

中国草地 NDVI 时空动态对多尺度干旱的响应

刘洋洋¹, 任涵玉¹, 呼天明¹, 杨培志¹, 巴桑参木决¹,

张伟¹, 张志新¹, 温仲明¹, 章钊颖²

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023)

摘 要:草地对干旱的响应较其他植被类型更为敏感,且不同草地类型在不同气候区干旱的响应具有较大差异,因此分气候区探究不同草地类型对干旱的响应机制对草地资源保护具有重大意义。基于植被 Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)、草地覆被及标准化蒸散指数(SPEI)数据,分析 1982—2015 年中国不同气候区不同草地类型植被 NDVI 的时空动态及其与 SPEI 的关系,并确定 NDVI 与 SPEI 指标最大相关系数所对应的干旱时间尺度,结合气象数据探究气温、降水及水平衡因素对草地干旱响应的影响状况。结果表明:中国草地 NDVI 呈现出极显著增加趋势(0.004/a)。草地 NDVI 呈显著增加的比例为 15.62%,集中在华北平原地区、四川、云南、广西及西藏的东南部地区。草地 SPEI 值呈不显著增加趋势(0.05/10 a),其中显著变干的区域集中在内蒙古中部和宁夏地区。草地 NDVI 与 SPEI 指数呈显著正相关的区域集中在内蒙古、青海省南部及新疆北部地带。内蒙古、新疆、青海省北部及西藏南部地区的草地 NDVI 对干旱响应的的时间尺度较短,而青海东南部及西藏中部草地 NDVI 对干旱响应的的时间尺度较长。高山亚高山草甸和草甸区域植被 NDVI 与 SPEI 的相关性最强,且对干旱的响应时间尺度较长,而荒漠草地对干旱的响应时间尺度较短;与湿润区域相比,干旱区域草地 NDVI 与 SPEI 的相关性更强,且对干旱响应的的时间尺度更短。降水是草地响应干旱的最主要因素,水平衡次之,而气温的影响较小。

关键词:多时间尺度; SPEI 指数; 最大相关系数; 干旱响应尺度

中图分类号:K903

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0153-09

Spatiotemporal Dynamics of NDVI of Grassland and Its Response to Multi-Scale Drought in China

LIU Yangyang¹, REN Hanyu¹, Hu Tianming¹, Yang Peizhi¹, BASANG Canmujue¹,

ZHANG Wei¹, ZHANG Zhixin¹, WEN Zhongming¹, ZHANG Zhaoying²

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2.International Institute for Earth System Sciences, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The response of grassland to drought is more sensitive than other vegetation types, and the responses of different grassland types to drought in different climate regions are quite different. Therefore, it is of great significance to explore the response mechanism of different grassland types to drought in different climate regions for grassland resource protection. Based on vegetation NDVI data, grassland cover data and multi-scale SPEI index, the temporal and spatial dynamic trend of vegetation NDVI and its relationship with SPEI in different climatic regions (arid, semi-arid, semi humid and humid) and different grassland types from 1982 to 2015 were analyzed, and the drought time corresponding to the maximum correlation coefficient between NDVI and SPEI index in different climatic regions and grassland types was determined by combining with meteorological data, the effects of temperature, precipitation and water balance on grassland drought

收稿日期:2021-01-11

修回日期:2021-01-28

资助项目:西北农林科技大学博士科研启动项目(2452020186);陕西省林业科学院科技创新计划专项(SXLK2020-0204);中国博士后科学基金(2020M683594)

第一作者:刘洋洋(1991—),男,河南洛阳人,博士,副教授,主要从事草地遥感及陆地生态系统碳循环等研究。E-mail:hnlycbtks@163.com
任涵玉(1996—),女,甘肃白银人,博士,研究方向为草地遥感。E-mail:1805223632@nwfufu.edu.cn

通信作者:温仲明(1968—),男,陕西定边人,博士,研究员,主要从事黄土高原植被恢复与重建、草地生态恢复等有关研究工作。E-mail:zmwen@ms.iswc.ac.cn

response mechanism were explored. The results show that NDVI of grassland in China increased significantly (0.004/a). The average value of NDVI in humid area was the highest (0.37), and the average value of NDVI in arid area was the lowest (0.24). Grassland NDVI in each climate region showed a very significant upward trend, and the increase rate in humid area was higher than that in arid area. Grassland NDVI mainly significantly increased in the North China Plain, Sichuan, Yunnan, Guangxi and the southeast of Tibet. During this period, SPEI value of grassland area showed no significant increase trend (0.05/10 a), in which 26.67% of grassland area dried significantly, and concentrated in central Inner Mongolia and Ningxia. The areas with significant positive correlation between NDVI and SPEI index concentrated in Inner Mongolia, southern Qinghai Province and northern Xinjiang. The time scales of NDVI response to drought in Inner Mongolia, Xinjiang, northern Qinghai Province and southern Tibet were shorter, while those in southeastern Qinghai and central Tibet were longer. The correlation between NDVI and SPEI was the strongest in alpine and subalpine meadows and meadow regions, and the response time scale to drought was longer, while the response time scale of desert grassland to drought was shorter. Compared with the humid area, the correlation between NDVI and SPEI was stronger in arid area, and the response time scale to drought was shorter. Precipitation was the most important factor on grassland response to drought, followed by water balance and temperature.

Keywords: multi time scale; SPEI index; maximum correlation coefficient; drought response scale

中纬度地区气候的暖干化是造成全球干旱灾害频发的主要原因之一,IPCC 第 4 次评估报告指出气候暖干化所波及的范围将不断扩大^[1-2],干旱成为国内外广大气象学者所关注的焦点问题之一。干旱通过抑制植被生长、减少植被生物量或者直接造成植被死亡等方式对陆地生态系统碳平衡产生严重影响^[3]。尽管在全球变化背景下,干旱强度和范围在不断扩大,但陆地生态系统对干旱的潜在响应机制仍不明确^[4]。因植物个体防止水分流失的生理和结构特征的不同,且对干旱响应存在差异^[5],深入理解不同类型覆被对干旱的响应机制,便于促进对这些土地覆被的更有效管理^[6]。

草地是中国主要的植被类型之一,在维持区域生态环境平衡和气候调节方面具有重要意义^[7]。研究表明草地对干旱的响应较其他植被类型更为敏感^[6,8],且不同气候区及不同草地类型对水分匮乏或气候干旱的抵抗力及恢复力稳定性具有较大差异,例如,草地生态系统长期暴露在干旱和半干旱环境中,因其形态和物候策略,往往在干旱条件结束时能够表现出很高的抗旱性和抗逆性^[9]。因此分气候区探究不同草地类型对干旱的响应机制对于草地资源的保护和抚育意义重大^[10]。Xu 等^[11]研究中国北方地区不同植被类型对多尺度时间干旱的响应,孔冬冬等^[6]也曾对中国不同植被类型对多尺度干旱事件的响应特征进行探究。然而,中国不同气候区及不同草地类型对多尺度干旱的响应机制尚不明确。标准化降水

