

呼伦贝尔草地植被枯黄期变化及其对极端气候的响应

甜甜, 佟斯琴, 包玉海

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年3月30日; 发布日期: 2023年4月10日

摘要

草地生态系统是自然生态系统的重要组成部分, 探讨植被物候变化与极端气候的关系, 对草地生态系统保护及极端气候灾害预防具有重要意义。本文基于呼伦贝尔地区的2001~2017年MOD13Q1数据和气象数据资料, 选取S-G滤波法对NDVI时间序列数据拟合重建, 采用动态阈值法提取草地植被枯黄期, 并利用趋势分析、相关分析等方法分析呼伦贝尔草地植被枯黄期变化及其对极端气候的响应。结果表明: 1) 枯黄期主要集中在260~290天, 但各草地类型之间的物候参数具有差异性; 年际变化趋势表现出微弱的提前趋势; 在空间上, EOS提前区域主要分布在呼伦贝尔中部和西南地区, EOS推迟区域主要分布在中部偏西和东南地区。2) 近17a来, 呼伦贝尔地区极端气温指数TX10P呈上升趋势, TX90P呈下降趋势, TNx、TXx、Tnn和TXn总体呈减少趋势; 极端降水指数CDD呈减少的趋势外, 其他降水指数均呈上升趋势, 表明该地区降水量增大。3) 不同草地植被类型枯黄期对于极端气温指数和极端降水指数的响应并不显著, 且存在差异。该研究有助于加深草地植被物候对极端气候指数响应的认识, 以为维系生态平衡提供参考。

关键词

枯黄期, 极端气温指数, 极端降水指数, 呼伦贝尔草地

Changes of Grassland Vegetation End of Growing Season and Its Response to Extreme Climate in Hulun Buir

Tian Tian, Siqin Tong, Yuhai Bao

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Feb. 21st, 2023; accepted: Mar. 30th, 2023; published: Apr. 10th, 2023

Abstract

Grassland ecosystems are an important part of natural ecosystems, it is of great significance to discuss the relationship between vegetation phenology changes and extreme climate for grassland ecosystem protection and extreme climate disaster prevention. In this paper, based on the MOD13Q1 data and daily meteorological data information in Hulun Buir area from 2001 to 2017, the S-G filter method was selected to fit and reconstruct the NDVI time series data, the dynamic threshold method was used to extract the grassland vegetation end of growing season, and the trend analysis and correlation analysis methods were used to analyze the changes of grassland vegetation end of growing season in Hulun Buir and its response to climate extremes. The results showed that: 1) The end of growing season was mainly concentrated in 260~290 days, but the phenological parameters of different grassland types were different; the interannual change trend showed a weak upward trend; spatially, the EOS advancement area was mainly distributed in the central and southwest areas of Hulun Buir, and the EOS delayed area was mainly distributed in the central west and southeast areas. 2) In the recent 17 years, the extreme temperature index TX10P in Hulun Buir area showed an upward trend, TX90P showed a downward trend, and TNx, TXx, TNn and TXn showed a downward trend in general. The extreme precipitation index CDD showed a downward trend, while other precipitation indexes showed an upward trend, which indicates that the precipitation in this area increased. 3) The responses of different grassland vegetation types to extreme temperature indices and extreme precipitation indices during end of growing season were not significant and differed. This study helps to deepen the understanding of the response of grassland vegetation phenology to extreme climate indices, with a view to providing a reference for maintaining ecological balance.

Keywords

End of Growing Season, Extreme Temperature Index, Extreme Precipitation Index, Hulun Buir Grassland

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

植被物候通常是指植被随着气候的季节性而产生的生长发育、枯萎凋零的周期性变化[1] [2]。而植被物候不仅会受到气候变化的影响,也会反过来影响气候变化[2]。因此,随着全球气候的变化,植被物候也发生了显著变化[3]。其中,草地植被作为自然生态系统的重要组成部分,研究其物候的变化也是目前研究的热点之一。在全球气候变暖的背景下,极端气候事件频繁发生,而极端气候事件的发生改变了水热条件,并对生态环境的变化产生影响[4] [5]。因此,研究植被物候和极端气候是极其重要的。目前,国内外学者对物候和极端气候做了大量研究。例如: Dashkhuu 等[6]对蒙古国极端温度的研究发现,重要的温度指数发生了显著变化。Na 等[7]针对内蒙古植被动态对极端气候事件的研究表明,内蒙古极端寒冷气温的出现呈显著下降趋势,而极端温暖气温的出现则呈上升趋势。秦格霞等[8]针对中国北方草地植被物候变化对气候变化的研究发现,植被返青期(Start of Growing Season, SOS)提前,植被枯黄期(End of

Growing Season, EOS)推迟。马晓芳等[9]的研究表明,青藏高原植被返青期和枯黄期呈提前趋势,生长季长度呈增长趋势。目前已有研究对全国、内蒙古、呼伦贝尔等整体区域进行了研究,但物候研究限于各植被类型物候的研究,缺少对单个植被类型的研究,因此本文针对草地植被进行研究。张晋霞等[10]的研究表明,NDVI在北疆中部和南疆西南部等地区与极端气温指数多呈负相关,NDVI与降水指数之间多呈正相关。韩丹丹等[11]的研究得出,年际和月际NDVI变化与极端气温指数存在相关性,而与极端降水指数均未表现出明显的相关。以往的研究主要针对极端气候对NDVI的影响,极端气候对物候的研究较少,因此本文研究物候期对极端气候的响应研究。

呼伦贝尔草地植被生态系统具有防风、固沙、调节气候、净化空气、涵养水源等生态功能,对于维系生态平衡、区域经济和人文历史都具有重要的地理价值。本文利用MODIS NDVI数据和气象数据提取呼伦贝尔草地植被EOS及极端气候指数,辅以趋势分析、相关分析等方法,分析草地植被EOS及极端气候指数的时空变化,探索不同草地植被类型EOS与极端气候指数之间的响应关系,以期降低极端气候灾害对草地植被生态系统产生的影响,为保护草地植被生态系统提供参考依据。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

呼伦贝尔位于内蒙古自治区东北部(图1),地处 $115^{\circ}13' \sim 126^{\circ}04'E$ 、 $47^{\circ}05' \sim 53^{\circ}20'N$ 之间,海拔在166~1689 m之间。呼伦贝尔草原位于呼伦贝尔市西部,是中国最大的草原。呼伦贝尔地处温带北部,大陆性气候显著。研究区草地植被类型有低地盐化草甸类、改良草地、沼泽类、温性山地草甸类、温性草原化荒漠类、温性草原类、温性草甸草原类及热性灌草丛类等7类。本研究在呼伦贝尔地区共选取了16个气象站点。

