

DOI: 10.5846/stxb202205181410

袁沫汐, 赵林, 李鑫鑫, 林爱文. 1982—2015 年中国温带不同草地植被枯黄期对极端气候事件的响应. 生态学报, 2023, 43(14): 6015–6032.

Yuan M X, Zhao L, Li X X, Lin A W. Diverse responses of end of growing season to extreme climate events in different grasslands in temperate China during 1982–2015. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 6015–6032.

1982—2015 年中国温带不同草地植被枯黄期对极端气候事件的响应

袁沫汐^{1,2,3,4,*}, 赵 林², 李鑫鑫², 林爱文²

¹ 湖南工商大学公共管理与人文地理学院, 长沙 410205

² 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079

³ 中国地质大学(武汉)流域关键带演化湖北省重点实验室, 武汉 430074

⁴ 长沙人工智能社会实验室, 长沙 410205

摘要: 随着极端气候事件频率和强度的增加, 植被物候正在发生深刻的变化。然而, 植被枯黄期(EGS)对极端气候的响应机制目前尚未厘清, 特别是对于干旱半干旱地区的草地而言。因此, 聚焦我国温带草地, 基于 1982—2015 年全球监测与模型研究工作组归一化植被指数(GIMMS NDVI3g)长时间序列数据提取草地物候参数, 并分析其时空变化规律; 运用随机森林模型等方法探究温带草地 EGS 对极端气候变化的响应特征。结果表明: (1) 全区多年平均 EGS 主要发生于 270—290 儒略日(DOY), 59.8% 的区域呈延迟趋势, 其中显著延迟($P < 0.05$)的区域分布在新疆天山、阿尔泰山一带和准噶尔盆地西部、黄土高原北部、呼伦贝尔高原的西部和东北小兴安岭。(2) EGS 与极端气温暖极值(日最低气温的最大值、日最高气温的最大值、暖夜日数、暖昼日数)之间均以广泛的正相关关系为主; 相比之下, 极端降水事件与 EGS 之间的关系相对比较复杂, 这与各草地类型自身的生理策略和所处环境密切相关。(3) 整体而言, 持续干旱日数、气温日较差和暖夜日数对全域草地 EGS 动态变化具有极大的重要性。就不同草地类型而言, 温带草甸草原主要受到气温日较差的影响, 温带山地草甸和温带沼泽化草甸 EGS 变化主要受日最高气温的最大值的影响, 日最低气温的最大值和暖夜日数分别对温带草丛和温带荒漠草原的影响最大; 持续湿润日数和持续干旱日数则分别对生长在水分限制地区的温带盐生草甸和温带典型草原的 EGS 产生强烈作用。

关键词: 植被枯黄期; 极端气候事件; 响应; 随机森林模型; 温带草地

Diverse responses of end of growing season to extreme climate events in different grasslands in temperate China during 1982—2015

YUAN Moxi^{1,2,3,4,*}, ZHAO Lin², LI Xinxin², LIN Aiwen²

¹ School of Public Administration and Human Geography, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

² School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

⁴ Changsha Social Laboratory of Artificial Intelligence, Changsha 410205, China

Abstract: Vegetation phenology is undergoing profound changes as the frequency and intensity of extreme climate events increase. However, the mechanisms of end of growing season (EGS) response to the extreme climate has not yet been elucidated, especially for grasslands in arid and semi-arid regions. Therefore, this study focused on the temperate grasslands in China, extracted grassland phenological parameters based on the long-term GIMMS NDVI3g data from 1982 to 2015, and analyzed its temporal and spatial variation patterns. Additionally, correlation analysis and random forest models were used to

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(18ZDA040); 流域关键带演化湖北省重点实验室开放基金项目(CZE2022F06)

收稿日期: 2022-05-18; **网络出版日期:** 2022-12-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuanmoxi@whu.edu.cn

本研究尚未包含中国港澳台统计数据。

explore the response of EGS in temperate grassland to the extreme climate change. The results showed that: (1) the multi-year average EGS in the whole region mainly occurred in 270—290 day of year (DOY), 59.8% of the pixels showed a delayed trend, and the pixels with a significant delay ($P < 0.05$) were mainly distributed in Tianshan Mountains, the Altai Mountains in Xinjiang, the western Junggar Basin, the northern Loess Plateau, the western Hulunbuir Plateau, and the Xiaoxing'an Mountains. (2) There was a widespread positive correlation between EGS and extreme temperature events (yearly maximum value of daily minimum temperature (TNx), yearly maximum value of daily maximum temperature (TXx), percentage of days when daily minimum temperature $> 90^{\text{th}}$ percentile (TN90P), percentage of days when daily maximum temperature $> 90^{\text{th}}$ percentile (TX90P)). In contrast, the relationship between extreme precipitation events and EGS was relatively complex, which was closely related to the physiological strategies and environment of each grassland type. (3) Overall, maximum length of dry spell (CDD), daily temperature range (DTR), and TN90P were of great importance to the dynamic changes of EGS on the temperate grassland. For different grassland types, the EGS changes in temperate meadow steppe (TMS) were mainly affected by DTR; those changes in temperate mountain meadow (TMM) and temperate swampy meadow (TSM) were affected by TXx. TNx and TN90P had the greatest impacts on the temperate grassland forb (TGF) and temperate desert steppe (TDS), respectively; maximum length of wet spell (CWD) and CDD had the stronger effects on the EGS in temperate halobiotic meadow (THM) and temperate typical steppe (TTS) growing in water-limited areas, respectively.

Key Words: autumn phenology; extreme climate events; response; random forest model; temperate grassland

植物适应周围环境因素而产生相应地规律性和季节性变化称为植物物候^[1-2]。它一方面通过生理特征变异对气候产生反馈,另一方面基于群落结构和生态功能直接影响陆-气间碳水循环^[3]。植被枯黄期(EGS)作为植被物候的重要指标之一,其动态变化对植被生长季长度和陆地生态系统生产力的影响存在巨大潜力^[4-5]。因此,在全球变暖背景下,深入研究植被枯黄期动态变化对理解植被-气候关系,评估植被减缓气候变化贡献以及预测未来气碳循环反馈具有重要意义^[6-7]。

现有研究表明,气温是长期驱动北半球中高纬度地区 EGS 变化的主导因素^[8],降水则对水分限制地区的 EGS 发挥着至关重要的作用^[9-10]。然而,与平均气候相比,极端气候事件对生态环境的影响更加直接和严重^[11-12],因此,越来越多的学者开始着手于 EGS 与极端气候的相关研究。比如,欧洲高纬度地区常绿落叶、落叶阔叶林以及混交林由于受到极端变暖事件的干扰,其 EGS 发生时间有所延迟^[13];Hong 详细地说明了极端变暖事件对内蒙古草地 EGS 的影响因植被类型而异^[14]。相较于极端变暖事件,干旱和极端降水对植被物候的影响机制仍不清楚。基于实验设计的研究发现干旱和强降水对欧石楠花期并没有影响^[15-16],以遥感数据为手段的研究却认为干旱导致澳大利亚和中国干旱半干旱地区植被 EGS 提前^[17-18]。Xie 以森林群落为研究对象,分析了多个极端气候事件对 EGS 的影响,结果发现寒冷、霜冻、潮湿和热浪会造成 EGS 提前,中度高温和干旱胁迫却使得 EGS 延迟^[19]。尽管当前社会各界对不同空间尺度以及各种极端气候指标给予了极大的关注,但由于极端气候变化对植被生长的影响呈多样性特点,所以目前关于不同强度和频率的极端气候事件是如何影响植被 EGS,尤其是针对脆弱地区草地植被类型的相关研究仍然不足。

中国温带草地作为我国北方的生态屏障对全球气候变化的响应尤为敏感,近年来频繁发生的极端气候事件致使当地的生态环境愈发脆弱^[20-21],同时对我国的草畜牧业生产造成了巨大的经济损失。因此,明确极端气候事件对该地区草地 EGS 的影响,有助于评估草地生态系统对极端气候的适应性和脆弱性,并且能更好地理解全球变暖背景下极端气候事件区域响应,从而为当地政府保护和改善草原提供相应的解决策略。

1 研究区概况

本研究以中国温带草地为研究区,该区域由东至西包括我国大部分北方草地^[22],根据《1:1000000 中国植被图集》,将研究区草地划分为以下 7 类:温带草甸草原(TMS)、温带典型草原(TTS)、温带荒漠草原(TDS)、温带山地草甸(TMM)、温带沼泽化草甸(TSM)、温带盐生草甸(THM)、温带草丛(TGF)。研究区多分布在干

旱半干旱区,多年年均温和降水量范围分布在 $-8.2\sim 15.2^{\circ}\text{C}$ 和 $62.4\sim 936.3\text{mm}$ 之间;月平均温度和月降水量均在7月达到最大值(图1)。

