 2003, 58(1): 119-125.
- [24] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.
- [25] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379-382.
- [26] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210, T001.
- [27] 缪利, 陆晴, 刘根林, 危小建. 1999—2019 年青藏高原不同植被类型 NDVI 时空演变特征及其对气候因子的响应. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 97-105.
- [28] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应. *生态学报*, 2022, 42(9): 3557-3568.
- [29] 浮媛媛, 赵建军, 张洪岩, 贺红土, 郭笑怡. 基于生态地理分区的大兴安岭植被物候时空变化. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2797-2806.
- [30] 张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 周才平, 徐兴良. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2010, 29(11): 2004-2016.
- [31] Fang J Y, Song Y C, Liu H Y, Piao S L. Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(9): 1105-1122.
- [32] Holben B. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7: 1417-1434.
- [33] 吴佳, 高学杰. 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*, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [34] Frich P, Alexander L, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Tank A K, Peterson T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 2002, 19: 193-212.
- [35] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, Caesar J, Gleason B, Klein Tank A M G, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson D B, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre J L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D5): D05109.
- [36] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [37] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245.
- [38] Kendall M G. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin, 1970.
- [39] Papagiannopoulou C, Miralles D G, Decubber S, Demuzere M, Verhoest N E C, Dorigo W A, Waegeman W. A non-linear Granger-causality framework to investigate climate-vegetation dynamics. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1945-1960.
- [40] 倪铭, 张曦月, 姜超, 王鹤松. 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*, 2021, 45(6): 626-640.
- [41] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [42] 曾红霞, 刘强, 赵强. 西北地区昼夜增温的不对称性对植被动态的影响. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 260-265.
- [43] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [44] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 丁文斌. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.
- [45] 任正果, 张明军, 王圣杰, 朱小凡, 董蕾, 强芳. 1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化. *地理学报*, 2014, 69(5): 640-649.
- [46] 许旭, 李晓兵, 梁涵玮, 黄玲梅. 内蒙古温带草原区植被盖度变化及其与气象因子的关系. *生态学报*, 2010, 30(14): 3733-3743.
- [47] Guo Z J, Lou W, Sun C, He B. Trend changes of the vegetation activity in northeastern East Asia and the connections with extreme climate indices. *Remote Sens*, 2022, 14: 3151.
- [48] 李文梅, 覃志豪, 李文娟, 杨强. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 的比较分析. *遥感信息*, 2010, 25(6): 73-78.
- [49] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52.