DOI: 10.5846/stxb202112073469

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.

Su R H, Guo E L, Wang Y F, Yin S, Gu X L, Kang Y, Bao S H.Extreme climate changes in the Inner Mongolia and their impacts on vegetation dynamics during 1982–2020. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1):419-431.

1982—2020年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的 影响

苏日罕^{1,2}, 郭恩亮^{1,2,*}, 王永芳^{1,2}, 银山^{1,3}, 顾锡羚^{1,2}, 康尧^{1,2}, 包山虎^{1,3}

1 内蒙古师范大学地理科学学院,呼和浩特 010022

2 内蒙古自治区蒙古高原灾害与生态安全重点实验室,呼和浩特 010022

3 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室,呼和浩特 010022

摘要:内蒙古地处生态环境脆弱区,对气候变化尤为敏感。在全球气候变暖背景下,探究极端气候变化及其影响显得尤为重要。 基于内蒙古地区115个气象站点1982—2020年的逐日气象数据,从强度、持续时间、频率3个维度出发计算了18个极端气候指 数,在综合分析极端气候的时空变化特征的基础上,运用地理探测器和皮尔逊相关分析方法,定量评估极端气候对该区植被的 影响。结果表明:(1)极端暖指数均呈增加趋势,说明1982—2020年期间内蒙古地区极端偏暖现象增多。(2)持续干旱日数与 持续湿润日数呈减少趋势,说明39年来内蒙古地区连续性无降水天数和降水天数均减少。(3)极端气候指数与归一化植被指 数(NDVI)的相关关系表现出明显的空间异质性,表明内蒙古不同区域 NDVI 对各极端气候指数的响应程度不同。(4)因子探 测器结果表明极端降水指数相对于极端气温指数来说,对内蒙古植被生长变化的影响较大。研究结果可为内蒙古地区防灾减 灾与生态修复工程提供一定的科学依据。

关键词:极端气候;归一化植被指数(NDVI);时空变化;地理探测器;内蒙古

Extreme climate changes in the Inner Mongolia and their impacts on vegetation dynamics during 1982—2020

SU Rihan^{1,2}, GUO Enliang^{1,2,*}, WANG Yongfang^{1,2}, YIN Shan^{1,3}, GU Xiling^{1,2}, KANG Yao^{1,2}, BAO Shanhu^{1,3} 1 College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

2 Key Laboratory of Disaster and Ecological Security on Mongolian Plateau, Hohhot 010022, China

3 Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, China

Abstract: In recent years, a growing number of reports and studies have shown that extreme weather events will become more frequent, which will cause serious impacts and losses to society, economy and human life. In the context of global warming, it is especially significant to explore the characteristics of extreme climate change and its impact on ecosystem. Vegetation plays a key role in the terrestrial ecosystem. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is the best indicator for monitoring the growth state and spatial distribution of terrestrial vegetation, and is often used to reflect the response of vegetation dynamics to climate change in the region. The Inner Mongolia is located in a fragile ecological environment and is particularly sensitive to climate change. Therefore, it is necessary to explore the dynamic change of extreme climate in Inner Mongolia and its impact on vegetation, which can provide a scientific basis for disaster mitigation

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2020LH04003,2019MS04003);内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY21542);内蒙古自治区高 等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT22028)

收稿日期:2021-12-07; 网络出版日期:2022-08-29

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: guoel1988@ imnu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

and ecological restoration projects in the Inner Mongolia. Based on the daily meteorological data of 115 meteorological stations in the Inner Mongolia from 1982 to 2020, this paper selected and calculated 18 extreme climate indices from three dimensions of intensity, duration, and frequency, and comprehensively analyzed the temporal and spatial variation characteristics of extreme climate. On this basis, the geographical detectors and Pearson correlation analysis methods were used to quantitatively evaluate the impact of extreme climate on vegetation in the region. The results showed that: (1) the extreme warm temperature indices all showed an increasing trend, indicating that extreme warm phenomenon in the Inner Mongolia has increased during the period 1982—2020. (2) Both consecutive dry days and consecutive wet days showed a decreasing trend, indicating that the continuous drought and precipitation events in the Inner Mongolia have decreased in the past 39 years. (3) The correlation between the extreme climate indices are positively correlated in the east, but negatively correlated in the central region; the NDVI and extreme warm indices are positively correlated in the east, but negatively correlated in the central region; the NDVI was significantly positively correlated with extreme precipitation intensity and frequency indices in the central Inner Mongolia. (4) The factor detector results showed that the extreme precipitation index had a greater impact on the vegetation growth and changes than the extreme temperature index in the Inner Mongolia. In general, the paper can provide the theoretical evidence for disaster mitigation and ecological environment conservation in the Inner Mongolia.