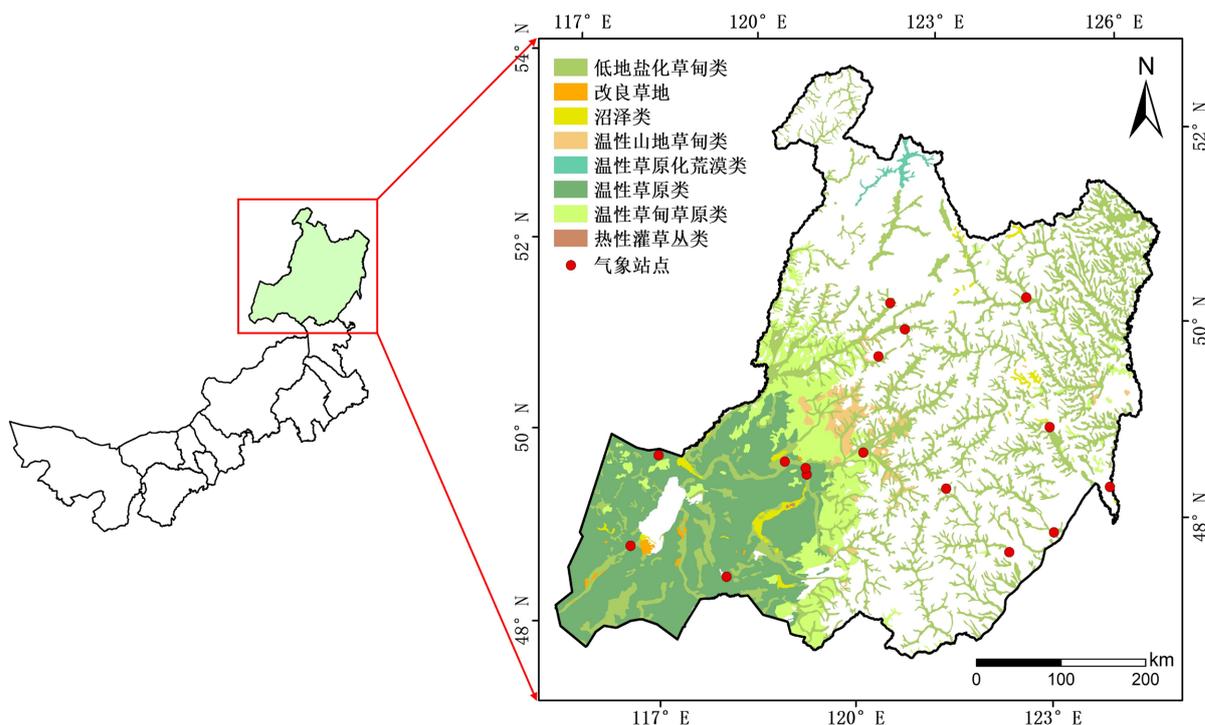


Figure 1. Geographical location and grassland type distribution map of Hulun Buir

图 1. 呼伦贝尔地理位置及草地类型分布图

2.2. 数据来源与处理

研究采用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)提取植被物候期。NDVI 数据来源于 NASA 提供的 MOD13Q1 数据集, 空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 16 d, 时间跨度为 2001~2017 年(<https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/>), 研究将 $NDVI \leq 0.05$ 作为排除非植被区的阈值[3]。

气象数据来自中国气象局国家气象信息中心。下载数据包括 2001~2017 年共 16 个台站的气象数据, 下载的数据利用 Rclimdex 软件对各站点进行极端气候指数计算(表 1)。利用样条函数对计算结果进行插值, 插值为与 MOD13Q1 数据空间分辨率一致的栅格数据集。

其他辅助数据包括全国草地类型图、行政边界图等。

Table 1. Names and definitions of extreme climate indices [12] [13]

表 1. 极端气候指数名称及其定义[12] [13]

极端气候指数	名称	定义	单位
CDD	持续干燥指数	日降水量 < 1 mm 的最长连续日数	d
CWD	持续湿润指数	日降水量 ≥ 1 mm 的最长连续日数	d
RX1day	1 日最大降水量	每月内一日的最大降水量	mm
RX5day	5 日最大降水量	每月内连续五日的最大降水量	mm
TNn	日最低气温的极低值	每月日最低气温的最小值	°C
TNx	日最低气温的极高值	每月日最高气温的最大值	°C
TX10P	冷昼日数	日最高气温 < 10%分位值的日数	d
TX90P	暖昼日数	日最高气温 > 90%分位值的日数	d
TXn	日最高气温的极低值	每月日最高气温的最小值	°C
TXx	日最高气温的极高值	每月日最高气温的最大值	°C

3. 研究方法

3.1. 时间序列数据拟合重建与植被物候参数提取

NDVI 数据由于受到云、大气及太阳高度角等因素的干扰, 使得 NDVI 时间序列曲线呈现出不规则的波动。NDVI 数据即使经过预处理, 也会影响后续的分析, 因此在提取物候期之前, 需要对时间序列数据进行拟合重建, 得到更为平滑的拟合曲线[14]。研究采用 Savitzky-Golay 滤波(S-G)对 NDVI 时间序列数据拟合重建。S-G 滤波是一种基于平滑时间序列数据和最小二乘原理的卷积算法, 它是一种移动窗口的加权平均算法, 其加权系数不是简单的常数窗口, 而是通过在滑动窗口内对给定高阶多项式的最小二乘拟合得出[15]。相比于其他时间序列植被指数拟合重建方法, S-G 滤波可以更好的保留 NDVI 数据的细节信息[16]。其表达式为:

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+i}}{N} \quad (1)$$

式中, Y_j^* 为拟合值, Y_{j+i} 为 NDVI 原始值, C_i 为第 i 个值滤波时的系数, m 为平滑窗口的宽度, N 为滤波器长度, 等于滑动数组的宽度 $2m + 1$ 。

本文利用动态阈值法提取呼伦贝尔物候期。阈值法定义为 EOS 出现在年际 NDVI 拟合曲线的基准面和峰值之间, 当拟合曲线的右侧部分达到预设的 NDVI 振幅所对应的天数被认为是 EOS [16]。本文对各阈值进行试验, 最终将枯黄期阈值设定在 NDVI 振幅右侧的 50%, S-G 窗口大小设定为 5。

3.2. 趋势分析

本文运用以最小二乘法为基础的一元线性回归趋势模型分析时间序列数据变化趋势, 以年份为自变量, 极端气候指数为因变量, 在年份和极端气候指数之间建立一元线性回归方程并进行线性回归, 用最小二乘法得到变化率 $slope$, 即极端气候指数变化趋势。公式如下:

$$y = ax + b \quad (2)$$

式中, a 代表斜率, b 代表截距。其变化斜率采用最小二乘法计算, 公式为:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times y) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式中, $slope$ 为趋势线的斜率, 即极端气候指数年际间的变化趋势, y 为第 i 年的变量, i 为时间变量。当 $slope < 0$ 时, 极端温度和极端降水指数呈下降趋势; $slope > 0$ 时, 极端温度和极端降水指数呈上升趋势。

运用 Sen's 斜率估计法分析植被物候的时间序列数据变化趋势, 计算公式如下:

$$\beta = median \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall_j > i \quad (4)$$

式中, $median$ 为中值函数; β 为植被物候的变化趋势; 当 $\beta > 0$ 时, 物候呈推迟趋势; $\beta < 0$ 时, 物候呈提前趋势。

采用 Mann-Kendall 趋势检验法进行极端气候指数时间序列和 EOS 变化趋势的显著性判断。Mann-Kendall 检验是一种非参数的时间序列趋势性检验方法, 利用统计检验量 Z 值进行显著性检验, 适用于长时间序列数据的趋势显著检验。

3.3. 相关分析法

利用 Pearson 相关系数分析极端气候指数与植被物候期之间的关系, 相关系数可以用来表示两个变量之间的密切程度, 一般用 r 表示, 其公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中, x 表示极端气候指数, y 表示植被物候值, n 为研究时段年数。 r_{xy} 为两个变量之间的相关系数, 其取值范围在 $-1 \sim 1$ 之间。当 $r > 0$ 时, 表示极端气候指数和物候期之间呈正相关, 当 $r < 0$ 时, 表示极端气候指数和物候期呈负相关, 而当 $r = 0$ 时, 表示极端气候指数和物候期不存在线性相关性。

