

DOI: 10.20103/j.stxb.202206061601

刘海, 姜亮亮, 刘冰, 刘睿, 肖作林. 近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响. 生态学报, 2023, 43(19): 7936-7949.

Liu H, Jiang L L, Liu B, Liu R, Xiao Z L. Characteristics of drought in China and its effect on vegetation change in recent 40 years. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 7936-7949.

近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响

刘 海^{1,3}, 姜亮亮^{1,3,*}, 刘 冰², 刘 睿^{1,3}, 肖作林^{1,3}

1 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

2 重庆师范大学化学学院, 重庆 401331

3 地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331

摘要: 全球变暖影响下, 中国干旱事件发生愈加频繁。过去半个世纪里, 中国半干旱和半湿润地区的分界线总体南移, 干旱面积呈增加趋势, 因此了解中国干旱变化趋势对区域生态环境保护具有重要意义。基于 GLASS 数据产品、ERA5-Land 数据, 采用游程理论和多元线性回归等方法, 探究 1982—2018 年间多尺度干旱事件基本特征(干旱持续时间、干旱严重度、干旱强度等), 并分析植被生产力变化趋势, 揭示干旱对植被变化的累积影响。结果表明:(1) 新疆、青藏高原以及东南地区干旱较为严峻, 而华中、华东大部分区域处于轻旱或无旱状态;(2) 1982—2018 年间, 中国植被生产力整体呈改善态势, 显著改善区集中在中国中部, 而退化区集中在东南部、内蒙古和西藏南部;(3) 中国大部分区域干旱与植被呈正相关, 且干旱对植被多为累积影响, 在干旱区和半干旱区尤为明显;(4) 随着植被覆盖度的增加, 植被与近短期尺度干旱的相关性也逐渐增加, 由干旱区到湿润区, 近短尺度干旱对植被变化的影响逐步增大。其中, SPEI-6(标准化降水蒸散发指数—中期尺度)对植被轻微变化累积影响最显著, 而 SPEI-12(标准化降水蒸散发指数—长期尺度)对植被显著变化累积影响更明显。本研究将有助于深入认知干旱对植被累积影响, 提高植被退化防治措施的有效性, 为区域土地退化零增长目标实现提供科学依据。

关键词: 干旱事件; 植被变化; SPEI; 游程理论; 中国

Characteristics of drought in China and its effect on vegetation change in recent 40 years

LIU Hai^{1,3}, JIANG Liangliang^{1,3,*}, LIU Bing², LIU Rui^{1,3}, XIAO Zuolin^{1,3}

1 School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

2 College of Chemistry, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

3 Chongqing Key Laboratory of Geographic Information System Application, Chongqing 401331, China

Abstract: Under the influence of global warming, drought events are becoming more frequent in China. Moreover, the dividing line between China's semi-arid and semi-humid areas has generally moved southward in the past half-century, and the arid area had an increasing trend. Thus, understanding the trend of drought change in China is of great significance for protection of the regionally ecological environment. Based on the GLASS dataset and ERA5-Land data, the characteristics of drought events (drought duration, drought severity, drought intensity, etc.) were explored from 1982 to 2018 at different timescales (SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 and SPEI-12) using run theory and multiple linear regression model. Then, the changing trend of vegetation productivity was investigated in the study. Further study revealed the cumulative effect of drought on vegetation change. The results showed that severe drought was observed in Xinjiang, the Qinghai-Tibet Plateau and southeast China based on drought indicators at multiple timescales, while mild drought or no drought was identified in most of central and eastern China. Drought events with high severity and long duration have occurred in Xinjiang; The

基金项目: 国家自然科学基金(42201124); 重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0523); 重庆市博士“直通车”科研项目(CSTB2022BSXM-JCX0145); 重庆市留学人员回国创业创新支持计划项目(2204012976986965)

收稿日期: 2022-06-06; **网络出版日期:** 2023-05-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiang@cqnu.edu.cn

drought intensity in the Qinghai-Tibet Plateau is relatively high; In southeast China, there are fewer drought events, but their severity and intensity are higher. The overall vegetation productivity of China improved from 1982 to 2018. The areas with significant improvement were mainly distributed in the central China, while the areas with significant degradation were concentrated in the southeastern China, the Inner Mongolia and southern Tibet. A positive correlation between vegetation and drought was investigated in most areas of China, especially in the arid and semi-arid zones. With the increase in vegetation coverage, the correlation between vegetation and short-term drought increased. The correlation between vegetation and drought at the short-term timescale increased gradually from the arid area to the humid area. Drought at the medium timescale of SPEI-6 had the significantly cumulative impact on vegetation with slight changes, whereas drought at the long-term timescale of SPEI-12 had the strongest cumulative impact on vegetation with significant changes. Most of the impacts of drought on vegetation in China are cumulative. For example, Inner Mongolia, located in the northeastern part of the semi-arid region, has a close relationship between vegetation degradation and medium-term drought. Vegetation in the Qinghai-Tibet Plateau is sensitive to long-term drought, which is not only affected by precipitation, but also by ice and snow melt water in the early stage and frozen soil freezing and thawing. This study will help to deeply understand the cumulative impact of drought on vegetation and improve the effectiveness of vegetation degradation prevention and control measures. This paper can provide the scientific basis for achieving the land degradation neutrality initiative.

Key Words: drought event; vegetation change; SPEI; run theory; China

受全球变暖影响,干旱事件愈加频繁,不仅强度增加,持续时间增长,危害也逐步加剧^[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次气候变化评估报告指出极端干旱事件愈发成为全球变暖最重要的威胁,且未来持续增暖将增加极端干旱的频率^[2]。1880—2012 年全球平均温度上升了 0.85℃ (0.65—1.06℃),其中,1983—2012 年可能是北半球近 1400 年来气温最高的 40 年。在过去的一个半世纪里,地表温度在全球范围内呈现整体上升趋势,但存在着明显的地域差异^[3]。IPCC 第五次评估报告指出,近百年,中国陆地区域平均增温高于全球平均值^[4],中国半干旱和半湿润地区的分界线不断向南移动,干旱面积有增加趋势^[5]。中国华北、西北东部以及东北等地区的干旱化趋势显著,已形成了从东北到西南的一条干旱化趋势带^[6-7]。自 1995 年以来,中国因干旱灾害所造成的直接经济损失逐年增长,位于各类自然灾害前列^[8]。因此,研究中国干旱事件的基本特征可为制定应对全球气候变化影响的措施提供理论基础,且对了解中国干旱变化趋势和区域生态环境保护有重要意义。