Key Words: extreme climate; NDVI; spatio-temporal change; geographical detector; the Inner Mongolia

极端气候事件是指特定时段内某类气候要素统计量值显著偏离平均值、且超出其观测统计量值区间上下限的阈值的事件^[1]。与平均态的气候变化相比,极端气候事件由于其突发性和破坏性强,会给社会、经济和人类生活造成严重的影响和损失。IPCC第六次评估报告中指出,在全球变暖进一步加剧的背景下,热浪、强降水、干旱等极端气候事件发生的频次和强度将增加^[2]。一系列研究又指出欧洲、蒙古高原、美国、伊朗等地区均出现极端暖事件逐渐增多,极端冷事件逐渐减少的现象^[3-8]。因此,极端气候的研究已成为当今社会的热点话题。

联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告(IPCC6)中指出,气候变化监测和指标专家组(ETCCDI)定义了 27 个代用气候指数,主要集中在对极端气候的描述上^[9]。目前,国内外不同研究小组都一致认同代用极端气候指数对极端气候变化监测的重要性^[10]。除了极端气候事件监测外,其对陆地生态系统的影响研究也是热点问题之一^[11]。植被连接着土壤、水圈和大气圈^[12],其呼吸作用、光合作用和植被的蒸散发等对生态系统能量收支、水热平衡和生物循环有着重要作用^[13]。归一化植被指数(NDVI)是监测陆地植被生长状态及空间分布变化的最佳指示因子^[14],常用于反映区域内植被动态对气候变化的响应^[15]。例如,高 滢等对陕西省极端气候指数与 NDVI 进行相关分析,发现 NDVI 对极端气候的响应具有空间差异性,比如 NDVI 与日最低气温极大值(TNx)在陕西省北部呈负相关,在南部呈正相关^[16]。张晋霞等发现,气温日较差(DTR)和冷夜日数(Tn10p)是影响新疆大部分地区植被 NDVI 的主导指数^[17]。

内蒙古位于中国北部边疆,其植被类型多样,生态环境脆弱,对气候变化尤为敏感。极端气候事件会对生态系统土壤水分和养分状况、植物生长发育和生理特性、群落结构、生产力和碳循环产生影响^[18]。目前,有关内蒙古地区极端气候变化的研究已有不少,但是从极端气候的强度、持续时间、频率等多种维度深入探究其演变规律及对植被生长影响的研究较少。因此本文从极端气候的强度、持续时间和频率角度出发,选取18个极端气候指数对内蒙古地区极端气候的时空演变规律进行研究,在此基础上,利用皮尔逊相关系数法和地理探测器模型,分别从线性和空间异质性角度入手,探究极端气候对植被动态变化的影响,研究结果对该区生态环境的保护与筑牢区域生态安全具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区(97°12′—126°04′E,37°24′—53°23′N)位于我国北部边疆地区,总面积为118.3 万 km²。内蒙古地形复杂、地貌单元多样,平均海拔1000m,地形地势由西向东、从南到北逐渐下降(图1)。内蒙古位于北半球中高纬度内陆区,属于西北干旱、半干旱气候向东南沿海湿润、半湿润季风气候的过渡带^[19]。年均温为-4—9℃,具有夏季短暂而炎热、冬季寒冷而漫长、春季风大少雨、秋季气温剧降,昼夜温差大,日照时间充足等特点。降水量少且不均匀,全区降水量平均为375mm,由东北向西南递减。



Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源与处理

1.2.1 NDVI 数据

本研究使用的 NDVI 数据来源于国家地球系统科学数据中心提供的 NOAA CDR NDVI 数据集(http://www.geodata.cn)。选取的数据集时间跨度为 1982—2020 年,空间分辨率为 5km,时间分辨率为 1d。最大值合成法(MVC)可以从多时间数据中选择最高 NDVI 值来代表某像元值,并具有消除云、大气与太阳高度角等干扰的优点^[20]。因此,本研究利用 MVC 对 NDVI 数据集进行合成处理,构建了 1982—2020 年内蒙古地区的 NDVI 年最大值来监测该区植被动态及其对极端气候的响应。

1.2.2 气象数据

气象数据来源于内蒙古气象局 115 个站点的逐日最高气温、日最低气温和日降水量数据,若有缺失的站 点数据,利用历史同时期多年平均值进行了插补处理。使用 Rclimdex1.0 对原始数据进行质量分析后计算了 1982—2020年18个极端气候指数(包括10个极端气温指数和8个极端降水指数),再用反距离权重法进行 了空间插值,并将选取的极端气候指数从强度、持续时间和频率3个维度进行了归类^[21](表1)。

