

DOI: 10.20103/j.stxb.202209162644

陆建涛, 彭建, 李刚勇, 关靖云, 韩万强, 刘亮, 王仁军, 郑江华. 干旱对中亚草地总初级生产力时滞和累积效应的影响评估. 生态学报, 2023, 43 (23): 9745-9757.

Lu J T, Peng J, Li G Y, Guan J Y, Han W Q, Liu L, Wang R J, Zheng J H. Assessment of time-lag and cumulative effects of drought on gross primary productivity of grassland in Central Asia from 1982 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (23): 9745-9757.

干旱对中亚草地总初级生产力时滞和累积效应的影响评估

陆建涛^{1,2}, 彭建³, 李刚勇³, 关靖云^{1,2,4}, 韩万强^{1,2}, 刘亮^{1,2}, 王仁军^{1,2}, 郑江华^{1,2,*}

1 新疆大学地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆维吾尔自治区草原总站, 乌鲁木齐 830049

4 新疆财经大学旅游学院, 乌鲁木齐 830012

摘要:随着全球气候变化加剧, 干旱对草原生态系统碳循环的影响更加复杂。作为全球陆地生态系统碳通量的最大组成部分, 总初级生产力 (GPP) 对整个陆地碳循环具有深远影响, 因此, 探讨干旱对草地 GPP 的影响, 对于理解区域碳循环机制, 维护草地生态系统稳定发展具有重要意义。以中亚为研究区, 基于 NIRv-GPP 和 SPEI base v.2.7 数据集, 利用 Theil-Sen Median 斜率估计结合 Mann-Kendall 显著性检验、M-K 突变检验和相关分析方法, 探究 1982—2018 年干旱对草地 GPP 的时滞和累积效应。结果表明: (1) 中亚地区草地 GPP 年平均值随时间变化整体上呈下降趋势, 标准化降水蒸散指数 (SPEI) 年平均值呈降低趋势; (2) 干旱对中亚绝大多数草地 (95.6%) 产生了时滞效应, 滞后时间尺度集中在 2—3 个月; 随着干旱状况的加重, 滞后时间变长, 滞后效应对草地 GPP 影响减弱; (3) 中亚绝大多数草地 (95.8%) 对干旱存在累积响应, 累积时间尺度以 4、5、10 月为主; 随着干旱状况的加重, 累积时间变短, 累积效应对草地 GPP 影响增强; (4) 通过对比研究时滞效应和累积效应发现: 中亚超过四分之三 (76.84%) 的草地区域, 干旱对草地 GPP 的时滞效应大于累积效应。研究结果可为理解气候变化背景下中亚生态环境动态变化特征及区域碳循环机制提供参考。

关键词:时滞效应; 累积效应; 总初级生产力; 标准化降水蒸散指数; 碳循环

Assessment of time-lag and cumulative effects of drought on gross primary productivity of grassland in Central Asia from 1982 to 2018

LU Jiantao^{1,2}, PENG Jian³, LI Gangyong³, GUAN Jingyun^{1,2,4}, HAN Wanqiang^{1,2}, LIU Liang^{1,2}, WANG Renjun^{1,2}, ZHENG Jianghua^{1,2,*}

1 College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang Grassland Central Station, Urumqi 830049, China

4 College of Tourism, Xinjiang University of Finance & Economics, Urumqi 830012, China

Abstract: The Central Asia is located in the hinterland of Eurasia, with scarce rainfall and uneven distribution of water resources. It is the largest arid zone in the temperate and warm temperate zones of the Northern Hemisphere. The vegetation types in the Central Asia are mainly woodland, grassland and cultivated land, among which grassland occupies absolute superiority in land use types. As one of the most important components of the terrestrial ecosystem, grassland is the means of

基金项目: 极端干旱对新疆草地净初级生产力的影响研究项目 (202105140044); 新疆维吾尔自治区天山雪松项目 (2020XS04)

收稿日期: 2022-09-16; 网络出版日期: 2023-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zheng_jianghua@126.com

production and management object of animal husbandry, which plays a key role in maintaining the global carbon cycle, regional ecological security and social stability. With the intensification of global climate change, the effects of drought on the carbon cycle of grassland ecosystems become more complex. As the largest component of global terrestrial ecosystem carbon flux, gross primary productivity (GPP) has profound impact on the overall terrestrial carbon cycle. Therefore, it is of great significance to explore the effects of drought on grassland GPP for understanding the mechanism of regional carbon cycling and maintaining the stable development of grassland ecosystem. This paper takes Central Asia as the research area, and based on NIRv-GPP and SPEI base v.2.7 dataset, uses Theil-Sen Median slope estimation combined with Mann-Kendall significance test, M-K mutation test, and correlation analysis methods to explore the time-lag and cumulative effects of drought on grassland GPP from 1982 to 2018. The results showed that: (1) the annual average GPP and the annual average standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) of grassland in the Central Asia showed a downward trend over time. (2) Drought had a time-lag effect on most grassland (95.6%) in the Central Asia, and the lag time scale was concentrated in 2—3 months. With the aggravation of drought conditions, the lag time became longer, and the effect of lag effect on grassland GPP was weakened. (3) Most grassland (95.8%) in the Central Asia showed cumulative response to drought, and the cumulative time scale was mainly in April, May and October. With the aggravation of drought, the cumulative time became shorter, and the cumulative effect on grassland GPP became stronger. (4) Through comparative study of time-lag effect and cumulative effect, it was found that the time-lag effect of drought on grassland GPP was greater than the cumulative effect in more than three quarters (76.84%) of grassland areas in the Central Asia. The results can provide reference for understanding the dynamic change characteristics of ecological environment and the mechanism of regional carbon cycle in the Central Asia under the background of climate change.

Key Words: time-lag effect; cumulative effect; gross primary productivity; standardized precipitation evapotranspiration index; carbon cycle

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,自工业时代以来,人类活动排放的大量温室气体使全球气候变暖^[1]。随着全球变暖加剧,干旱事件的频率和强度持续增加,其影响范围也在扩大^[2]。干旱作为一种复杂而渐进的自然现象,是最常见的自然灾害之一,具有持续时间长、传播范围广的特点^[3]。在陆地生态环境脆弱的干旱和半干旱地区,干旱对区域生态环境的影响尤为严重^[4]。草地作为生态系统的重要组成部分,在全球碳循环研究中发挥着重要作用^[5]。因此,研究干旱-草地两者间的关系具有重要的现实意义和科学价值,能够为草地应对未来气候变化响应及对碳循环的影响分析提供依据。

干旱指数通常用来量化干旱程度,目前,多种干旱指数被学者们相继提出,包括帕默尔干旱指数(PDSI)^[6]、标准化降水指数(SPI)^[7]和标准化降水蒸散指数(SPEI)^[8]等。在众多干旱指数中,SPEI综合考虑了降水和潜在蒸散变化对干旱的影响,Vicente-Serrano等^[9]比较了PDSI、SPI和SPEI在全球范围内的农业、水文和生态干旱监测,结果表明,SPEI是捕获干旱对农业、水文和生态变量影响的最佳干旱指数。