干旱因其长期性、高频性、影响广泛性和影响持续性等特点,已成为影响我国乃至全世界农业生产和生态环境最严重的自然灾害之一^[9-10]。相关研究表明,干旱是对陆地生态系统总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)影响最强烈的极端气候^[11],直接影响着植被的生长和发育,破坏着陆地生态系统的碳循环。近年来全球气候变化愈发频繁,气温逐渐升高。气温变化通过影响大气环流及全球水循环,从而改变了降水的时空分布^[12],继而使得干旱具有时间和空间变化特征^[13],进而引起植被覆盖度的时空变化。而植被由于土壤、温度和降水等气候因素的综合作用,对全球变化有不同的响应程度,且在气候频繁变化的背景下,生态研究具有尺度依赖性^[14]。因此,中国多尺度干旱对植被变化影响研究有助于了解植被发展动态及预测未来格局。

随着全球环境的日益恶化,干旱严峻化以及干旱与植被的关系等问题已经吸引了众多学者的关注。自 1965 年 Palme^[15] 提出帕默尔干旱指标(Palmer Drought Severity Index, PDSI)以来,干旱发展到定量化研究的新阶段^[16]。McKee^[17] 于 1993 年提出了标准降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI),随后 Vicente-Serrano^[18] 在标准化降水指数基础上提出了标准化降水蒸散发指数(Standard Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),该指数不仅考虑了温度变化的影响,还具有多时间尺度特征,因此 SPEI 广泛应用于干旱监测。目前多数研究利用变化趋势、残差等定量方法监测干旱变化趋势,而基于干旱事件分析干旱基本特征的研究还较少^[19-20]。同时,考虑前期气候条件可以更加合理了解植被与干旱相互作用,然而不同时间尺度干旱对植被影响以及其累积效应常常被忽视^[21]。国内学者对干旱问题展开了大量研究,多数学者利用气象站点数据

计算了干旱指标,继而分析了长江流域、黄河流域等^[22-25]地区的干旱情况,但多数集中在小区域或站点尺度。部分学者研究了黄土高原地区和云南省植被 NDVI 对气候变化的响应,草地 NDVI 对干旱的响应研究,但更多关注区域植被与干旱的响应^[26-28],鲜有研究关注整个中国不同时间尺度的干旱事件及其对植被的影响。而中国植被类型丰富,不同植被在物种组成、群落结构、根系分布等方面存在较大差别,对外界环境变化的响应也有明显的空间差异性^[29]。基于此,本文基于长时间序列气候数据建立中国多尺度 SPEI 指数数据集,结合游程理论方法开展大区域多尺度中国干旱事件研究。本文联合多时间尺度的 SPEI 和净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据,研究不同尺度干旱对植被影响,分析其空间异质性,明确干旱对植被的变化的累积效应,可为区域土地退化零增长目标实现提供科学支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国位于亚洲东部、太平洋西岸,幅员辽阔,陆地总面积约 $960 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地势西高东低,呈三级阶梯分布,地形多变,导致气温降水组合的多样性,形成了复杂多样的气候。中国季风气候和大陆气候并存,形成了降水时空分布不均、气候的区域性和季节性差异明显等特点^[30]。中国有五个气候区(图 1):湿润区(38.79%)、半湿润区(14.57%)、半干旱区(34.95%)、干旱区(10.27%)和极端干旱区(1.42%)。其中干旱区集中于中国西部,湿润区位于南部。中国植被类型分布具有空间异质性^[31],中国西部多为草地,而耕地与林地集中于东部和南部(图 1)。

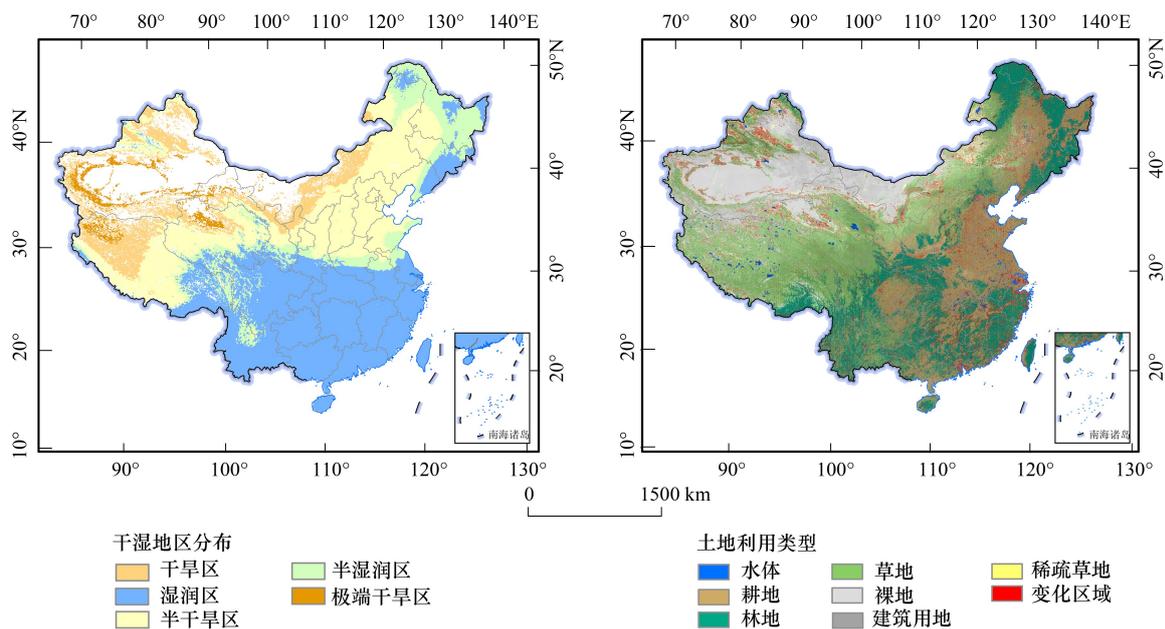


图 1 中国干湿地区分布及土地覆被类型图

Fig.1 Distribution maps of dry and wet zones and land cover types in China

1.2 数据

1.2.1 NPP 数据

生态系统植被净初级生产力是地表碳循环的重要评估要素及生态系统可持续发展的主要生态指标,其时序变化分析对评价生态质量、调节生态过程具有十分重要的意义^[32-33]。NPP 数据集来源于全球陆表特征参量数据产品(Global LAnd Surface Satellite, GLASS),GLASS 数据是基于多源遥感数据与地面实测数据反演得到的长时间序列、高精度的全球地表遥感产品^[34-35]。本研究选取 1982—2018 年的 NPP 数据,该数据可从国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)获取。

1.2.2 ERA5-Land

ERA5-Land 源自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF),是在 ERA5 数据基础上对陆地区域进行重新模拟而生成的再分析数据集,其空间分辨率高于 ERA5^[36]($0.1^\circ \times 0.1^\circ$)。ERA5-Land 的时间分辨率为 1 h,对各要素的量化将更加精确^[37]。ERA5-Land 数据下载自 ECMWF 网站(<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>),该数据集包括气温、潜在蒸散发以及降水等,本研究选取其中的降水与潜在蒸散发数据计算 SPEI 干旱指数。