4. 结果与分析

4.1. 草地植被枯黄期时空变化特征分析

呼伦贝尔草地植被枯黄期主要集中在 260~290 天，即 9 月中旬到 10 中旬，占总面积的 91.27% (图 2)。各草地类型之间的物候参数具有差异性，低地盐化草甸类 EOS 多年均值在第 272.4 d，改良草地 EOS 多年均值在第 286.49 d，热性灌草丛类 EOS 多年均值在第 279.84 d，温性草甸草原类 EOS 多年均值在第 273.59 d，温性草原荒漠类 EOS 多年均值在第 273.47 d，温性草原类 EOS 多年均值在第 282.75 d，温性山地草甸类 EOS 多年均值在第 267.81 d (图 3)。总的来说，温性山地草甸类的枯黄期最早，改良草地的枯黄期最晚。

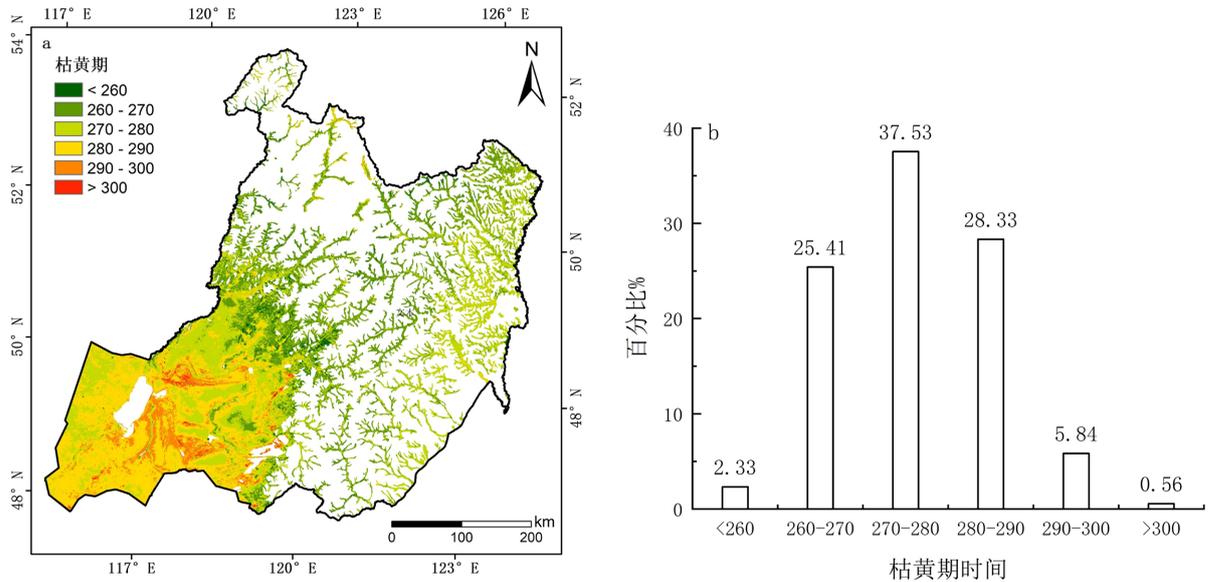


Figure 2. Multi-year mean values (a) and percentage of occurrence time (b) for the Hulun Buir grassland end of growing season
图 2. 呼伦贝尔草地植被枯黄期多年均值(a)及发生时间所占百分比(b)

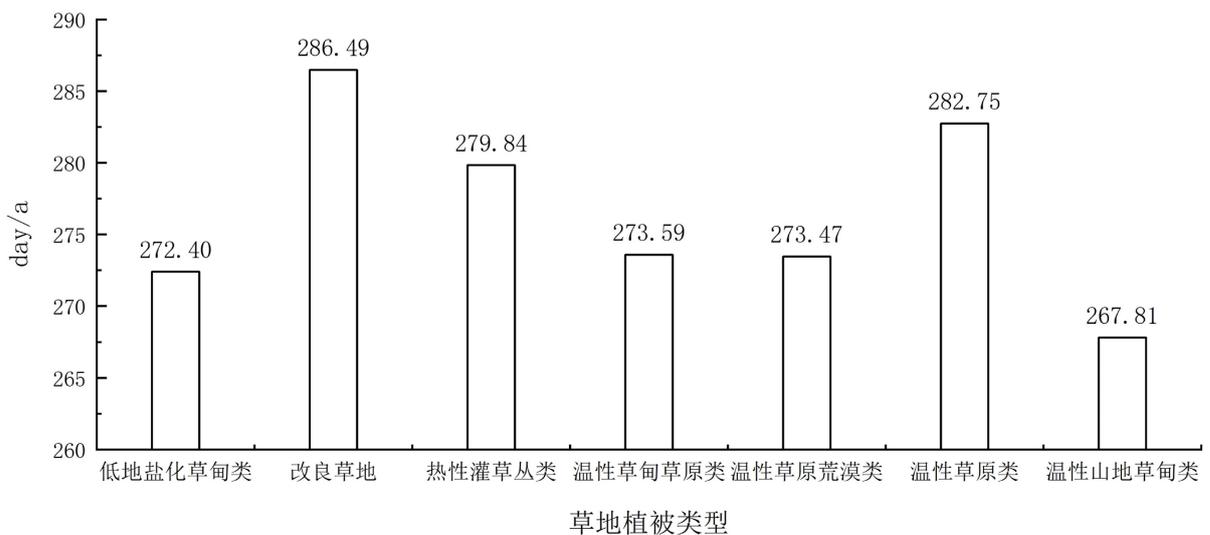


Figure 3. Multi-year mean values of different grassland vegetation types in Hulun Buir during the end of growing season
图 3. 呼伦贝尔不同草地植被类型枯黄期多年均值

从 2001~2017 年的年际变化趋势来看, 呼伦贝尔草地植被枯黄期随时间呈波动变化, 整体上呈微弱的提前趋势, 提前幅度为 0.07 d/a。最早的 EOS 发生在 266 d, 最晚的 EOS 发生在 285 d (图 4)。根据 Sen's 斜率估计法分析得出, 枯黄期变化天数在 ± 1.5 d 之内。研究区呈微弱的提前趋势, 由东向西逐渐提前, 提前的像元约占总面积的 54.39% (图 5)。EOS 提前区域主要分布在呼伦贝尔中部和西南地区, EOS 推迟区域主要分布在中部偏西和东南地区。呼伦贝尔草地植被枯黄期只有在 3.66% 的地区通过显著性检验, 1.7% 的地区呈显著提前, 1.96% 的地区呈显著推迟, 其余地区不显著 (图 6)。

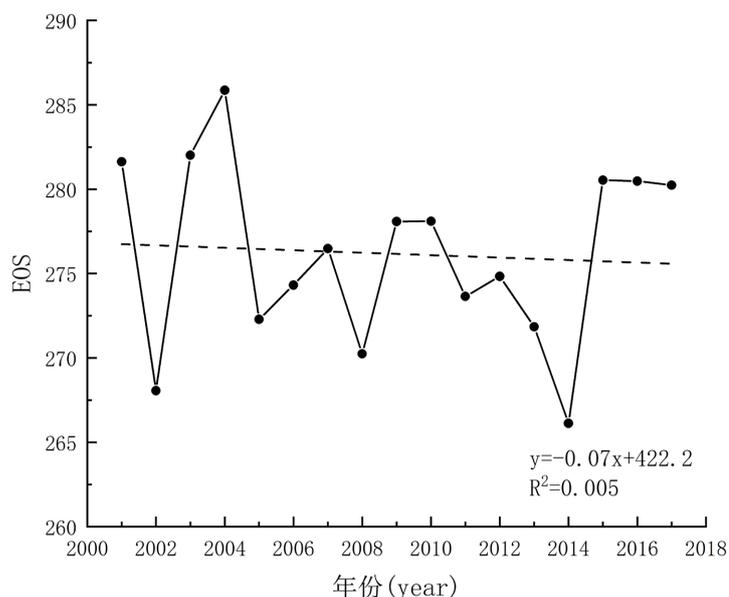


Figure 4. Inter-annual variation chart of Hulun Buir grassland vegetation at the end of growing season