1.3 研究方法

1.3.1 森氏斜率(Theil-Sen)和曼-肯德尔(Mann-Kendall)显著性检验

Theil-Sen 斜率是一种非参数估计方法,常用于分析某一要素在长时间序列中的变化趋势^[22]。相对于简单的线性回归分析,该方法可以减少异常值的影响^[23]。因此,本文用此方法计算了极端气候指数与 NDVI 的 空间变化趋势。计算公式如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i}\right), 1982 \le i < j \le 2020$$
(1)

式中, median 表示中位数函数, β 表示某极端气候指数或 NDVI 的变化趋势, x_i 和 x_j 表示不同年份的序列数据, t_i 和 t_j 为时间序列。当 β >0时, 表示某极端气候指数或 NDVI 呈上升趋势; β <0时, 则表示存在下降趋势。

| Table 1 Definitions of extreme climate indices | | | | |
|--|---------|----------|---|--------------|
| 类别 Category | 代码 ID | 名称 Name | 定义 Definition | 单位 Unit |
| 极端气温强度指数 | TNn | 日最低气温极小值 | 每月内日最低气温的最小值 | °C |
| Extreme temperature intensity | TXn | 日最高气温极小值 | 每月内日最高气温的最小值 | $^{\circ}$ C |
| indices | TNx | 日最低气温极大值 | 每月内日最低气温的最大值 | °C |
| | TXx | 日最高气温极大值 | 每月内日最高气温的最大值 | $^{\circ}$ C |
| | DTR | 气温日较差 | 年内日最高气温与最低气温的差值 | $^{\circ}$ C |
| 极端气温持续时间指数 Extreme temperature duration index | GSL | 生长季长度 | 日平均气温第一次连续6天以上大于5℃至日平 均气温第一次(6月1日后)连续6天小于5℃的 日数 | d |
| 极端气温频率指数 | Tx90p | 暖昼日数 | 日最高气温>90%分位值的日数 | d |
| Extreme temperature frequency | Tn90p | 暖夜日数 | 日最低气温>90%分位值的日数 | d |
| indices | Tx10p | 冷昼日数 | 日最高气温<10%分位值的日数 | d |
| | Tn10p | 冷夜日数 | 日最低气温<10%分位值的日数 | d |
| 极端降水强度指数 | Rx1day | 1日最大降水量 | 每月最大1日降水量 | mm |
| Extreme precipitation intensity | Rx5day | 5日最大降水量 | 每月连续5日最大降水量 | mm |
| indices | PRCPTOT | 雨日降水总量 | 雨日(日降水量≥1mm)降水总量 | mm |
| 极端降水持续时间指数 | CDD | 持续干燥日数 | 日降水量<1mm的最长连续日数 | d |
| Extreme precipitation durationindices | CWD | 持续湿润日数 | 日降水量≥1mm 的最长连续日数 | d |
| 极端降水频率指数 | R10 | 中雨日数 | 每年日降水量≥10mm的总日数 | d |
| Extreme precipitation | R20 | 大雨日数 | 每年日降水量≥20mm的总日数 | d |
| frequency indices | R25 | 暴雨日数 | 每年日降水量≥25mm的总日数 | d |

表1 极端气候指数及定义

Mann-Kendall 检验(简称 MK 检验)是一种非参数统计检验方法,由于其不需要样本遵循一定的分布,也不受少数异常值的干扰,在水文、气象等要素时间序列趋势变化中广泛应用^[16]。计算公式如下:

假设时间序列 X_1, X_2, \dots, X_n 。定义检验统计量S:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{Sgn}(x_j - x_i)$$
(2)

$$\operatorname{Sgn}(x_{j} - x_{i}) = \begin{cases} 1 & (x_{j} - x_{i} > 0) \\ 0 & (x_{j} - x_{i} = 0) \\ -1 & (x_{i} - x_{i} < 0) \end{cases}$$
(3)

式中,x_i和x_i为时间序列数据,n为数据个数。当n>10时,统计量S为正态分布,标准化检验统计量Z通过下

http://www.ecologica.cn

式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases}$$

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$
(5)

式中,当IZI>1.65、1.96和2.58时,表示变化趋势分别通过了置信度90%、95%和99%的显著性检验,说明存在显著变化趋势。

1.3.2 相关分析

本文采用 Pearson 相关分析方法分析了极端气候指数与 NDVI 之间的相关关系。计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{X}) (y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{Y})^2}}$$
(6)