蒸腾指数(SPEI)是基于气象数据且可以量化不同干旱类型的多标量干旱指数^[12],而植被归一化指数(NDVI)则被视为区域和全球尺度上表征植被绿色和活力的稳定指标^[13]。因此,本研究基于 NDVI 和 SPEI 数据分析 1982—2015 年中国不同气候区、不同草地类型植被 NDVI 的时空演变趋势,并计算不同气候区、不同草地类型植被 NDVI 和多尺度 SPEI 指数的最大相关系数,确定不同气候区及不同草地类型 NDVI 和 SPEI 指数的最大相关系数的干旱时间尺度,探究气温、降水和水平衡等因素对草地干旱响应的影响状况。

1 材料与方法

1.1 数据来源及处理

1.1.1 NDVI 数据 本研究利用两套 NDVI 遥感数据作为后续的模型驱动数据。第一种为全球监测与模型研究组(GIMMS)提供的 GIMMS NDVI 数据(1982—2006 年),该数据的时空分辨率分别为 15 d 和 8 km^[10-12]。另一种 NDVI 数据选用美国国家航空航天局(NASA)地球观测系统提供的 MOD13A2 产品(2001—2015 年),该数据的时空分辨率分别为 16 d 和 1 km,采用 MRT 工具实现数据格式的转换及数据的拼接、裁剪^[13-14]。采用最大合成法将 NDVI 数据合成为月 NDVI 数据用于后续研究^[15]。最终,在 ArcGIS 10.3 环境下对两种 NDVI 数据进行投影的转换及数据的重采样,数据统一选用 China_Lam-

bert_Conformal_Conic 投影,分辨率统一为 1 km。

1.1.2 草地类型数据 采用 Global Land Cover 2 000 (GLC2000) 产品提取中国草地覆被。GLC 2000 产品空间分辨率为 1 km,相对于 IGBP 分类数据而言分类精度更高,且草地精度高达 66.95%^[2,12],同时与中国的 2000 年 1:10 万土地分类数据具有较

高的面积一致性,被广泛应用于区域或全球的植被研究中^[7]。该分类法中中国草地总面积为 335 万 km²,草地种类具体包括高山亚高山草甸(93.13 万 km²)、坡面草地(20.98 万 km²)、平原草地(41.99 万 km²)、荒漠草地(55.16 万 km²)、草甸(59.16 万 km²)、高山亚高山草地(64.58 万 km²)(图 1)。

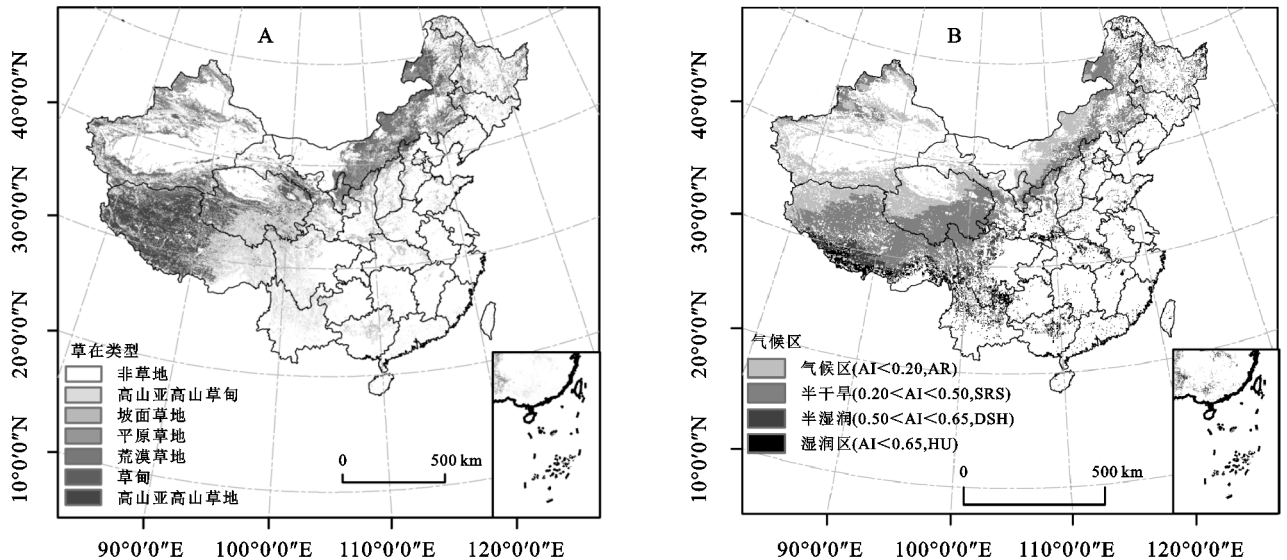


图 1 中国草地类型及草地生态系统气候区分布特征

1.1.3 SPEI 指数 全球尺度的 SPEI 数据从 SPEI base v.2.5 产品获得,时间序列为 1901—2015 年,空间分辨率为 0.5°,包括 1~48 个月尺度,可用来分析植被对干旱响应的快慢程度^[12]。本研究选取 1982—2015 年的 SPEI 指数来研究中国草地植被对干旱的响应状况。因本研究所选择的 SPEI 数据包括 1~48 个月尺度,研究表明,12 个月尺度的 SPEI 对水分响应的滞后性较长,可以有效地监测干旱的年际变化特征^[14-15]。

1.1.4 气象数据 气象数据源于中国气象数据共享网 1982—2015 年的中国 720 多个标准气象站点的月降水量、气温和蒸散数据^[16]。通过引入海拔及日照等协变量因子,基于 ANUSPLIN 程序实现气象数据的空间插值处理。

1.1.5 湿润度指数 (AI) 根据联合国环境规划署 (UNEP) 提出的标准格式,湿润度指数被定义为年均降水量和年潜在蒸散量的比值,被广泛应用于气候区和气候类型的划分。根据 UNEP 的干旱分类标准计算中国草原生态系统的湿润度指数,将中国草原生态系统划分为 4 个气候区以研究不同气候区草地覆盖的时空动态格局对气候变化的响应特征,气候区具体划分标准为:干旱区 (AI < 0.20, AR)、半干旱区 (0.20 < AI < 0.50, SAR)、半湿润区 (0.50 < AI < 0.65, DSH) 和湿润区 (AI > 0.65, HU)^[17]。图 1B 显示中

国草地生态系统 AI 指数的空间分布及气候区格局。

1.2 主要分析方法

1.2.1 趋势分析和 F 检验 基于一元线性拟合回归分析来研究 NDVI/SPEI 和气象因子在像元尺度上的时空变化率^[2]:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{Var}_i) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n \text{Var}_i)}{n \times (\sum_{i=1}^n i^2) - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

