

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.017.

李尚飞, 戈文艳, 王飞. 1982—2019年中国北方干旱事件特征及其对植被的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 251-259.

LI Shangfei, GE Wenyan, WANG Fei. Characteristics of Drought Events and Their Impacts on Vegetation in Northern China from 1982 to 2019 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 251-259.

1982—2019年中国北方干旱事件特征及其对植被的影响

李尚飞¹, 戈文艳^{1,2}, 王飞^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]探究中国北方干旱事件及其对植被的影响, 对于干旱风险评估及降低干旱对生态系统的影响具有重要意义。[方法]基于标准化降水蒸散指数(SPEI)分析了1982—2019年中国北方干旱的时空分布特征, 并运用游程理论对中国北方干旱响应敏感区的典型干旱事件进行识别和表征, 在时空尺度上进一步探讨了不同干旱事件对归一化植被指数(NDVI)标准化异常(SA_{NDVI})的影响。[结果]38年来, 中国北方的气候干旱持续加重(斜率 $_{SPEI} = -0.001$ 2/月, $p < 0.01$), 主要集中在新疆中东部、青海北部以及内蒙古东部。高频次、短历时、中低强度的干旱事件主要发生在中国北方的南部地区, 北部地区则以低频次、长历时、高强度的干旱事件为主。中国北方干旱响应敏感区共发生10次典型干旱事件, 不同干旱事件的干旱特征间存在较大差异。在干旱事件对植被生长态势的影响方面可以初步判定, 对于一次干旱事件, 当干旱持续时间不超过3个月时, 干旱强度对植被生长过程起主要影响作用; 当干旱持续时间超过3个月后, 干旱烈度开始发挥主要影响作用。[结论]只有当干旱持续时间超过一定范围后, 前期干旱的累积与滞后效应才会逐渐体现, 后续干旱的持续会导致植被生产力的显著下降。该结论为中国北方地区的生态保护提供了理论支持。

关键词: SPEI; 游程理论; 干旱事件; NDVI 标准化异常

中图分类号: P463.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0251-09

Characteristics of Drought Events and Their Impacts on Vegetation in Northern China from 1982 to 2019

LI Shangfei¹, GE Wenyan^{1,2}, WANG Fei^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Exploring the characteristics of drought events and their impacts on vegetation in northern China is of great significance for drought risk assessment and reducing the impact of drought on ecosystems. [Methods] Based on the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), the temporal and spatial distribution characteristics of drought in northern China from 1982 to 2019 were analyzed, the typical drought events in drought response sensitive areas in northern China were identified and characterized by using the run theory, and the impacts of different drought events on the normalized vegetation index (NDVI) standardized anomaly (SA_{NDVI}) on the temporal and spatial scale were further discussed. [Results] Over the past 38 years, the climate drought in northern China had continued to worsen ($slope_{SPEI} = -0.001$ 2/month, $p < 0.01$), and mainly concentrated in the middle east of Xinjiang, the north of Qinghai and the east of Inner

收稿日期: 2021-11-28

修回日期: 2022-03-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771558); 中国科学院国际伙伴计划(16146KYSB20200001)

第一作者: 李尚飞(1997—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事气候变化和流域综合管理研究。E-mail: 2570343@163.com

通信作者: 王飞(1971—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持环境效应评价与流域综合管理研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Mongolia. Drought events with high frequency, short duration and medium and low intensity mainly occurred in the south of northern China, while drought events with low frequency, long duration and high intensity mainly occurred in the north. During the study period, 10 typical drought events occurred in the drought response sensitive area of northern China, and there were great differences in the drought characteristics of different drought events. In terms of the impact of drought events on vegetation growth, it could be preliminarily determined that for a drought event, when the drought duration was no more than 3 months, the drought intensity played the major role in the vegetation growth process; when the drought lasted more than 3 months, the drought severity began to play a major role. [Conclusion] Only when the drought duration exceeds a certain range, the accumulation and lag effect of early drought will be gradually reflected, and the subsequent drought will lead to a significant decline in vegetation productivity. This conclusion can provide theoretical support for ecological protection in northern China.

Keywords: SPEI; run theory; drought events; NDVI standardization anomaly

干旱通常指由于水分持续亏缺而致使水分供应不能满足当前需求的一种自然灾害^[1]。作为对全球生态平衡威胁最大的自然灾害之一,干旱具有发生代价高、时空特征复杂以及难以预测等特点。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次报告称,未来20年,全球升温将达到或超过1.5℃^[2],升温会促使干旱和热浪等极端气象灾害变得更加频繁,从而进一步破坏全球生态系统的稳定性。

植被作为自然生态系统的关键主体以及联结地表和大气的纽带,在气候调节、土壤养分循环以及水土保持等生态系统功能调节方面发挥着重要作用^[3]。气象灾害和人为破坏是威胁植被生长的两个关键因素。作为对植被生长最具有威胁性的气象灾害之一,干旱通过影响植被光合和呼吸作用等生理过程对植被生长产生不利影响,进而给农业、水资源以及生态环境带来灾难性后果^[4]。因此,全球气候变暖背景下植被与干旱之间的关系成为当前学术界研究的热点。