式中, R_{xy} 为变量x,y的相关系数, x_i 为第i年的 NDVI 值, \bar{X} 为 NDVI 多年平均值, y_i 为第i年极端气候指数值, \bar{Y} 为极端气候指数多年平均值。相关系数 R_{xy} 的取值范围为[-1,1],|R|越大则表示变量之间的相关性越强。 1.3.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[24],包括因子探测器、交互探测器、风险探测器和生态探测器。本文采用因子探测器测度内蒙古地区 18 个极端气候指数对植被 NDVI 变化的解释力。计算公式如下:

$$Q = 1 - \sum_{h=1}^{L} \frac{N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$
(7)

式中,Q为极端气候指数对 NDVI 变化趋势的解释力, $Q \subset [0,1]$,q 值越大表示解释力越强; $h(1,2,\dots,L)$ 为变量分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和区域单元数; σh^2 和 σ^2 分别是 h 层和区域内 Y 值的方差。

2 结果与分析

2.1 内蒙古地区极端气候指数变化特征

2.1.1 极端气候指数时间变化

从极端气温指数的年际变化(图2)发现,极端气温强度指数日最低气温极小值(TNn)、日最高气温极小 值(TXn)分别以0.192℃/10a、0.074℃/10a的速率减小,而日最低气温极大值(TNx)和日最高气温极大值 (TXx)分别以0.521℃/10a、0.561℃/10a的速率增加。但是日气温极大值的增加速率明显大于日气温极小值 的减小速率,可能这种不对称的变化是导致气温日较差(DTR)缓慢减小(0.018℃/10a)的原因。生长季长度 (GSL)以3.559d/10a的速率增加,说明近39年内蒙古地区极端气温持续时间呈增加趋势。暖昼日数 (Tx90p)和暖夜日数(Tn90p)分别以1.977d/10a、2.285d/10a的速率增加,而冷昼日数(Tx10p)、冷夜日数 (Tn10p)分别以1.095d/10a、1.512d/10a的速率减少,说明内蒙古地区出现暖昼日数和暖夜日数的频率减少。 从昼夜变化中看,内蒙古夜间变化速率比白天大,可以进一步说明, 夜间变暖可能导致了内蒙古地区气温日较差呈减少趋势。

从极端降水指数的年际变化(图 3)看出,1日最大降水量(Rx1day)以 0.238mm/10a 的速率增加,5日最 大降水量(Rx5day)以 0.663mm/10a 的速率减少,说明内蒙古地区极端降水呈单日降水强度增加,连续降水强

43 卷

度减少趋势。雨日降水总量(PRCPTOT)则以 1.317mm/10a 的速率增加。在 1982—2020 年期间持续干燥日数(CDD)以 2.229d/10a 的速率减少,并且持续湿润日数(CWD)也以 0.09d/10a 的速率减少。总的来说, 39 年来内蒙古地区连续性无降水天数和降水天数均在减少。中雨日数(R10)、大雨日数(R20)和暴雨日数(R25)呈缓慢增加趋势,增加速率分别为 0.008d/10a、0.003d/10a、0.001d/10a。由此可见, 1982—2020 年内蒙古地区极端降水的频率呈增加趋势,其中雨日数增加最明显。除此之外,发现 Rx1day、Rx5day、PRCPTOT、R10、R20 和 R25 等极端降水指数最大值都出现在 1998 年,可能与 1998 年气候异常导致的我国大部分地区暴雨偏多有关^[25-26]。



图 2 极端气温指数时间变化趋势

Fig.2 Temporal variation trend of extreme temperature indices

TNn:日最低气温极小值 Monthly minimum value of daily minimum temperature;TXn:日最高气温极小值 Monthly minimum value of daily maximum temperature;TNx:日最低气温极大值 Monthly maximum value of daily minimum temperature;TXx:日最高气温极大值 Monthly maximum value of daily minimum temperature;DTR:气温日较差 Diurnal temperature range;GSL:生长季长度 length of growing season;Tx90p:暖 昼日数 Warm days;Tn90p:暖夜日数 Warm nights;Tx10p:冷昼日数 Cold days;Tn10p:冷夜日数 Cold nights