一般而言,时间滞后效应是指特定时间点先前气候因素对当前植被生长的间接影响^[10];时间累积效应定义为先前气候因素持续一段时间对当前植被生长的长期和累积间接影响,累积效应是基于时滞效应并加深时滞效应,因为它还考虑了气候因素在不同的前期对当前植被生长的不同影响^[11]。目前,关于干旱时滞效应和累积效应对植被生长状况的影响国内外学者进行了大量研究,顾锡玲等^[12]利用多时间尺度的SPEI和归一化植被指数(NDVI)时序数据,发现1982—2015年间内蒙古大部分地区植被生长状况与干旱的累积和时滞作用呈正相关关系;Zhao等^[13]研究指出干旱时滞效应影响了黄土高原一半的草地,并且当地草地生长受到干旱累积效应的广泛影响;Peng等^[14]研究发现北半球干旱对秋季叶片衰老有很强的累积和滞后效应,并且随着干旱程度加重,累积和滞后效应更强。综合相关研究发现,植被NDVI对干旱的响应滞后且具有累积效应,NDVI是基于反射率的植被指数,反映植被绿色度,虽然它可以用来检测植被的生长状态,但不能直接反映实际的植被生产力^[15]。总初级生产力(GPP)是陆地生态系统碳循环的关键参数^[16],可以直接反映实际的植被光合作用,并且比植被指数对干旱更敏感^[17],但目前在区域或全球范围内研究干旱对植被GPP的时滞和累

积影响还有不足。

中亚五国及中国新疆地区地处亚欧大陆腹地,区域降水稀少、极端干旱、水资源分布不均^[18],生态环境相对脆弱,中亚五国已经成为亚洲乃至世界生态环境恶化最严重的地区之一^[19]。草地作为陆地生态系统中最重要的一部分,是畜牧业的生产资料 and 经营对象,在中亚土地利用类型中占有绝对优势^[20],对于维护全球碳循环、区域生态安全和社会稳定发挥着关键作用^[21]。基于以上研究结果,有必要系统地评估干旱对中亚草地 GPP 的滞后和累积影响,为缓解干旱对草地生产力的影响提供重要信息。

相对于湿润地区,干旱地区的草地 GPP 和 SPEI 相关性较高,表明干旱地区草地生长更受以往干旱的制约^[22]。通过文献归纳,目前,干旱对中亚干旱半干旱地区草原植被总初级生产力的时滞和累积效应是怎样的?这个科学问题还未得到充分解答。本研究利用时间序列 NIRv-GPP 数据和 SPEI 数据评估干旱对中亚草地生长的时滞和累积效应,具体研究如下:评估干旱对中亚草地 GPP 的时滞和累积效应,了解这些影响如何随水平衡梯度变化;并探究干旱对中亚草地 GPP 的主要影响是时滞效应还是累积效应。其结果有助于在气候变化背景下深刻理解区域生态环境变化特征及碳循环机制,对于维护中亚地区生态服务功能、保障区域生态安全具有重要参考意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中亚处于亚欧大陆腹地(46°24'—97°06'E,33°48'—55°48'N),是北半球温带、暖温带面积最大的干旱区。中亚地区幅员辽阔,地形复杂多样,跨越天山山脉,中部和西部是图兰平原和里海沿海平原,北部是哈萨克斯坦丘陵,南部是克孜勒库姆沙漠、卡拉库姆沙漠和塔克拉玛干沙漠。中亚气候特点主要是年均降水相对稀少,不同地域的年均降水量相差大,荒漠地区年降水量通常小于 100mm,而山区年降水量可达 1000mm;日照充足,气温日较差很大,从多年平均气温分布来看,西部和南部较高^[18]。中亚植被类型以林地、草地和耕地为主,其中草地分布最广泛,面积也相对较大(图 1)。

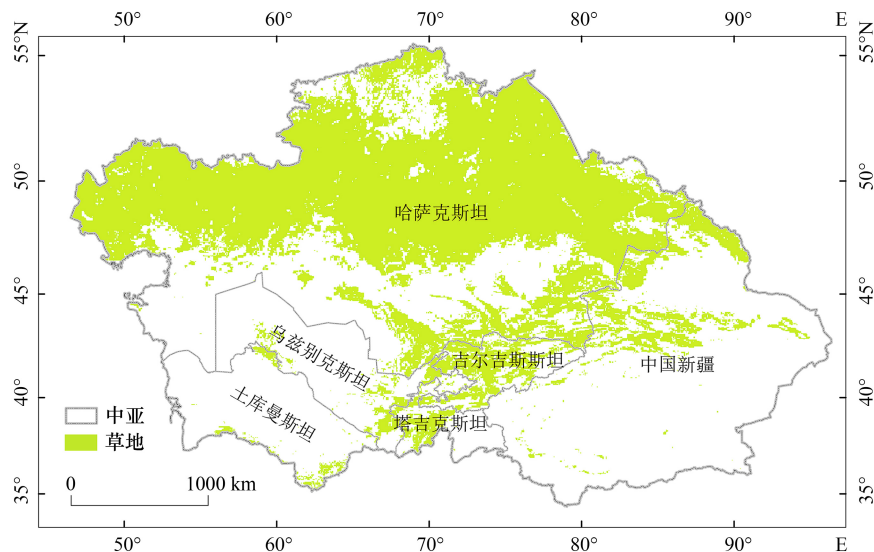


图 1 研究区示意图

Fig.1 Location of the research area

1.2 数据来源及处理

1.2.1 NIRv-GPP 数据集

本研究使用新发布的基于近红外反射(NIRv)的全球 GPP 数据集^[23—24],在分析 NIRv 作为日光诱导叶绿

素荧光(SIF)和 GPP 探针可行性的基础上,该数据集利用长时间序列的遥感 AVHRR 数据和数百个全球通量站观测数据获得了全球高分辨率长时间序列(1982—2018 年)GPP 数据,以下简称 NIRv-GPP。NIRv-GPP 的空间分辨率为 0.05°。最近的研究表明了 NIRv-GPP 的优越性^[25-26],该数据集可从国家青藏高原数据中心下载(<http://data.tpdc.ac.cn/>)。为有效表达干旱与草地总初级生产力的关系,本研究选择生长季(4—10 月)分析干旱对草地 GPP 的影响。

1.2.2 SPEI base v.2.7

全球 SPEI 数据库 SPEI base(<https://spei.csic.es/database.html>)涵盖了全球尺度的干旱状况,SPEI 数据集时间尺度为 1—48 个月,空间分辨率为 0.5°。在本研究中,SPEI 数据集用于量化干旱的严重程度和持续时间,代表了与平均气候水平衡的偏差,它具有多个尺度的特点,能够确定不同时间尺度的干旱^[8]。同时,SPEI 数据集在评估干旱对植被生长和 GPP 的影响方面表现良好^[27-28]。已有学者基于 SPEI 数据集对中亚地区的干旱时空趋势进行了分析,评估了中亚地区干旱变化情况^[29],表明 SPEI 数据集能有效表达中亚地区的干旱特征。为了匹配 GPP 数据的时间范围和空间分辨率,从 1982—2018 年选择了 1—12 个月尺度的 SPEI 数据集,并将 SPEI 数据插值至 0.05°的空间分辨率。