1.2.3 干旱指数数据集

根据潜在蒸散量和降水有效性之间的差异,由 Antonio Trabucco 以 1 km 的空间分辨率计算得到 AI 数据集^[38]。目前多数研究利用干旱指数(AI)数据集对气候区进行划分,根据前人研究气候区被重新划分为五类^[39]:极端干旱($AI < 0.03$),干旱($0.03 < AI \leq 0.2$),半干旱($0.2 < AI \leq 0.5$),半湿润($0.5 < AI \leq 0.65$)和湿润($AI > 0.65$)。

1.2.4 土地利用数据集

土地利用数据由欧洲航天局(ESA)提供(<https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>),由 AVHRR、SPOT 和 MERIS 数据解译获得,采用了良好的质量把控,具有高度精准性^[40]。为了保持空间分辨率一致,利用双线性插值对 NPP 数据、土地利用数据和干旱指数数据集进行 0.1° 重采样,以匹配 ERA5-Land 数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散发指数 SPEI

SPEI 具备多时间尺度、计算过程简单、空间可比较性强、同时考虑降水与温度因素等多种优势。因此,本文在开展干旱识别和干旱的特征描述时,选取 SPEI 干旱指数。通过 1982—2018 年 ERA5-Land 数据计算出 4 个时间尺度(SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-12)的标准化降水蒸散发指数。并通过不同尺度的 SPEI 来探索干旱对植被累积最大影响的时间尺度,所以不同尺度每个月都有一个值。例如,SPEI-1 是当月的值,而 SPEI-3 是当月以及之前两个月的累积值。目前国内外研究多数采用该指数,多时间尺度 SPEI 可较好地表征干旱特征,反映实际干旱特征^[41]。

SPEI 干旱指数的计算过程主要步骤如下:

首先,进行降水(P_m)与潜在蒸散发(PET_m)差值计算,见公式(1)。

$$D_m = P_m - PET_m \quad (1)$$

式中, m 代表月份, D_m 表示第 m 月份的降水与该月份潜在蒸散发的差值。 D_m 提供了可分析月尺度的水分赤字或盈余的描述,当 $D_m > 0$,则表示当月处于湿润的状态;而当 $D_m < 0$,说明当月处于干旱的状态。

其次,将 D_m 按照不同的时间尺度(k 个月)依次进行累加。例如,将 k 设定为 6 个月尺度时,其累加过程见公式(2)。

$$\begin{cases} X_{n,m}^k = \sum_{l=7-k+m}^6 D_{n-1,l} + \sum_{l=1}^m D_{n,l} & \text{if } m < k \\ X_{n,m}^k = \sum_{l=m-k+1}^m D_{n-1,l} & \text{if } m \geq k \end{cases} \quad (2)$$

式中, $X_{n,m}^k$ 表示潜在蒸散发(PET_m)与降水(P_m)在 k 个月的时间尺度上第 n 年 m 月的累加值。

由于降水属于偏态分布,因此需要对 D_m 累加值进行标准化处理。依据 Vicente-Serrano^[18]等,使用 Log-logistic 分布函数对 D_m 累加值进行标准化处理,处理过程见公式(3)。

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

式中, α 、 β 、 γ 分别代表尺度、形状、位置参数,均由 L 距估计计算得到,计算过程见公式(4)–(8)。

$$\omega_s = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (1 - F_m)^s D_m \quad (4)$$

$$F_m = \frac{m - 0.35}{N} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (7)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (8)$$

式中, $\Gamma(\beta)$ 是 β 的 gamma 分布函数, $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 表示数据序列 D_m 的加权矩阵。

最后, 计算 SPEI, 过程见公式(9)–(11):

$$p = 1 - F(x) \quad (9)$$

$$w = \begin{cases} \sqrt{-2\ln p} & \text{if } p \leq 0.5 \\ \sqrt{-2\ln(1-p)} & \text{if } p > 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{SPEI} = w - \frac{C_0 + C_1w + C_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3} \quad (11)$$

式中, $C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853, C_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269$ 和 $d_3 = 0.001308$, 以上参数均来自于 Vicente-Serrano^[18] 等。

一般情况下, 不同时间尺度的 SPEI 值对于干旱或湿润条件有不同的敏感性。在本研究中, 分别选择 1 个月、3 个月、6 个月和 12 个月时间尺度的 SPEI 值(SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-12)来描述近期、短期、中期、长期干旱事件特征。

1.3.2 游程理论

游程理论由 Yevjevich^[42] 提出, 现已被广泛应用于干旱识别和干旱特征描述。一个游程是指在时间序列中所有数值中低于或高于一个截断阈值的部分, 高于截断阈值的部分为正游程, 而低于截断阈值的部分为负游程。根据 McKee^[17] 等对干旱事件的定义, 本研究通过以下三个标准判定一次干旱事件: 首先, SPEI 值持续 < 0 ; 其次, 在持续小于 0 期间 SPEI 总持续时间 ≥ 2 个月; 最后, SPEI 最小值 < -1 。相较于高强度的干旱事件, 持续的低强度干旱同样会对植被以及当地的生态系统等带来影响。因此, 在本文中的干旱事件事实上是一次最小值 < -1 且持续时间 ≥ 2 个月的负游程。图 2 描述了一次干旱事件及其基本特征。

基于游程理论和干旱事件的定义逐像元进行干旱事件识别并计算其基本特征, 干旱特征包括: 干旱持续时间(Drought Duration, DD)、干旱严重度(Drought Severity, DS)、干旱强度(Drought Intensity, DI)、干旱间隔(Drought Interval, DIV)和干旱次数(Drought Times, DT)。干旱持续时间指处于干旱状态下的时间长度, 即干旱开始时间和干旱结束时间之间的月份数。干旱严重度指干旱事件期间 SPEI 累加值的绝对值, 见公式(12)。干旱强度是指干旱事件期间的 SPEI 值的平均值, 是干旱严重度与干旱持续时间的比值, 见公式(13)。

$$DS = \sum_{i=1}^{DD} |\text{SPEI}_i| \quad (12)$$

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^{DD} |\text{SPEI}_i|}{DD} \quad (13)$$

1.3.3 皮尔逊相关系数法

基于线性回归分析法, 逐像元计算趋势线的变化斜率, 分析植被的时空变化趋势。趋势线斜率的计算如下^[44]:

$$\text{Slope} = \frac{m \sum_{j=1}^m j \times X_j - \sum_{j=1}^m j \times \sum_{j=1}^m X_j}{m \sum_{j=1}^m j^2 - \left(\sum_{j=1}^m j\right)^2} \quad (14)$$