2.1.2 极端气候指数空间变化

从极端气温指数的空间变化(图 4)发现,TNn 呈上升和下降的面积分别占总面积的 35.5%和 64.5%,其中仅 5 个和 8 个站点通过了显著性检验(P<0.05)。TXn 呈显著上升和显著下降的站点仅有 2 个。TNx 呈增加的面积占 99.5%,其中 45 个站点通过显著性检验(P<0.01)。TXx 呈增加的面积占 99.6%,31 个站点呈极显著上升趋势(P<0.01)。气温日较差(DTR)的空间变化趋势具有明显差异,呈上升和下降的面积各占 37.9%和 62.1%。其中有 22 个站点呈极显著(P<0.01)上升趋势,主要分布于赤峰市和鄂尔多斯市,有 29 个站点呈极显著的下降趋势,主要分布于阿拉善盟和巴彦淖尔市和兴安盟的部分地区。生长季长度(GSL)呈增加的面积占 97.8%,共有 22 个站点通过了显著性检验(P<0.01),零星分布于全区,说明 39 年来内蒙古地区极端气温持续时间普遍增加。Tx90p和 Tn90p在 99%地区呈增加的趋势且分别有 97 和 91 个站点通过了显著性检验(P<0.01)。相反,Tx10p和 Tn10p呈减少的面积各占 99%和 97%,且分别有 52 和 68 个站点呈极显著的减少趋势(P<0.01)。整体而言,1982—2020年期间内蒙古地区极端气温呈上升趋势。



图 3 极端降水指数时间变化趋势 Fig.3 Temporal variation trend of extreme precipitation indices

Rx1day:1 目最大降水量 Monthly maximum one-day precipitation; Rx5day:5 日最大降水量 Monthly maximum five-day precipitation; PRCPTOT: 雨日降水总量 Total amount of precipitation on rainy days; R10:中雨日数 Number of days per year with precipitation amount≥10mm; R20:大雨日数 Number of days per year with precipitation amount≥20mm; R25:暴雨日数 Number of days per year with precipitation amount≥25mm; CDD:持续 干燥日数 Consecutive dry days; CWD:持续湿润日数 Consecutive wet days

从极端降水指数的空间变化(图5)看出,Rx1day呈上升和下降的面积分别占48%和52%,Rx5day呈上升 和下降的面积分别占41.7%和58.3%,PRCPTOT呈上升和下降的面积分别占36.3%和63.7%。其中Rx1day、 Rx5day与PRCPTOT呈显著上升(P<0.05)趋势的站点分布于西部的阿拉善盟和巴彦淖尔市,而显著下降的 站点分布于东部的赤峰市和通辽市。说明39年来内蒙古西部地区的极端降水强度在增加,而中部和东部地 区的极端降水强度在减少。CDD呈减少的面积占86%,呈增加的面积占14%,但是变化并不显著。CWD呈 减少的面积占69%,主要分布于中部和东部地区,CWD呈增加的面积占31%,主要分布于西部地区。说明 39年来内蒙古西部干旱区的连续性降水天数呈增加趋势,而中部和东部地区的连续性降水天数呈减少趋势。 R10、R20、R25呈增加的面积各占61%、65%、57%,主要分布在西部地区,呈减少的面积各占39%、35%、43%, 主要分布在中部地区。综上所述,1982—2020年内蒙古西部干旱区极端降水的强度、持续湿润时间、频率均 在增加,中部典型草原区极端降水的强度、持续湿润时间、频率均在减少,表明西部干旱区的干旱程度有所 减轻。

2.2 内蒙古地区 NDVI 变化特征

空间分布上,39年来内蒙古地区 NDVI 呈自东北向西南逐渐降低的空间格局(图6)。NDVI 高值主要分 布于东部地区,低值主要分布于西部地区。主要是因为干湿度地带性引起了内蒙古植被类型从东到西依次为 森林、草甸草原、典型草原、荒漠草原、戈壁荒漠植被类型分布导致的空间差异。

在空间变化趋势上(图 6),根据 Sen 斜率和 MK 显著性检验结果划分出了六个等级:极显著减少(P< 0.01)、显著减少(P<0.05)、不显著减少、不显著增加、显著增加(P<0.05)和极显著增加(P<0.01)。结果显示



图 4 极端气温指数空间变化趋势 Fig.4 Spatial variation trend of extreme temperature indices

内蒙古地区 NDVI 呈增加的面积占总面积的 76%,其中呈极显著增加趋势的占 64%,主要分布于内蒙古东部 的呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市和西南部乌兰察布市、呼和浩特市、鄂尔多斯市。NDVI 呈减少的面积占总面 积的 24%,其中 0.04%的地区通过了显著性检验,减少趋势并不明显。NDVI 的变化趋势具有明显空间差异, 一方面是由于不同地区水热条件和植被类型不同,从而导致气候变化对植被 NDVI 产生不同的影响,引起植 被变化的空间差异。另一方面也说明"三北防护林"等生态建设工程取得了显著成效^[27]。