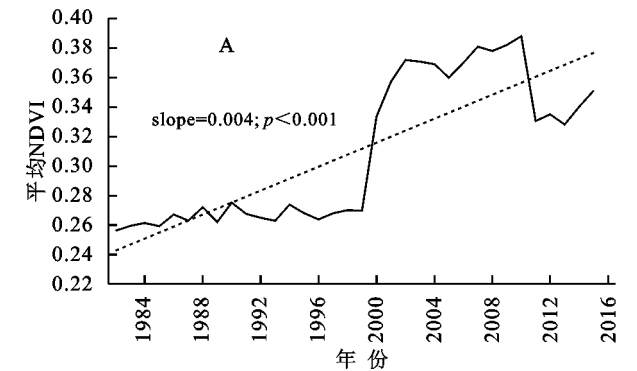
式中:slope 为斜率; i 为研究年限; Var_i 表示第 i 年的研究变量,主要为 NPP 和气象因子。如果 slope 小于 0 表示变量呈下降趋势,反之则呈现上升趋势^[2]。各个变量的变化率基于 F 检验来确定其变化的显著性^[2],依据 F 检验的结果,趋势可分为:(1) 极显著减少 (slope < 0, $p < 0.01$);(2) 显著减少 (slope < 0, $0.01 < p < 0.05$);(3) 未显著减少 (slope < 0, $p > 0.05$);(4) 未显著增加 (slope > 0, $p > 0.05$);(5) 显著增加 (slope > 0, $0.01 < p < 0.05$);(6) 极显著增加 (slope > 0, $p < 0.01$)。此外,采用 Mann-Kendall 检验对 NDVI 和 SPEI 的年际变化趋势进行突变点监测分析^[4]。

1.2.2 最大相关系数 NDVI 与 SPEI 的年最大相关系数能够表征植被活动对干旱的响应程度,而两者的年最大相关系数出现时所对应的月时间尺度能够反映植被活动对不同时间尺度干旱响应的敏感程

度^[8,15]。NDVI 与 SPEI 的年最大相关系数所对应的月时间尺度越短,则植被对于干旱的响应速度越快,且植被对于干旱的恢复力及抵抗力稳定性较弱,反之则响应速度越慢,且这种恢复力和抵抗力稳定性越强^[6]。本研究基于 Pearson 相关系数来分析草地 NDVI 与 SPEI 指数的相关程度。分别计算各像元 12 个 NDVI 值与 1~48 个月尺度下 SPEI 值的相关系数,进而可以获得 576 个相关系数值^[15]。为了排除物候对研究结果的干扰,将每个像元处 576 个相关系数的最大值定义为该像元处的年最大相关系数,进而将月相关系数整合为年相关系数^[10]。本研究将年最大相关系数所对应的时间尺度定义为 Rtime-scale。计算方式如下^[6,8]:

$$R_{m,n} = \text{COR}(\text{NDVI}_n, \text{SPEI}_{m,n});$$
$$R_{\max} = \max_{1 \leq m \leq 48, 1 \leq n \leq 12} (R_{m,n}) \quad (2)$$

式中: $R_{m,n}$ 表示 NDVI 与 SPEI 的相关函数; R_{\max} 为最大相关系数; m 为时间尺度,1,2,...,48; n 为月份,1,2,...,



12。后续研究主要分析中国不同气候区及不同草地类型植被 NDVI 和 SPEI 的最大相关系数及其对应的时间尺度,探究草地对于干旱的响应特征及响应快慢程度。

2 结果与分析

2.1 中国草地 NDVI 的年际变化特征

草地区域多年气温均值为 0.31,最高值为 2010 年的 0.39,最小值为 1982 年的 0.26(图 2)。趋势上,草地 NDVI 呈现出波动增加的变化趋势,其中 1982—1999 年呈小幅增加趋势,而 1999 年之后 NDVI 陡然上升。

总体而言,34 a 间中国草地 NDVI 呈现出极显著增加的变化趋势($p < 0.001$),年均增长率为 0.004/a(图 2A)。MK 检验表明(图 2B),草地 NDVI 在 1988 年前呈现不显著增加的变化趋势,而 1988 年之后呈现出显著增加的变化趋势($p < 0.05$),此外,草地 NDVI 的 UF 和 UB 曲线于 1994 年相交,表明 NDVI 均值在 1994 年发生突变。

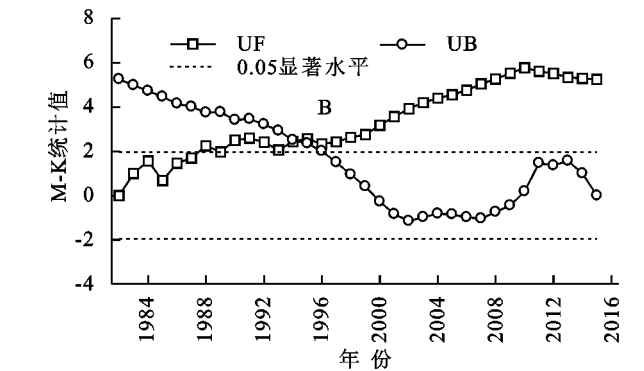


图 2 中国草地 NDVI 年际变化

从图 3 可以看出, HU 区域的 NDVI 均值最高(0.37),DSH 区域次之(0.35),而 AR 区域的平均 NDVI 值最低(0.24)。变化趋势上,各气候区草地 NDVI 的波动趋势与年变化趋势大致相符,在 1999 年之前呈现小幅波动增加趋势,但增加趋势并不明显,1999 年之后草地各个气候区的草地 NDVI 均陡然上升,随后呈现出大幅度的波动增加趋势。总体看来,各气候区草地 NDVI 均呈现出极显著上升趋势($p < 0.001$),其中 DSH 和 HU 区域 NDVI 的年际变化率较大(0.005/a),而 SAR 和 AR 区域 NDVI 的平均增加率相对较小(0.003/a)。

从图 4 可以看出,坡面草地的植被 NDVI 均值最高(0.33),高山亚高山草甸(0.31)和草甸次之(0.30),而高山亚高山草地的植被 NDVI 均值最低(0.14)。趋势上,6 种草地类型植被 NDVI 均值均表现为极显著增加趋势($p < 0.001$),其中坡面草地的年际平均变化率最大(0.005/a),高山亚高山草甸和草甸次之,其年际平均增加率分别为 0.004/a 和 0.003/a。

其余 3 种草地类型的植被 NDVI 年际平均变化率均为 0.002/a。

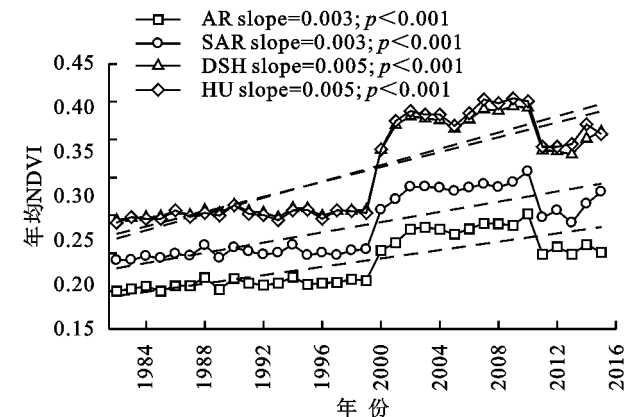


图 3 中国不同气候区草地 NDVI 年际变化趋势

2.2 中国草地 NDVI 的空间变化特征

从图 5A 可以看出,草地 NDVI 均值大于 0.4 的区域主要约占总草地面积的 34.7%,主要分布在青藏高原东部、云南省、广西省、黑龙江及内蒙古的呼伦贝尔地区。草地 NDVI 均值处于 0.2~0.4 之间的区域