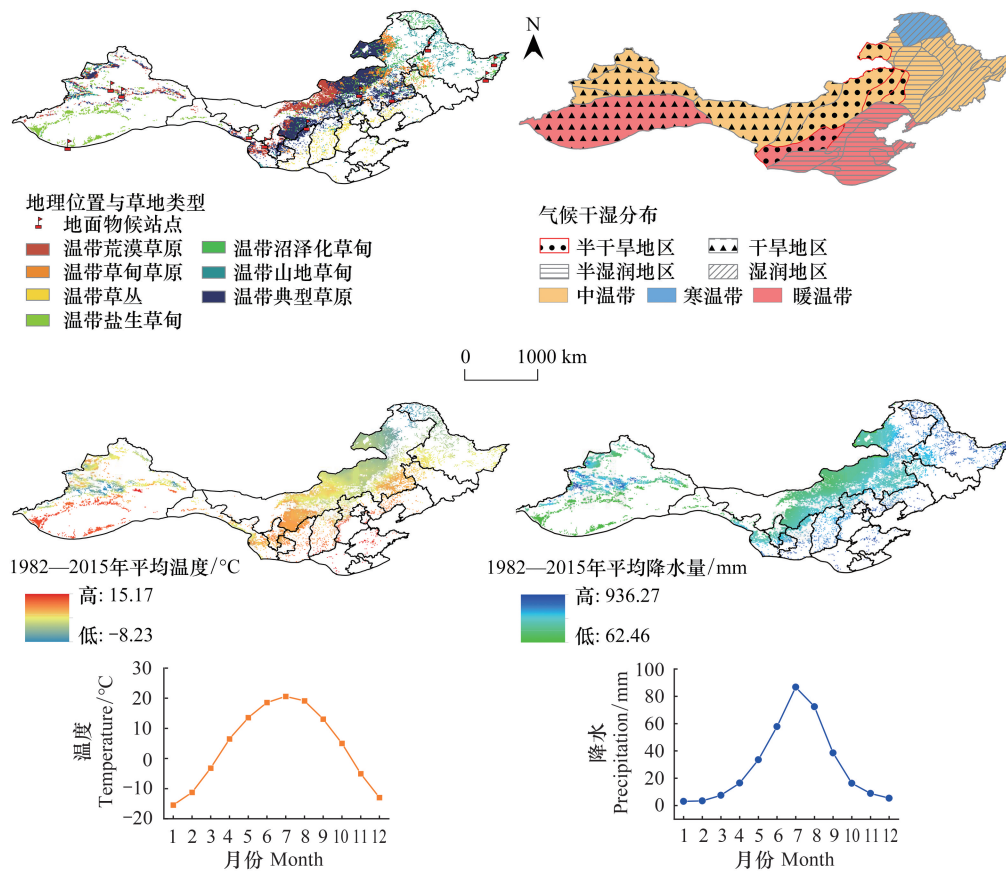


图1 研究区地理位置和草地类型、气候干湿分区、多年平均温度、多年平均降水

Fig.1 Location and grassland type of the study area, climate zones, multi-year average temperature, multi-year average precipitation

2 数据与方法

2.1 数据来源

气象数据来源于中国气象数据共享网(<http://www.cma.cn/>),该网站提供了1961—2015年格点日平均温度、日最高温度、日最低温度和日降水量数据,空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。

归一化植被指数(NDVI)数据集是由全球监测与模型研究工作组(GIMMS)基于先进甚高分辨率辐射计制作而成(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/>),简称GIMMS NDVI3g。该数据集时间跨度最长(1982—2015年)且覆盖全球范围,其空间分辨率为 $1/12^{\circ}$,时间分辨率分别为15天合成。

1:100万植被类型图由中国科学院资源环境科学数据中心平台提供(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为1km。

利用ArcGIS 10.2平台对气象数据和植被类型数据进行重采样,使两类数据的空间分辨率与NDVI数据空间分辨率一致。

地面物候观测数据来源于中国生态系统网络综合中心数据资源服务网站(<http://www.cnern.org.cn>)和《中国动植物物候观测年报》第11号,具体的物候站点信息如表1所示。尽管两类数据的来源有所不同,但各个站点的观测方法统一,因此数据具有一致性^[23]。参考先前研究,剔除同一站点物候数据相差30天以上的记录,并将70%观测对象进入黄枯期的时间点与遥感估算得到的草地EGS结果相对应^[24]。

表 1 地面物候观测站点概况

Table 1 Overview of phenology observation sites

站点 Sites	经度 Longitude	纬度 Latitude	观测年份 Year	生态站类型 Eco station types	来源 Sources
策勒站	80.72	37.02	2005—2007, 2010	荒漠	中国生态系统网络 《中国动植物观测年报》11 号
鄂尔多斯站	110.19	39.49	2006—2015	荒漠	
内蒙古站	116.67	43.54	2005—2015	草地	
奈曼站	120.70	42.92	2005—2015	农田	
三江站	133.30	47.35	2005, 2009—2015	沼泽	
沙坡头站	105.00	37.28	2004—2015	荒漠	
嫩江	125.14	49.16	1987—1988	森林	
虎林	132.28	45.44	1987	森林	
石河子	86.03	44.19	1987—1988	荒漠	
乌鲁木齐	87.36	43.45	1987	草地	
民勤	103.05	38.38	1987—1988	草地	

2.2 数据处理

2.2.1 植被指数的预处理

为确保 NDVI 数据产品能准确地反映植被季节变化趋势,本研究需对 GIMMS NDVI3g 数据进行预处理和时间序列重构。由于积雪覆盖会降低 NDVI 值,从而对植被物候提取产生影响。由于 GIMMS NDVI3g 数据集缺少积雪信息,本文根据前人研究^[25],首先利用日气温识别被积雪覆盖的像元,即,当某个像元的日均气温连续 5 天小于 0℃ 时,认为是被积雪覆盖;接着,使用该像元 11 月到次年 3 月之间未被积雪污染的 NDVI 中值作为替代^[26],这种预处理方法的稳健性已经在先前的研究中得到良好验证^[27—28]。除了积雪的影响,大气状况以及云量也会给 NDVI 数据带来突变噪声^[29—30]。为此,采用非对称高斯滤波法(AG 滤波)、S-G 滤波法(S-G 滤波)和双逻辑斯蒂滤波(DL 滤波)分别对 GIMMS NDVI3g 数据进行平滑处理。通过比较分析原始 NDVI 时序曲线和重构后 NDVI 时序曲线的平均绝对值误差(MAE)、均方根误差(RMSE)以及相关系数(R),选择出最佳的适合研究区的重构算法。上述重构处理均在 TIMESAT 3.0 软件中进行^[31]。

对比滤波前后 NDVI 曲线(图 2)可以看出,三种滤波方法均能较为完整地表达出原始 NDVI 曲线的波动特点,但 SG 滤波不能消除一些非极值噪声,这可能会造成植被生长曲线的伪高峰,从而对物候提取造成干扰。AG 滤波和 DL 滤波两种方法处理后的曲线较为相似,曲线中过度异常的值均被剔除掉,整体比 SG 滤波后的曲线相对平滑。就滤波保真性而言,经过三种滤波方法处理后的 NDVI 曲线与原始曲线的相关系数超 0.8 以上的像元占比均达到了 98.6%,仅有新疆南部地区少数像元的相关系数在 0.6—0.8 之间(图 3)。另外,从 RMSE 和 MAE 结果来看,AG 滤波的效果要优于 SG 滤波和 DL 滤波。总体而言,根据对比结果,本研究选用 AG 滤波对 NDVI 进行时间序列重构。

2.2.2 基于遥感反演植被枯黄期

本研究使用动态阈值法和 Logistic 曲线拟合法两种算法分别提取研究区草地 EGS,并取两个结果的平均值结果用于后续的研究以便消除估算方法带来的差异。

(1) 动态阈值法

$$NDVI_{ratio} = \frac{NDVI_t - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \tag{1}$$

式中,NDVI_t是指一年中第 *t* 天的 NDVI 值,NDVI_{max} 和 NDVI_{min} 分别为一年 NDVI 变化的最大值与最小值。根据已有的研究结果和实测物候信息,本研究将草地的 EGS 则定义为 NDVI_{ratio} 下降到 0.5 时所对应的时间^[32—33]。

(2) Logistic 曲线拟合法

Logistic 曲线拟合法是基于 4 个参数的植被物候提取方法,该方法将植被生长周期的 NDVI 曲线视为 Logistic 曲线形状,无需确定阈值,仅根据 NDVI 的拟合曲线变化特征即可识别植被物候期。具体计算公式如公式(2)所示:

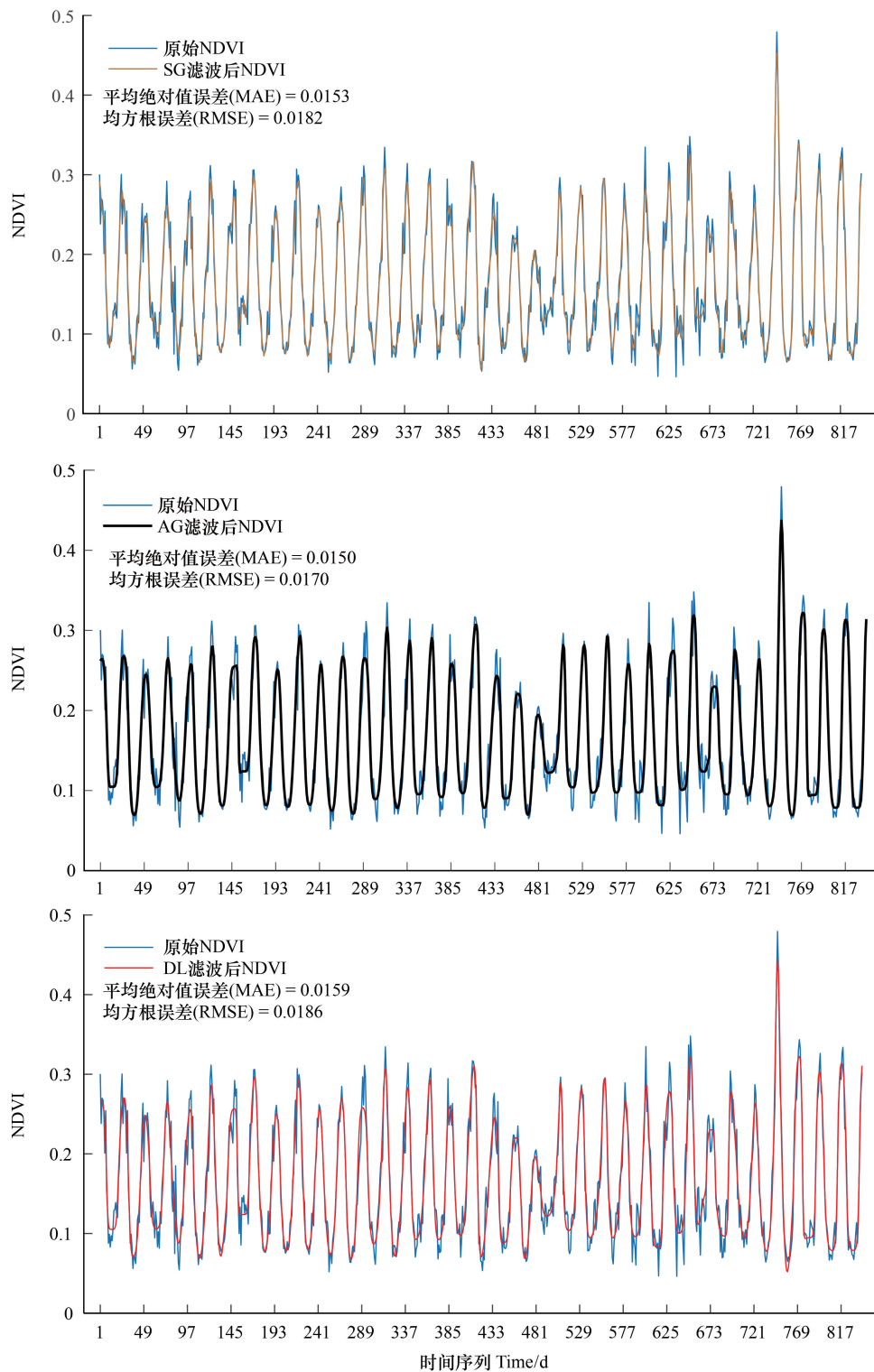


图2 滤波前后 NDVI 时间序列曲线

Fig.2 NDVI time series curve before and after filtering

SG: SG 滤波 Savitzky golay filter; AG:非对称高斯滤波 Asymmetric gaussian filter; DL: 双逻辑斯蒂滤波 Double logistic filter; NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