为了探讨植被对干旱的响应机制,本文选择了极易受干旱影响的中国北方作为研究区域。中国北方位于东亚中纬度地区,下垫面复杂、地表植被稀疏,干旱、半干旱和半湿润地区分别约占其陆地总面积的39%,23%和25%^[5]。近年来,由于温度持续升高导致的潜在蒸散发不断增加,中国北方干旱问题尤为突出,进一步加剧了其地表植被的脆弱性和不稳定性,严重阻碍了当地农业生产和生态经济的可持续发展^[6]。已有研究基于标准化降水蒸散指数(SPEI)对中国北方及区域气象干旱的时空演变进行了探讨,发现近60年来中国北方地区普遍存在干旱化趋势^[7]。亦有研究验证了近30年来中国北方的干旱程度进一

步加剧,严重威胁了陆地水文循环和植被生长状况,致使区域生态环境恶化^[8]。然而,在以往有关中国北方干旱特征的描述及地表植被对干旱响应状况的研究中,仍有许多问题亟待解决。首先,当前研究多基于干旱历时或强度等单干旱特征变量描述干旱的时空特征,少有研究从多干旱特征变量角度具体分析单次干旱事件的演变过程。其次,在植被对干旱的响应方面,许多研究仅考虑干旱与植被指数间的关系,而模糊了干旱特征变量在植被变化过程中所起的作用。因此,本文基于SPEI和归一化植被指数标准化异常(SA_{NDVI})分析1982—2019年中国北方干旱响应敏感区的典型干旱事件对植被生长的影响。本文的主要目的是:(1)分析1982—2019年中国北方SPEI的时空变化特征;(2)识别中国北方干旱响应敏感区的典型干旱事件并描述其干旱特征;(3)研究各典型干旱事件对SA_{NDVI}的影响,并进一步探讨不同干旱特征变量在植被生长过程中所起的作用,以期阐明中国北方地区近几十年来的干旱情况及其对植被生长的潜在影响,进而为生态系统管理及保护提供理论支持。

1 研究区概况

本文以中国北方为研究区域(73°29′—135°04′E, 32°23′—53°34′N),包括西北、华北和东北地区(图1),覆盖15个省级行政区,总面积约577.24 km²。其地势西高东低,由西到东先分别是青藏高原(平均海拔大于4 000 m)、黄土高原和内蒙古高原(平均海拔1 000~2 000 m)、华北平原和东北平原(平均海拔小于500 m),三大盆地分布其间^[9]。

研究区气候类型复杂,西部主要受地理位置、西风带和青藏高原的影响,属于温带大陆性气候,常年

干燥少雨;东部主要受东亚夏季风和西北季风的影响,属于温带季风气候,雨热同期;西南部主要受高海拔青藏高原的影响,属于高原山地气候,常年寒冷干燥。此外,研究区内复杂多样的气候进一步丰富了其土地利用类型^[10]。如耕地主要分布在具有大面积平原的东北中部以及华北等地,林地主要分布在东北地区的长白山、大小兴安岭以及秦岭等地,荒漠和草原主要分布在西北地区。

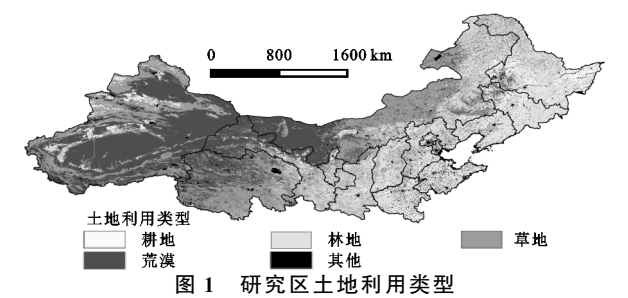


图 1 研究区土地利用类型

2 数据与研究方法

2.1 数据

2.1.1 归一化植被指数 (NDVI) 本研究中的 NDVI 数据来源于国家地球系统科学数据中心 ([http: www. geodata. cn](http://www.geodata.cn)) 提供的中国 5 km 分辨率逐月 NDVI 数据集 (1982—2020 年), 该数据集由美国国家航空航天局 (NASA) 超高分辨率辐射计 (AVHRR) NDVI V5 版逐日数据进行月度合成、镶嵌和裁剪后制作而成。

2.1.2 气象数据 本文采用国家气候中心 ([https: www. ncc- cma. netcn](https://www.ncc-cma.netcn)) 提供的 1982—2019 年逐月平均气温和降雨量栅格数据作为计算 SPEI 的基础气象数据, 原始空间分辨率为 0.5°, 通过双线性内插法重采样为 5 km 的分辨率, 以保持和植被数据的分辨率一致。

2.2 方法

2.2.1 标准化降水蒸散发指数 (SPEI) SPEI 在将降水量和潜在蒸散发纳入干旱成因的同时, 还兼具 SPI (标准化降水指数) 的多时间尺度优势, 是监测和定量描述气候类型复杂地区的干旱最常用的指标之一^[11]。SPEI 具体计算过程如下:

(1) 基于 Thornthwaite 方法逐月计算降水量 (P) 与潜在蒸散量 (PET) 之差:

$$D_i = P_i - PET_i \tag{1}$$

式中: P_i 和 PET_i 分别为第 i 月的降水量 (mm) 与潜在蒸散发量 (mm); D_i 为水分盈亏状况 (mm)。

(2) 建立多时间尺度 P 和 PET 差值的累积序列 (D_n^k):

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-1} - PET_{n-1}) \quad n \geq k \tag{2}$$

式中: k 分别指 1 月、3 月、6 月、12 月; n 表示某个月。

(3) 对 D_n^k 数据序列进行拟合及正态化得到 SPEI 数值。给定时间尺度的累积概率 $F(x)$ 通过 log-logistic 概率函数计算:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{D - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \tag{3}$$