1.2.3 植被覆盖数据

植被覆盖数据来自两个数据集,即全球动态土地覆盖数据产品(GLASS-GLC)(空间分辨率为 0.05°,时间尺度为 1982—2015 年)和中分辨率成像光谱仪(MODIS)陆地覆盖类型产品(MCD12C1)(空间分辨率为 0.05°,时间尺度为 2000—2018 年)。为了尽可能避免植被类型变化造成的干扰,利用 ArcGIS 软件分析土地利用变化,生成 1982—2018 年间土地覆盖类型不变的草地区域(图 1),并对其进行分析。GLASS-GLC 和 MCD12C1 分别从地球与环境科学数据发布者(<https://doi.pangaea.de/>)和美国国家航空航天局(NASA)(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)下载。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势与突变分析

Sen 斜率和 Mann-Kendall 显著性检验用于计算 1982—2018 年中亚草地 GPP 和干旱变化的总体趋势,Mann-Kendall 突变检验用于分析草地 GPP 和旱情的变化趋势。

Sen 趋势度计算公式如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (1)$$

式中, x_i 和 x_j 表示时间序列数据,Median 表示序列的中位数, $\beta > 0$ 表示序列上升; $\beta < 0$ 代表序列下降趋势。

Mann-Kendall 显著性检验方法如下:

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1, & x_i - x_j > 0 \\ 0, & x_i - x_j = 0 \\ -1, & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (3)$$

根据 S 标准化检验统计量 Z:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (4)$$

当 Z 的绝对值大于 1.64 和 2.32 时,意味着分别以 95% 和 99% 的置信度通过显著性检验。Mann-Kendall

突变检测属于非参数统计检验方法,易于计算,可以确定突变开始的时间点,并指出相应的突变时间段区域,对于具有 n 个样本的时间序列 x ,首先构造秩序列^[30]。

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

其中:

$$r_i = \begin{cases} +1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (6)$$

假设时间序列是随机和独立的,定义统计数据:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中, $UF_1 = 0$, $E(s_k)$, $\text{var}(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差,当 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立,且相同连续分布时,则:

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (8)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (9)$$

按时间序列逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ 重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \dots, 1, UB_1 = 0$ 。

在本文中,对应于 0.05 水平测试的正负 1.96 为临界值。如果两条曲线相交且交点位于临界线之间,则对应于交点的时间为突变开始的时间,超过临界值的范围被确定为突变发生的时间区域。

1.3.2 干旱对 GPP 的时滞效应

Pearson 相关系数(R)用于研究干旱对草地 GPP 的滞后效应大小和时间尺度^[13-14],范围从-1 到 1,表征从负相关到正相关。首先,为了确保相关结果的可比性,本文选择 1982—2018 年中亚草地区域生长季逐月 NIRv-GPP 和 1 个月尺度 SPEI,每月 GPP 与当月之前的前 i 个月的 1 个月 SPEI 相结合,形成一个系列($1 \leq i \leq 12$),然后,计算滞后时间尺度为 i 个月的 R ,并为每个像素获得 12 个相关系数(公式(10))。例如,滞后尺度为 3 个月,可通过 1982—2018 年 1—7 月的逐月 SPEI-01 数据与 1982—2018 年生长季(4—10 月)逐月 GPP 进行相关性分析,以此类推至滞后 12 个月。

最后,选择最大相关系数 $R_{\text{max_lag}}$,并将相应的滞后月份视为像素的滞后效应大小和时间尺度(公式(11)),当月 GPP 和 1 个月 SPEI 之间的 $R_{\text{max_lag}}$ 滞后发生在 4 月时,则草地 GPP 对干旱的滞后响应时间尺度记录为 4 个月,意味着 4 个月前的干旱条件对草地 GPP 的变化有着关键影响。

$$R_i = \text{corr}(\text{GPP}, \text{SPEI}_i) \quad 1 \leq i \leq 12 \quad (10)$$

$$R_{\text{max_lag}} = \max(R_i) \quad 1 \leq i \leq 12 \quad (11)$$

式中, GPP 表示 i 个月滞后时 1982—2018 年的每月 NIRv-GPP 时间序列, SPEI_i 是滞后 i 个月的 1 个月 SPEI 时间序列, R_i 是滞后 i 个月的皮尔森相关系数。

1.3.3 干旱对 GPP 的累积效应

为了评估干旱对草地 GPP 的累积影响,通过月度 GPP 与累积 SPEI 之间的 Pearson 相关系数,获得了对应于最大相关的 SPEI 时间尺度^[13-14]。与仅使用 SPEI-01 的滞后效应不同,需要 1—12 个月的 SPEI 来计算累积效应。因此,使用 1982—2018 年期间 1—12 个月 SPEI 数据集和 NIRv-GPP 中草地区域的像素值来确定相关性。

首先,将 GPP 时间序列与 m 个月尺度的 SPEI 时间序列相关联($1 \leq m \leq 12$) 并计算出 R (公式(12))。然后,将与 GPP 具有最大相关性的 $R_{\text{max_cum}}$ 的 SPEI 累积月数视为累积效应的时间尺度(公式(13)),并将 $R_{\text{max_cum}}$ 确定为累积效应量。例如,如果每月 GPP 与 3 个月 SPEI 的相关性最大,则累积效应的时间尺度记录为 3 个月,表明当前月之前累积的 3 个月干旱条件对植被光合作用的影响最大。

$$R_m = \text{corr}(\text{GPP}, m\text{SPEI}) \quad 1 \leq m \leq 12 \quad (12)$$

$$R_{\max_cum} = \max(R_m) \quad 1 \leq m \leq 12 \quad (13)$$

式中, m 是 SPEI 的累积时间尺度, $m\text{SPEI}$ 是具有 m 个累积月的 SPEI 时间序列, R_m 是 GPP 和 $m\text{SPEI}$ 之间的皮尔森相关系数。

同时, 选择 1982—2018 年的年 SPEI (SPEI-12) 作为年平均水平衡条件, 分析滞后和累积效应如何随不同水分条件而变化。根据年平均 SPEI, 以 0.05 的等间隔确定水平衡梯度, 然后, 分别使用滞后和累积效应的 R 均值及对应月数, 与沿水平平衡梯度的年平均 SPEI 进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 草地总初级生产力及干旱的时空变化特征

Mann-Kendall 突变检验用于探究 1982—2018 年中亚草地 GPP 和干旱的变化。由图 2 可知, 中亚地区草地 GPP 年平均值以 $0.6553/\text{a}$ 速率呈下降趋势, 表明从 1982—2018 年中亚地区草地呈现退化趋势。UF 与 UB 曲线有三个交点但均未通过显著性检验, 因此未变成突变点。SPEI 年平均值以 $0.0208/\text{a}$ 速率呈降低的变化趋势 (图 2), 说明中亚草地区域总体上变得干燥, 根据 UF 和 UB 曲线可知, 1989 年前后和 1994 年形成突变, 但未通过 0.05 的显著性检验。在 1990—1993 年间, 年均 SPEI 呈现出明显的上升趋势, 表明该时间段内中亚地区相对湿润。