2.3 极端气候指数对 NDVI 变化的影响力

从因子探测器结果发现(图7),内蒙古地区不同极端气候指数对植被NDVI变化趋势的因子解释力(Q值)排序为:R25>Rx1day>R20>R10>Rx5day>PRCPTOT>GSL>TXn>TNx>CWD>CDD>TXx>DTR>Tx90p>TNn>Tn10p>Tn90p>Tx10p,且均通过了显著性检验。其中,R25、Rx1day、R20、R10、Rx5day、PRCPTOT等极端降水指数的因子解释力均在 0.3 以上,说明内蒙古地区植被变化对极端降水的强度和频率最为敏感。Tx90p、Tn90p、Tx10p、Tn10p、TNn等极端气温指数的因子解释力较小,均在 0.1 以下,说明内蒙古地区植被变化对极



图 5 极端降水指数空间变化趋势

Fig.5 Spatial variation trend of extreme precipitation indices





端气温的敏感性不强。

2.4 内蒙古地区极端气候与 NDVI 的相关性

2.4.1 极端气温与 NDVI 的相关性

图 8 表示内蒙古地区年 NDVI 对各极端气候指数的响应程度,通过的显著性检验均在α=0.05 水平。结果显示,NDVI 与 TNn、TXn 的相关性普遍不高,全区 98%的地区相关系数在-0.4-0.4 之间。TNx、TXx 在内蒙

古中部和西部地区与 NDVI 呈显著负相关,可能是由于 该地区下垫面为典型草原和荒漠草原区,加之气候干旱 且水分条件较差,因此日气温的升高一定程度上加快了 植被的蒸腾和土壤水分蒸发,从而对植被的生长产生负 面影响^[28];在内蒙古东部地区与 NDVI 呈显著正相关, 有研究指出大兴安岭北部森林区植被气候生产潜力与 气温呈正相关目气温是影响该区植被气候生产潜力的 主导因子^[29],由此可以确定,日气温的升高促进了该区 植被生长。NDVI 与 Tx90p、Tn90p 呈显著正相关的地 区主要东部地区,呈负相关的地区主要分布于中西部地 区,但是相关性并不显著。与之相反,Tx10p、Tn10p与 NDVI 在东部地区呈显著负相关,在中西部地区呈显著 正相关。可能是对于东部地区森林和草甸草原区来说, 暖昼日数和暖夜日数的增加会使土壤温度增加且保持 平衡,从而减轻低温带来的伤害,增强了植被的碳固定 能力、初级生产力及呼吸作用,为植被创造了良好的生

长条件^[30];而对于中部典型草原和荒漠草原地区来说



图 7 内蒙古地区不同极端气候指数对植被 NDVI 变化的 Q 值 Fig.7 Q valve of extreme climate indices to NDVI changes in Inner Mongolia

Q Valve:因子解释力 The contribution rate of extreme climate indices to NDVI

冷昼日数和冷夜日数的增加利于土壤保持水分、减少蒸散量,从而利于该区植被的生长。DTR 与 NDVI 呈显 著负相关的地区主要分布于中部地区,与 NDVI 呈显著正相关的地区主要分布于东部地区。GSL 与 NDVI 呈 显著正相关的地区主要分布于中部和东部地区,呈负相关的地区未通过显著性检验。

2.4.2 极端降水与 NDVI 的相关性

从图 9 可以看出,NDVI 与 Rx1day、Rx5day、PRCPTOT、R10、R20、R25 在内蒙古中部和西部地区均呈显著 正相关(P<0.05),可能是由于该地区水资源相对匮乏,极端降水的增加在一定程度上减缓了旱情,从而促进 了植被生长。该结果与上文中计算的因子探测器的结果较为一致。NDVI 与 Rx1day、Rx5day、PRCPTOT、 R10、R20、R25 呈负相关的地区主要分布于东部地区,但未通过显著性检验,相关性总体较弱。NDVI 对极端 降水强度和频率的响应具有空间规律性,具体表现为:NDVI 与 Rx1day、Rx5day、PRCPTOT、R10、R20、R25 在 内蒙古中部典型草原区均呈正相关。NDVI 与 CWD 呈显著正相关的地区主要分布于中部地区,呈负相关的 地区主要分布于东部森林区。森林区土壤水分较充足,因此极端降水持续时间过长可能会导致森林植被根系 因水淹而出现无氧呼吸,影响植被的养分吸收效率,进而影响植被的正常发育^[18]。因此,CWD 与 NDVI 在东 部森林区呈显著负相关。此外,图中显示 NDVI 与 CDD 相关性不高。

3 讨论

全球正经历以气候变暖为主要特征的变化。本文对内蒙古地区 1982—2020 年极端气候变化进行研究发现,内蒙古地区正经历极端偏暖现象,这与李春兰、雅茹等的研究结果也是一致的^[31-32]。Alexander 等在全球极端气候变化研究中指出,全球 70%的陆地呈现出冷夜日数持续减少而暖夜日数持续增加趋势越发显著^[33]。因此,内蒙古地区符合全球气候变化趋势。在昼夜变化中发现,内蒙古夜间变化速率比白天大,故夜间温度的升高可能进一步加速了气候变暖。在极端降水变化中发现,西部地区极端降水的强度、持续湿润时间、频率均在增加,说明内蒙古西部干旱区的干旱程度有所减轻,与前人的研究结果较为一致^[34]。