式中: α, β, γ 代表 3 种参数, 用基于经验频率的概率加权距法 (PWMs) 来估计参数。

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta})} \tag{5}$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta}) \tag{6}$$

$$\omega_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - F_i)^s D_i \tag{7}$$

式中: ω_s 是 s 阶的 PWMs, $s = 0, 1, 2$; n 是数据点的个数; $F(\beta)$ 是 Gamma 函数; F_i 为频率估计。

将 $F(x)$ 标准化, 令 $p = 1 - F(x)$:

当 $p \leq 0.5$ 时, 参数 $\omega = \sqrt{-2\ln(P)}$:

$$SPEI = \omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \tag{8}$$

当 $p > 0.5$ 时, 参数 $\omega = \sqrt{-2\ln(1-P)}$

$$SPEI = \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1 + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} - \omega \tag{9}$$

干旱等级划分见表 1。

表 1 基于 SPEI 指数的干旱等级划分

SPEI 数值	干旱等级
$SPEI < -2$	极端干旱
$-2 \leq SPEI < -1.5$	严重干旱
$-1.5 \leq SPEI < -1$	中等干旱
$-1 \leq SPEI < -0.5$	轻微干旱
$-0.5 \leq SPEI$	无旱

2.2.2 游程理论 游程理论是根据干旱指数在时间序列上的变化特征设定相关阈值来提取干旱事件的方法, 还可以进一步识别出干旱事件的干旱历时 (DD)、干旱烈度 (DS) 和干旱强度 (DI) 等基本干旱特征^[12]。DD 指一场干旱事件持续的月份, DS 为该场事件期间干旱指数累加和的绝对值, DI 为该场事件烈度的均值, 即 DS/DD。在实际研究中, 传统的游程理论可能会导致 1 场“强干旱事件”被划分为多场“小干旱事件”, 继而降低了该场事件的干旱等级。因

此,本文采用He等^[13]提出的3阈值优化的游程理论识别干旱事件及其特征。设定3个阈值 R_0, R_1, R_2 ($R_0=0, R_1=-0.3, R_2=-0.5$)水平,干旱特征的具体识别过程如下:

(1) 当干旱指数小于 R_1 时,初步认定该月干旱。

(2) 针对DD仅持续1个月的情况,当该月份的干旱指数大于 R_2 时,该月不被认定为一场干旱事件。

(3) 对于连续2场事件仅间隔1个月发生的情况,当间隔月干旱指数小于 R_0 时,2场干旱事件合并为1场,其DI为2场事件的DI之和,DD为2场事件的DD之和加1,否则认定为2场独立事件。考虑到人为灌溉的影响以及植被对干旱响应的敏感性,本文选取SPEI与SANDVI呈显著相关区域的林草地作为中国北方的干旱响应敏感区,从而进一步分析该区域的典型干旱事件对植被的影响。

2.2.3 归一化植被指数标准化异常(SA_{NDVI}) 为了监测植被生长态势的好坏,本文基于归一化植被指数(NDVI)计算了其标准化异常(SA_{NDVI}), SA_{NDVI} 可在一定程度上消除季节性差异对植被的影响。当 $SA_{NDVI}>0$ 时,植被盖度改善明显;当 $SA_{NDVI}<0$ 时,植被长势恶化^[14]。其计算公式如下:

$$SA_X = \frac{X_{i,t} - \bar{X}_{i,t}}{\sigma(X_{i,t})} \quad (10)$$

式中: X 代表植被指数; $X_{i,t}$ 代表干旱事件期间某一年第 t 个月第 i 个像元的 X 值; $\bar{X}_{i,t}$ 和 $\sigma(X_{i,t})$ 分别为研究期间不同年份第 t 个月第 i 个像元 X 的平均值及相应的标准差。 SA_X 是一个无量纲值,指某一年第 t 月的 X 值相对于研究期间不同年份第 t 月平均值的偏离程度。

2.2.4 趋势分析 Theil-Sen Median(Sen)法用于本研究SPEI和 SA_{NDVI} 变化的趋势分析:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (11)$$

式中: x_j 和 x_i 为相关变量在时间序列上对应的值; $\beta>0$ 表示相关变量在研究期间呈上升趋势, $\beta<0$ 表示相关变量在研究期间呈下降趋势。

Mann-Kendall(M-K)法用于判断SPEI和 SA_{NDVI} 变化趋势的显著性,其显著性水平设为0.05。

2.2.5 相关性分析 本文通过相关系数探讨SPEI和 SA_{NDVI} 之间的关系,其计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

式中: R 为相关系数; x_i 和 y_i 为研究变量的时间序列数据; \bar{x} 和 \bar{y} 为相关变量的均值。

3 结果与分析

3.1 SPEI的时空变化特征

中国北方地区在1982—2019年经历了多次干湿交替过程,且平均SPEI呈显著下降趋势(斜率 $= -0.0012$ /月, $p<0.01$),表明该区域在研究期间旱情持续加重(图2)。同时,SPEI具有明显的阶段性特征,分别于1995年及2015年出现转折,呈“稳定—下降—上升”的趋势。其干旱时段主要集中在1995—2015年,于2002年和2007年达到谷值,SPEI分别为 -0.016 和 -1.138 。2015年后北方干旱有所缓解,SPEI分别在2016年、2018年达到峰值,分别为 $1.212, 1.221$ 。