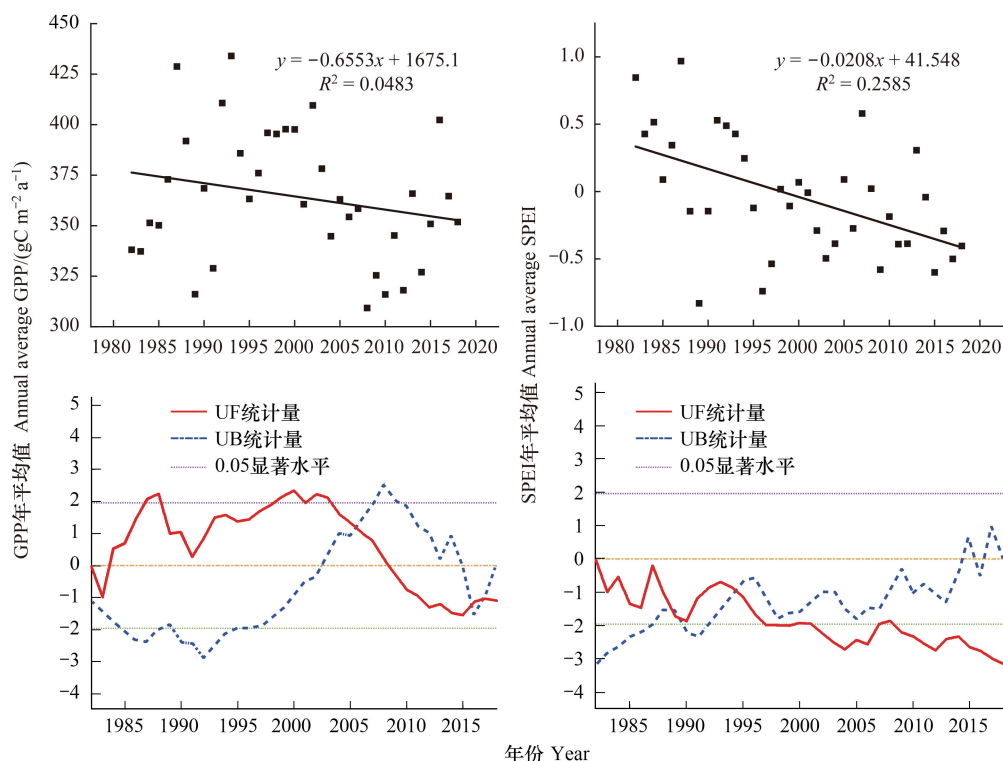


图 2 1982—2018 年 GPP 与 SPEI 变化趋势与突变结果

Fig. 2 Trends and mutation results of GPP and SPEI from 1982 to 2018

GPP: 总初级生产力 Gross Primary Productivity; SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; UF: 顺序统计量 Order statistics; UB: 逆序统计量 Reverse statistics

通过 Sen 斜率结合 Mann-Kendall 显著性检验评估 1982—2018 年中亚草地 GPP 和干旱空间趋势变化特征。由图 3 可知, 1982—2018 年研究区大部分地区的年 GPP 呈下降趋势, 面积占比为 60.57%。其中, 极显著 ($P < 0.01$), 显著 ($P < 0.05$) 减少的区域分别占比 14.16%, 9.83%, 主要分布在哈萨克斯坦的东北和西部地区, 南

部与中国新疆和吉尔吉斯斯坦接壤处也有一定分布。GPP 呈上升趋势的主要分布在哈萨克斯坦北部,另外,在中国新疆北部主要沿天山、阿尔泰山,中亚南部的吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦等地草地 GPP 也呈增加趋势。就干旱而言(图 3),中亚草地覆盖的绝大部分地区呈变干趋势,面积占比为 93.76%,其中显著变干的区域可达 51.53%,主要分布在哈萨克斯坦。变湿的区域主要分布在我国新疆北部,面积占比相对较小。

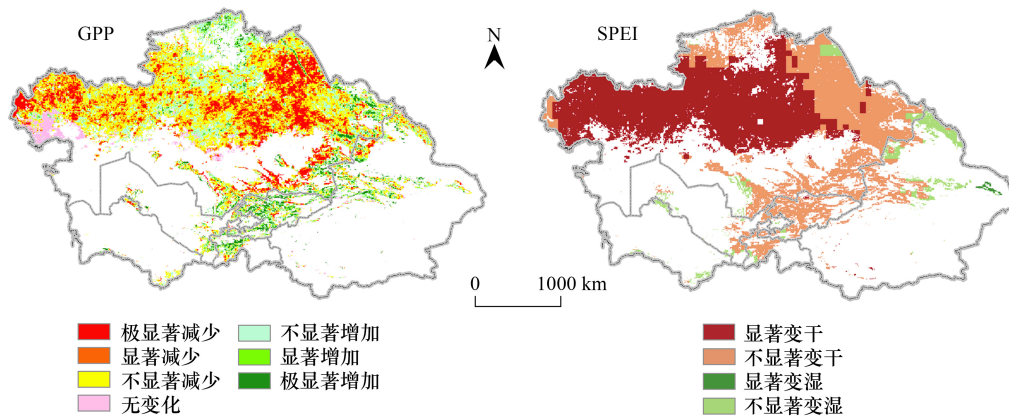


图 3 1982—2018 年中亚地区草地 GPP、SPEI 变化趋势的空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of variation trends of grassland GPP and SPEI in the Central Asia from 1982 to 2018

2.2 干旱对草地 GPP 的滞后效应

2.2.1 不同滞后尺度下草地 GPP 对干旱的响应

由图 4 可知,正相关系数等级的面积百分比在滞后时间尺度上存在不同。对于整个滞后时间尺度,相关系数主要在 0.1—0.15 的范围内,面积百分比为 72.5%,大于 0.2 的 $R_{\max_lag}$ 极为少见(0.62%)。相应地,草地 GPP 和平均正相关系数在滞后时间尺度上明显变化(图 4)。3 个月滞后的相关系数最大($R=0.09, P<0.05$),其次是 2 个月滞后($R=0.088, P<0.05$)和 4 个月滞后($R=0.075, P<0.05$),这与 $R_{\max_lag}$ 的面积百分比变化总体一致。