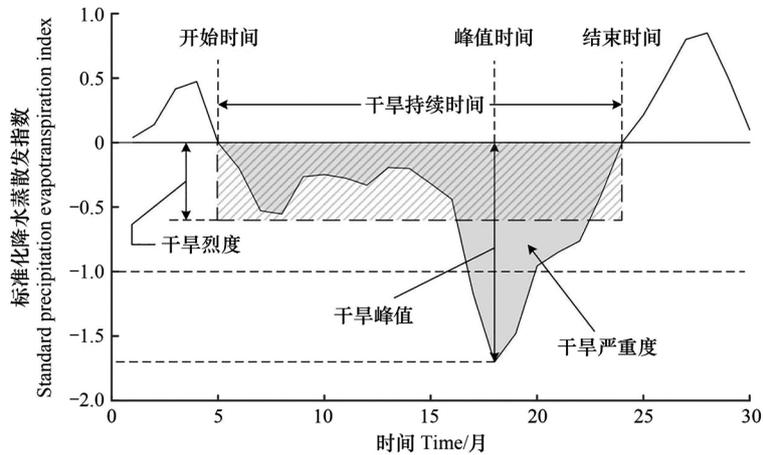


图 2 基于游程理论的干旱事件及其特征示意图^[43]

Fig.2 Diagram of drought event and its characteristics based on the Run theory ^[43]

其中, X_j 表示第 j 年的 NPP 的平均值, m 为时间序列。当 $Slope > 0$, 表明植被呈增加趋势; 而 $Slope < 0$, 表示植被呈减少趋势; 当 $Slope = 0$ 时, 则表示植被状态稳定。

采用皮尔逊相关系数法计算 SPEI 与 NPP 的相关性, 若相关系数在 95% 的水平上显著, 则表明 SPEI 与 NPP 关系密切, 计算过程见公式 (15):

$$r = \frac{m \sum_{j=1}^m X_j \times Y_j - \sum_{j=1}^m X_j \times \sum_{j=1}^m Y_j}{\sqrt{m \sum_{j=1}^m X_j^2 - (\sum_{j=1}^m X_j)^2} \times \sqrt{m \sum_{j=1}^m Y_j^2 - (\sum_{j=1}^m Y_j)^2}} \quad (15)$$

式中, X, Y 是两个随机变量, j 为年份, m 为研究时序。

1.3.4 曼-肯德尔检验

曼-肯德尔检验 (Mann-Kendall) 可以检验植被净初级生产力变化趋势的显著性。利用 0.05 水平上的置信区间, MK 的显著性检验结果可分为轻微变化 ($Z > 0.05$) 和显著变化 ($Z \leq 0.05$), 植被变化趋势分为以下五类 (表 1)。

表 1 植被 NPP 变化趋势的持续性

Table 1 Sustainability of NPP change trend

斜率 Slope	显著性水平 Significance level (Z)	变化类型 Change types	斜率 Slope	显著性水平 Significance level (Z)	变化类型 Change types
≥ 0.32	< 0.05	显著改善	< -0.32	> 0.05	轻微退化
≥ 0.32	> 0.05	轻微改善	< -0.32	< 0.05	显著退化
$-0.32 \sim -0.32$	—	稳定或无植被			

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity

2 结果与分析

2.1 干旱事件基本特征分析

SPEI-1 时间尺度下 (图 3), 干旱持续时间较长和干旱严重度较严峻的地区集中在各个气候区的西部, 如极端干旱区西部的新疆, 干旱区和半干旱区西部的西藏, 半湿润区西部的青海、四川以及湿润区西部的云南, 在半干旱区和半湿润区的东部也有少部分高值分布。中国干旱强度较高的地区主要分布在半干旱地区, 以及少部分半湿润地区和湿润区。SPEI-1 的干旱间隔时间, 除了西藏和部分东南地区, 整个中国的干旱间隔时间都呈现较短化。综上, SPEI-1 时间尺度下, 各个气候区西部的干旱特征情况较严峻。其中, 半干旱地区的干旱情况更为突出。