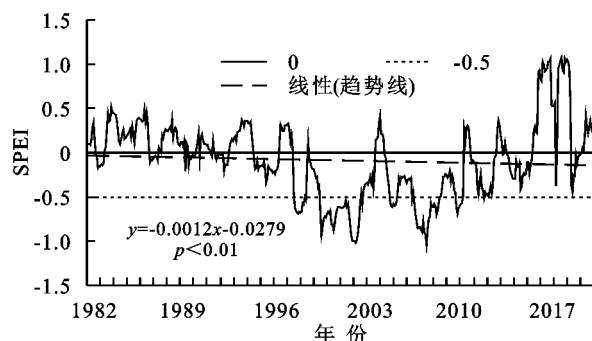


图2 1982—2019年中国北方SPEI变化趋势

从空间上看(图3),研究期间中国北方大部分地区(67.42%)SPEI呈下降趋势($-0.005 \sim -0.0007$ /月),新疆中东部、青海北部以及内蒙古、黑龙江等省份的部分地区(12.29%)SPEI呈显著下降趋势($-0.005 \sim -0.002$ /月),表明这些地区呈干旱加强趋势。相反,青海的中部地区,山东、山西、陕西、新疆以及黑龙江等省份的少部分地区(2.13%)SPEI呈显著上升趋势($0.001 \sim 0.004$ /月),相应地区则表现为湿润化趋势加强。

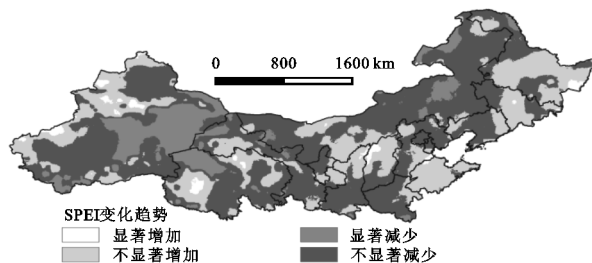


图3 1982—2019年中国北方SPEI的空间变化趋势

3.2 干旱与植被的空间分布特征

3.2.1 干旱事件特征的空间分布 本文基于游程理论从空间上分析了1982—2019年中国北方多发性干旱事件的特征(图4),结果表明北方不同地区多发性

干旱事件的干旱频次、干旱历时、干旱烈度和强度等特征差异很大。大部分地区在研究期间发生了 12 次以上的干旱事件,主要以短历时、中低强度的干旱事件为主。相反,新疆中部、青海北部、甘肃西北部以及内蒙古的西北和东北部等地在研究期间发生的干旱事件频次相对较低,主要以长历时、高强度的干旱事件

件为主。整体而言,高频次、短历时、中低强度的干旱事件主要发生在中国北方的南部地区,低频次、长历时、高强度的干旱事件主要集中在北部地区。此外,严重干旱地区的干旱事件总是以低频次、长历时的特点发生,这主要是由于中国北方降水的年际变化不均匀和空间分布不均匀造成的。

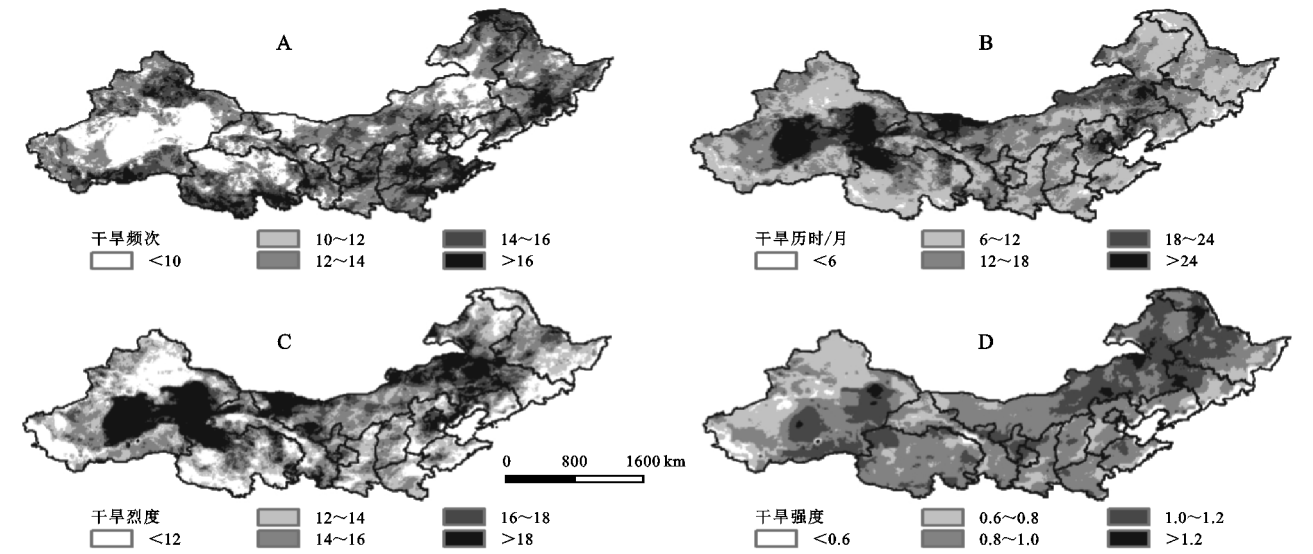


图 4 1982—2019 年中国北方干旱事件特征的空间分布

3.2.2 SA_{NDVI} 的空间变化趋势 1982—2019 年中国北方 SA_{NDVI} 呈上升趋势($0.001/\text{月}—0.008/\text{月}$)的面积占研究区总面积的 39.07%(图 5),其中呈显著上升趋势($0.003\sim 0.008/\text{月}$)的面积百分比为 4.89%,主要集中在黄土高原和华北平原,表明这些地区的植被生长状况得到明显改善。相反, SA_{NDVI} 呈下降趋势($-0.006\sim -0.001/\text{月}$)的面积占研究区总面积的 10.89%,其中呈显著下降趋势($-0.006\sim -0.003/\text{月}$)的面积百分比为 4.02%,主要分布在新疆以及内蒙古等地。