集中在青藏高原中部地区、内蒙古中部地区及新疆中部和北部地区。图 5B 表明,1982—2015 年草地 NDVI 呈现出明显的减少趋势的区域主要分布在黄土高原北部等地,另在新疆北部地区及青藏高原的中西部地区也有分布,其中最大减少率可达 0.08/a,而中国青藏高原的东部地区及南方大部分地区的草地 NDVI 则均表现为增加趋势,而最大增速可达 0.06/a。图 5C 表明,23.49%的区域草地植被 NDVI 表现为增加趋势,其中草地 NDVI 显著增加区域主要集中在华北平原地区、四川、云南、广西及西藏的东南部,另在新疆中部地区也有零星分布。而草地 NDVI 呈现减少趋势的区域分布范围较大,主要集中在黄土高原北部及青藏高原中西部。

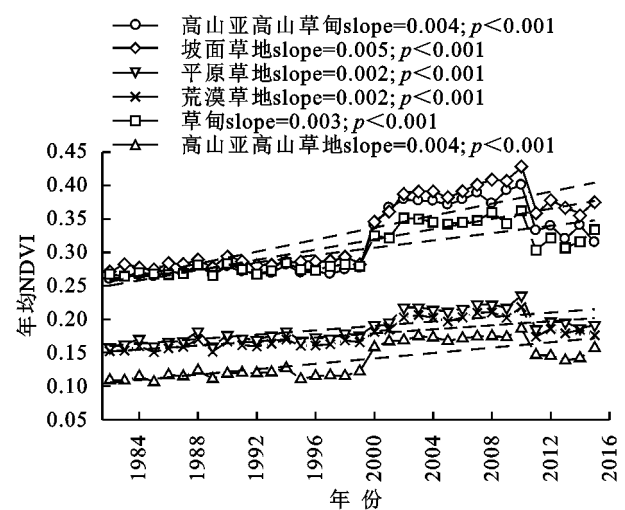


图 4 中国不同草地类型植被 NDVI 年际变化趋势

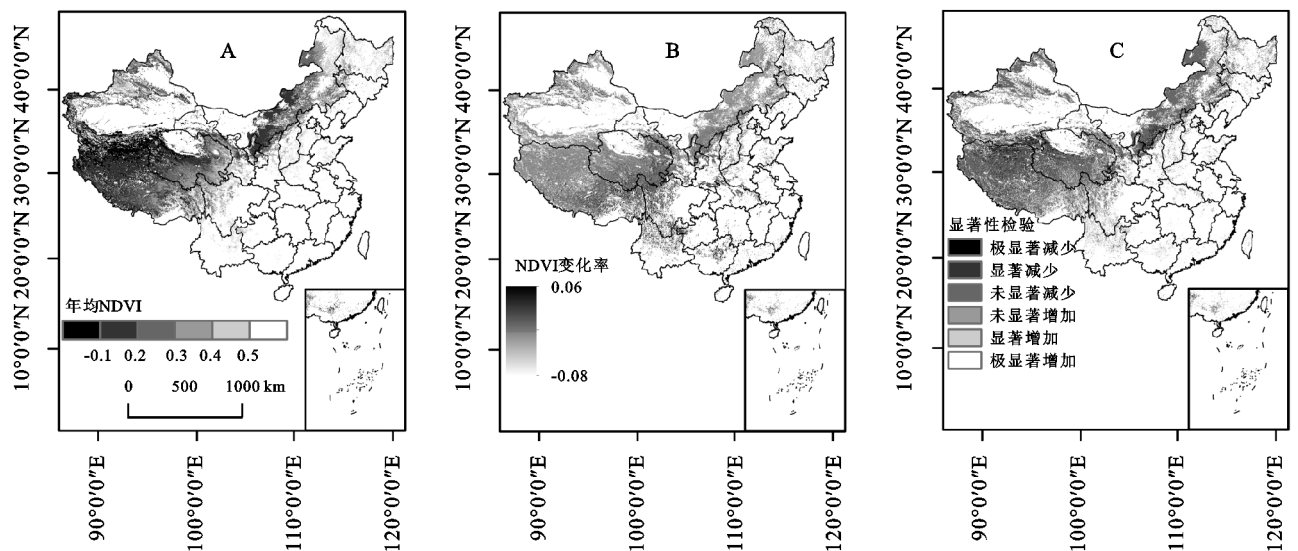


图 5 中国草地年均 NDVI、变化率和显著性检验的空间分布格局

2.3 中国草地区域干旱的时空变化趋势

从图 6 可以看出,34 a 间中国草地区域 SPEI 指数波动程度较大,呈现不显著增加趋势(0.05/10 a, $p > 0.05$),即近几十年草地区域呈现出不显著的变湿趋势。具体看来,1982—1987 年中国草地 SPEI 呈现减小趋势,由正值逐渐变为负值,说明干旱趋势增加,而 1987 年后 SPEI 指数不断增大,并于 1990 年增至最大值,1990 年为 34 a 间最湿润年,随后 SPEI 指数呈现不断下降趋势,并于 1995 年减少至最小值,1995 年为 34 a 间的最干旱年。1995 年之后 SPEI 指数呈现出波动上升的变化趋势,表明气候干旱有所缓解。MK 检验同样表明,UF 和 UB 曲线主要在 1988 年后相交,表明 1988 年后中国干旱趋势发生突变,草地区域由干旱转变为湿润,此后于 1993 年后相交,即 1993 年草地区域气候由湿润转变为干旱,而 1997 年后又由干旱转变为湿润。

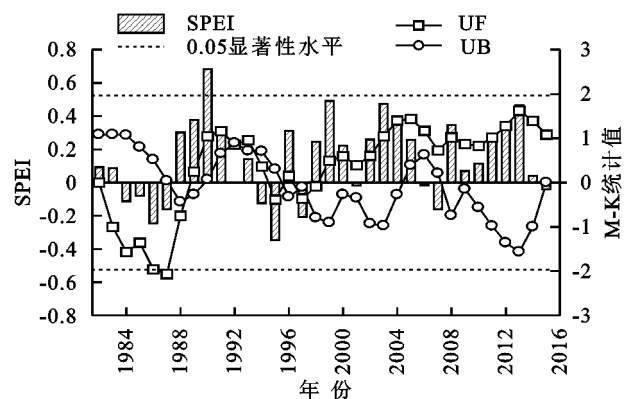


图 6 中国草地区域 SPEI 的年际变化趋势及其突变检验

从图 7A 可以看出,1982—2015 年年尺度 SPEI 变化率分布范围处于 $-0.09 \sim 0.12/10 \text{ a}$,SPEI 的平均变化率为 $0.07/10 \text{ a}$,气候状况总体呈现变湿趋势。草地区域干旱缓解的地区主要分布在新疆的中部及北部地区、青海省、四川西部地区以及西藏中部的大部分地区,其中 SPEI 的最大增加幅度为 $0.12/10 \text{ a}$,而干旱加剧的地区主要集中在内蒙古中部及东部的