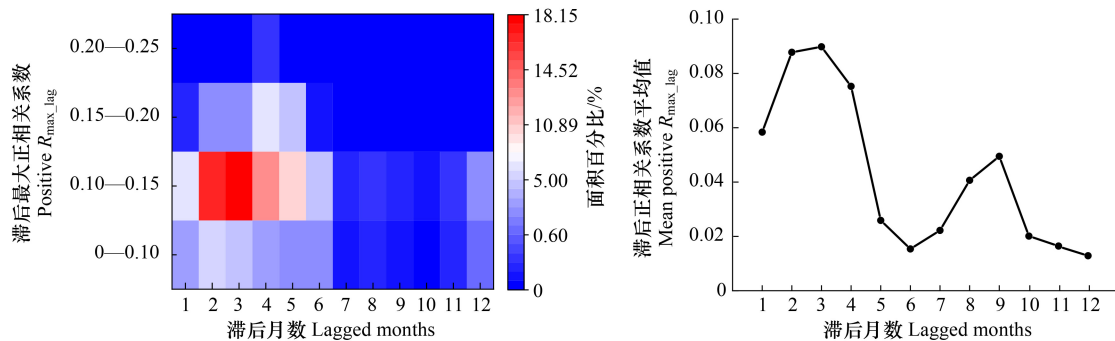


图 4 滞后效应的正相关变化

Fig.4 Positive correlation change of lag effect

$R_{\max_lag}$:最大滞后相关系数 Maximum lag correlation coefficient

2.2.2 干旱对草地 GPP 滞后效应的空间分布

通过 GPP 与 1 个月尺度 SPEI(SPEI-01)进行相关性分析,得到干旱对草地 GPP 的滞后效应最大相关系数($R_{\max_lag}$)与滞后月数。由图 5 所示,中亚绝大部分地区草地 GPP 与滞后 SPEI 呈正相关(95.3%),负相关及不相关区域分别占比仅为 0.3%和 4.4%,其中通过 0.05 水平显著性检验的面积占比 43.6%。最大相关系数($R_{\max_lag}$)较高的区域主要分布在哈萨克斯坦的中部和北部地区,中国新疆天山和阿尔泰山也有一定分布。在具有时滞效应的区域中,约 69.23%的草地对于干旱保持了 1—4 个月的时滞响应,其中 2—3 个月的时滞占据了

大部分区域(30.58%和17.89%,图5)。

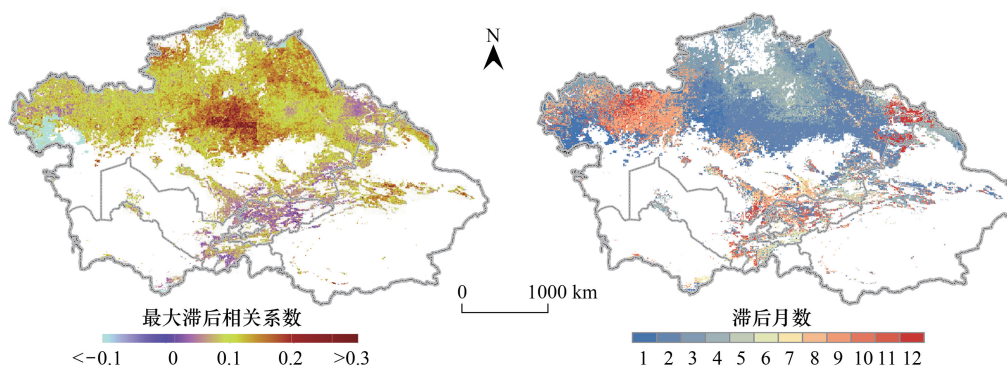


图5 1982—2018年干旱滞后效应的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of drought lag effect from 1982 to 2018

2.2.3 干旱对不同水分条件下草地 GPP 的时滞效应

如图6所示,年平均 SPEI 与滞后月数之间存在负相关($R^2 = 0.8087$)。随着年平均 SPEI 的增加,干旱对 GPP 的滞后月数减少,表明当区域干旱状况加重时,干旱对草地 GPP 的影响通常有较长时间的滞后作用。滞后相关系数均值与年平均 SPEI 呈正相关($R^2 = 0.4778$) (图6),表明干旱滞后效应对相对干旱地区草地的影响较弱。

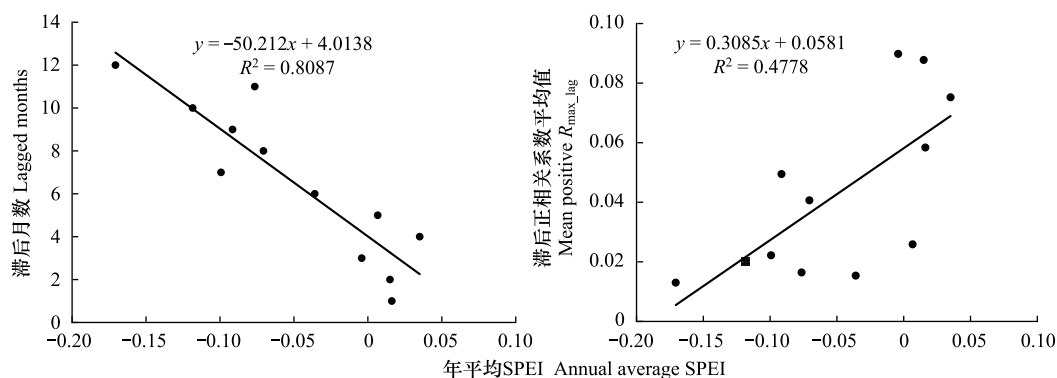


图6 时滞效应与年平均 SPEI 关系

Fig.6 Relationship between time lagged effect and annual average SPEI

2.3 干旱对草地 GPP 的累积效应

2.3.1 不同累积尺度下草地 GPP 对干旱的响应

由图7可知,在不同的累积时间尺度下,正相关系数等级的面积百分比和平均值明显不同。在整个累积时间尺度上,相关系数主要在0.1—0.15范围内,面积百分比为61.9%,其中4个月尺度面积占比最大为16.82%,其次是5个月(15.04%)和3个月(12.68%),1个月占比最小(1.15%)。草地 GPP 和 SPEI 平均相关系数在累积时间尺度上变化明显,最大值出现在4个月时间尺度($R = 0.066$, $P < 0.05$),最小值为1个月尺度($R = 0.026$, $P < 0.05$)。结合面积百分比和正相关系数均值可知(图7),随着累积月数增加,草地 GPP 和 SPEI 相关系数及其面积占比变化趋势一致。

2.3.2 干旱对草地 GPP 累积效应的空间分布

通过对不同尺度累积 SPEI 与 GPP 的相关分析,得到累积效应的最大相关系数($R_{\max_cum}$)和累积月数。由图8可知,累积 SPEI 与 GPP 呈正相关区域占总面积的90.7%,负相关及不相关区域分别占比5.1%和4.2%,