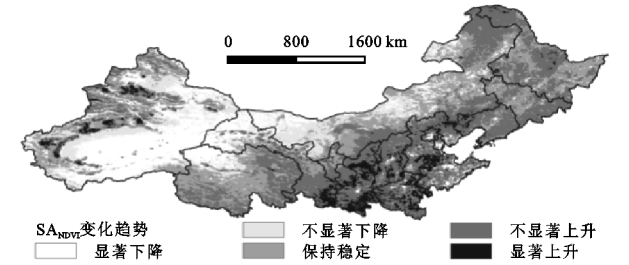


图 5 1982—2019 年中国北方 SA_{NDVI} 的空间变化趋势

3.3 干旱响应敏感区干旱事件对植被的影响

3.3.1 SPEI 与 SA_{NDVI} 的空间关系 本研究通过对比中国北方 1982—2019 年 1,3,6,12 个月尺度的 SPEI 与 SA_{NDVI} 的相关关系发现(图 6),各时间尺度 SPEI 与 SA_{NDVI} 呈显著相关区域的面积百分比依次为 43%,59%,48%,39%。相对较高且通过显著性检验的相关系数更多地集中在中国北方中东部地区。如华北中部和内蒙古东部 SA_{NDVI} 与 SPEI 主要呈显著正相关,东北中部

SA_{NDVI} 与 SPEI 主要呈显著负相关。另一方面,尽管各时间尺度的 SPEI 与 SA_{NDVI} 的相关性间存在一定差异,但在中国北方地区,SPEI-3 与 SA_{NDVI} 的相关性较高($R=0.689\ 6$),具有极好的代表性,故选用 SPEI-3 作为衡量该区域干旱状况的指数,以评估干旱对植被的影响。

3.3.2 敏感区典型干旱事件的识别 中国北方干旱响应敏感区在 1982—2019 年平均 SPEI 呈显著下降趋势(斜率= $-0.001\ 5/\text{月}$, $p<0.01$),表明该区域在研究期间旱情持续加重(图 7)。此外,敏感区在研究期间共经历了 10 次典型干旱事件($D_1—D_{10}$),10 次干旱事件都发生在 20 世纪 90 年代末期以后,其干旱历时、干旱烈度和干旱强度等干旱特征列于表 2。敏感区内 10 次典型干旱事件的干旱特征间存在较大差异。如 D_4 事件发生在 2001 年 3 月至 2002 年 3 月,干旱历时为 13 个月,干旱烈度为 11.05,在所有干旱事件中历时最长且烈度最大。尽管 D_4 事件的干旱历时最长、烈度最大,但 D_3 事件的干旱强度最大,干旱强度为 0.92。

3.3.3 典型干旱事件特征对植被的影响 为了更直观地分析敏感区的典型干旱事件对植被生长过程的影响,本文同时引入干旱事件开始前以及干旱事件结束后两个正常月份 SA_{NDVI} 与 SPEI 变化的时间序列,从而进一步探讨各事件的不同干旱特征在植被生长过程中所起的作用(图 8)。从 SA_{NDVI} 与 SPEI 时间序列的变化上看,对于一次干旱事件($D_1—D_{10}$),当其持续时间不超过 3 个月时, SA_{NDVI} 与 SPEI 具有相同的变化趋

势,此时干旱强度对植被生长过程起主要影响作用;当干旱持续时间超过 3 个月,SA_{NDVI} 与 SPEI 不再具有相同的变化趋势,而是开始呈持续下降趋势,此时干旱烈度开始对植被生长过程起主要影响作用。此外,对于历时不足 6 个月的干旱事件(见 D₆,D₉,D₁₀),当其结

束后,SA_{NDVI} 与 SPEI 会继续呈现相同的变化趋势;而对于历时超过 6 个月的干旱事件(如 D₁,D₄,D₈),当其结束后,SA_{NDVI} 仍会持续一段时间的下降。这说明当干旱事件结束而其产生干旱胁迫又达到一定程度时,干旱对植被生长的滞后作用会变得更加明显。