大部分地区、宁夏地区、西藏的西部地区及云南省北部地区。

图 7B 表明,中国草地区域气候变干的区域主要

集中在内蒙古中部和宁夏地区。而草地区域气候变湿的区域则集中在新疆中部和北部及青藏高原大部分地区。

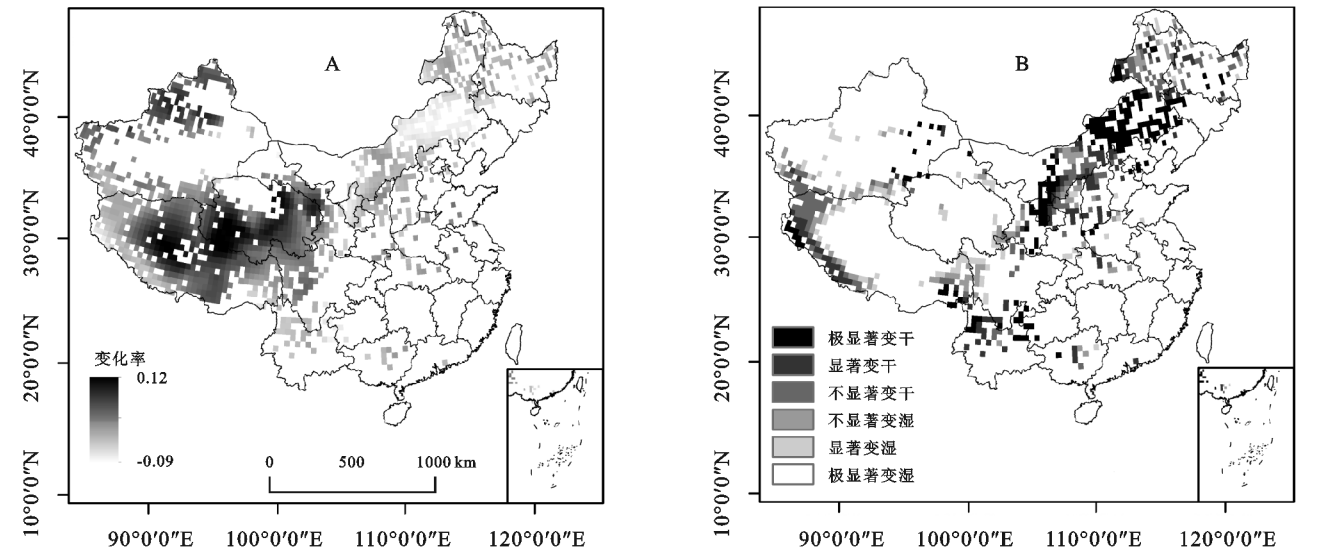


图 7 草地区域 SPEI 变化率及显著性空间分布

2.4 草地 NDVI 与 SPEI 的相关性及其对应的尺度

图 8A 表明,中国草地 NDVI 与 SPEI 指数呈正相关的区域占全国草地总面积的 75.16%,其中正相关系数达 0.6 以上的区域集中在内蒙古大部分地区、青海省北部、黄土高原北部及新疆北部地区,正相关系数于 0.4~0.6 之间的区域集中在青海省大部分地区、西藏中部偏西地区、华北平原地区及广西省。

图 8B 表明,草地 NDVI 与 SPEI 指数呈显著 ($p < 0.05$) 和极显著 ($p < 0.01$) 正相关的面积分别占全国草地总面积的 17.92% 和 32.39%,集中分布在内蒙古大部分地区、青海省南部及新疆北部地带;而草地 NDVI 与 SPEI 指数呈显著 ($p < 0.05$) 和极显著 ($p < 0.01$) 负相关的面积分别占全国草地总面积的 4.46%

和 3.62%,主要分布在西藏东南部、四川西部及云南等地。

图 8C 表示中国草地 NDVI 与 SPEI 的年最大相关系数所对应的月时间尺度。中国内蒙古地区、新疆地区、青海省北部及西藏南部地区的草地 NDVI 对 SPEI 响应的时间尺度较短,主要集中在 1~3 个月、3~6 个月及 6~9 个月的时间尺度内。而青海省南部及东部地区及西藏的中部地区草地 NDVI 对 SPEI 的响应的时间尺度较长,达 24~36 个月,主要由于该部分地区地貌以冰川、冻土为主,土壤水分除了受降水量影响之外,冻土消融及冰川融水对于土壤水分的变化也会产生重大影响,因而草地生长对于干旱响应的的时间尺度较长。