$$y(t) = \frac{c}{1 + e^{a+bt}} + d \quad (2)$$

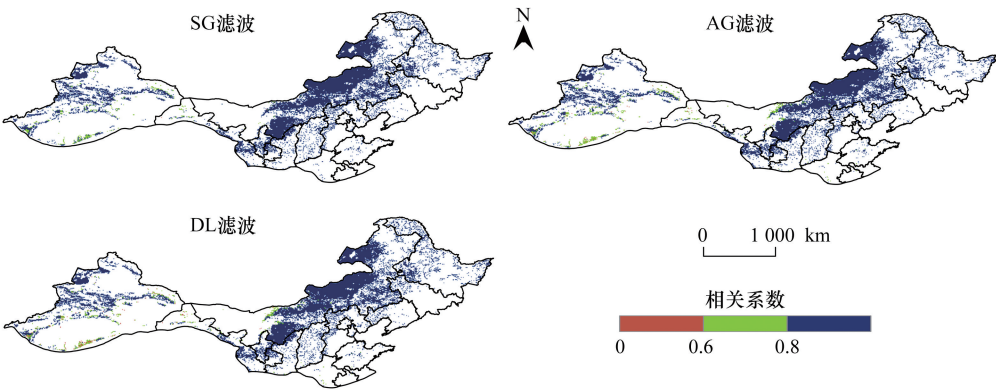


图 3 滤波前后 NDVI 数据相关系数空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of correlation coefficients of NDVI data before and after filtering

式中, t 表示天数, $y(t)$ 为第 t 天的 NDVI 值, a 、 b 为拟合参数, d 为 NDVI 背景值, $c+d$ 为 NDVI 最大值。

得到 NDVI 的拟合曲线后,利用公式(3)计算拟合后曲线的曲率变化率(RCC)求取物候参数,当 RCC 达到极小值时对应的天数则为 EGS。

$$RCC = b^3 cz \left\{ \frac{3z(1-z)(1+z)^3 [2(1+z)^3 + b^2 c^2 z]}{[(1-z)^4 + (bcz)^2]^{2.5}} - \frac{(1+z)^2(1+2z-5z^2)}{[(1+z)^4 + (bcz)^2]^{1.5}} \right\}$$

(3)

式中, $z=e^{(a+bt)}$, a 、 b 为拟合参数, t 表示天数。

2.3 极端气候指标选取

本研究从气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)提供的极端气候指标体系中选取了 17 个指标(表 2),分别从强度、频率以及持续时间三个方面探究草地物候对极端气候事件的响应。各个指标的计算过程均在 MATLAB 2015a 软件包中完成。

表 2 极端气候指标

Table 2 Definition of extreme climate indices

类别 Categories	指标 Index	代码 ID	定义 Definitions	单位 Unit
气温类指数 Temperature indices	日最低气温的最小值	TN _n	每年日最低气温的极小值	℃
	日最低气温的最大值	TN _x	每年日最低气温的极大值	℃
	日最高气温的最小值	TX _n	每年日最高气温的极小值	℃
	日最高气温的最大值	TX _x	每年日最高气温的极大值	℃
	气温日较差	DTR	年内日最高气温与最低气温的差值	℃
	霜冻天数	FD	年内日最低气温<0℃的天数	d
	冰冻天数	ID	年内日最高气温<0℃的天数	d
	冷夜日数	TN10P	日最低气温<1961—1990 年第 10%分位值的天数	d
	暖夜日数	TN90P	日最低气温<1961—1990 年第 90%分位值的天数	d
	冷昼日数	TX10P	日最高气温<1961—1990 年第 10%分位值的天数	d
	暖昼日数	TX90P	日最高气温<1961—1990 年第 90%分位值的天数	d
降水类指数 Precipitation indices	强降水量	R95p	日降水量>1961—1990 第 95 个百分位值的总降水量	mm
	极强降水量	R99p	日降水量>1961—1990 第 99 个百分位值的总降水量	mm
	单日最大降水量	RX1day	单日最大降水量	mm
	连续 5 日最大降水量	RX5day	连续 5 日最大降水量	mm
	持续干旱日数	CDD	日降水量<1mm 的连续日数最大值	d
	持续湿润日数	CWD	日降水量≥1mm 的连续日数最大值	d

2.4 数据分析方法

2.4.1 趋势分析

为了分析草地 EGS 多年时空格局变化趋势,采用最小二乘法拟合像元尺度上变量的斜率^[34],其公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{j=1}^n (j \times k_j) - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n k_j}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - \left(\sum_{j=1}^n j \right)^2} \quad (4)$$

式中,slope 表示变量的变化趋势, j 为时间, k_j 为第 j 年的变量值。slope>0 表明物候参数在研究时段内是增加(延迟)的;slope<0 表明物候参数在研究时段内是减少(提前)。 t 检验用来判断变量的变化趋势是否显著。

2.4.2 相关分析

Pearson 相关分析可以描述两个变量间的线性相关程度,其计算公式如下:

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

式中, r_{xy} 是所求两个变量间的相关系数, x 、 y 为输入的两个变量, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为变量的平均值, n 为样本个数。 r_{xy} 的取值范围在-1 到 1 之间, r_{xy} 值越接近于 1 表示两个变量之间的关系越密切。另外, $r_{xy}>0$ 表示两个变量呈现正相关; $r_{xy}<0$ 表示两个变量呈负相关。

2.4.3 随机森林模型重要性排序

随机森林模型是 Breiman^[35]提出的一种基于分类树的机器学习算法。该方法是通过 j 次自助重采样,从数量为 N 的原始训练集中有放回地重复随机抽取多个样本构建单棵决策树,形成 j 棵树组成的随机森林;当输入待分类的样本时,由所有决策树的分类结果统计投票决定输出的分类结果。在构建决策树的过程中,随机森林模型可以对输入的变量进行重要性排序^[36]。因此,本研究使用随机森林来识别各个极端气候事件对研究区草地枯黄期的影响程度。具体计算公式如下:

$$i m_i = \frac{1}{nt} \sum_{v \in S_{x_i}} \text{Gain}(X_i, v) \quad (6)$$

式中, $i m_i$ 为 X_i 对模型的贡献,表示为 IncMSE,其值越大重要性越高; S_{x_i} 表示在 nt 棵回归树的随机森林中被 X_i 分裂的节点集合, $\text{Gain}(X_i, v)$ 表示为 X_i 在分裂节点 v 时的基尼信息增益。

3 结果与分析

3.1 温带草地物候反演结果验证

对基于动态阈值法和 Logistics 拟合法估算得到的 EGS 求平均值后,将其与地面物候观测数据进行验证(图 4)。验证结果表明,基于遥感数据得到的 EGS 值与地面物候观测值之间的 RMSE 为 8.9 天,偏差为 1.85,考虑到研究所使用的 NDVI 数据时间分辨率为 15 天,所以该误差值是在可以接受范围之内。另外,两者的拟合优度为 0.41,通过了置信度 95%的显著性检验。以上结果表明,本研究基于 GIMMS NDVI3g 数据反演得到的中国温带草地 EGS 结果具有一定的可靠性。

3.2 温带草地枯黄期时空特征

3.2.1 温带草地枯黄期空间分布格局

草地枯黄期空间分布表明,温带草地多年平均 EGS 发生在第 270—290 天左右(即 9 月下旬到 10 月中旬),约占全域面积的 93.6%(图 5)。空间格局分布呈中部地区晚于西部和东部地区的特征。位于东北地区 and 新疆地区的草地 EGS 发生时间集中在第 270—280 天左右,约占像元总面积的 42.8%;分布在内蒙古地区和黄土高原西部地区的草地 EGS 则多发生在第 280—290 天之间。

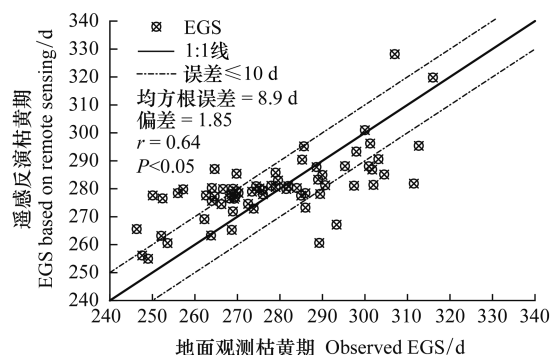


图4 中国温带草地物候遥感监测数据与地面物候观测数据验证

Fig.4 Validation of phenological monitoring results with phenology observation data of the temperate grassland in China