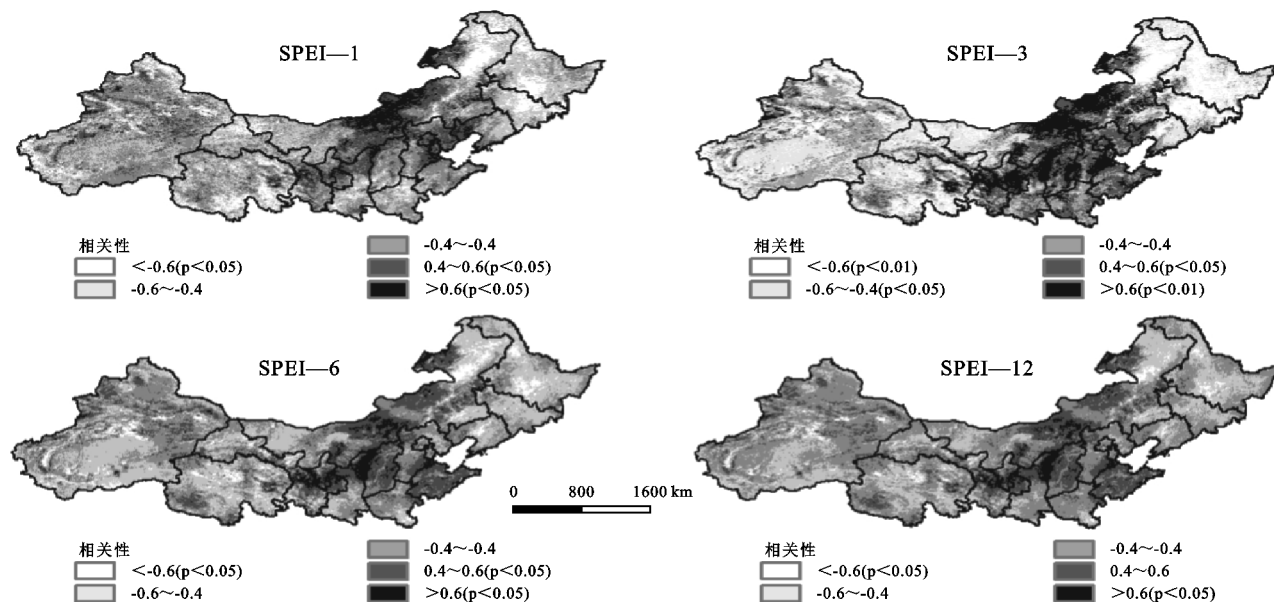


图 6 1982—2019 年 SPEI 与 SA_{NDVI} 的空间相关关系

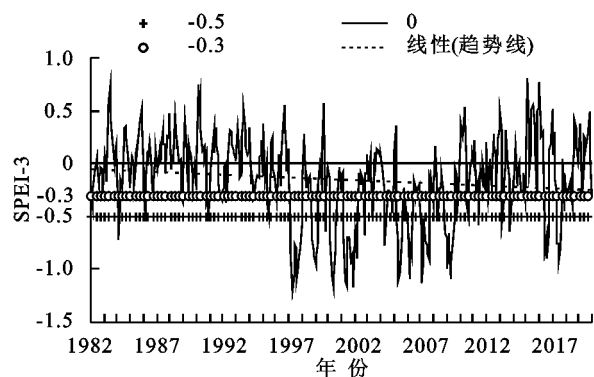


图 7 1982—2019 年中国北方干旱响应敏感区 SPEI 变化

表 2 中国北方干旱响应敏感区 1982—2019 年干旱事件

干旱事件	干旱起始时间	干旱终止时间	干旱历时/月	干旱烈度	干旱强度
D ₁	1997-02	1997-12	11	9.57	0.87
D ₂	1998-09	1999-03	7	5.67	0.81
D ₃	2000-02	2000-08	7	6.44	0.92
D ₄	2001-03	2002-03	13	11.05	0.85
D ₅	2005-03	2005-08	6	4.62	0.77
D ₆	2006-01	2006-05	5	4.00	0.80
D ₇	2007-01	2007-08	8	6.48	0.81
D ₈	2008-11	2009-07	9	7.11	0.79
D ₉	2016-05	2016-09	5	3.80	0.76
D ₁₀	2017-05	2017-08	4	3.24	0.81

4 讨论

本文通过分析中国北方地区近 40 年来 SPEI 的

时空演变特征发现,北方地区整体呈现干旱化趋势(图 2),这与前人的研究结果一致^[15]。另一方面,本文基于像元尺度将干旱特征进一步在空间上进行表征(图 4),受温带大陆性季风气候和东亚季风的影响,低频次、长历时、高强度的干旱事件主要集中在中国北方的北部地区。新疆中东部以及青海北部干旱化趋势最为明显,主要原因在于自 20 世纪 90 年代以来该区域降水量持续减少,而同时期风速和日照时数反而增加,潜在蒸散量大于降水量,最终导致该区域干旱程度加剧^[16]。

SPEI 与 SA_{NDVI} 的相关性大小有效地反映了植被对干旱的敏感性高低^[17]。中国北方 SA_{NDVI} 与短时间尺度的 SPEI 的相关性较高(图 6),说明中国北方植被对短时间尺度的干旱响应敏感^[18]。然而,干旱不能完全解释 SA_{NDVI} 的变化,其中人为干扰占据了绝大部分原因。

如在黄土高原以及东北西部等地,得益于封山育林、退耕还林以及三北防护林等生态治理工程,当地的植被覆盖度明显提高,显著增强了区域自然生态系统抵御极端气象灾害的能力,即使干旱呈增强趋势,SA_{NDVI} 也没有呈下降趋势^[19]。另一方面,在内蒙古地区,放牧强度也是影响 SA_{NDVI} 变化的重要因素。在不受其他因素干扰的前提下,随着放牧强度的增大,当地植被生物量呈现先增加后减少的趋势^[20],即使气候条件变得更加湿润,SA_{NDVI} 仍可能呈下降状态。