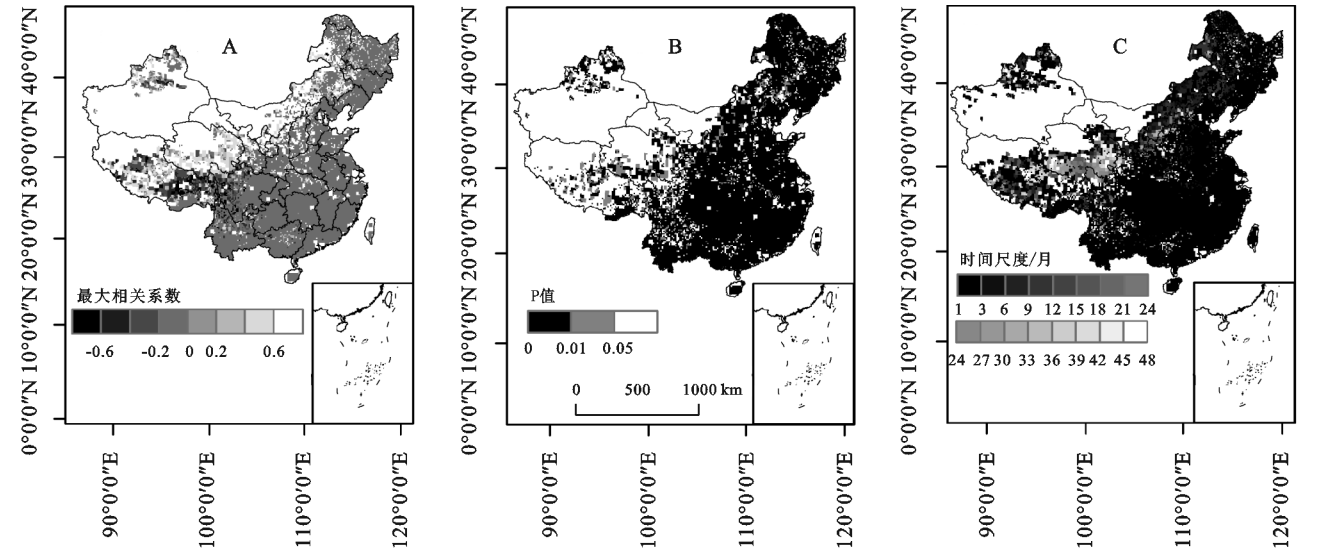
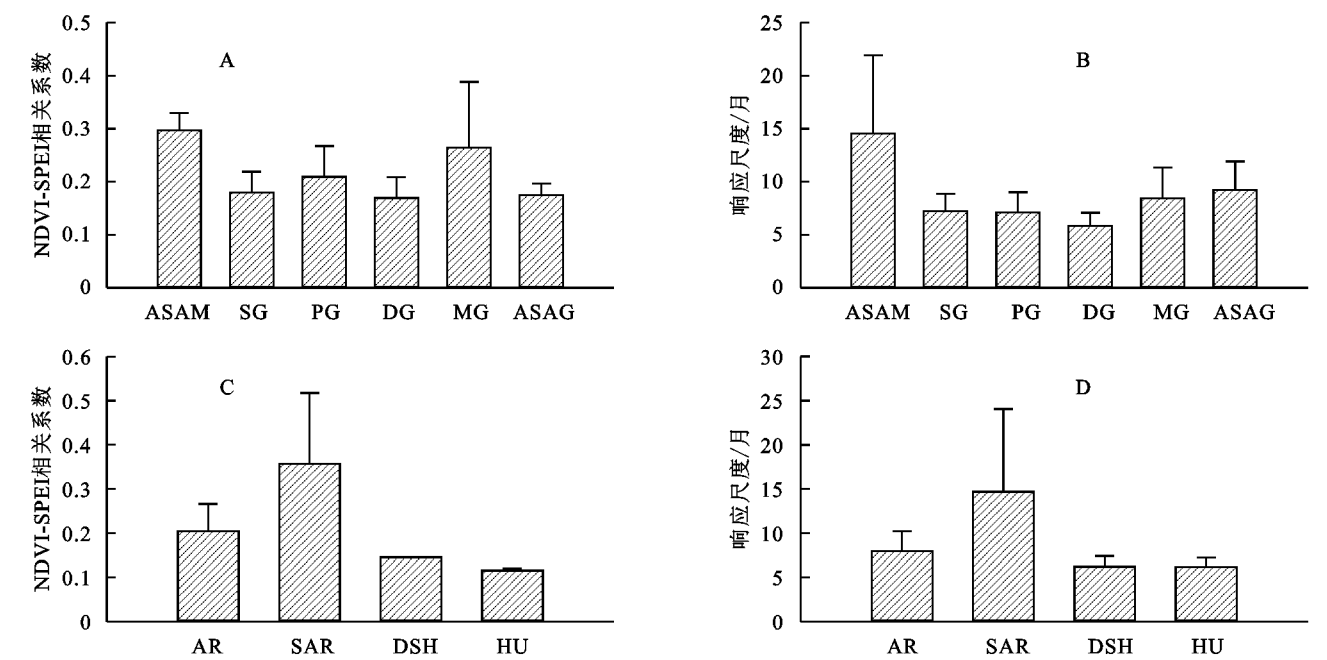


图 8 中国草地 NDVI 与 1—48 月尺度 SPEI 指数的年最大相关系数、显著性检验及其对应时间尺度的空间分布格局

图 9A 表明高山亚高山草甸与草甸植被 NDVI 与 SPEI 的最大相关系数较大,分别为 0.30,0.26,平原草地次之,而其余 3 种草地类型植被 NDVI 与 SPEI 的最大相关系数均在 0.18 左右。图 9B 表明,高山亚高山草甸植被 NDVI 对 SPEI 的干旱响应尺度最长(长达 14 个月尺度),高山亚高山草地和草甸次之(8~10 个月尺度之间),而其余 3 种草地类型植被 NDVI 对短时间

尺度的 SPEI 响应更为敏感。就不同气候区而言,半干旱区域草地 NDVI 与 SPEI 的最大相关系数最大(0.36),干旱区域次之(0.21),而湿润地区则相对较小(图 9C)。同样地,半干旱区域草地 NDVI 对 SPEI 的响应尺度较长(长达 14 个月尺度),干旱区域次之(8 个月尺度),而湿润地区草地 NDVI 对 SPEI 响应的响应尺度集中在 6 个月尺度左右(图 9D)。



注: ASAM 表示高山亚高山草甸; SG 表示坡面草地; PG 表示平原草地; DG 表示荒漠草地; MG 表示草甸; ASAG 表示高山亚高山草地; AR 表示干旱地区; SAR 表示半干旱地区; DSH 表示干旱和半湿润地区; HU 表示湿润地区。

图 9 不同草地类型及气候区草地 NDVI 与 SPEI 的最大相关系数及对应的尺度

2.5 气象因素及水平量衡对草地响应干旱的影响分析

由图 10A 可以看出,多年平均气温与草地 NDVI 和 SPEI 的相关性呈现出不显著的负相关关系($R = -0.29$),表明气温对于草地响应干旱的影响程度较弱,总体表现为气温较高的状况下,草地生长与气候干旱的相关性较低,诸如坡面草地;而对于高山亚高山草甸和草甸等气温较低区域,草地生长对于干旱的响应更为明显。图 10C 表明,草地区域多年平均降水与草地 NDVI 和 SPEI 的相关性呈现出不显著的正相关关系($R = 0.38$),表明降水对于草地干旱响应的影响较大,主要表现在对荒漠草地、高山亚高山草地及平原草地的植被干旱响应状况影响较小,而对降水较多的高山亚高山草甸植被生长的影响较大,但对于降水较多的坡面草地区域影响较小。图 10E 表明,多年水平衡对于草地响应干旱的影响也较大($R = 0.37$),但不显著,具体表现为对高山亚高山草甸和草甸区域的植被干旱响应影响较大,而对荒漠草地区域的植被干旱响应影响较小。综合以上分析,降水是草地干旱响应的最主要因素,水平衡次之,而气温对

于草地干旱响应的影响相对较小。

图 10B,D,F 表示气温、降水及多年平均水平衡对不同草地类型 NDVI 与 SPEI 的最大相关系数所对应的干旱时间尺度的影响状况。由图可知,气温、降水及水平衡对于草地响应干旱快慢程度的影响存在较大差异性。图 10B 表明,多年平均气温与最大相关系数所对应的时间尺度之间呈现不显著的负相关关系($R = -0.33$),即气温对于草地干旱响应快慢的影响并不明显,具体表现为随着气温的升高,不同草地类型植被 NDVI 对于 SPEI 的响应尺度将不断缩短,其中高山亚高山草甸的响应尺度最久,而荒漠草地的响应尺度较短。图 10D 表明,多年平均降水对于草地干旱响应尺度的影响较大,两者呈现出正相关关系($R = 0.47$),表现为降水缺乏的区域草地生长往往更容易被短时间尺度的干旱所影响,诸如荒漠草地等,而降水较多的高山亚高山草甸区域,植被 NDVI 对于 SPEI 的响应则集中在长时间尺度。图 10F 表明,水平衡对于草地干旱响应快慢的影响程度较弱,呈现出弱的正相关关系($R = 0.25$),体现为水