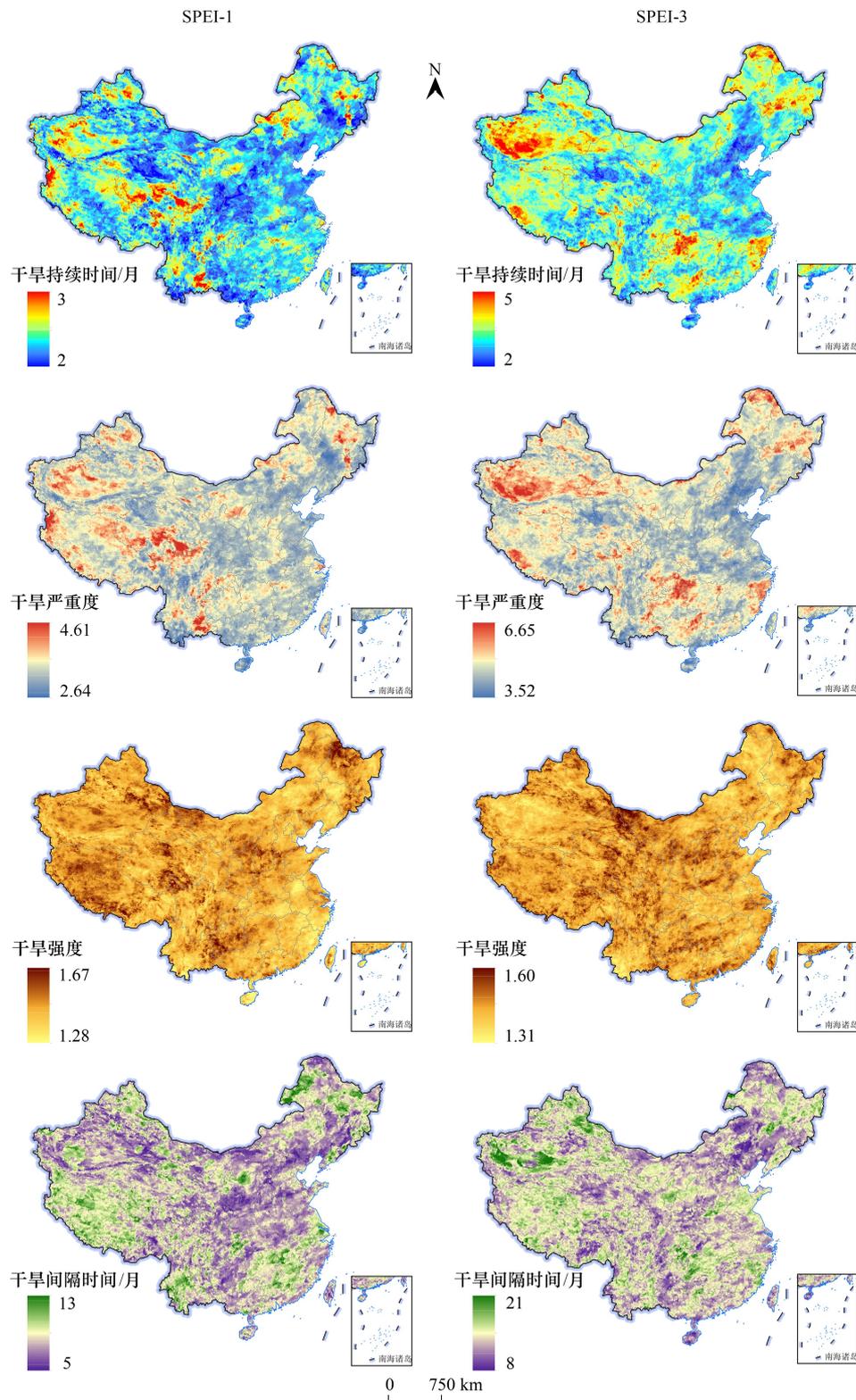


图3 1982—2018年 SPEI-1 与 SPEI-3 干旱年际空间变化

Fig.3 The spatial distribution of annual changes in SPEI-1 and SPEI-3 among 1982—2018

SPEI-3 时间尺度下(图3),极端干旱区西部的干旱持续时间以及干旱严重度异质性更加凸显。位于湿润和半湿润区的渝贵湘相交边界、黑龙江北部的干旱持续时间以及干旱严重度均偏高。中国干旱强度的变化

并不大,但在内蒙古和甘肃的交界处较为突出。在 SPEI-3 尺度下,大部分地区的干旱时间间隔明显变长,其中塔里木盆地更为突出。综上,在 SPEI-3 时间尺度下,干旱持续时间、干旱严重度和干旱间隔时间均高于 SPEI-1,极端干旱区和半干旱区以及部分湿润区的干旱情况较严峻。

SPEI-6 时间尺度下(图 4),极端干旱区及部分干旱区以及湿润区的东南部分的干旱持续时间和干旱严

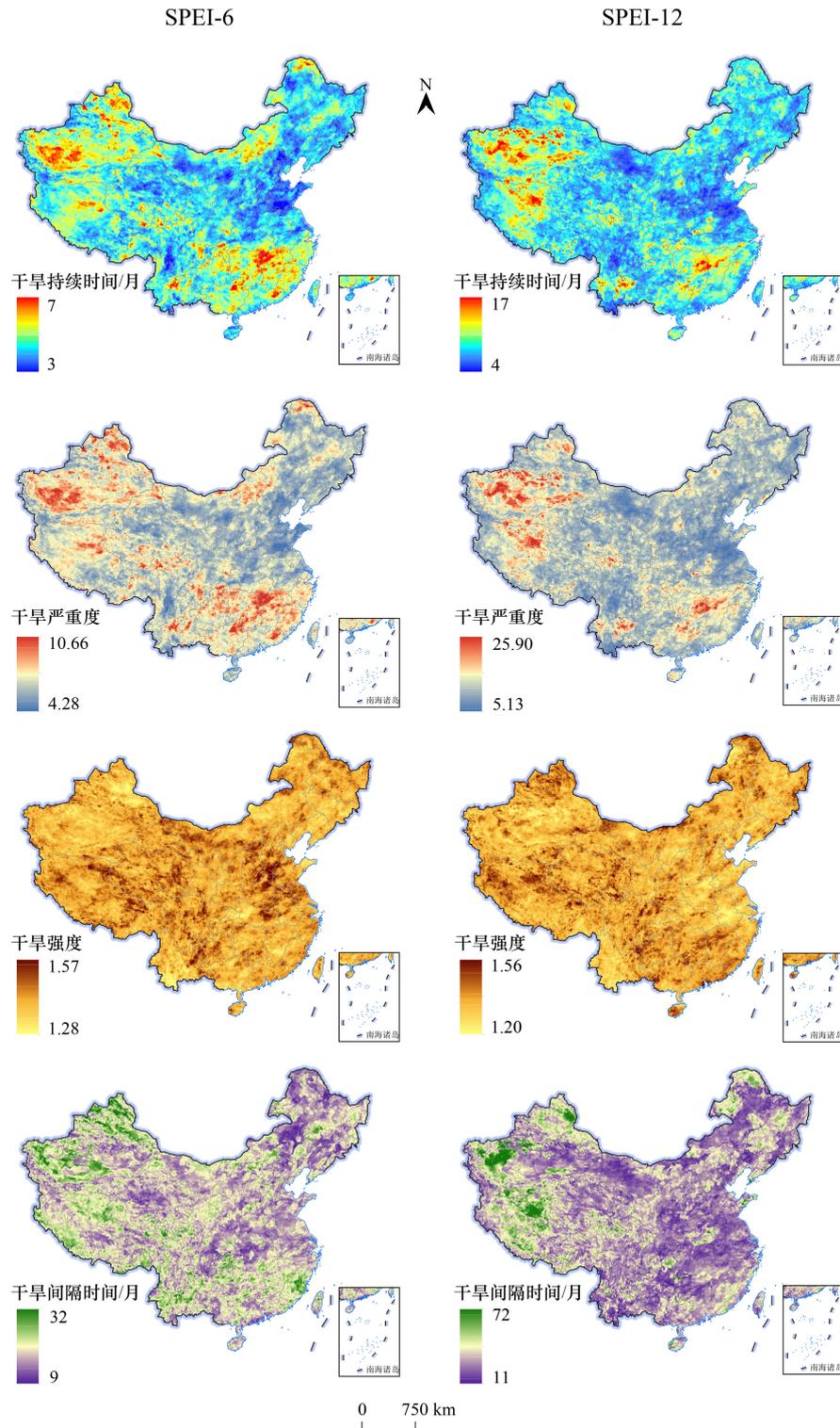


图 4 1982—2018 年 SPEI-6 与 SPEI-12 干旱年际空间变化

Fig.4 The spatial distribution of annual changes in SPEI-6 and SPEI-12 among 1982—2018

重度值均较高,此外,位于干旱区和半干旱区的内蒙古北部干旱持续时间和严重度开始加剧。在 SPEI-6 尺度下,干旱强度较强的地方出现在半干旱区东部的华北平原以及西藏地区,干旱时间间隔较短区域集中在中国东部,新疆地区间隔较长。综上,在 SPEI-6 时间尺度下,极端干旱区和东部湿润区的干旱特征情况严峻。