图 4. 呼伦贝尔草地植被枯黄期年际变化图

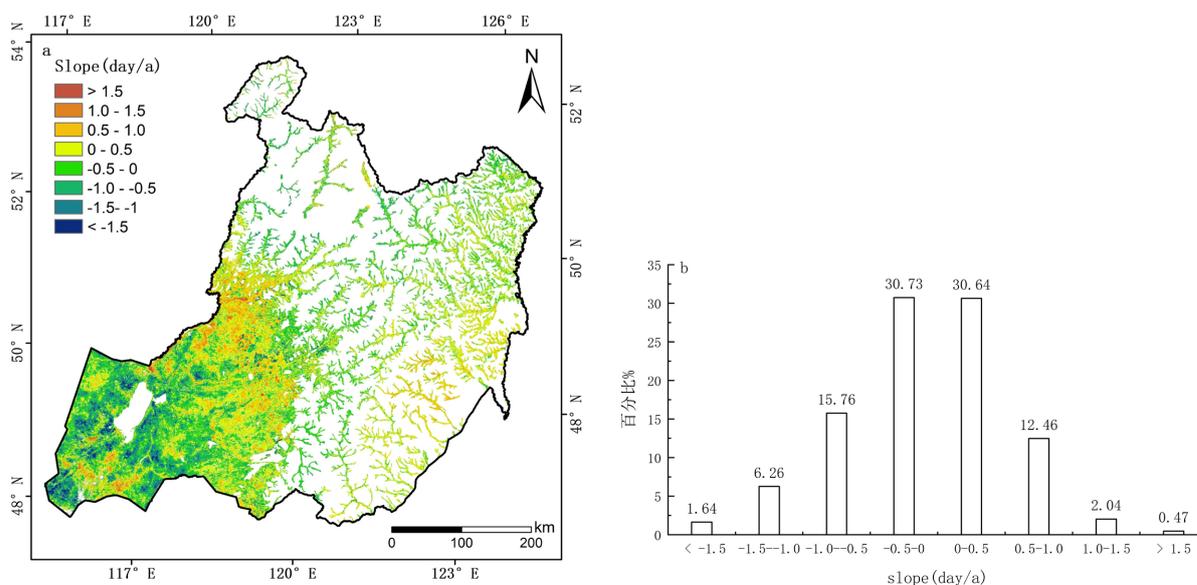


Figure 5. Variation trends (a) and percentages (b) of grassland vegetation end of growing season in Hulun Buir

图 5. 呼伦贝尔草地植被枯黄期变化趋势(a)及所占百分比(b)

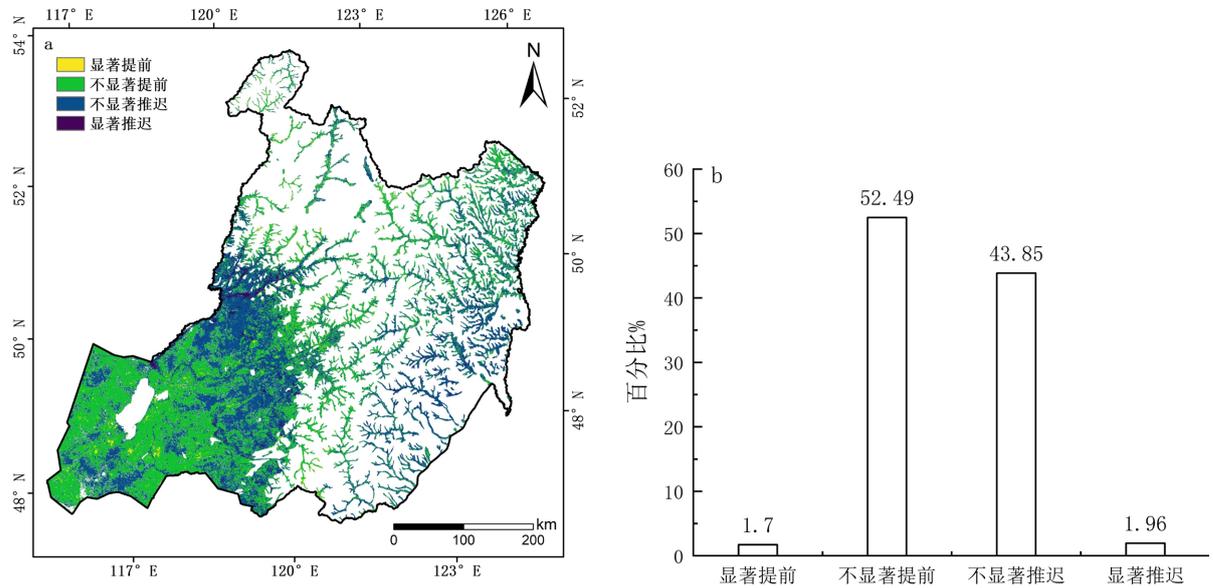


Figure 6. Significance test (a) and percentage (b) of the change trend of grassland vegetation in Hulun Buir during the end of growing season

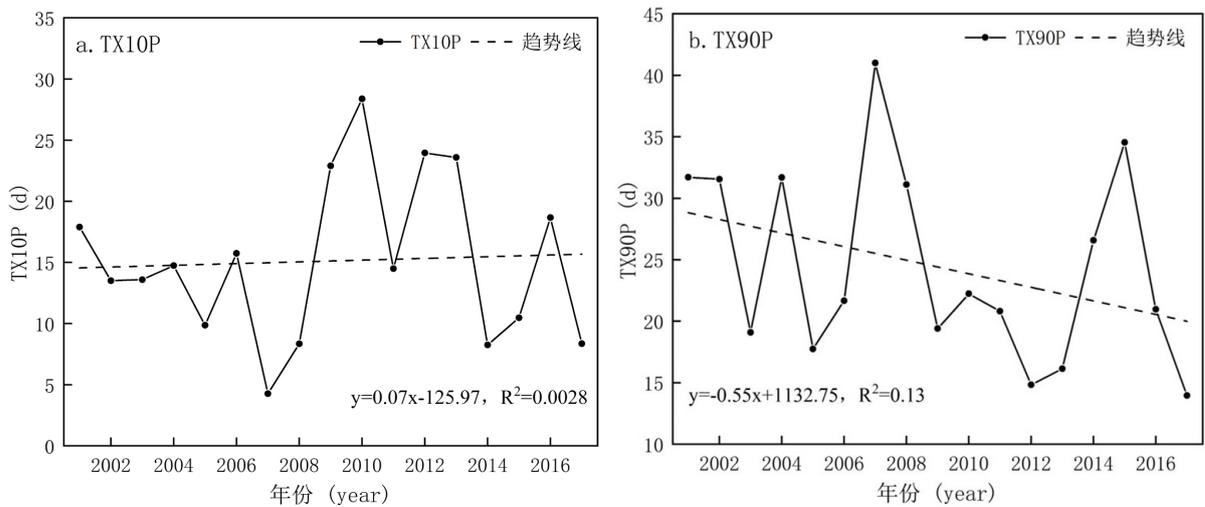
图 6. 呼伦贝尔草地植被枯黄期变化趋势显著性检验(a)及所占百分比(b)