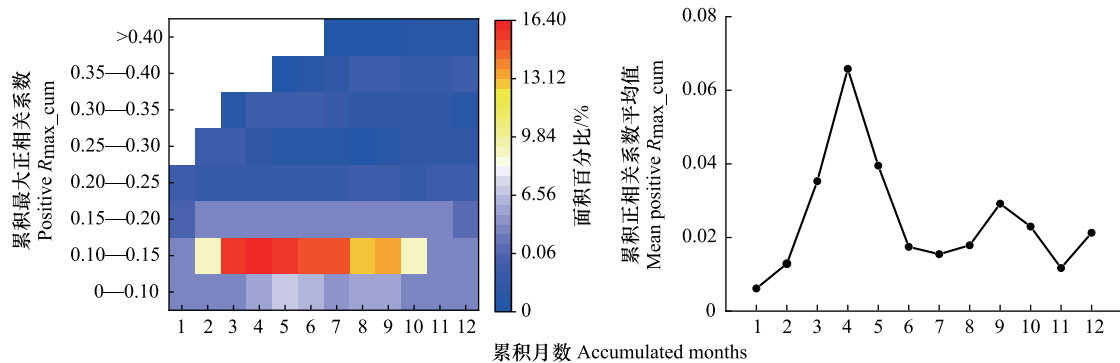


图7 累积效应的正相关变化

Fig.7 Positive correlation change of cumulative effect

$R_{\max_cum}$:最大累积相关系数 Maximum cumulative correlation coefficient

其中通过 0.05 水平显著性检验的区域面积占比 21.6%。 $R_{\max_cum}$ 在哈萨克斯坦中部和北部地区相对较高;负相关区域主要分布在哈萨克斯坦东南部、吉尔吉斯斯坦、中国新疆天山和阿尔泰山等高海拔草甸区。由于高寒草地生长受低温影响^[31],随着干旱状况减轻,草地生长仍会受到影响,因此与 SPEI 相关性较弱或呈负相关。在具有累积效应的区域中(图 8),4 个月尺度的累积占比最大(22.6%),其次是 5 个月(12.86%)和 10 个月(11.9%)的累积占据较大比例。哈萨克斯坦北部累积月数相对较大,可达 9—12 个月,这表明,当地草原对干旱的敏感性相对较低,需要长时间的干旱才能对草原产生影响。

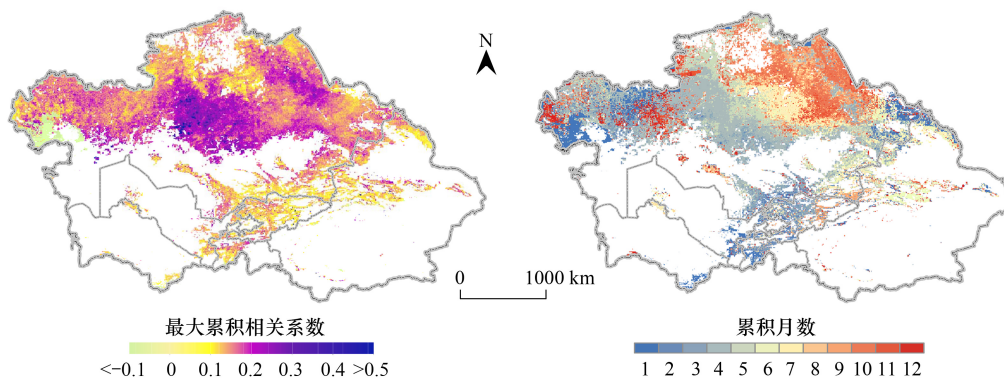


图8 1982—2018 年干旱累积效应的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of cumulative effects of drought from 1982 to 2018

2.3.3 干旱对不同水分条件下草地 GPP 的累积效应

图 9 显示了年平均 SPEI 与相应的累积月份和累积正相关系数平均值之间的关系。累积月份与年平均 SPEI 之间的相关性为正($R^2 = 0.3642$),随着年平均 SPEI 值的增加,累积效应的时间尺度不断变长,说明在水分状况较好地区(即年平均 SPEI 较高),干旱对草地 GPP 具有更长时间的累积效应。同时,累积正相关系数均值和年平均 SPEI 之间相关性为负($R^2 = 0.284$),表明干旱地区的草地 GPP 通常经历了更强的干旱累积效应。

2.4 干旱对中亚草地 GPP 的时滞效应和累积效应对比

利用最大滞后相关系数($R_{\max_lag}$)和最大累积相关系数($R_{\max_cum}$)之间的差异($\Delta R_{\max} = R_{\max_lag} - R_{\max_cum}$)来探讨干旱对中亚草地 GPP 的主要影响。由图 10 可知,在超过四分之三(76.84%)的地区,干旱的滞后效应大于累积效应。此外,以滞后效应为主的区域平均 $\Delta R_{\max}$ 为 0.038,而累积效应相对应的区域平均 $\Delta R_{\max}$ 为-0.005。

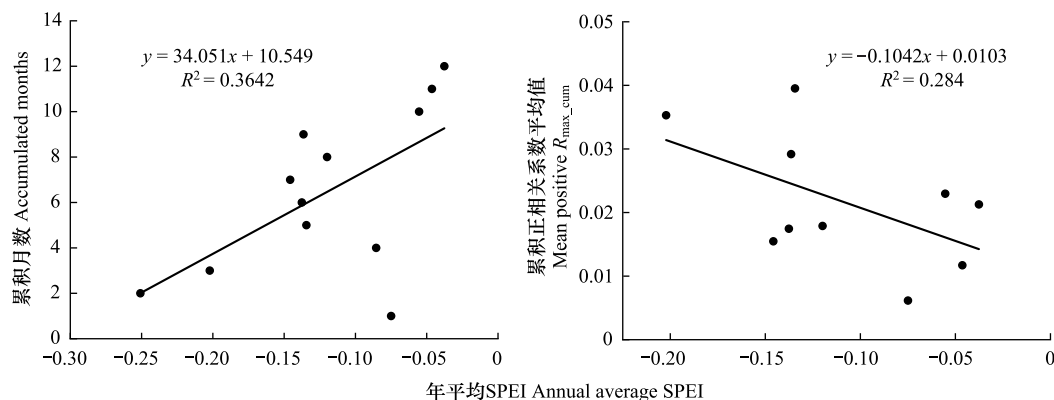


图9 累积效应与年平均 SPEI 关系

Fig.9 Relationship between cumulative effect and annual average SPEI

从面积百分比来看, $\Delta R_{\max}$ 在范围 0—0.05 内占比最大 (46.05%), 其次是 0.05—0.10 (24.29%) 和 -0.05—0 (20.92%)。滞后效应强于累积效应的区域 ($\Delta R_{\max} > 0$) 主要分布在哈萨克斯坦北部和中国新疆地区; 而累积效应占主导的区域主要分布在哈萨克斯坦中部的图兰平原以及东部与中国新疆接壤地区。

3 讨论

本研究表明, 干旱对中亚草地 GPP 存在广泛的时滞和累积效应, 这说明早期水分条件在很大程度上影响了当前的草地植被生长。干旱对大部分草地 (95.6%) 具有滞后影响, 滞后月份主要集中在较短的时间尺度上, 大多数草原植被 (69.23%) 有一到四个月的时间滞后于干旱, 两个月的干旱滞后对草地 GPP 的影响最大, 这意味着草地活动对干旱的反应较快。已有研究证明:

降水是控制中亚草地生产力变化的主要气候因子^[32], 主要通过改变土壤水分条件进而调控生态系统的结构和功能^[33]。中亚地区内陆平原大部分属于两种气候类型, 即中亚北部受西风带控制形成西风带气候, 降水少, 季节分布比较均匀; 中亚中南部属于准地中海气候区, 水-热季节配置反位向, 降水集中在冷季, 低温多雨, 暖季高温少雨^[34]。因此, 在干旱、半干旱的中亚地区, 降水尤其是降水的季节分配严格限制了草地植被生长, 使得这些地区的草地 GPP 对干旱的响应通常滞后两到三个月。这可能是由于草地植被的内在生理机制, 使得这些地区的草地植被物种能够忍受更长时间的缺水, 之前的研究也发现了类似的结果^[11, 35]。

累积效应对于分析干旱对草地 GPP 的影响至关重要, 一般而言, 水分胁迫对植被生长的负面影响会持续一段时间^[36]。累积效应则正好反映了干旱从干旱开始到结束的一段时间内对植被生长的持续影响^[11], 从而全面考虑了草地 GPP 与干旱之间的相互作用。中亚大部分草地 (95.8%) GPP 对干旱具有累积响应, 累积月份集中在较长时间尺度上, 主要是四个月尺度, 其次是五个月和十个月尺度累积。这可能与干旱程度和持续时间有关, 中亚地区年降水量不足且季节循环中降水与气温位相配置不当^[34], 不能满足地表草地植被生长长期的水分需求, 因此草地对长期和高强度干旱具有一定的适应性, 此外, 不同草原物种对干旱的敏感性存在差异^[37], 而在大陆性气候特征显著的中亚区域, 草原物种多样, 使得草地对干旱的累积响应时间更长。

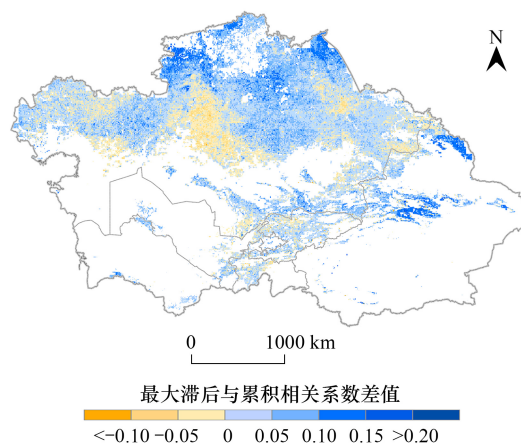


图10 滞后效应和累积效应之间最大相关系数的比较

Fig.10 Comparison of maximum correlation coefficients between lagged and cumulative effects

通过评估不同水分条件下干旱对草地的时滞与累积效应发现,随着干旱状况加重,干旱对草地的滞后效应时间相对较长,但影响强度减小;干旱对草地的累积效应持续时间更短,但强度较大。这主要是因为,在相对干旱的区域,草地对长期高强度干旱具有更强适应性,所以干旱会对草地 GPP 产生长时间但强度不大的影响。同时,GPP 和 SPEI 之间的相关性表明了干旱对植被生长的影响,通过滞后效应和累积效应相关系数的对比发现,在超过四分之三(76.84%)的地区,干旱对草地 GPP 的滞后效应大于累积效应,说明在中亚大部分地区,由于草原植被的内在生理机制,使其能够适应更长时间的水分不足。因此,在未来研究干旱对植被的影响时,必须密切关注时滞效应,以便更好地揭示气候与草地间的相互作用;同时可以考虑将干旱时滞效应纳入草地生产模型,利于进一步评估干旱对草地生态系统的损害,对维持草地生态系统的稳定发展具有重要价值。

本研究仍存在一些局限性,在评估干旱对草地 GPP 影响的过程中,数据集和分析方法的选择可能会导致结果存在不确定性。首先,NIRv-GPP 数据集尽管被证明是高度可靠的,但基于单个 GPP 数据集分析植被对干旱的响应的结果或多或少是不确定的^[38]。其次,SPEI 代表气象干旱,并不能完全表示土壤水分亏缺的变化^[39],需要进一步考虑不同环境因素之间复杂的相互作用如何影响植被生长。此外,采用相关分析方法评估草地植被与干旱的关系可能是不够的,由于干旱和草地生长直接复杂的相互作用,他们之间的关系可能是非线性的,在未来的研究中,可以通过采用多个干旱指标,在 GPP 和 SPEI 之间建立多个模型,如回归模型和分段模型等。最后,本研究仅考虑草地对干旱的响应,而其他非气候因素如自然干扰(野火、植物病虫害)的影响,以及人类活动(放牧、生态恢复计划等)也会对草地植被生长产生不可忽视的影响^[40-41],因此,全面了解草地如何应对不同类型的干扰,对于有效管理草地植被至关重要。

4 结论

本文研究了 1982—2018 年中亚草地 GPP 及干旱的时空变化特征;评估了干旱对中亚草地 GPP 的时滞和累积效应,并了解这些影响如何随水平衡梯度变化;同时探究了干旱对中亚草地 GPP 的主要影响是时滞效应还是累积效应。得到如下结论:

(1) 1982—2018 年中亚草地 GPP 年平均值以 0.6553/a 速率呈下降趋势,整体上草地出现退化现象;SPEI 年平均值以 0.0208/a 速率呈降低趋势,说明中亚地区总体上变得干燥。

(2) 干旱对中亚绝大多数草地(95.6%)产生了滞后效应,滞后时间尺度集中在 2—3 个月,说明植被活动对干旱的反应较快,随着干旱状况的加重,干旱对草地的时滞效应时间相对较长,但影响强度减小。

(3) 中亚绝大多数草地(95.8%)对干旱存在累积响应,累积时间尺度以 4、5、10 月为主,这表明,草地对干旱的敏感性相对较低,需要较长时间的干旱才能对草地产生影响,随着干旱状况的加重,干旱对草地的累积效应时间相对较短,但影响强度较大。

(4) 中亚超过四分之三(76.84%)的地区,干旱对草地 GPP 的滞后效应大于累积效应。因此,在评估干旱对草地生长和碳循环影响时,需要更加关注时滞效应对草地的影响,在构建模型时予以考虑,以便精准分析。

致谢:感谢自治区级产学研联合培养研究生基地——新疆草原总站提供资料与实验平台。

参考文献(References):

- [1] 周波涛. 全球气候变暖:浅谈从 AR5 到 AR6 的认知进展. 大气科学学报, 2021, 44(5): 667-671.
- [2] Li Y, Xie Z X, Qin Y C, Xia H M, Zheng Z C, Zhang L J, Pan Z W, Liu Z Z. Drought under global warming and climate change: an empirical study of the loess plateau. Sustainability, 2019, 11(5): 1281.
- [3] 罗新兰, 李英歌, 殷红, 隋明. 东北地区植被 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应. 生态学杂志, 2020, 39(2): 412-421.
- [4] 魏雯, 高娃, 师尚礼, 田青松, 于凤春. 近 10 年农牧交错区生态环境变化分析——以内蒙古太仆寺旗为例. 草地学报, 2012, 20(1): 31-36.
- [5] 张亮, 韩静艳, 王道涵, 王凯, 蒙洋, 邱月, 张学耀, 布仁巴雅尔, 杜森云, 张光明, 闫彩凤, 陈全胜. 草地生态系统土壤呼吸对放牧干扰