SPEI-12 尺度下(图 4),极端干旱区、西部干旱区以及位于湿润区的湘赣的干旱持续时间和干旱严重度值较高。新疆塔里木盆地和华北平原的干旱强度值较低。从 SPEI-12 的干旱时间间隔可以看出,除西藏地区,全国的干旱间隔时间都较短。

1982—2018 年干旱次数年际空间分布如图 5 所示,其中,SPEI-3 的干旱次数极值最大,SPEI-12 的干旱次数极值最小。四个时间尺度的干旱次数指标呈现出较大差异。SPEI-1 干旱次数较高区域集中在极端干旱区和干旱区西部,SPEI-3 则集中半干旱和半湿润分界线周围,而 SPEI-6 在半干旱与半湿润地区的中部干旱次数较高,SPEI-12 呈现多组团状分布。综上,随着时间尺度的增加,干旱次数极值分布逐渐向东、向湿润区移动。

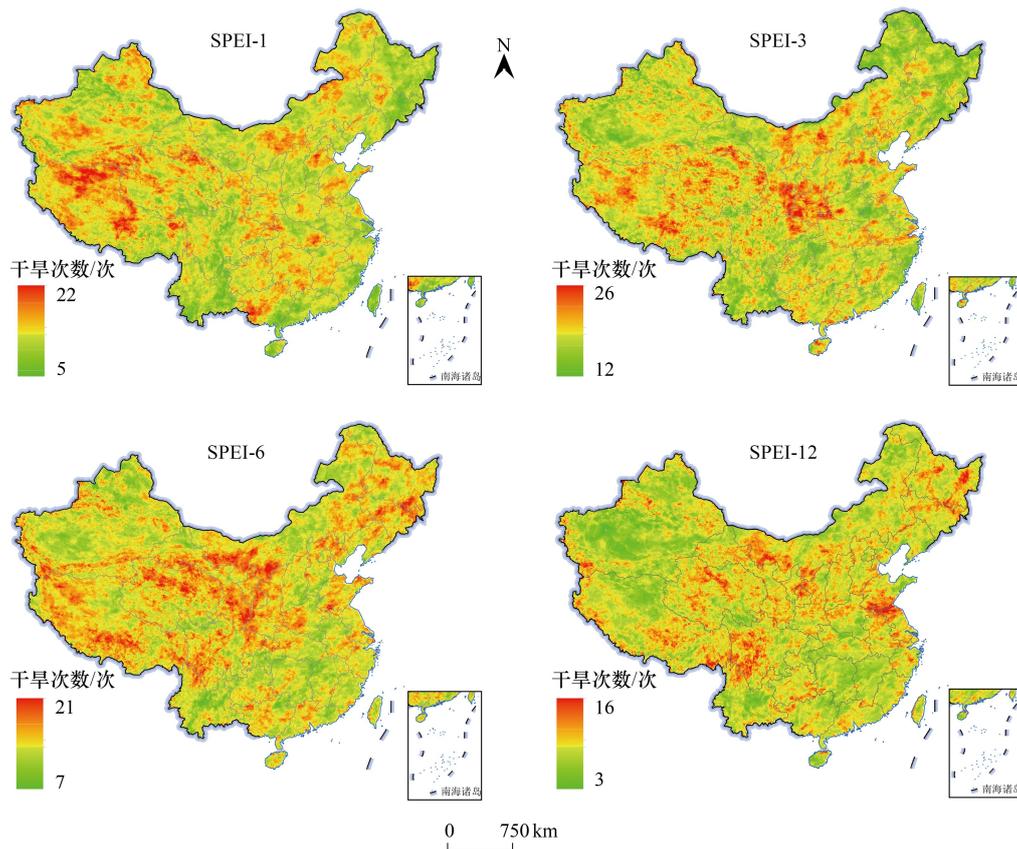


图 5 1982—2018 年干旱次数年际空间变化

Fig.5 The spatial of Drought Times among 1982—2018

综合四个时间尺度的五个干旱指标可以看出,华中、华东大部分区域处于轻旱或者无旱状态。极端干旱区和东部湿润区的干旱严峻情况随着时间尺度的增大,干旱持续时间、干旱严重度和干旱间隔时间数值都有不同程度的增大,尤其是干旱间隔时间增长最为显著。且随着尺度的增加,湿润区的干旱情况逐渐加剧。干旱强度值较高的地方,干旱持续时间和干旱严重度数值普遍较低。

2.2 植被动态变化特征

1982—2018 年植被生长年际 NPP 变化趋势如图 6 所示,中国植被整体呈增长态势,其中包括鲁西、豫东、皖北以及大致分布在 400mm 等降水线周围地区的植被均出现了大幅度的增长。粤南、苏南、浙北以及内蒙古

北出现了明显的下降趋势。整体而言,在 1982—2018 年间,中国大部分地区的植被得到了改善,但部分区域的退化趋势也不可忽略。

基于 Mann-Kendall(MK)显著性检验结果进行 NPP 变化分类。如图 6 所示,植被退化区域主要集中在内蒙古稀疏草地与草地、西藏林地以及湿润区东部;轻微退化集中在四川盆地周围。稳定或无植被地区集中在新疆、西藏以及内蒙古部分地区、甘肃地区。植被显著改善地区主要分布在中国中部。

植被增加区域占植被总面积约 72.04%,其中显著增加占比 47.31%,轻微增加占比 24.73%。植被退化区域占总面积约 20.37%,其中显著退化占比 6.48%,轻微退化占比 13.89%。植被稳定占比 7.59%。

综上,植被显著改善地区集中在中国中部,植被退化区域集中在中国东南部、内蒙古和西藏南部。

2.3 干旱与植被的相关性分析

由于本研究在干旱时间尺度上考虑了以往的气候条件,四个时间尺度下的干旱与植被的相关性分析具有一定的相似性(图 7),中国大部分地区的植被与干旱保持着正相关关系。四个尺度的干旱与植被的强正相关分布均出现在浙、皖、赣三者相邻地区和内蒙古北部,但其最大相关值略有不同,其中,SPEI-1 最低,为 0.6;

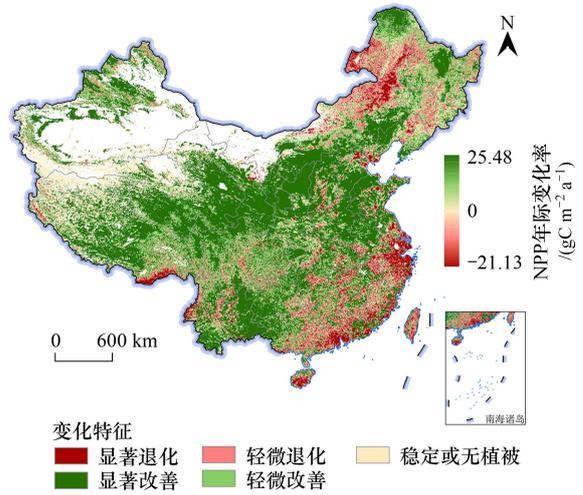


图 6 1982—2018 年植被生长年际 NPP 变化趋势
Fig.6 The change trends of Vegetation growth among 1982—2018