EGS: 枯黄期 End of the growing season

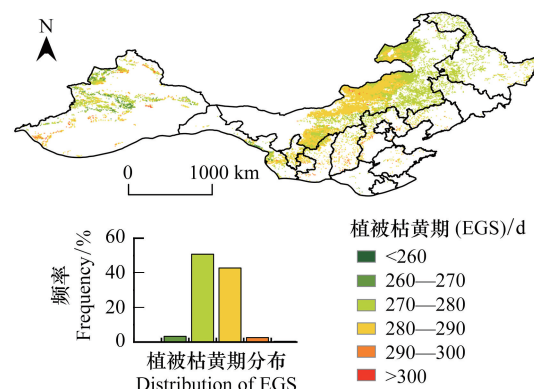


图5 1982—2015 年中国温带草地枯黄期空间分布图

Fig.5 Spatial pattern of multi-annual mean EGS of temperate grassland in China from 1982—2015

3.2.2 温带草地枯黄期多年动态变化特征

1982—2015 年期间,中国温带草地 EGS 整体以 $0.5\text{days}/10\text{a}$ 的速率延迟但并不显著 ($P>0.05$),不同草地类型的变化趋势和速率存在明显差异(图 6)。具体来说,除了温带荒漠草原的 EGS 以 $1.2\text{days}/10\text{a}$ 的速率显著提前 ($P<0.05$),其余各草地类型 EGS 均表现出延迟趋势,变化速率范围在 $0.1\text{days}/10\text{a}$ — $2.0\text{days}/10\text{a}$ 之间。其中,温带草丛的 EGS 延迟幅度最大($2.1\text{days}/10\text{a}$, $P<0.01$),温带山地草甸和温带盐生草甸分别以 $1.9\text{days}/10\text{a}$ ($P<0.01$) 和 $0.9\text{days}/10\text{a}$ ($P>0.05$) 的延迟幅度紧随其后。

另外,从 EGS 空间变化趋势来看,研究区 EGS 在 1982—2015 年的变化幅度分布在 -0.3 — $0.3\text{day}/\text{a}$ 之间的像元占比约为 82.2%(图 7)。EGS 表现为延迟趋势和提前趋势的像元占比分别为 59.8% 和 40.2%,其中表现为显著延迟的像元占比大约是其显著提前像元占比的 2 倍,其像元占比分别为 29.4% 和 13.3%。空间上,分布在新疆天山、阿尔泰山一带和准噶尔盆地西部、黄土高原北部、呼伦贝尔高原的西部和东北小兴安岭的 EGS 表现出了显著延迟的趋势,呈显著提前趋势的地区则集中在内蒙古自治区锡林郭勒的西北部。

对于不同草地类型而言,仅温带荒漠草原的 EGS 提前趋势的比例高于延迟趋势的比例,其余草地类型的 EGS 均为延迟趋势。其中,分布在内蒙古高原北部边缘和松嫩平原一带的温带草丛、南疆塔里木盆地边缘温带盐生草甸以及散落于东北北部和大兴安岭西部的温带沼泽化草甸 EGS 呈显著延迟的像元占比均超过了 50%。

3.3 温带草地枯黄期对极端气候事件的响应

3.3.1 温带草地枯黄期对极端温度事件的响应

考虑到植被对气候变化的滞后响应,本研究计算了当年 5 月到当年 10 月的极端气候事件指标,以探究温带草地 EGS 对极端气候事件的响应(图 8)。整体而言,我国温带草地 EGS 与极端气温暖极值(日最低气温的最大值(TN_x)、日最高气温的最大值(TX_x)、暖夜日数($TN90P$)、暖昼日数($TX90P$))之间均以广泛的正相关关系为主,呈显著正相关的像元占比分别为 10.5%、10.7%、10.6% 和 12.7%。空间上也保持了良好地一致性,即分布在内蒙古高原北部、东北北部以及新疆天山一带的草地 EGS 与极端气温暖极值呈显著正相关。这说明极端气温暖极值的增加可能在一定程度上会对温带草地 EGS 起到延迟作用。相比之下,草地 EGS 与极端气温冷极值(日最低气温的最小值(TN_n)、日最高气温的最小值(TX_n)、冷夜日数($TN10P$)、冷昼日数($TX10P$)、冰冻天数(ID)、霜冻天数(FD))相关关系比较模糊,表现为两者间呈正负相关关系的像元比例基本保持一致,其中呈显著正负相关的像元比例仅占 5% 左右。另外,草地 EGS 与气温日较差(DTR)的正负相关像元比例持平,两者之间表现为显著正相关的像元比例(6.8%)略高于显著负相关像元比例(4.6%)。在空

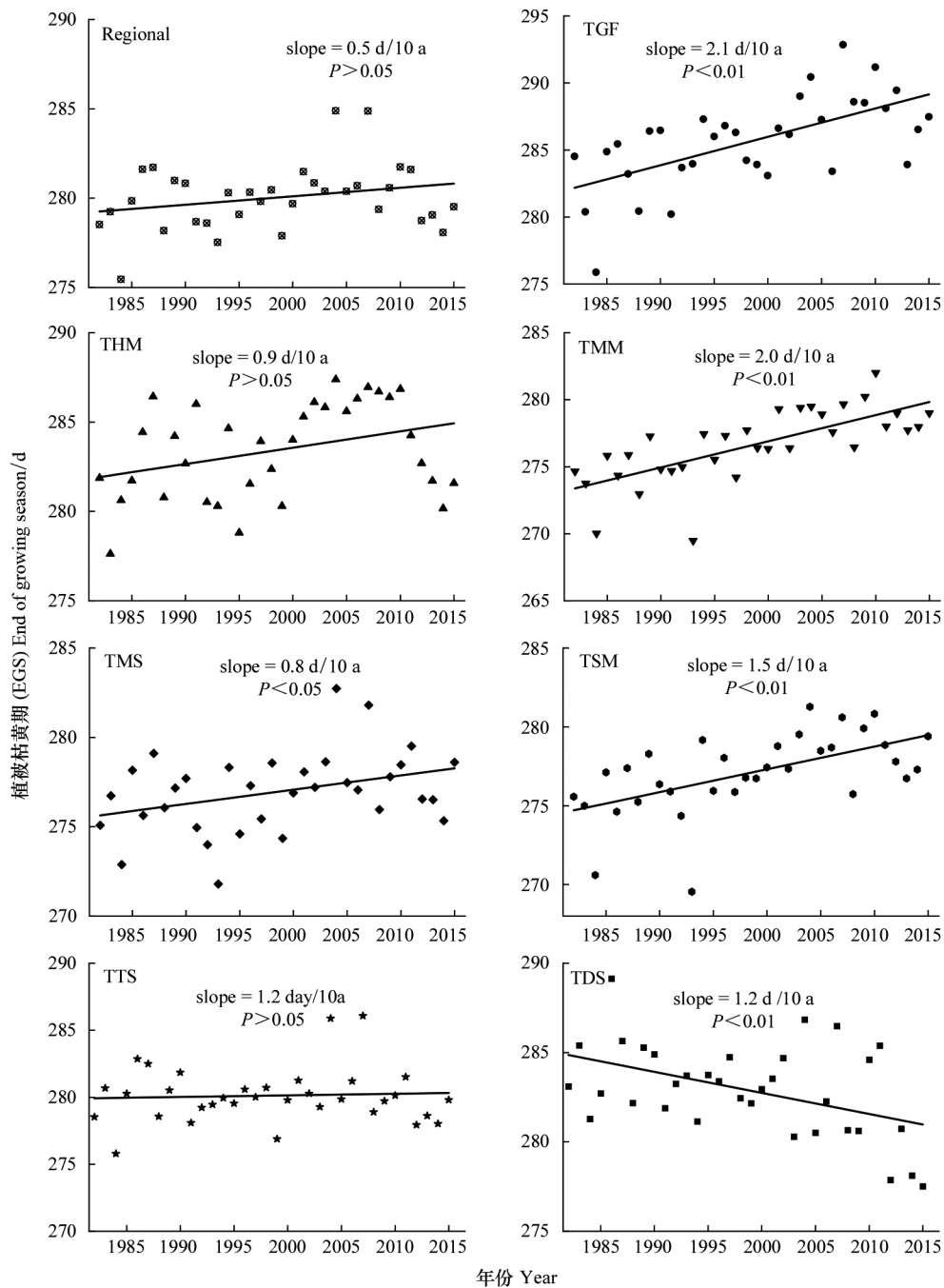


图 6 1982—2015 年中国温带草地全域和不同草地类型枯黄期年际变化趋势

Fig.6 The interannual variation trends of EGS in the whole area and different grassland types from 1982 to 2015

Regional: 全区; TGF: 温带草丛 temperate grass forb; THM: 温带盐生草甸 temperate holophytic meadow; TMM: 温带山地草甸 temperate montane meadow; TMS: 温带草甸草原 temperate meadow steppe; TSM: 温带沼泽化草甸 temperate swamp meadow; TTS: 温带典型草原 temperate typical steppe; TDS: 温带典型草原 temperate typical steppe

间上,草地枯黄期与 DTR 呈正相关关系的区域主要分布在内蒙古西部和东北部以及东北小兴安岭北部,而两者呈负相关关系的地区则分布在新疆天山西部、华北平原以及内蒙古高原中部。

研究区不同草地类型枯黄期对极端温度事件的响应存在明显差异(图 9)。具体表现为,除了温带荒漠草原,其余各草地类型 EGS 均与 TN_x 、 TX_x 和 TX_n 三个极端温度指标呈现出正相关关系,其中 EGS 与 TX_x 的正相关性整体都强于与 TN_x 和 TX_n 的正相关性。相比之下,各草地类型 EGS 与 TN_n 之间的关系存在的差异更明显。温带草丛、温带山地草甸以及温带荒漠草原的 EGS 与 TN_n 以负相关关系为主,其中温带荒漠草原表现

出显著的负相关关系($P<0.05$);而温带盐生草甸、温带草甸草原、温带典型草原、温带沼泽化草甸的 EGS 则与 TN_n 呈现出了微弱的正相关关系。

此外,研究区各草地类型 EGS 与表征冷的极端温度频率指数(TN_{10P} 和 TX_{10P})均呈现了负相关关系,温带山地草甸与两个指标存在显著的负相关关系($P<0.05$)。相反地,各草地类型 EGS 与表征暖的极端温度频率指数(TN_{90P} 和 TX_{90P})均呈现出了较强的正相关关系。温带盐生草甸、温带山地草甸和温带沼泽化草甸的 EGS 与两个指标的相关关系均通过了置信度 95% 的显著性水平检验。FD 和 ID 与各草地类型 EGS 以负相关关系为主,且 ID 对各个草地类型枯黄期的影响强度略小于 FD。相比之下,草地 EGS 与 DTR 的相关关系在不同草地类型间存在差异。仅有温带荒漠草原和温带草甸草原的 EGS 与 DTR 表现出微弱的正相关关系,其它草地类型 EGS 与 DTR 表现出不同强度的负相关关系,其中温带沼泽化草甸枯黄期与 DTR 的负相关关系通过置信度 99% 的显著性水平检验。