4.2. 极端气候指数时空变化特征

4.2.1. 极端气温指数时空变化特征

从 2001~2017 年的极端气温指数的年际变化可以发现，冷昼日数 TX10P 呈上升趋势，TX10P 以 0.07 d/a 的趋势上升(图 7)。暖昼日数 TX90P 呈下降趋势，TX90P 以 0.55 d/a 的趋势下降。TX10P 的最大值出现在 2010 年，最小值出现在 2007 年。TX90P 的最大值出现在 2007 年，最小值出现在 2017 年。

在 2001~2017 年间，两个极高值 TNx、TXx 和两个极低值 TNn、TXn 总体呈减少趋势。TNx、TXx、TNn 和 TXn 分别以 0.04℃、0.01℃、0.003℃和 0.006℃的趋势减少，总的来说，四个值的减少趋势都较小。极端气温指数随时间呈波动变化，TNn 和 TXn 在 2001 年出现最低温度-41.85℃和-31.5℃，TNx 和 TXx 分别在 2016 年和 2010 年出现最高温度 22.46℃和 38.76℃。



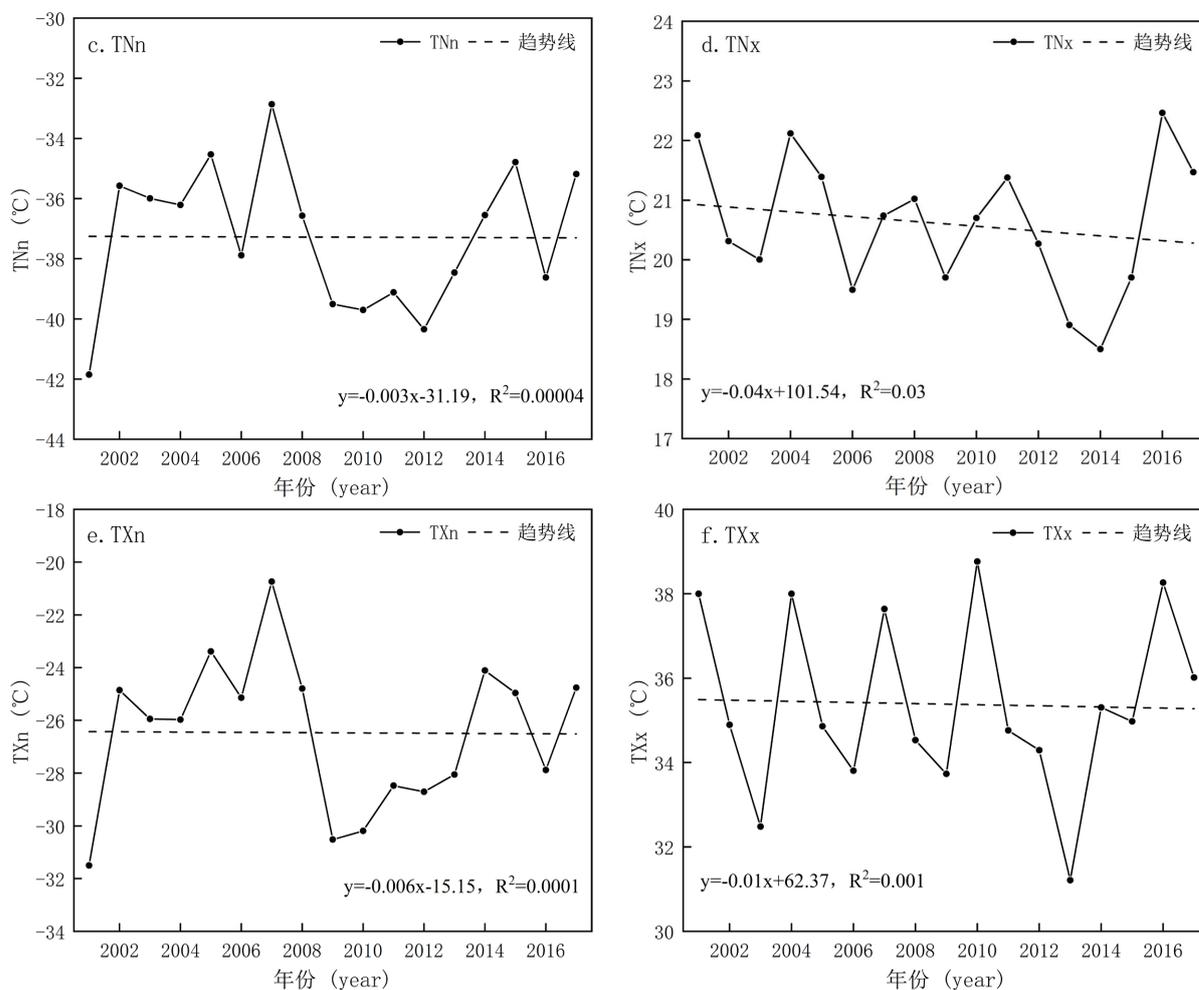


Figure 7. Temporal variation trend of extreme temperature index in Hulun Buir from 2001 to 2017

图 7. 2001~2017 年呼伦贝尔极端气温指数时间变化趋势

根据极端气温指数的空间变化趋势可以得出, TX_{10P} 和 TX_x 在大部分地区呈现出增加的趋势(图 8)。 TX_{10P} 呈现出增加趋势的地区主要分布在呼伦贝尔西北部, 中部偏西地区和东部的一小部分地区。 TX_x 呈现出增加趋势的地区主要分布在西南部和中部偏西地区。 TN_n 、 TN_x 、 TX_n 在大部分地区呈现出下降的趋势, TX_{90P} 在整个地区都表现出下降趋势。 TN_n 呈现出下降趋势的地区主要分布在呼伦贝尔东北部、中部偏西和西北部地区。 TN_x 呈现出增加趋势的地区分布在中部中间位置, 其余地区均呈现出下降趋势。 TX_n 呈现出下降趋势的地区主要分布在中部以西地区。

4.2.2. 极端降水指数时空变化特征

从 2001~2017 年的极端降水指数的年际变化可以发现, 持续干燥指数 CDD 以 0.004 d/a 的速率呈减少的趋势, 持续湿润指数 CWD 以 0.03 d/a 的速率呈增加的趋势(图 9)。在 17 年间, CDD 最高值和最低值分别出现在 2012 年和 2013 年, 最高值为 99 d, 最低值为 35 d。CWD 最高值和最低值分别出现在 2009 年和 2007 年, 分别为 5.6 d 和 3.3 d。

在 17 年间, 最大降水量 RX_{1day} 、 RX_{5day} 均呈上升趋势, 分别以 0.47 mm 和 0.98 mm 的趋势上升。 RX_{1day} 最高值出现在 2013 年, 最高值为 68.24 mm, 最低值出现在 2017 年, 为 31.86 mm。 RX_{5day} 最高值出现在 2013 年, 为 96.59 mm, 最低值出现在 2004 年, 最低值为 54.25 mm。总的来说, 近 17 年的降水量有所提高。