对比极端气温和极端降水对 NDVI 的影响发现,影响内蒙古地区植被的主要生长因素是降水,且对极端 降水的强度和频率的响应最为敏感,并呈现出明显的空间特征,具体表现为:NDVI 与极端降水在内蒙古中部 典型草原区呈正相关。罗琳玲在内蒙古植被长势与气候驱动分区研究中的发现在森林生态区、草原生态区和



图 8 极端气温指数与年 NDVI 的相关性 Fig.8 Correlation between extreme temperature indices and annual NDVI

荒漠草原生态区3个分区中,内蒙古草原生态区受降水的驱动力为最强,这与本研究结果一致[35]。

本文也存在一些不足之处,影响内蒙古植被变化的因素不仅限于气候,人为因素同样起着重要作用。内蒙古东部地区极端降水在减少,NDVI却呈现显著增加趋势,这离不开内蒙古东部地区"三北防护林"、"退耕还林(草)"等生态工程的实施^[36-37]。因此,在今后研究中持续强化极端气候与人为因素对植被的影响机制研究。由于研究区东西跨度大,水热条件和下垫面因子也存在较大差异,尤其是植被类型多样且遵循有显著的空间分布规律,因此,极端气候变化对内蒙古不同植被类型区 NDVI 的影响也是在以后研究的重点。

4 结论

本文利用 NDVI 数据,以及内蒙古 115 个气象站点的逐日最高气温、日最低气温和日降水量数据,计算出 18 个极端气候指数,并采用趋势分析、MK 检验、相关性分析、地理探测器等方法,探究内蒙古地区 1982—2020 年极端气候的强度、持续时间、频率时空变化特征及其对植被的影响,得到以下主要结论:



图 9 极端降水指数与年 NDVI 的相关性 Fig.9 Correlation between extreme precipitation indices and annual NDVI

(1)在时间变化趋势上,TNx、TXx、Tx90p、Tn90p和 GSL等极端气温指数均呈增加趋势,说明近 39年内蒙 古地区极端高温的强度、持续时间和频率均在增加。极端降水持续时间指数 CDD、CWD 呈减少趋势,说明内 蒙古地区连续性无降水天数和降水天数均减少。

(2)在空间变化趋势上,发现,GSL呈增加的面积占总面积的97.8%,说明,内蒙古地区极端气温持续时间普遍增加。从极端降水指数的空间变化发现,39年来内蒙古西部地区的极端降水强度和频率在增加,而中部和东部地区的极端降水强度和频率在减少。

(3)极端气候指数与NDVI的相关性具有明显的空间差异。具体表现为:NDVI与TNx、TXx、Tx90p、Tn90p等极端暖指数在东部多呈正相关,而在中部地区多呈负相关;NDVI与Rx1day、Rx5day、PRCPTOT、R10、R20、R25等极端降水指数在内蒙古中部地区均呈显著(P<0.05)正相关。

(4) R25、Rx1day、R20、R10、Rx5day、PRCPTOT等极端降水指数的因子解释力均在 0.3 以上,说明极端降水的强度和频率对内蒙古地区植被变化有较大影响。

参考文献(References):

- [1] 韩丹丹,穆兴民,高鹏,赵广举,孙文义,田鹏.黄土高原地区植被变化及其对极端气候的响应.水土保持通报,2020,40(2):247-254.
- [2] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读:极端天气气候事件变化. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
- [3] Gruza G, Rankova E, Razuvaev V, Bulygina O. Indicators of climate change for the Russian federation. Weather and Climate Extremes. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999,42(1): 219-242.
- [4] Choi G, Collins D, Ren G Y, Trewin B, Baldi M, Fukuda Y, Afzaal M, Pianmana T, Gomboluudev P, Huong P T T, Lias N, Kwon W T, Boo K O, Cha Y M, Zhou Y Q. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955-2007.

International Journal of Climatology, 2009, 29(13): 1906-1925.