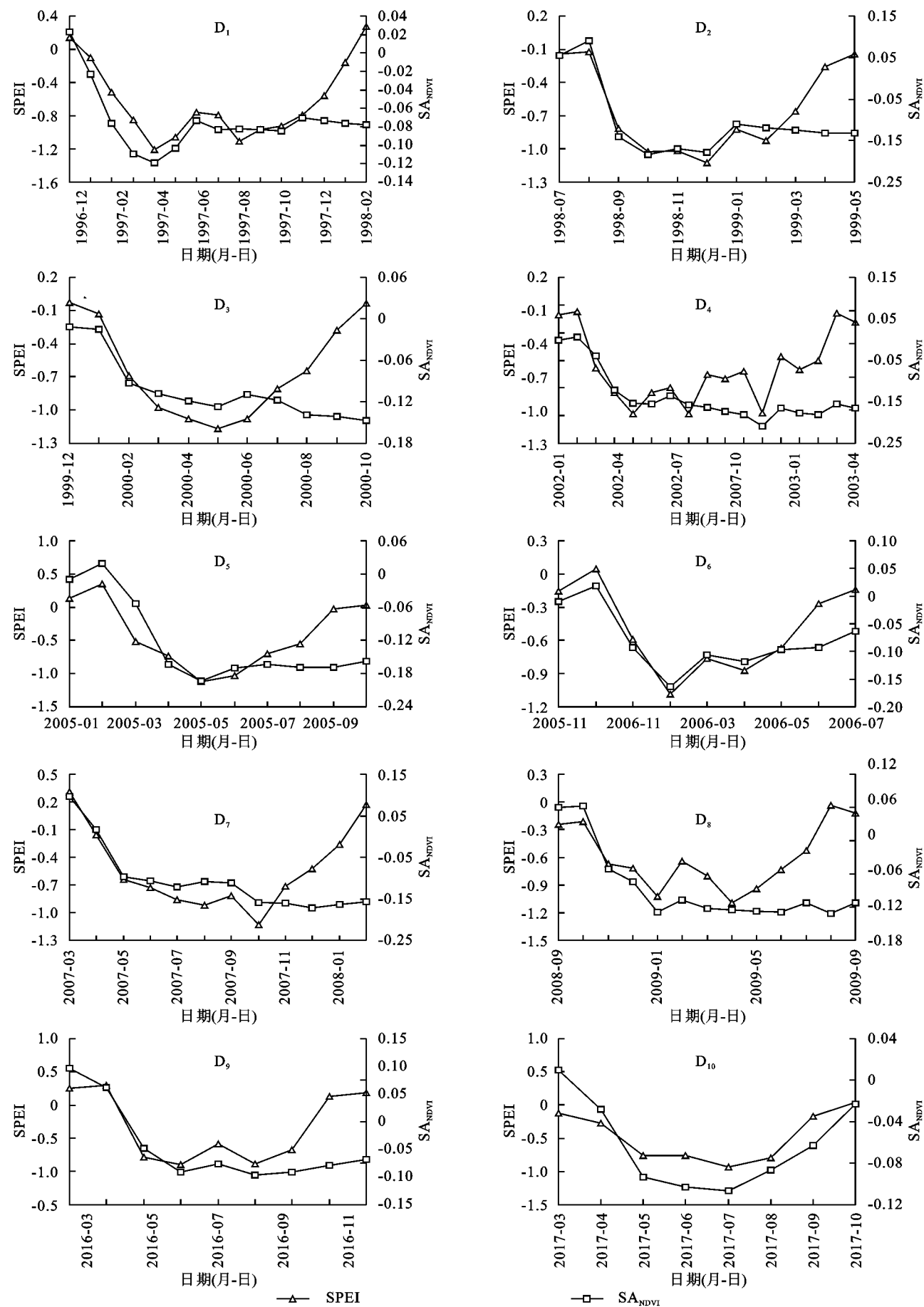


图 8 不同干旱事件期间 SPEI 与 SA_{NDVI} 的变化

本文基于 SPEI 等级划分标准采用优化后的 3 阈值游程理论在 1982—2019 年中国北方干旱响应敏感区识别出 10 次典型干旱事件(表 2), 10 次干旱事件与相关文献^[21-25]记载中该区域发生的干旱状况相一致。从敏感区不同干旱事件期间 SA_{NDVI} 对 SPEI 的响应来看(图 8), 只有当干旱持续时间超过一定范围后, 前期干旱的累积效应才会逐渐体现^[26]。当不同干旱事件的前期历时达到 3 个月时, 各事件对应的干旱累积效应会达到一定的阈值范围, 此时干旱烈度开始发挥作用, SA_{NDVI} 与 SPEI 不会再具有相同的变化趋势, 而是开始呈持续下降趋势^[27]。但该规律为整体均值评估结果, 可能并不完全适用于敏感区所有范围内 SA_{NDVI} 与 SPEI 间的关系, 主要原因在于植被生长是一个复杂的过程, 在受到气候因素影响的同时还受到受其他因素的影响。如在青海的大部分高寒草原上, 升温可以在一定程度上促使高原积雪和冻土融化, 增加了土壤水分的有效性^[28], 在一定程度上缓解了前期干旱的累积效应对植被产生的胁迫作用。这可能是部分高寒植被对干旱响应缓慢的主要原因。另一方面, 不同类型的植被从土壤获取水分的能力有所不同。在干旱导致的土壤水分胁迫作用下, 草地只是吸收表层土壤的水分来满足生长条件, 因而对干旱更为敏感; 林地可利深层土壤水分, 所以林地对干旱胁迫的响应存在一定的滞后性^[29]。这可能是少部分草地和林地出现干旱烈度提前或延迟发挥主导作用的原因。