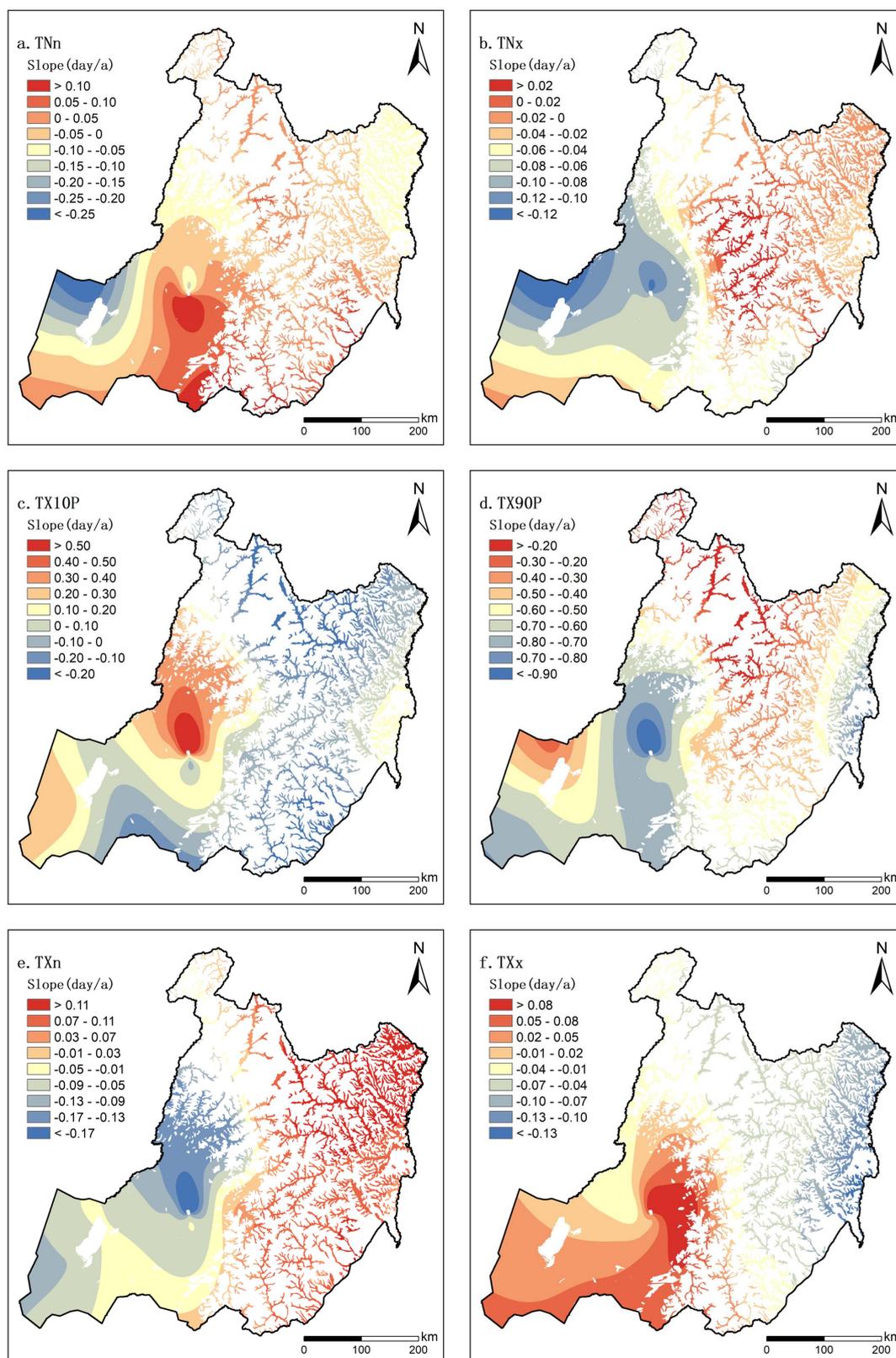


Figure 8. Spatial variation trend of extreme temperature index in Hulun Buir
图 8. 呼伦贝尔极端气温指数空间变化趋势

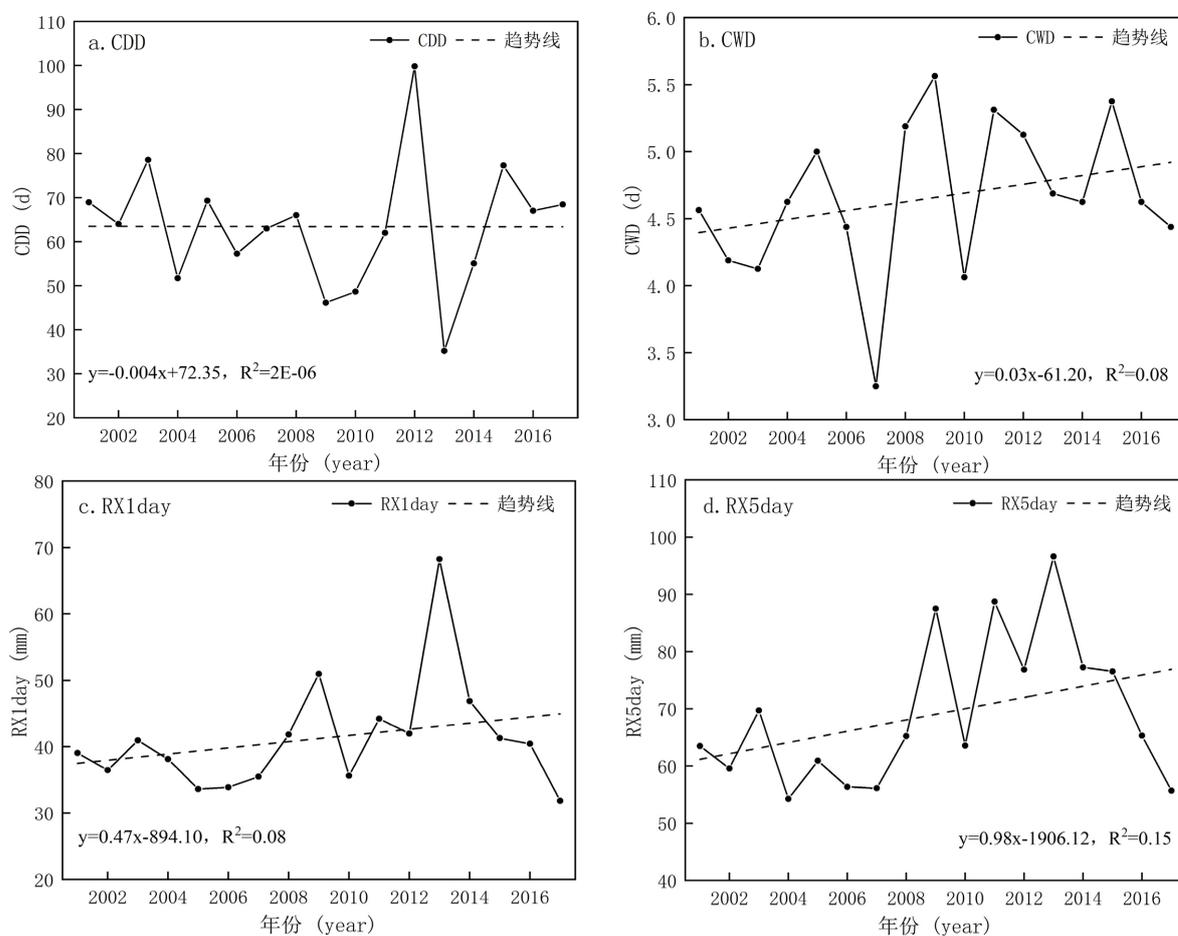


Figure 9. Temporal variation trend of extreme precipitation index in Hulun Buir from 2001 to 2017

图 9. 2001~2017 年呼伦贝尔极端降水指数时间变化趋势

根据极端降水指数的空间变化趋势可以得出, 呼伦贝尔地区极端降水指数呈增加趋势的面积均大于呈下降趋势的面积(图 10)。CDD、CWD、RX1day、RX5day 均呈现出增加趋势。CDD 呈现出增加趋势的地区主要分布在东部中间位置, 中部偏上和西部一小部分地区。CWD 呈现出下降趋势的地区分布在中部偏下地区, 其余地区均呈现出增加趋势。RX1day 呈现出增加趋势的地区主要分布在中部和西南地区。RX5day 呈现出增加趋势的地区主要分布在西部和中部大部分地区。