3.3.2 温带草地枯黄期对极端降水事件的响应

虽然研究区草地枯黄期与持续干旱日数(CDD)呈正相关关系的像元比例(54%)略高于呈负相关关系的像元比例(46%),但通过置信度 95% 的显著性检验的像元比例仅为 2.9%。空间上,两者表现为正相关关系的区域集中分布在内蒙古高原中部,而呈负相关关系的区域则分散地分布在新疆草地中部、黄土高原西部。类似地,枯黄期与持续湿润日数(CWD)的相关关系空间格局相对比较模糊,以正相关关系为主的区域大多散落在新疆西北部、黄土高原西部、内蒙古东部以及东北东部,约占整个区域总像元的 53.6%,其中达到显著的比例为 4.7%;新疆北部、内蒙古中西部和东北部和华北平原地区的草地枯黄期则与 CWD 呈负相关关系,达到显著的像元比例仅有 2.2%。

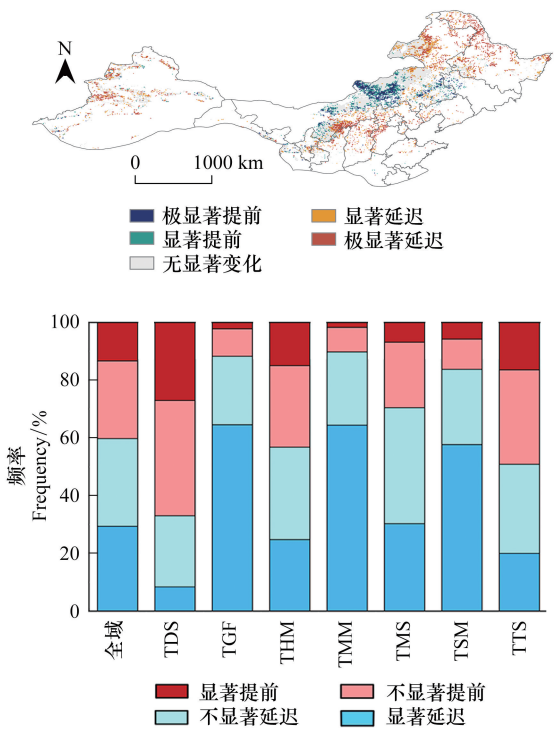


图 7 1982—2015 年中国温带草地枯黄期变化趋势空间分布图
Fig.7 Spatial distribution of inter-annual variation of EGS in the temperate grassland in China from 1982—2015

表 3 中国温带草地枯黄期与极端温度事件相关性统计

代码 ID	相关关系 Correlation relationship/%			
	正相关	显著正相关	负相关	显著负相关
	Positive correlation	Significant positive correlation	Negative correlation	Significant negative correlation
TN _{10P}	41.7	3.0	51.0	4.3
TN _{90P}	49.0	10.6	35.6	4.7
TX _{10P}	42.4	1.5	53.0	3.0
TX _{90P}	49.3	12.7	35.1	2.8
FD	39.8	2.5	51.9	5.8
ID	43.9	3.0	50.0	3.1
TN _n	49.8	4.6	43.2	2.4
TN _x	50.9	10.5	36.8	1.8
TX _n	50.2	3.3	42.7	3.8
TX _x	42.8	10.7	42.2	4.3
DTR	43.2	6.8	45.4	4.6

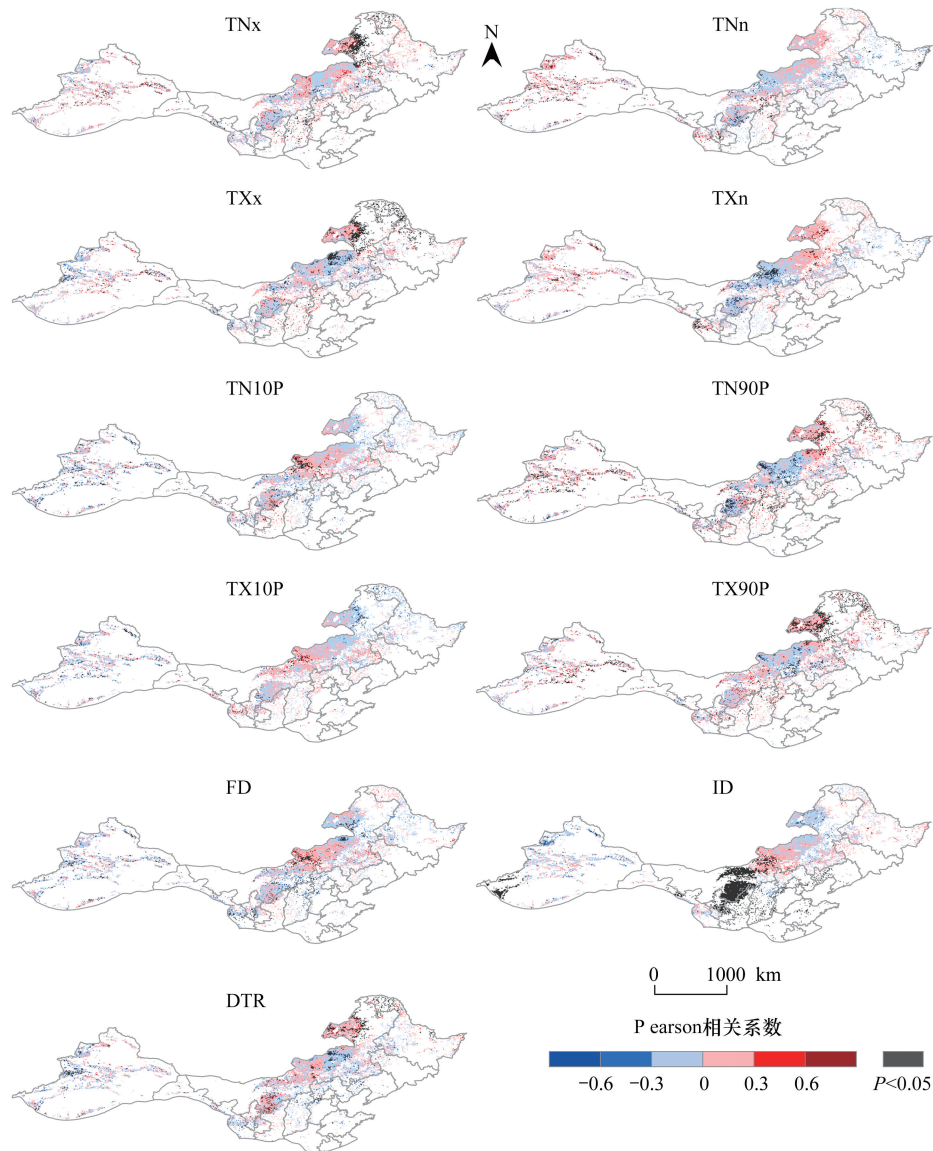


图 8 中国温带草地枯黄期与极端温度指数相关关系空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of the correlation between EGS and extreme temperature indices in temperate grassland in China

TNx:日最低气温的最大值 Yearly maximum value of daily minimum temperature; TNn:日最低气温的最小值 Yearly minimum value of daily minimum temperature; TXx:日最高气温的最大值 Yearly maximum value of daily maximum temperature; TXn:日最高气温的最小值 Yearly minimum value of daily maximum temperature; TN10P:冷夜日数 Percentage of days when daily minimum temperature < 10th percentile; TN90P:暖夜日数 Percentage of days when daily minimum temperature > 90th percentile; TX10P:冷昼日数 Percentage of days when daily maximum temperature < 10th percentile; TX90P:暖昼日数 Percentage of days when daily maximum temperature > 90th percentile; FD:霜冻天数 Number of frost days; ID:冰冻天数 Number of icing days; DTR:气温日较差 Daily temperature range

温带草地 EGS 与不同强度的极端降水均以正相关关系为主,且在空间分布上基本保持一致,这表明降水增加会促进温带草地 EGS 延迟(图 10)。具体来说,草地枯黄期与单日最大降水量(RX1day)和连续 5 日最大降水量(RX5day)呈正相关关系的像元比例分别为 51.8%和 53.9%,其中通过置信度 95%的显著性检验的像元占比分别为 4.2%和 4.9%。空间上,呈正相关关系的区域多分布在内蒙古东部边缘、新疆西北部以及黄土高原西部。类似地,草地枯黄期与强降水量(R95p)和极强降水量(R99p)呈正相关关系的区域分别占整个研究区的54.0%和 53.1%,主要分布在新疆西北部和内蒙古中东部地区,其中呈显著正相关的区域占比分别为 5.1%和 3.3%。