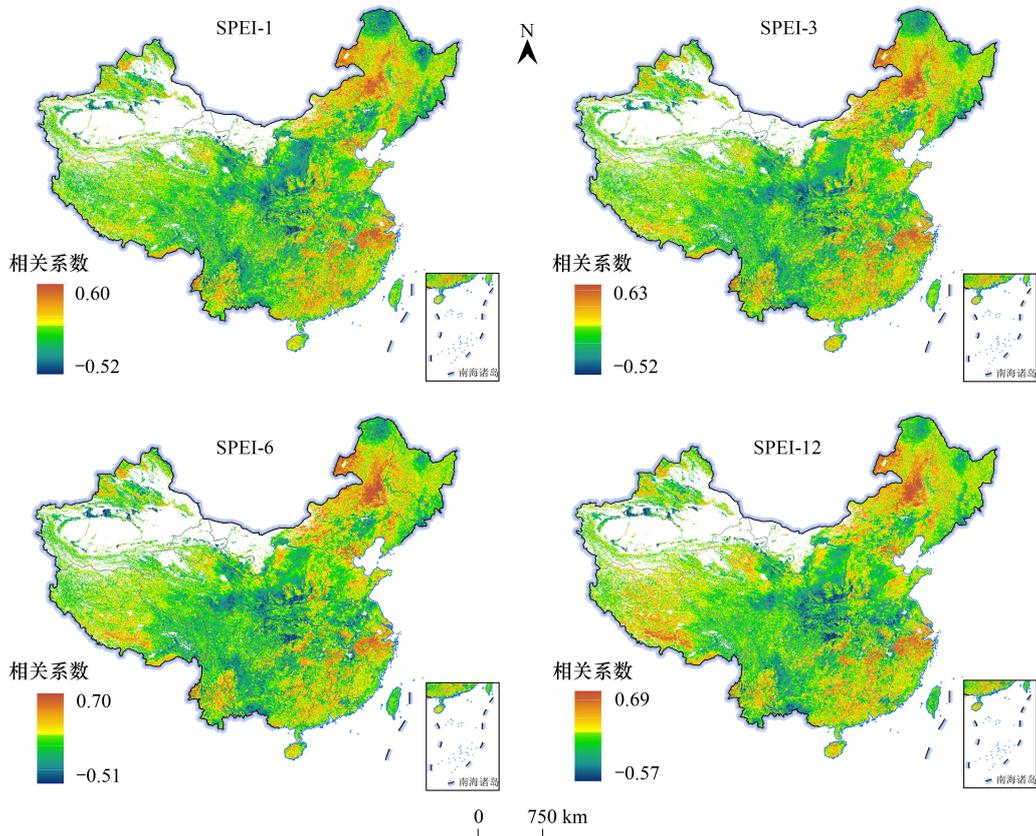


图 7 干旱与植被相关性
Fig.7 Relation between drought and vegetation

SPEI-6 最高,为 0.7;SPEI-6 与 SPEI-12 的极高值近似;随着时间尺度的增加,这些区域干旱与植被的相关性呈先增加再减小的趋势。强负相关性均出现在陕西以及甘肃等地区,其中,SPEI-12 的负相关值达到最高,为 0.57;SPEI-1、SPEI-3 次之,为 0.52;SPEI-6 最低为 0.51,整体上看,干旱与植被相关性较高区域集中在中国东部。

2.4 干旱对植被累积影响分析

干旱对植被生长有抑制作用,即 SPEI 与 NPP 呈正相关,不同区域植被对前期气候变化累积效应响应有所不同,所以需要将四个时间尺度与干旱的相关性进行对比分析。对四个时间尺度的干旱与植被相关性进行逐像元比较,选择相关系数最大且为正的像元代表该尺度下干旱对植被累积影响最大。

将干旱对植被累积影响最大的 SPEI 时间尺度(图 8)协同植被生长年际 NPP 变化趋势(图 6)进行分析,内蒙古中东部地区的植被退化严重,其地区与 SPEI-6 尺度下的干旱保持着较高的相关性。海南地区的植被变化也呈显著退化趋势,但其西部与 SPEI-3 尺度下的干旱呈较高相关性,而东部则与 SPEI-12 相关性较高。台湾与福建地区的植被退化与 SPEI-1 时间尺度下的干旱相关性较高。与其相比,北京、天津地区植被出现退化,主要与 SPEI-6 干旱相关性较高。中国东南地区植被与干旱相关性较为复杂,但最主要以 SPEI-12 长期干旱情况为主。总之,影响中国植被以中长期干旱尺度(SPEI-6 和 SPEI-12)为主,占植被总面积的 76%。

西藏植被多呈显著增长情况,这个地区的植被变化情况与 SPEI-12 尺度下干旱相关性较高,部分区域与 SPEI-3 相关性较高。云南植被的增长主要与 SPEI-6 情况下的干旱相关性高。冀晋豫等地区的植被变化主要呈增长趋势,与 SPEI-6 干旱相关性较高。东三省地区既有植被改善情况,也有植被退化现象,其中,大部分地区与 SPEI-6 干旱相关性较高。新疆植被多呈增长和稳定状态,多数与 SPEI-6 相关性较高。

综上,干旱与植被生长季年际 NPP(图 8)相关性最高的为 SPEI-6 与 SPEI-12 时间尺度。中国植被对中长期干旱的敏感性较高,即干旱对植被的影响大多数为累积效应。SPEI-6 尺度下干旱与中国东北地区植被变化密切相关,青藏高原地区植被对 SPEI-12 尺度干旱更为敏感。东部湿润区植被变化与干旱时间尺度的相关性较为复杂。

从统计图(图 9)可以看出,在累积影响植被最大的 SPEI 时间尺度中,从稀疏植被到草地再到林地,近短期干旱占比从 18%上升到 29%。稀疏植被对 SPEI-6 响应更为突出,面积占比为 56%。从干旱区到湿润区,近短期的干旱尺度对植被变化的影响逐步增大;从湿润区到干旱区,长尺度 SPEI-12 对植被的影响逐步增加。在不同植被变化类型中,植被显著退化区域主要以 SPEI-12 长尺度干旱累积影响为主,而轻微植被退化以 SPEI-6 尺度干旱累积影响为主。