4.3. 草地植被枯黄期对极端气候的响应

分析呼伦贝尔不同草地植被类型枯黄期与极端气候指数的相关性发现, 不同草地植被类型枯黄期对极端气候指数的响应不同(图 11)。不同草地植被类型枯黄期对于极端气温指数和极端降水指数的响应并不显著且存在差异, 响应最大的是温性草原类。各草地类型与极端降水指数 CDD 以正相关关系为主, 与 CWD、RX1day、RX5day 均以负相关关系为主。低地盐化草甸类、温性草原荒漠类与极端降水指数以正相关为主, 其余草地类型均以负相关为主。各草地类型与极端气温指数 TNn、TXn 均呈现出负相关关系, 与 TNx、TX10P、TXx 均以正相关关系为主, TX90P 既有正相关也有负相关。改良草地、温性草原类与极端气温指数以正相关为主, 温性草原荒漠类以负相关为主。各草地类型对极端气温指数 TNx 的响应最显著。总的来说, 改良草地、温性草原荒漠类、温性草原类对极端降水的响应较为显著, 温性草甸草原类、温性草原类对极端温度的响应较为显著。

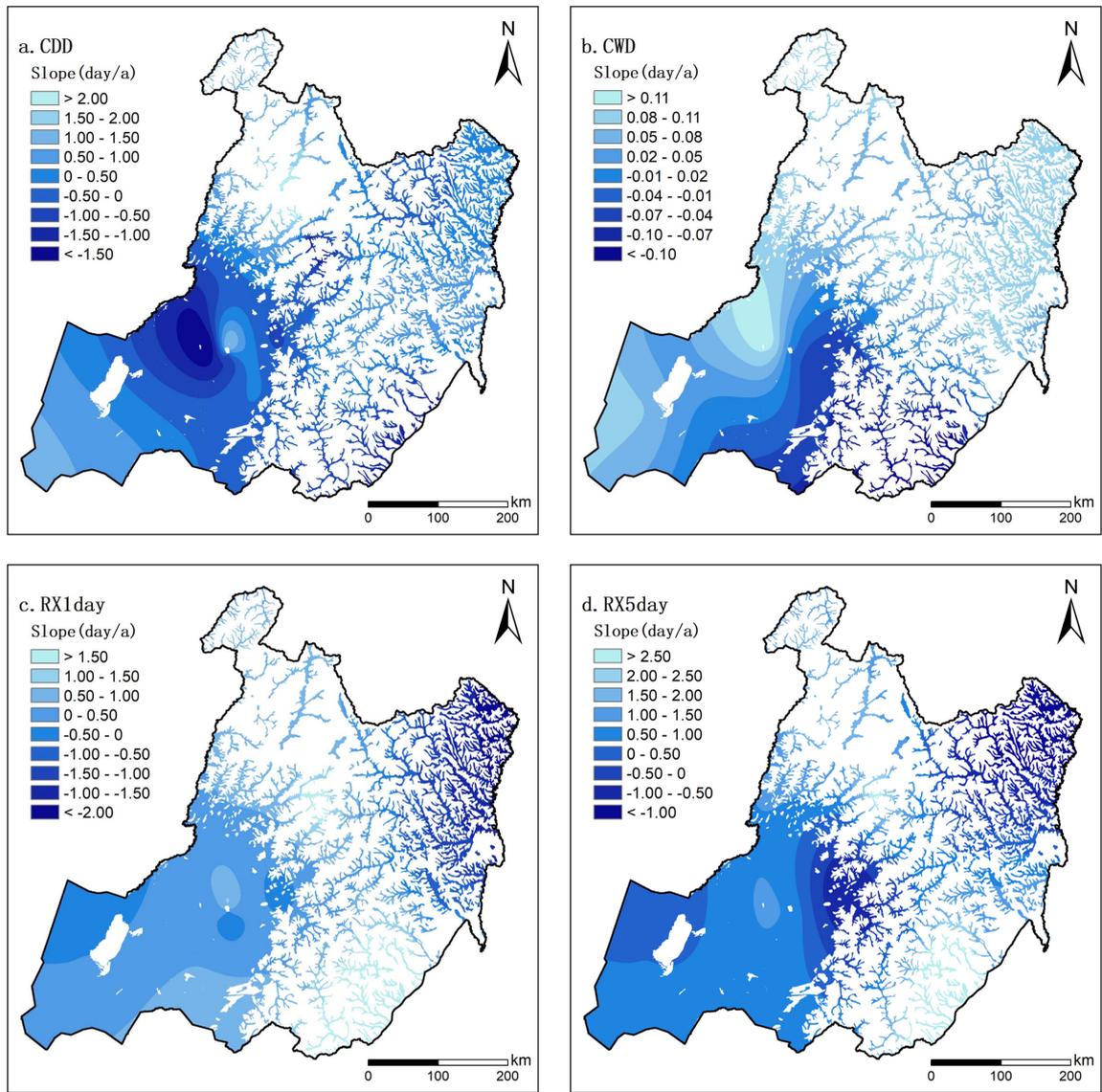


Figure 10. Spatial variation trend of extreme precipitation index in Hulun Buir
图 10. 呼伦贝尔极端降水指数空间变化趋势

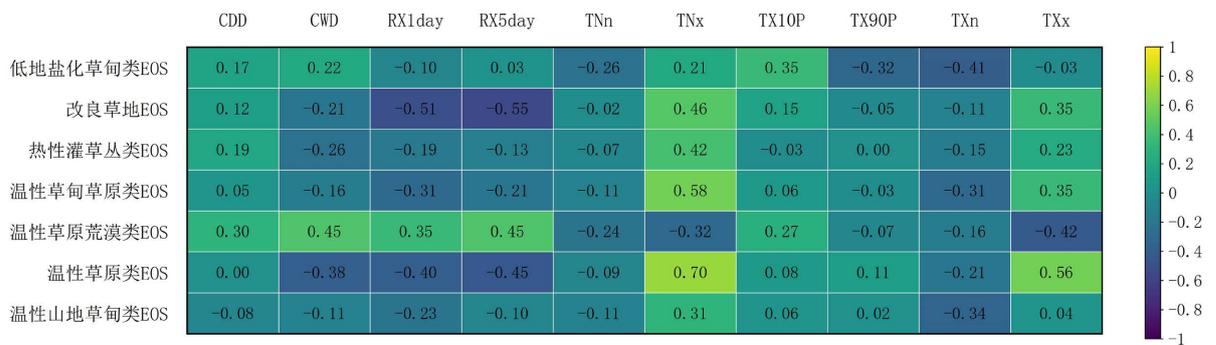


Figure 11. Correlation between EOS and extreme temperature and precipitation index of different grassland vegetation types in Hulun Buir

图 11. 呼伦贝尔不同草地植被类型 EOS 与极端气温、降水指数之间的相关性

5. 讨论

对 2001~2017 年呼伦贝尔草地植被枯黄期的研究得出, 枯黄期呈现出微弱的提前趋势, 这与 Rina 等 [17]、顾润源等 [18]、倪璐等 [19] 对物候期的研究结果是一致的。与已有的研究结果相比, 张玉静等 [20] 的研究表明, 呼伦贝尔草原枯黄期变化天数主要在 ± 20 d 之内, 而本研究得出的 EOS 变化天数以 ± 1.5 d 为主。苗百岭等 [21] 的研究得出, 呼伦贝尔枯黄期呈现出推迟趋势。这些结论与本研究的结论是有出入的, 原因可能是因为遥感数据源和研究方法的不同导致的。因此, 在今后的研究中, 应考虑高精度的遥感数据结合地面物候数据提取更为准确的物候参数。