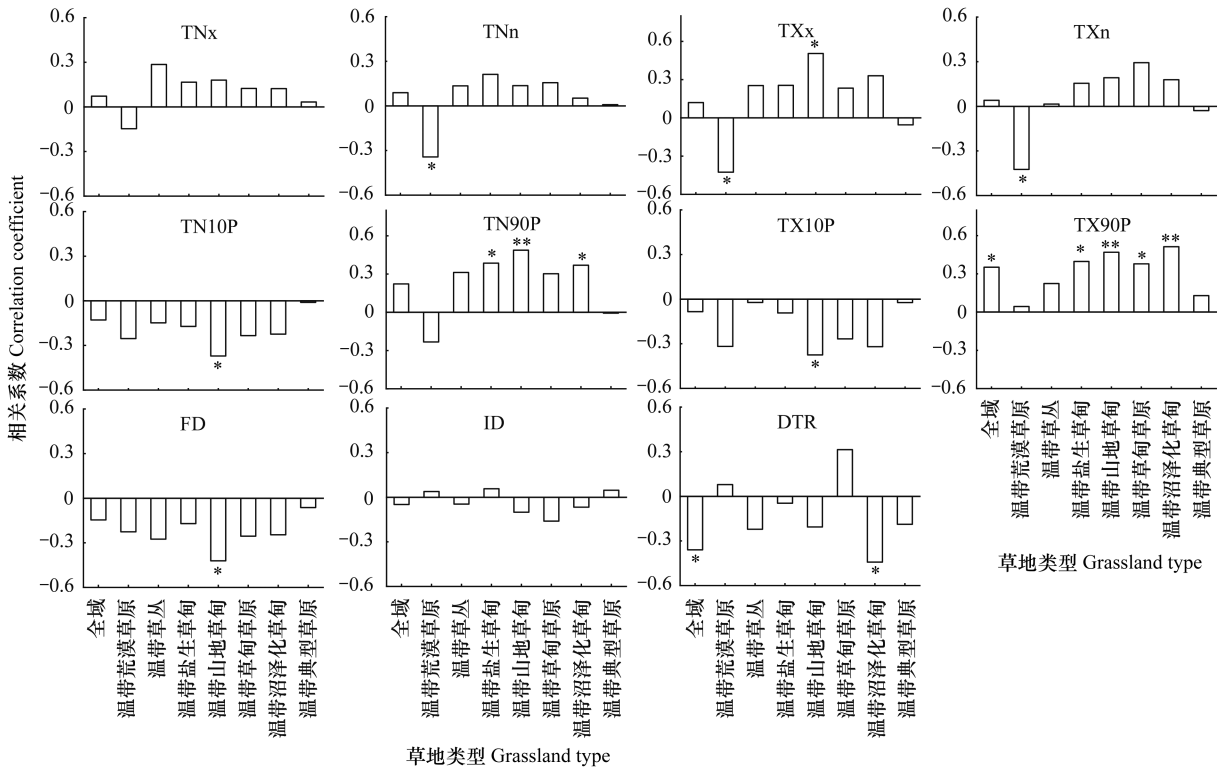


图9 中国温带不同草地类型枯黄期与极端温度事件相关关系

Fig.9 Correlation between EGS and extreme temperature indices of different grassland types in the temperate China

* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

表4 中国温带草地枯黄期与极端降水事件相关性统计

Table 4 Statistics on the correlation between EGS and extreme precipitation indices in temperate grassland in China

代码 ID	相关关系 Correlation relationship/%			
	正相关	显著正相关	负相关	显著负相关
	Positive correlation	Significant positive correlation	Negative correlation	Significant negative correlation
CDD	51.1	2.9	43.6	2.3
CWD	48.9	4.7	44.2	2.2
RX1day	47.6	4.2	45.5	2.7
RX5day	49.0	4.9	43.0	3.1
R95p	48.9	5.1	42.3	3.6
R99p	49.8	3.3	43.5	3.4

就不同草地类型 EGS 与极端降水事件的相关关系而言(图 11),温带荒漠草原、温带草丛、温带山地草甸和温带沼泽化草甸的枯黄期与 CDD 均表现出了不显著正相关关系;而与 CDD 表现出负相关关系的草地类型包括了温带盐生草甸、温带草甸草原和温带典型草原,其中 CDD 与温带典型草原枯黄期的负相关关系通过了置信度 95%显著性水平检验。从草地 EGS 与 CWD 的相关关系来看,温带盐生草甸的枯黄期与 CWD 呈现出显著正相关关系($P<0.05$),而温带草丛、温带草甸草原和温带典型草原的枯黄期与 CWD 的正相关性相对较弱;剩余草地类型则与 CWD 表现出负相关关系,其相关系数在-0.3—0 之间。不同极端降水强度指标与研究区各草地类型枯黄期整体的相关性较弱,但相关关系呈现较为复杂的态势。RX1day 与草地枯黄期整体表现出不显著负相关关系,但 RX1day 的增加可能会延迟温带草丛、温带草甸草原和温带荒漠草原的枯黄期。类似地,仅有温带草丛、温带荒漠枯黄期与 RX5day 呈不显著正相关关系,其它草地类型的枯黄期则与之表现出

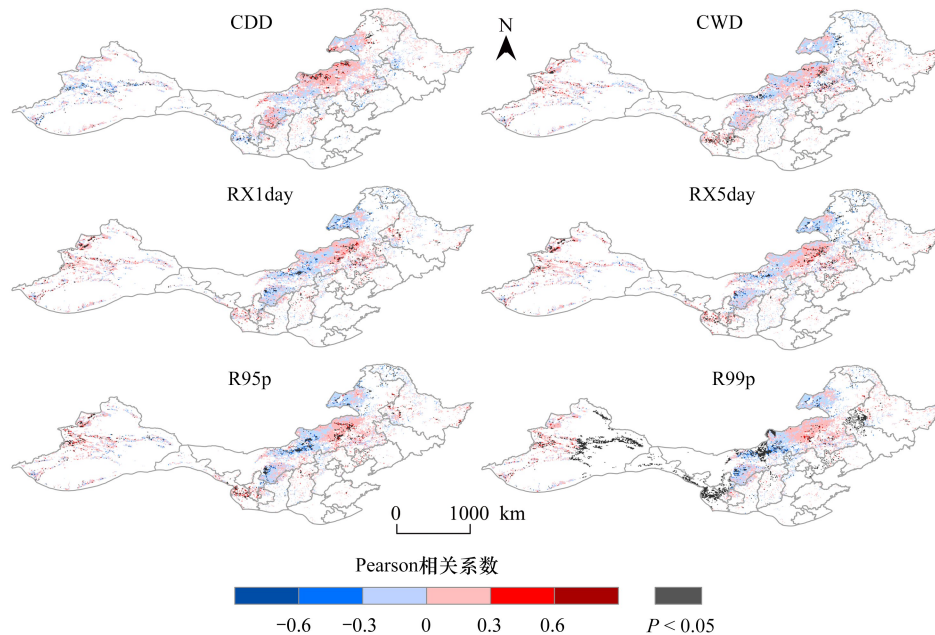


图 10 中国温带草地枯黄期与极端降水指数的相关关系空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of the correlation between EGS and extreme precipitation indices in temperate grassland in China

CDD:持续干旱日数 Maximum length of dry spell; CWD:持续湿润日数 Maximum length of wet spell; RX1day: 单日最大降水量 maximum 1-day precipitation; RX5day: 连续 5 日最大降水量 maximum consecutive 5-day precipitation; R95p:强降水量 Annual total PRCP when RR > 95p; R99p:极强降水量 Annual total PRCP when RR > 99p

不同程度的负相关关系。同样地,仅有温带荒漠草原、温带草甸草原的枯黄期与 R95p 和 R99p 呈现微弱的正相关关系,其余草地类型的枯黄期则与 R95p、R99p 表现为微弱的负相关关系。

3.3.3 极端气候事件对温带草地枯黄期的重要性测定

基于随机森林回归模型测定了各个极端气候指标对研究区全域和不同草地类型枯黄期的重要性,其结果如图 12 所示。由图可知,持续干旱日数(CDD)、气温日较差(DTR)和暖夜日数(TN90P)对整个研究区的草地枯黄期的重要性在 17 个极端指标中排名前三。从草地类型的视角来看,温带草甸草原主要受到气温日较差(DTR)的影响,日最高气温的最大值(TX_x)对温带山地草甸和温带沼泽化草甸的枯黄期具有重要影响,而温带草丛的枯黄期则受到日最低气温的最大值(TN_x)的强烈作用;持续湿润日数(CWD)和 CDD 分别会对生长在干旱地区的温带盐生草甸和温带典型草原的枯黄期产生较为强烈的作用。出乎意料的是,TN90P 对受水分限制的温带荒漠草原的枯黄期的重要性超过其它极端气候指标。

4 讨论

利用遥感卫星数据获取长期、连续以及大尺度植被物候信息是物候研究的主要手段,对遥感物候反演结果进行验证也是检验物候信息精确度的重要过程。已有大量研究基于地面物候观测数据、通量观测塔数据、近地面物候相机观测数据以及无人机监测数据对遥感物候反演信息验证^[30]。其中,地面物候观测数据验证既是最直接的验证方法^[37],也是目前算法验证和产品真实性检验中最广泛使用的方法^[38—40]。因此,本文对使用的地面物候观测数据进行相应的转换,验证基于 GIMMS NDVI3g 遥感数据反演获取的研究区草地枯黄期信息,结果表明两者的拟合优度达到了 0.41 ($P < 0.05$),意味着该结果相对可靠。尽管地面物候观测数据准确度高,但该方法监测主要基于个体尺度,而遥感物候监测的是数米甚至数公里像元尺度的植被物候特征^[41],两者之间存在尺度差异,因此在后续的研究中探索合适的尺度转换方法,统一地面和遥感物候空间信息十分