- 的响应研究进展. 生态科学, 2017, 36(2): 201-207.
- [6] Dai A G. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2011, 116: D12115.
- [7] McKee T, Doesken N, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 1993, 17: 179-184.
- [8] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [9] Vicente-Serrano S M, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, Camarero J J, López-Moreno J I, Azorin-Molina C, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 2012, 16(10): 1-27.
- [10] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, Moore B III. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. *Science*, 1997, 278(5339): 870-873.
- [11] Wen Y Y, Liu X P, Xin Q C, Wu J, Xu X C, Pei F S, Li X, Du G M, Cai Y L, Lin K, Yang J, Wang Y P. Cumulative effects of climatic factors on terrestrial vegetation growth. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(4): 789-806.
- [12] 顾锡羚, 郭恩亮, 银山, 王永芳, 那仁满都拉, 万志强. 干旱对内蒙古植被生长的累积与滞后影响评估研究. *草地学报*, 2021, 29(6): 1301-1310.
- [13] Zhao A Z, Yu Q Y, Feng L L, Zhang A B, Pei T. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: a case study in the Chinese Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110214.
- [14] Peng J, Wu C Y, Zhang X Y, Wang X Y, Gonsamo A. Satellite detection of cumulative and lagged effects of drought on autumn leaf senescence over the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 2174-2188.
- [15] Petterelli N, Vik J O, Myrsterud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [16] 沈洁. 基于星上 SIF 数据的中国北方-蒙古草地 GPP 估算研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [17] Wagle P, Xiao X M, Torn M S, Cook D R, Matamala R, Fischer M L, Jin C, Dong J W, Biradar C. Sensitivity of vegetation indices and gross primary production of tallgrass prairie to severe drought. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 1-14.
- [18] 韩雪云, 姚俊强, 赵丽, 张倩, 曹孟磊, 张同文, 张连成. 1901—2017 年中亚五国气候特征分析. *沙漠与绿洲气象*, 2021, 15(6): 1-8.
- [19] 周可法, 张清, 陈曦, 孙莉. 中亚干旱区生态环境变化的特点和趋势. *中国科学: D 辑*, 2006(S2): 133-139.
- [20] 李均力, 包安明, 陈曦. 气候变化背景下的中亚资源与环境. 北京: 气象出版社, 2017: 79-81.
- [21] Han Q F, Luo G P, Li C F, Shakir A, Wu M, Saidov A. Simulated grazing effects on carbon emission in Central Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216: 203-214.
- [22] Wei X N, He W, Zhou Y L, Ju W M, Xiao J F, Li X, Liu Y B, Xu S H, Bi W J, Zhang X Y, Cheng N. Global assessment of lagged and cumulative effects of drought on grassland gross primary production. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108646.
- [23] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, Qiu B, Zhang Z Y. Tracking the seasonal and inter-annual variations of global gross primary production during last four decades using satellite near-infrared reflectance data. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142569.
- [24] 王松寒, 张光永. 基于遥感 NIRv 的全球生态系统总初级生产力 (GPP) 长时间序列数据 (1982—2018). 国家青藏高原科学数据中心, 2020.
- [25] Bai Y, Liang S, Yuan W. Estimating global gross primary production from Sun-induced chlorophyll fluorescence data and auxiliary information using machine learning methods. *Remote Sens*, 2021, 13: 963.
- [26] Wang S H, Zhang Y G, Ju W, Chen J, Ciais P, Cescatti A, Sardans J, Janssens I, Wu M S, Berry J, Campbell E, Fernández - Martínez M, Alkama R, Sitch S, Friedlingstein P, Smith W K, Yuan W, He W, Lombardozzi D, Kautz M, Zhu D, Lienert S, Kato E, Poulter B, Sanders T, Krüger I, Wang R, Zeng N, Tian H, Vuichard N, Jain A K, Wiltshire A, Haverd V, Goll D, Peñuelas J. Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 2020, 370: 1295-1300.
- [27] Cui T F, Martz L, Guo X L. Grassland phenology response to drought in the Canadian prairies. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1258.
- [28] Chen T, de Jeu R A M, Liu Y Y, van der Werf G R, Dolman A J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: a case study over mainland Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 330-338.
- [29] 魏巍, 王百田, 张克斌. 基于 SPEI 的中亚地区 1901—2015 年干旱时空趋势分析. *北京林业大学学报*, 2020, 42(4): 113-121.
- [30] 陈中平, 徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征. *科技通报*, 2016, 32(6): 47-50.
- [31] 殷刚, 孟现勇, 王浩, 胡增运, 孙志群. 1982—2012 年中亚地区植被时空变化特征及其与气候变化的相关分析. *生态学报*, 2017, 37(9): 3149-3163.
- [32] Chen T, Tang G P, Yuan Y, Guo H, Xu Z W, Jiang G, Chen X H. Unraveling the relative impacts of climate change and human activities on

- grassland productivity in Central Asia over last three decades. *Science of the Total Environment*, 2020, 743: 140649.
- [33] Fay P A, Blair J M, Smith M D, Nippert J B, Carlisle J D, Knapp A K. Relative effects of precipitation variability and warming on tallgrass prairie ecosystem function. *Biogeosciences*, 2011, 8(97): 3053-3068.
- [34] 戴新刚, 汪萍. 亚洲中部干旱气候研究综述与机理分析. *沙漠与绿洲气象*, 2020, 14(1): 1-12.
- [35] Anderegg W R L, Schwalm C, Biondi F, Camarero J J, Koch G, Litvak M, Ogle K, Shaw J D, Shevliakova E, Williams A P, Wolf A, Ziaco E, Pacala S. FOREST ECOLOGY. Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. *Science*, 2015, 349(6247): 528-532.
- [36] Xu H J, Wang X P, Zhao C Y, Yang X M. Diverse responses of vegetation growth to meteorological drought across climate zones and land biomes in Northern China from 1981 to 2014. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 1-13.
- [37] Tong S Q, Bao Y H, Te R, Ma Q Y, Ha S, A L S. Analysis of drought characteristics in xilingol grassland of Northern China based on SPEI and its impact on vegetation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017: 1-11.
- [38] Xie X Y, Li A N, Tan J B, Lei G B, Jin H A, Zhang Z J. Uncertainty analysis of multiple global GPP datasets in characterizing the lagged effect of drought on photosynthesis. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106224.
- [39] Slette I J, Post A K, Awad M, Even T, Punzalan A, Williams S, Smith M D, Knapp A K. How ecologists define drought, and why we should do better. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3193-3200.
- [40] Huang M T, Wang X H, Keenan T F, Piao S L. Drought timing influences the legacy of tree growth recovery. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3546-3559.
- [41] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.