分亏损严重的地区草地生长对于干旱响应的时间尺度较短。综上分析,中国草地生长对于干旱响应快

慢的影响因素主要为降水,气温次之,而水平衡影响相对较小。

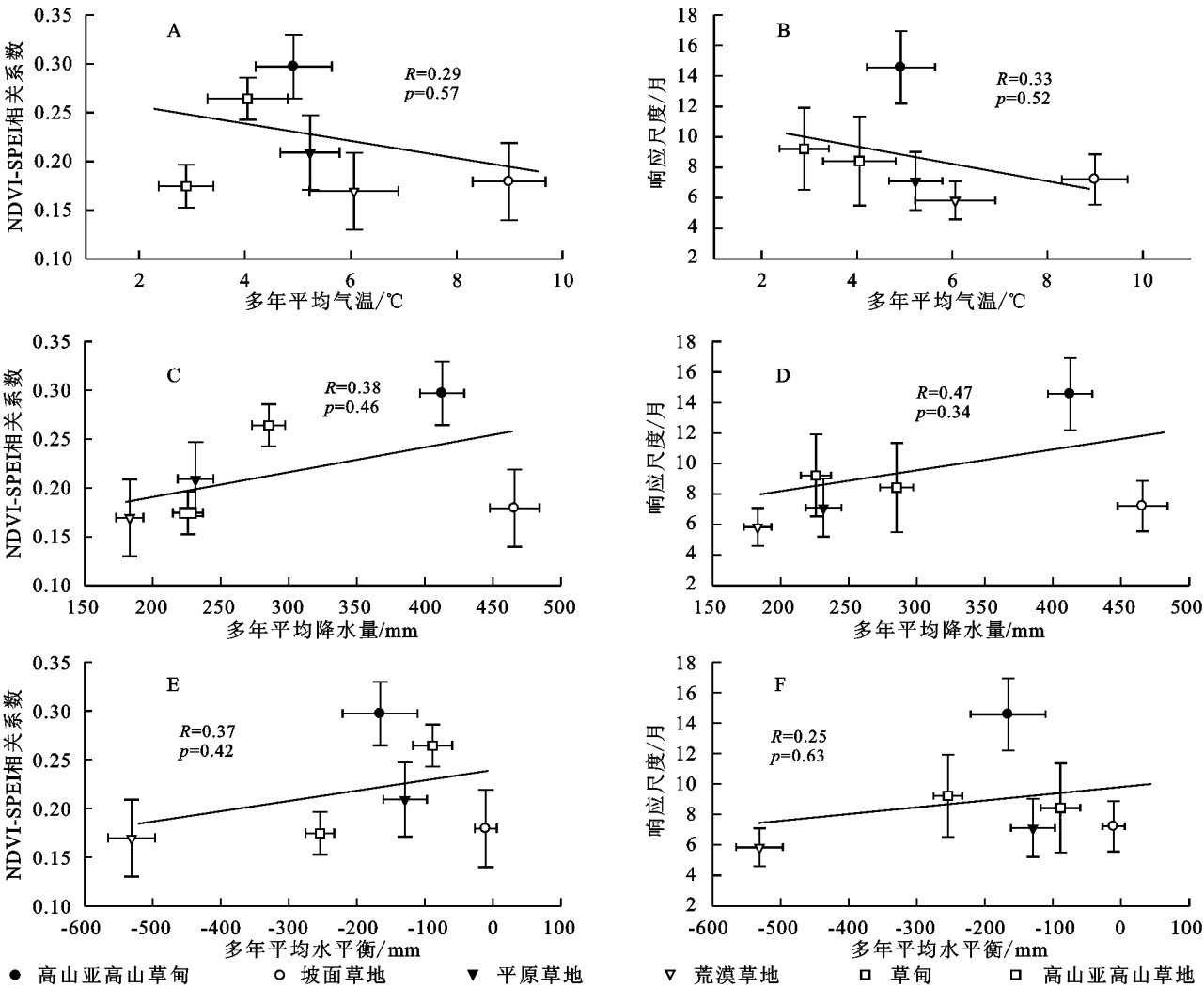


图 10 气温、降水及水平衡对中国草地植被 NDVI 与 SPEI 相关性及其最大相关系数所对应的尺度的影响特征

3 讨论

干旱频发对草地生态系统的生长及分布格局产生严重影响,不同气候区干旱的发生有较大差异,而不同草地类型对干旱的响应机制也有区别,研究不同气候区各草地类型对干旱的响应机制对于草地保护具有重要意义^[18]。Vicente-Serrano 等^[19]评估全球不同气候区下陆地生态系统对多尺度干旱的响应特征,发现美国中部、西南部及墨西哥的半干旱和干旱地区的森林 NDVI 与 SPEI 之间的相关性最高,而湿润地区的相关性则明显低于半干旱和干旱地区。本研究得出半干旱区域草地 NDVI 与 SPEI 的最大相关系数最大(0.36),而湿润地区则相对较小(图 9C),湿润地区的特点是水平衡通常大于 0,降水较为充足且植被的水分利用效率低^[20]。尽管湿润区域干旱对植被的影响小于干旱区域,但干旱同样对于湿润区域的植被活动产生影响,因而导致 58.39% 的区域草地

NDVI 与 SPEI 的相关性达到显著。

了解干旱对植被影响的最大主导时间尺度有助于评估植被对于干旱的抵抗力及其自身的恢复力^[17]。Vicente-Serrano 等^[19]研究表明,全球尺度范围内干旱地区的植被对干旱的响应往往集中在短时间尺度范围下,而湿润区域的植被则对长时间尺度的干旱响应更为敏感,该结论与本研究结果一致。根据 Xu 等^[11]的研究,气候干旱的条件下植被对于干旱的响应非常迅速,因而干旱与半干旱区域的植被对于干旱的响应的响应时间尺度往往较短,尤其对于内蒙古高原、黄土高原以及中国的西部干旱区。本研究结果与 Xu 等的结论同样一致,发现草地 NDVI 对 SPEI 响应的响应时间尺度较短的区域主要分布在内蒙古地区、新疆地区、青海省北部等干旱地带,该部分地区主要分布着荒漠草地及平原草地等,原因可能是干旱半干旱地区降水相对较为匮乏,一旦土壤水分发生缺失,植物物种存在特有的抵抗力及适应机制促使它们能够

迅速适应不断变化的水资源^[21]。孔冬冬等^[6]发现中国川西及青藏高原地区主要分布着高原草甸、草地,地表地貌以冰川、冻土为主,冻土消融及冰川融水对于土壤水分的变化也会产生重大影响,因而草地生长对于干旱响应的响应较弱。本研究结果与上述结果相吻合,主要归因于该区域独特的气候水文条件^[11]。