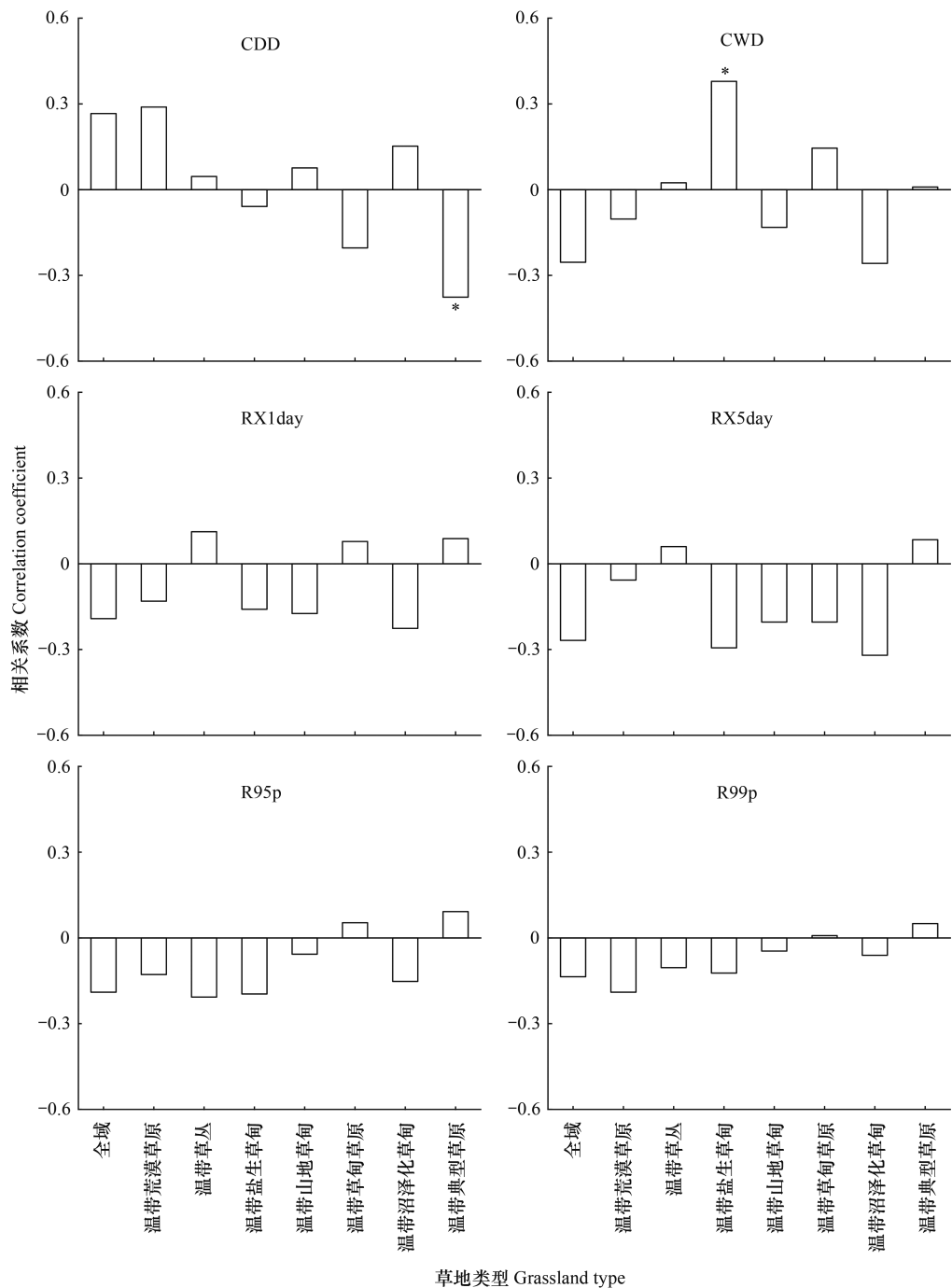


图 11 中国温带不同草地类型枯黄期与极端降水事件相关性

Fig.11 Correlation between EGS and extreme precipitation indices of different grassland types in the temperate China

有必要。

植被通过调节自身的形态结构和生长策略来逐渐适应所处的生长环境,从而达到最大化地利用环境资源的目的^[42]。然而,当极端气候事件发生时,植被对环境的适应平衡将会被打破,这将间接地影响植被的发育机制、生长态势以及分布格局^[43]。本研究的结果显示,表征暖的极端温度事件与我国温带草地枯黄期在空间上分别表现出广泛正相关关系,主要包括,暖夜日数(TN90P)、暖昼日数(TX90P)、日最高气温的最大值(TX_x)和日最低气温的最大值(TN_x);相比之下,草地枯黄期与表征冷的极端温度事件,如日最低气温的最小

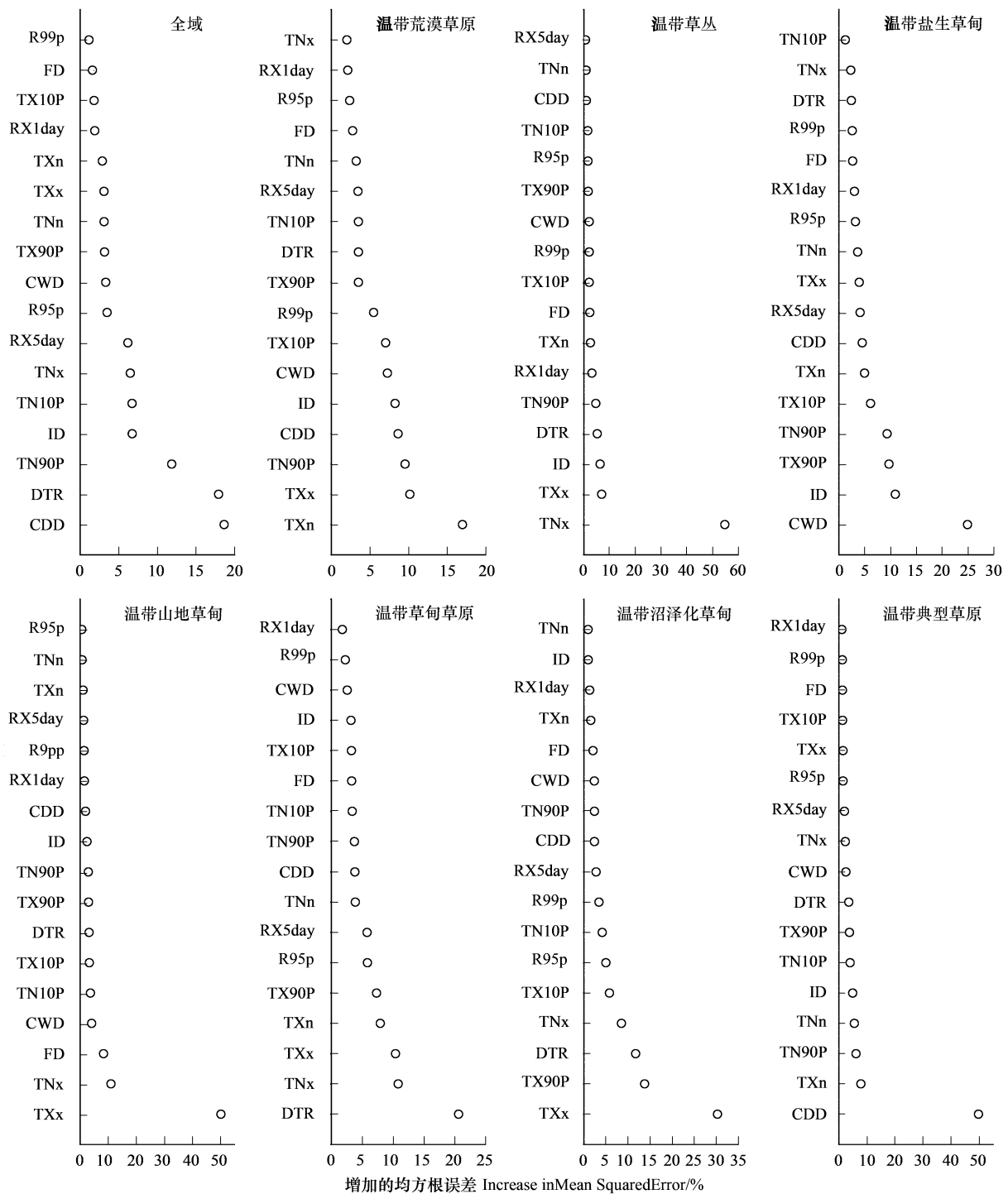


图 12 17 个极端气候指数相对于不同草地类型枯黄期的重要性

Fig.12 Importance of 17 extreme climate indices relative to the EGS of difference grassland types

值(TNn)、日最高气温的最小值(TXn)、冷昼日数(TX10P)和冷夜日数(TN10P),呈现出较为模糊的相关关系(正负相关比例基本一致)。这一方面说明白天和夜间温度的升高在定程度上可以枯黄期延迟,另一方面则表明我国温带草地植被物候受温度影响较大。霜冻天数(FD)和冰冻天数(ID)对枯黄期的影响比较强烈,两个指标的天数增加会诱发枯黄期提前。这主要是植被受到自身进化机制调控造成的^[44],即,植被为了避免不利环境带来的损害会提前结束生长。

从不同草地类型来看,除了温带荒漠草原外, TN_x 、 TN_n 、 TX_x 和 TX_n 的增加几乎对所有草地类型枯黄期均起到了延迟作用。气温日较差(DTR)对不同草地类型的枯黄期的影响存在差异性,这一方面是因为 DTR 受到温度波动的大小的影响,会对植被的强制休眠产生作用,从而影响发芽的频率^[45];另一个解释原因是由于 DTR 是通过计算日最高气温和日最低气温之间的差值获得的,因此 DTR 对枯黄期的影响要追溯到日最高气温和日最低气温的影响。

极端降水事件对研究区草地枯黄期的影响相对较为复杂。虽然研究区草地枯黄期与极端降水强度指标(RX1day、RX5day、R95p、R99p)和持续时间指标(CDD、CWD)呈正相关关系的像元比例略微高于呈负相关关系的像元比例,但不同草地类型的枯黄期却对极端降水事件的响应存在较大差异。温带盐生草甸、温带荒漠草原、温带草丛、温带山地草甸和温带沼泽化草甸的枯黄期与 CDD 均表现出了不显著正相关关系,这与黄文琳等^[46]以内蒙古高原为研究区的研究结果一致。出现这种情况的原因可能是 CDD 通过影响气温来对枯黄期产生作用。此外,研究结果表明温带荒漠草原与 CDD 的正相关性高于其它草地类型,这可能是因为多年生草本植物是温带荒漠草原的主要组成部分,随着对于干旱气候的适应,该草地类型因此耐旱性更高^[47-49]。同时,植被通过调节气孔导度来减少蒸腾作用^[50],并在干旱季节或干旱期间通过改变其分支模式来维持最小的代谢活性^[51]。这些适应措施意味着荒漠草原无法在雨季有效利用多余的水,所以这也能解释温带荒漠草原枯黄期与其它几个极端降水指标呈负相关关系。另外,研究结果表明温带草甸草原和温带典型草原的枯黄期与 CDD 表现出负相关关系,与 RX1day、RX5day、R95p 和 R99p 呈现不同强度的正相关关系,这是由于温带草甸草原和温带典型草原的功能和活动在很大程度上依赖水分可利用性所造成。生长在半湿润地区的温带沼泽化草甸、温带山地草甸的枯黄期与各个极端降水指标的相关关系大多以负相关关系为主,这是因为过度的极端降水会造成植被厌氧从而加速枯黄期的到来^[52-53]。出乎意料的是,结果显示生长在干旱地区的温带盐生草甸与极端降水事件均表现出了负相关关系,这是由于该草地类型是以适盐、耐盐或抗盐的优势种组成,土壤中的盐分含量在一定程度上是该类植被发育不可或缺的要害,过度的降水输入可能会短暂的起到稀释地下水盐碱度的作用,从而影响其枯黄期的发生时间。通过上述讨论可以发现,不同草地类型枯黄期对极端降水事件的响应机制较为复杂,值得后续深入研究和探讨。