- [5] Fathian F, Ghadami M, Haghighi P, Amini M, Naderi S, Ghaedi Z. Assessment of changes in climate extremes of temperature and precipitation over Iran. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 141(3-4): 1119-1133.
- [6] Klein Tank A M G, Konnen G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. Journal of Climate, 2003, 16(22): 3665-3680.
- [7] Wang L, Yao Z J, Jiang L G, Wang R, Wu S S, Liu Z F. Changes in climate extremes and catastrophic events in the Mongolian plateau from 1951 to 2012. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2016, 55(5): 1169-1182.
- [8] Aguilar E, Peterson T C, Obando P R, Frutos R, Retana J A, Solera M, Soley J, García I G, Araujo R M, Santos A R, Valle V E, Brunet M, Aguilar L, Álvarez L, Bautista M, Castañón C, Herrera L, Ruano E, Sinay J J, Súnchez E, Oviedo G I H, Obed F, Salgado J E, Vúzquez J L, Baca M, Gutiérrez M, Centella C, Espinosa J, Martínez D, Olmedo B, Espinoza C E O, Núñez R, Haylock M, Benavides H, Mayorga R. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(D23): D23107.
- [9] 封国林, 龚志强, 支蓉. 气候变化检测与诊断技术的若干新进展. 气象学报, 2008, 66(6): 892-905.
- [10] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1066-1075.
- [11] 王晓利, 侯西勇. 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, 2019, 38(4): 807-821.
- [12] 杜佳梦,包刚,佟斯琴,黄晓君,温都日娜,美丽,包玉海. 1982—2015 年蒙古国植被覆盖变化及其与气候变化和人类活动的关系.草业 学报,2021,30(2):1-13.
- [13] 罗琳玲,易桂花,张廷斌,李景吉,王海军,别小娟,王娜,杜清江.内蒙古植被长势变化及其对气候变化的响应.测绘科学,2021,46 (5):126-134.
- [14] 吴霞, 张永宏, 王长军, 樊丽琴, 李磊. 基于 MODIS 的宁夏植被覆盖时空变化特征分析. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 204-208.
- [15] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型 NDVI 对气候变化和人类活动的响应. 生态学报, 2022, 49(09):1-12.
- [16] 高滢, 孙虎, 徐崟尧, 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(03):1-12.
- [17] 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. 水土保持通报, 2020, 40(5): 250-256, 275, 341.
- [18] 张彬,朱建军,刘华民,潘庆民.极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响.植物生态学报,2014,38(9):1008-1018.
- [19] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,刚成诚,周伟,居为民. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [20] 龙鑫,李静,柳钦火. 植被指数合成算法综述. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 969-977.
- [21] 李春兰.蒙古高原多时空尺度极端气候变化特征及其影响研究[D].上海:华东师范大学, 2019.
- [22] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall' s tau. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [23] 李明, 葛晨昊, 邓宇莹, 王贵文, 柴旭荣. 黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究. 地理科学, 2020, 40(12): 2105-2114.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] 孙继昌, 刘金平, 周国良. 1998 年暴雨洪水. 水文, 1998, 18(S1): 97-103.
- [26] 林婧婧, 张强. 中国气候态变化特征及其对气候变化分析的影响. 高原气象, 2015, 34(6): 1593-1600.
- [27] 陈赛赛, 孙艳玲, 杨艳丽, 王中良. 三北防护林工程区植被景观格局变化分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 85-90.
- [28] 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.
- [29] 赵慧颖,田宝星,宫丽娟,曲辉辉,季生太,李秀芬,张兴林.近 308 年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应. 生态学报, 2017, 37(6): 1900-1911.
- [30] 李峰,李琪,薛红喜,吴东丽,王云龙.温度对克氏针茅草原生态系统生长季碳通量的影响.农业环境科学学报,2012,31(7): 1453-1459.
- [31] 雅茹, 丽娜, 银山, 包玉海. 1960-2015年内蒙古极端气候事件的时空变化特征. 水土保持研究, 2020, 27(3): 106-112.
- [32] Li C L, Wang J, Hu R C, Yin S, Bao Y H, Ayal D Y. Relationship between vegetation change and extreme climate indices on the Inner Mongolia Plateau, China, from 1982 to 2013. Ecological Indicators, 2018, 89: 101-109.
- [33] 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 Atmospheres, 2006, 111(D5): D05109.
- [34] Li C L, Leal Filho W, Wang J, Fudjumdjum H, Fedoruk M, Hu R C, Yin S, Bao Y H, Yu S, Hunt J. An analysis of precipitation extremes in the Inner Mongolian plateau: spatial-temporal patterns, causes, and implications. Atmosphere, 2018, 9(8): 322.
- [35] 罗琳玲. 内蒙古不同生态区植被长势对气候变化的响应[D]. 成都:成都理工大学, 2020.
- [36] 陈赛赛, 孙艳玲, 杨艳丽, 王中良. 三北防护林工程区植被景观格局变化分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 85-90.
- [37] Li S D, Liu M C. The development process, current situation and prospects of the conversion of farmland to forests and grasses project in China. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(1): 120-128.

431