本研究发现,区域气温的升高会导致草地 NDVI 对于干旱的响应尺度不断缩短,且多年平均降水对于草地干旱响应尺度的影响较大,降水缺乏的区域草地生长往往更容易被短时间尺度的干旱所影响,诸如荒漠草地等,而降水较多的高山亚高山草甸区域,植被 NDVI 对于 SPEI 的响应则集中在长时间尺度。原因主要是气温的升高和降水的缺失均会导致干旱加剧,而干旱生态系统对水的有效性以高度可塑性的方式做出反映,能够通过减少水分损失、呼吸成本、光合活性和生长速率的生理、解剖学和功能策略而立即对缺水环境产生适应,因此对于干旱区域的而言,植被能够对干旱做出快速响应,且干旱响应所对应的时间尺度较短^[22-23]。

4 结论

本研究分析 1982—2015 年中国不同气候区及不同草地类型覆被下植被 NDVI 的时空动态趋势及其对于干旱的响应状况,表明中国草地 NDVI 呈现出极显著增加的变化趋势(0.004/a),各气候区草地 NDVI 均呈现极显著上升趋势,且湿润区域增加率较干旱区大。草地 NDVI 呈显著增加的区域集中在华北平原地区、四川、云南、广西及西藏的东南部地区。期间草地区域 SPEI 值呈现不显著增加趋势(0.05/10 a),其中显著变干的区域集中在内蒙古中部和宁夏地区。草地 NDVI 与 SPEI 指数呈显著正相关的区域集中在内蒙古、青海省南部及新疆北部地带。内蒙古、新疆、青海省北部及西藏南部地区的草地 NDVI 对于干旱响应的时间尺度较短,而青海东南部及西藏中部草地 NDVI 对于干旱响应的时间尺度较长。高山亚高山草甸和草甸区域植被 NDVI 与 SPEI 的相关性最强,且对于干旱的响应时间尺度相对较长,而荒漠草地对于干旱的响应时间尺度较短;与湿润区域相比,干旱区域草地 NDVI 与 SPEI 的相关性更强,且对于干旱响应的响应时间尺度更短。降水是草地干旱响应的最主要因素,水平衡次之,而气温的影响相对较小。

参考文献:

[1] 刘洋洋,章钊颖,同琳静,等.中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素[J].生态学杂志,2020,39(2):349-363.

- [2] 陈立奇.南极和北极地区变化对全球气候变化的指示和调控作用:第四次 IPCC 评估报告以来一些新认知[J].极地研究,2013,25(1):1-6.
- [3] 周蕾.2001—2010 年干旱对中国陆地生态系统碳循环的影响[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [4] 田汉勤,徐小锋,宋霞.干旱对陆地生态系统生产力的影响[J].植物生态学报,2007,31(2):231-241.
- [5] 赵平伟,李宏波,郭萍,等.滇西南地区 NDVI 变化及其对不同时间尺度干湿变化的响应[J].山地学报,2018,36(2):229-238.
- [6] 孔冬冬,张强,顾西辉,等.植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J].生态学报,2016,36(24):7908-7918.
- [7] Zhou W, Yang H, Huang L, et al. Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010[J]. Ecological Indicators, 2017,83:303-313.
- [8] Chen Y, Mu S, Sun Z, et al. Grassland carbon sequestration ability in China: a new perspective from terrestrial aridity zones[J]. Rangeland Ecology & Management, 2016,69(1):84-94.
- [9] Gu Y, Brown J F, Verdin J P, et al. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34, L06407, doi:10.1029/2006 GL029127.
- [10] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J].应用生态学报,2019,30(7):2309-2319.
- [11] Xu H, Wang X, Zhao C, et al. Diverse responses of vegetation growth to meteorological drought across climate zones and land biomes in northern China from 1981 to 2014[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010,262:1-13.
- [12] Liu Y, Yang Y, Wang Q, et al. Evaluating the responses of net primary productivity and carbon use efficiency of global grassland to climate variability along an aridity gradient[J]. Science of the Total Environment, 2019,652:671-682.
- [13] Liu Y, Wang Q, Zhang Z, et al. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013[J]. Science of the Total Environment, 2019,690:27-39.
- [14] 许玲燕,王慧敏,段琪彩,等.基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J].资源科学,2013,35(5):1024-1034.
- [15] 张照庭.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.

45-54.

- [10] 谷雷,岳彩荣,赵勋,等.基于 Google Earth Engine 的云南省 1999—2018 年植被覆盖度变化分析[J].西部林业科学,2020,49(5):74-80.
- [11] 曹云,钱永兰,孙应龙,等.基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J].生态环境学报,2020,29(5):857-865.
- [12] 丁文荣.滇中地区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素[J].水土保持通报,2016,36(6):252-257.
- [13] 李同艳,何云玲,熊巧利.云南中部地区植被覆盖时空变化特征及其影响因素研究[J].生态科学,2019,38(3):45-54.
- [14] 张景华,封志明,姜鲁光,等.澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J].自然资源学报,2015,30(9):1425-1435.
- [15] 赵桔超,朱彦辉,段国辉,等.基于 MOD13Q1 数据分析 2001—2015 年西双版纳植被变化特征[J].生态学杂志,2019,38(4):1083-1092.
- [16] 何云玲,熊巧利,余岚,等.基于 NDVI 云南地区植被生态系统对气候变化的适应性分析[J].生态科学,2019,38(6):165-172.
- [17] 陈宗瑜.云南气候总论[M].北京:气象出版社,2001.
- [18] 吴征镒,朱彦丞.云南植被[M].北京:科学出版社,1987.
- [19] Bian J, Li A, Song M, et al. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter[J]. Journal of Remote Sensing, 2010,14(4):725-741.
- [20] Stow D, Petersen A, Hope A, et al. Greenness trends of Arctic tundra vegetation in the 1990s: comparison of two NDVI data sets from NOAA AVHRR systems [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007,28(21):4807-4822.
- [21] John R, Chen J, Lu N, et al. Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(5):2018-2032.
- [22] 刘世梁,田韞钰,尹洁洁,等.云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对于干旱的响应[J].生态学报,2016,36(15):4699-4707.
- [23] 何云玲,李同艳,熊巧利,等.2000—2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应[J].生态学报,2018,38(24):8813-8821.

(上接第 161 页)

- [16] Cai H, Yang X, Xu X. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: The effects of ecological protection and restoration projects [J]. Ecological Engineering, 2015,83:112-119.
- [17] Liu Y, Zhang Z, Tong L, et al. Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe[J]. Ecological Indicators, 2019,106:105504.
- [18] Liang W, Yang Y, Fan D, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,204:22-36.
- [19] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013,110(1):52-57.
- [20] Liang X, Samanta A, Costa M H, et al. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought [J]. Geophysical Research Letters, 2011,38, L07402, doi:10.1029/2011 GL046824.
- [21] Zhou W, Gang C, Zhou L, et al. Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the northwest China [J]. Acta Oecologica, 2014,55: 86-96.
- [22] Gang C, Zhao W, Zhang Y, et al. The impacts of land conversion and management measures on the grassland net primary productivity over the Loess Plateau. Northern China [J]. Science of the Total Environment, 2018,645:827-836.
- [23] Verdoodt A, Evan R. Environmental assessment tools for multi-scale land resources information systems: A case study of Rwanda [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006,114(2):170-184.