本文对极端气候指数的研究发现, 极端气温指数 TX10P 呈上升趋势, TX90P 呈下降趋势。TNx、TXx、TNn 和 TXn 总体呈减少趋势。极端降水指数 CDD 呈减少趋势, CWD 呈增加趋势。RX1day、RX5day 均呈上升趋势。崔凤琪等 [22] 的研究表明, TX90P、TX10P、RX5day、CWD、CDD 的变化趋势与本研究的结论恰恰相反。邸择雷等 [23] 的研究结果得出, TX10p、TNx、TNn、RX1day 的变化趋势与本研究的结论一致, TXx、TX90p、TXn、RX5day、CDD、CWD 的变化趋势与本研究的相反。本研究与两个研究结果不同, 可能是因为时间尺度不同所带来的。春兰等 [24] 的研究显示, CWD、RX1day、CDD 的趋势一致, RX5day 相反。雅茹等 [25] 的研究表明, TX90P、TX10P、CWD 的趋势相反, CDD、RX5day 一致。刘俊英等 [26] 的研究得出, TXx 和 TNn 的趋势不一致, RX1day 一致。马爱华等 [27] 的研究表明, CDD 的趋势一致、CWD、RX5day、RX1day 不一致。闫慧敏等 [28] 的研究得出, TX10P、TX90P、RX5day、CWD 的变化趋势不一致, CDD 的一致。由此可见, 各极端气候指数的变化趋势都是有所差异的, 这可能是因为不同时间尺度和气象站点的选取导致的。

6. 结论

呼伦贝尔草地植被枯黄期主要集中在 9 月中旬到 10 月中旬, 年际变化趋势表现出微弱的提前趋势。在空间上, EOS 提前区域主要分布在呼伦贝尔中部和西南地区, 主要草地类型是低地盐化草甸类、温性草原类和温性山地草甸类, 并且围绕呼伦湖周围呈提前趋势。EOS 推迟区域主要分布在中部偏西和东南地区, 主要草地类型是温性草甸草原类。由此可见, 各草地类型之间的物候参数具有差异性。

呼伦贝尔地区冷昼日数呈上升趋势, 暖昼日数呈下降趋势, 极高值和极低值总体呈减少趋势。在空间上, TX10P 和 TXx 在中部以西的区域主要表现为增加趋势, TNn、TNx 和 TXn 在中部以东的区域主要表现为增加趋势, 而 TX90P 在整个区域都表现为下降趋势。极端降水指数中持续干燥指数呈减少趋势, 持续湿润指数呈增加趋势, 最大降水量均呈上升趋势。呼伦贝尔地区极端降水指数在空间上表现为增加趋势的面积大于下降趋势的面积, 且增加的范围以中部和西部地区为主。

对呼伦贝尔不同草地植被类型枯黄期和极端气候指数进行相关分析后发现, 不同草地植被类型枯黄期对于极端气温指数和极端降水指数的响应并不显著, 且存在差异, 响应最大的是温性草原类。改良草地、温性草原荒漠类、温性草原类对极端降水的响应较为显著, 温性草甸草原类、温性草原类对极端温度的响应较为显著。

基金项目

内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划资助(NJYT23018); 内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金资助(2022JBBJ013)。

参考文献

- [1] 孙梦鑫, 张岳, 辛宇, 钟鼎杰, 杨存建. 川西高原近 20a 植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 生态环境学报, 2023, 32(1): 1-8.

- 2022, 31(7): 1326-1339.
- [2] 李广泳, 李小雁, 赵国琴, 张志华, 李岳坦. 青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 3038-3047.
- [3] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 秦格霞, 侯青青, 谢保鹏, 吴华武. 黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6600-6612.
- [4] 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[J]. 植物生态学报, 2021, 45(6): 626-640.
- [5] 吴路华, 王世杰, 白晓永, 周苗, 宋小庆, 田义超, 罗光杰, 李汇文, 操玥, 李琴, 陈飞, 邓元红. 近 60 年来印江河流域极端气候演变及其对净初级生产力和归一化植被指数的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 960-981.
- [6] Dashkhuu, D., Kim, J.P., Chun, J.A. and Lee, W.S. (2014) Long-Term Trends in Daily Temperature Extremes over Mongolia. *Weather and Climate Extremes*, **8**, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.11.003>
- [7] Na, L., Na, R., Zhang, J., Tong, S. and Bao, Y. (2018) Vegetation Dynamics and Diverse Responses to Extreme Climate Events in Different Vegetation Types of Inner Mongolia. *Atmosphere*, **9**, Article 394. <https://doi.org/10.3390/atmos9100394>
- [8] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 秦安宁, 倪璐, 姚小强. 中国北方草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4099-4107.
- [9] 马晓芳, 陈思宇, 邓婕, 冯琦胜, 黄晓东. 青藏高原植被物候监测及其对气候变化的响应[J]. 草业学报, 2016, 25(1): 13-21.
- [10] 张晋霞, 徐长春, 杨秋萍. 2001-2017 年新疆 NDVI 变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 250-256+275+341.
- [11] 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[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 247-254.
- [12] 佟斯琴. 气候变化背景下内蒙古地区气象干旱时空演变及预估研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [13] 赵安周, 张安兵, 赵延旭, 范倩倩, 赵玉玲. 基于 MODISNDVI 数据的陕甘宁地区植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 224-231+2.
- [14] 孙秀云. 锡林郭勒盟草地物候时空演变及其气候影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [15] 冯克庭, 张耀南, 田德宇, 康建芳. 中巴经济走廊 2000-2017 年逐月温度植被干旱指数数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2019, 4(3): 97-111.
- [16] 红英. 内蒙古极端气候变化对植被物候的影响研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [17] Rina, W., Bao, G., Tong, S., Bao, Y. and Du, L. (2020) Multi-Climate Factors and the Preceding Growth Stage of Vegetation Co-Regulated the Variation of the End of Growing Season in Northeast Inner Mongolia, China. *IEEE Access*, **8**, 221525-221538. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043788>
- [18] 顾润源, 周伟灿, 白美兰, 李喜仓, 邸瑞琦, 杨晶. 气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 767-776.
- [19] 倪璐, 吴静, 李纯斌, 秦格霞, 李政, 孔婕. 近 30 年中国天然草地物候时空变化特征分析[J]. 草业学报, 2020, 29(1): 1-12.
- [20] 张玉静, 杨秀春, 郭剑, 金云翔, 徐斌, 申格, 张文博. 呼伦贝尔草原物候变化及其与气象因子的关系[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 144-153.
- [21] 苗百岭, 梁存柱, 韩芳, 梁茂伟, 张自国. 内蒙古主要草原类型植物物候对气候波动的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7689-7701.
- [22] 崔凤琪, 唐海萍, 张钦, 戴路炜. 1960-2017 年呼伦贝尔草原极端气候事件时空变化[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1382-1391.
- [23] 邸择雷, 乌云娜, 宋彦涛, 霍光伟, 王晓光, 樊荣. 额尔古纳市森林草原过渡带极端气候指数变化[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 3143-3152.
- [24] 春兰, 秦福莹, 宝鲁, 那音太, 包玉海, 包山虎. 近 55a 内蒙古极端降水指数时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 963-972.
- [25] 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[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 106-112.

-
- [26] 刘俊英, 刘华民, 王炜, 王立新. 内蒙古地区近四十年极端天气气候事件变化研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 400-408.
- [27] 马爱华, 岳大鹏, 赵景波, 胡倩. 近 60a 来内蒙古极端降水时空变化及其影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 74-85.
- [28] 闫慧敏, 陈伟娜, 杨方兴, 刘纪远, 胡云锋, 冀咏赞. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 13-22.