整体而言, 本文着重探讨了 1982—2019 年中国北方干旱的时空演变特征以及中国北方干旱响应敏感区 10 个典型干旱事件的干旱特征对植被生长的影响, 可为未来干旱监测以及降低干旱对生态系统的影响提供理论支持。但本文仅初步验证了典型干旱事件的干旱特征在植被生长过程中所起的作用, 如何定量分析各干旱特征间的相互关系及其在植被生长过程中所起的作用在未来需要研究的重要内容。

5 结论

(1) 近 38 年来, 中国北方的旱情持续加重(斜率 $_{SPEI} = -0.001$ 2/月, $p < 0.01$), 旱情加重区主要集中在新疆中东部、青海北部以及内蒙古东部。

(2) 研究期间, 高频次、短历时、中低强度的干旱事件主要发生在中国北方的南部地区, 低频次、长历时、高强度的干旱事件则集中在北部地区。

(3) 本文采用游程理论在中国北方干旱响应敏感区识别出 10 次典型干旱事件, 不同干旱事件的干旱特征存在明显差异。其中 D4 事件历时最长且烈度最大, 而 D3 事件的干旱强度最大。

(4) 在干旱事件对植被生长态势的影响方面可以初步判定, 对于一次干旱事件, 当干旱持续时间不超过 3 个月时, 干旱强度对植被生长过程起主要影响作用; 当干旱持续时间超过 3 个月, 干旱烈度开始发挥主要影响作用。只有当干旱持续时间超过一定范围后, 前期干旱的累积与滞后效应才会逐渐体现。

参考文献:

- [1] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 等. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 177-178.
- [2] 姜大膀, 王晓欣. 对 IPCC 第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 650-653.
- [3] Ge W Y, Han J Q, Zhang D J, et al. Divergent impacts of droughts on vegetation phenology and productivity in the Yungui Plateau, southwest China[J]. Ecological Indicators, 2021, 127: 107743.
- [4] Zhong R D, Chen X H, Lai C G, et al. Drought monitoring utility of satellite-based precipitation products across mainland China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 568: 345-349.
- [5] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 等. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 99-105.
- [6] 任国玉, 柳艳菊, 孙秀宝, 等. 中国大陆降水时空变异规律Ⅲ: 趋势变化原因[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 327-348.
- [7] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643-649.
- [8] Li J, Wang Z L, Lai C G. Severe drought events inducing large decrease of net primary productivity in mainland China during 1982—2015[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 135541.
- [9] 尹云鹤, 马丹阳, 邓浩宇, 等. 中国北方干湿过渡区生态系统生产力的气候变化风险评估[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1605-1614.
- [10] 贾艳青, 张勃. 1960—2017 年中国北方气候干湿变化及其与 ENSO 的关系[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2115-2124.
- [11] Vicente S, Sergio M, Santiago B, et al. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Jour-

- nal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [12] Herbst P H, Bredenkamp D, Barker H. A technique for the evaluation of drought from rainfall data[J]. Journal of Hydrology, 1966, 4:264-272.
- [13] He J, Yang X H, Li Z, et al. Spatiotemporal variations of meteorological droughts in China During 1961-2014: An investigation based on multi-threshold identification[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2016, 7(1):63-76.
- [14] Jiang W X, Wang L C, Zhang M, et al. Analysis of drought events and their impacts on vegetation productivity based on the integrated surface drought index in the Hanjiang River Basin, China [J]. Atmospheric Research, 2021, 254:105536.
- [15] 王素萍, 张存杰, 李耀辉, 等. 基于标准化降水指数的1960—2011年中国不同时间尺度干旱特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3):827-834.
- [16] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2):338-339.
- [17] Sergio M. Vicente-Serrano, Celia Gouveia, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1):52-57.
- [18] Xu H J, Wang X P, Zhao C Y, 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 and Forest Meteorology, 2018, 262:1-2.
- [19] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960—2016年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(7):1820-1832.
- [20] 高露, 张圣微, 朱仲元, 等. 放牧对干旱半干旱草原植物群落结构和生态功能的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6):209-211.
- [21] Zhou S, Wang Y, Li Z, et al. Characterizing spatio-temporal patterns of multi-scalar drought risk in mainland China [J]. Ecological Indicators, 2021, 131:108189.
- [22] 倪深海, 顾颖, 彭岳津, 等. 近七十年中国干旱灾害时空格局及演变[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6):176-181.
- [23] 王闪闪, 王素萍, 冯建英. 2016年全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2017, 35(2):342-351.
- [24] 张宇, 王素萍, 冯建英. 2017年全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2018, 36(2):331-338.
- [25] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6):1908-1919.
- [26] 顾锡羚, 郭恩亮, 银山, 等. 干旱对内蒙古植被生长的累积与滞后影响评估研究[J]. 草地学报, 2021, 29(6):1302-1308.
- [27] Zhao A Z, Yu Q Y, Feng L, et al. Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: A case study in the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261:110214.
- [28] Wang C, Huang M, Zhai P. Change in drought conditions and its impacts on vegetation growth over the Tibetan Plateau [J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(3):333-341.
- [29] Wang H, Vicente S M, Tao F, et al. Monitoring winter wheat drought threat in Northern China using multiple climate-based drought indices and soil moisture during 2000—2013[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 229:1-12.