5 结论

本研究基于 1982—2015 年 GIMMS NDVI3g 长时间遥感数据提取了中国温带草地 EGS 参数,分析其多年时空变化特征,并结合日最高最低气温和降水数据、利用随机森林模型探究了研究区草地 EGS 对极端温度事件和降水事件的响应特征。具体结论如下:

(1) 中国温带草地植被多年平均 EGS 集中发生在第 270—290 天左右(即 9 月下旬到 10 月中旬),空间分布上呈中部发生时间晚、西部和东部发生时间早的特征。

(2) 1982—2015 年,中国温带草地 EGS 以 0.047day/a 的速率延迟($P>0.05$),同一时期,仅有温带荒漠草原 EGS 以 0.12day/a 的速率呈显著提前($P<0.05$)。空间上,EGS 呈显著延迟的区域主要分布在新疆天山、阿尔泰山一带、准噶尔盆地西部、黄土高原北部、呼伦贝尔高原的西部以及东北小兴安岭一带。

(3) 表征暖的极端温度事件与我国温带草地 EGS 表现出广泛的正相关关系;多数表征冷的极端温度事件与草地 EGS 则呈现出较为模糊的相关关系。相比之下,不同强度的极端降水事件与草地枯黄期没有较为明显的相关关系。就草地类型而言,不论夜间或者白天表征强度的极端温度事件的增加都几乎对所有草地类型枯黄期均起到延迟作用。表征暖的极端温度频率指标对所有草地类型的枯黄期起到延迟作用,而表征冷的极端温度频率指标则恰好相反。极端降水事件与枯黄期发生时间存在较为复杂的关系,与草地自身的生理策略和所处环境有很大关系。

(4) 在众多极端气候指标中,持续干旱日数、气温日较差和暖夜日数对全域草地 EGS 动态变化的重要性最强。

参考文献 (References):

- [1] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系——基于遥感数据和物候资料的分析. 植物生态学报, 2004, 28(4): 499-506.
- [2] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. 生态学报, 2006, 26(3): 923-929.
- [3] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 169: 156-173.
- [4] Keenan T F, Gray J, Friedl M A, Toomey M, Bohrer G, Hollinger D Y, Munger J W, O'Keefe J, Schmid H P, Wing I S, Yang B, Richardson A D. Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. Nature Climate Change, 2014, 4(7): 598-604.
- [5] Keenan T F, Richardson A D. The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology: implications for predictive models. Global Change Biology, 2015, 21(7): 2634-2641.
- [6] 董晓宇, 姚华荣, 戴君虎, 朱梦瑶. 2000—2017 年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响. 地理科学进展, 2020, 39(1): 24-35.
- [7] 丛楠, 张扬建, 朱军涛. 北半球中高纬度地区近 30 年植被春季物候温度敏感性. 植物生态学报, 2022, 46(2): 125-135.
- [8] Piao S L, Liu Q, Chen A P, Janssens I A, Fu Y S, Dai J H, Liu L L, Lian X, Shen M G, Zhu X L. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. Global Change Biology, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [9] Shen M G, Piao S L, Cong N, Zhang G, Janssens I A. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3647 - 3656.
- [10] Yuan M X, Zhao L, Lin A W, Li Q J, She D X, Qu S. How do climatic and non-climatic factors contribute to the dynamics of vegetation autumn phenology in the Yellow River Basin, China? Ecological Indicators, 2020, 112: 106112.
- [11] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. Science, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [12] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1321-1334.
- [13] Crabbe R A, Dash J, Rodriguez-Galiano V F, Janous D, Pavelka M, Marek M V. Extreme warm temperatures alter forest phenology and productivity in Europe. Science of the Total Environment, 2016, 563/564: 486-495.
- [14] Hong Y, Zhang H Y, Zhao J J, Shan Y, Zhang Z X, Guo X Y, Wu R H, Deng G R. 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, 2020, 111: 105974.
- [15] JENTSCH ANKE KREYLING JUERGEN BOETTCHER-TRESCHKOW JEGOR BEIERKUHNLEIN CARL. Beyond gradual warming: extreme weather events alter flower phenology of European grassland and heath species. Global Change Biology, 2009, 15(4): 837-849.
- [16] Nagy L, Kreyling J, Gellesch E, Beierkuhnlein C, Jentsch A. Recurring weather extremes alter the flowering phenology of two common temperate shrubs. International Journal of Biometeorology, 2013, 57(4): 579-588.
- [17] He Z B, Du J, Chen L F, Zhu X, Lin P F, Zhao M M, Fang S. Impacts of recent climate extremes on spring phenology in arid-mountain ecosystems in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260/261: 31-40.
- [18] Kang W, Wang T, Liu S. The Response of vegetation phenology and productivity to drought in semi-arid regions of Northern China. Remote Sensing, 2018, 10(5): 727.
- [19] Xie Y Y, Wang X J, Silander J A Jr. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(44): 13585-13590.
- [20] 高滢, 孙虎, 徐崑尧, 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.
- [21] 岳天祥, 范泽孟. 典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究. 科学通报, 2014, 59(3): 217-231.
- [22] 何玉杰, 孔泽, 卢晓, 张江, 王猛, 彭长辉, 朱求安. 水热条件分别控制了中国温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势. 生态学报, 2022, 42(2): 766-777.
- [23] 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. 生态学报, 2021, 41(16): 6600-6612.
- [24] 侯学会, 牛铮, 高帅. 近十年中国东北森林植被物候遥感监测. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 515-519.
- [25] Liu Q, Fu Y H, Zeng Z Z, Huang M T, Li X R, Piao S L. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. Global Change Biology, 2016, 22(2): 644-655.

- [26] Shen M G, Zhang G, Cong N, Wang S, Kong W, Piao S L. 2014. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai - Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189, 71 - 80.
- [27] Tan B, Morisette J T, Wolfe R E, Gao F, Ederer G A, Nightingale J, Pedelty J A. An enhanced TIMESAT algorithm for estimating vegetation phenology metrics from MODIS data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(2): 361-371.
- [28] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): evaluation of global patterns and comparison with *in situ* measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2006, 111(4).
- [29] Zeng L L, Wardlaw B D, Xiang D X, Hu S, Li D R. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111511.
- [30] 王敏钰, 罗毅, 张正阳, 谢巧云, 吴小丹, 马轩龙. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展. *遥感学报*, 2022, 26(3): 431-455.
- [31] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [32] 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. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4099-4107.
- [33] 张煦庭. 中国温带地区草地植被动态时空特征及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [34] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [35] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [36] 余文梦, 张婷婷, 沈大军. 基于随机森林模型的我国县域碳排放强度格局与影响因素演进分析. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2788-2798.
- [37] 竺可桢宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973.
- [38] Hmimina G, Dufrêne E, Pontailier J Y, Delpierre N, Aubinet M, Caquet B, de Grandcourt A, Burban B, Flechard C, Granier A, Gross P, Heinesch B, Longdoz B, Moureaux C, Ourcival J M, Rambal S, Saint André L, Soudani K. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: an investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132: 145-158.
- [39] Ganguly S, Friedl M A, Tan B, Zhang X Y, Verma M. Land surface phenology from MODIS: characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1805-1816.
- [40] Xiao W W, Sun Z G, Wang Q X, Yang Y H. Evaluating MODIS phenology product for rotating croplands through ground observations. 2013: 073562.
- [41] Reed B C, Schwartz M D, Xiao X M. Remote sensing phenology//Noormets A. *Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research*. New York, NY: Springer, 2009: 231-246.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Yuan M X, Zhao L, Lin A W, Wang L C, Li Q J, She D X, Qu S. Impacts of preseason drought on vegetation spring phenology across the Northeast China Transect. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140297.
- [45] Lambers H, Chapin III F S, Pons T L. *Plant physiological ecology*. New York: Springer, 2008.
- [46] 黄文琳, 张强, 孔冬冬, 顾西辉, 孙鹏, 胡畔. 1982—2013 年内蒙古地区植被物候对干旱变化的响应. *生态学报*, 2019, 39(13): 4953-4965.
- [47] Grime J P, Brown V K, Thompson K, Masters G J, Hillier S H, Clarke I P, Askew A P, Corker D, Kielty J P. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. *Science*, 2000, 289(5480): 762-765.
- [48] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant[J]. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(3): 239-264.
- [49] Yang Y T, Guan H D, Batelaan O, McVicar T R, Long D, Piao S L, Liang W, Liu B, Jin Z, Simmons C T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23284.
- [50] Konings A G, Williams A P, Gentine P. Sensitivity of grassland productivity to aridity controlled by stomatal and xylem regulation. *Nature Geoscience*, 2017, 10(4): 284-288.
- [51] Guo W, Li B, Zhang X, Wang R. Architectural plasticity and growth responses of *Hippophae rhamnoides* and *Caragana intermedia* seedlings to simulated water stress. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69(3): 385-399.
- [52] Chen Z M, Xu Y H, Zhou X H, Tang J W, Kuzyakov Y, Yu H Y, Fan J L, Ding W X. Extreme rainfall and snowfall alter responses of soil respiration to nitrogen fertilization: a 3-year field experiment. *Global Change Biology*, 2017, 23(8): 3403-3417.
- [53] 李建国, 袁冯伟, 赵宴青, 刘丽丽. 中国东部沿海地区暴雨对植被活动的影响. *地理科学*, 2020, 40(2): 324-334.