综上,中长尺度干旱对植被累积影响较大。随着植被覆盖率的增加,植被与近短期尺度干旱的相关性增加,从极端干旱区到半干旱区再到湿润区,植被与干旱的相关性呈现先减小再增加的变化趋势。SPEI-6 中尺度对轻微变化的植被累积影响最大,而 SPEI-12 长尺度对变化显著的植被累积影响最强。

3 讨论

3.1 中国干旱事件的基本特征

受复杂地形和季风气候的影响,中国干旱事件的发生频率及强度具有区域差异,综合四个时间尺度五个

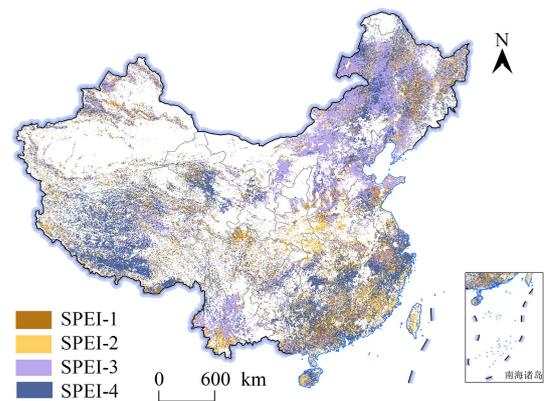


图 8 干旱对植被累积最大影响的时间尺度

Fig.8 Time scales for maximum impacts of drought on vegetation accumulation

图例从上至下依次为 SPEI—1,SPEI—3,SPEI—6,SPEI—12

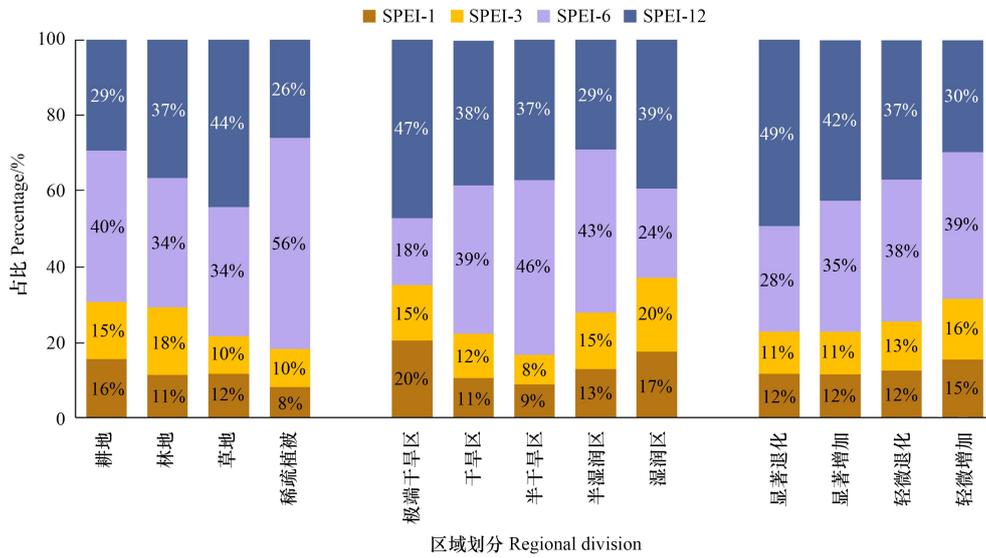


图 9 累积影响植被最大的 SPEI 时间尺度在不同区域的占比

Fig.8 Proportions of the of SPEI time scales with maximum cumulative influence on vegetation in different regions

干旱指标,发现新疆出现了严重程度高且持续时间长的干旱事件。有研究表明,新疆地区干旱情况整体较为严重,超过 47.7%的地区常年处于干旱状态,全年干旱发生频率最高可达 80%^[45]。其中,塔克拉玛干沙漠的干旱情况尤为突出。塔克拉玛干沙漠远离海洋,同时周边水汽受到青藏高原和天山山脉的阻挡,年均降水量不足 100 mm,干旱状况较为严重^[46]。青藏高原的干旱情况也较严峻,虽然其干旱持续时间和干旱严重度小于新疆地区,但其干旱强度较高。王劲松^[47]等表明,青藏高原干旱高发区主要位于高原北部、西南部等区域,而重度极端干旱主要发生在青藏高原东南部。

在中国东南部,干旱事件较少,但其严重程度和强度较高。中国东部大部分地区雨热同期,高温天气往往出现在雨季。当湿润地区雨季少雨时,高温热浪会加速土壤水分的蒸散发,土壤水分迅速下降,易发生短时间尺度高强度的干旱事件^[48-49]。本文研究结果也表明,大多数干旱地区经历了频率高、严重程度较低的干旱事件,而部分湿润地区经历了频率低、严重程度较高的干旱事件(图 3、图 4)。

3.2 干旱对植被的影响

植被变化是气候波动和人类活动共同驱动的结果^[50],中国植被整体具有增加趋势,侧面反映我国退耕还林还草、三北防护林等生态恢复工程取得了显著效果,有力遏制了生态退化趋势,推动了我国生态文明建设进程^[51]。

内蒙古中部至东部地区的植被退化情况较严峻,这些地区主要包括呼伦贝尔市南部地区、兴安盟、通辽市北部、锡林郭勒盟东部地区以及赤峰镇的北部。虽然该地区年降水量大于内蒙古西南地区,但其植被生长状况仍不容乐观。本文研究看出,内蒙古中部至东部地区不仅植被呈退化趋势,干旱情况也呈严重化状态。内蒙古中部地区的干旱持续时间和干旱严重度较突出,东部地区的干旱间隔时间较短,且大部分植被与 SPEI-6 时间尺度干旱相关性较高。因此,内蒙古中部至东部地区植被退化与该地区长期干旱情况密切相关^[52]。

青藏高原地区植被对长期干旱较为敏感。青藏高原植被以草地(图 1)为主,该地区海拔高,有积雪、冻土覆盖。在气候变暖的背景下,高原增温显著,加剧了冰雪消融和冻土活动层变化^[53-54]。青藏高原植被变化不仅受降水影响,前期冰雪融水、冻土冻融对其影响也不可忽略。因此,该地区植被与 SPEI-12 尺度的干旱相关性较高(图 8),孔冬冬^[55]等基于气象站点数据分析也发现青藏高原地区植被对干旱响应时间呈现 12—24 月。华北平原大部分地区植被与 SPEI-6 干旱相关性较高,但值得注意的是华北地区是主要的粮食作物产区,农业灌溉将导致土壤含水量上升,从而降低农业干旱的敏感性^[56]。黑龙江的东北部、长白山等地区,主要是

以林地为主(图1),且多为针叶林,对于干旱敏感度较低(图8)。相关研究也表明,针叶林对于干旱的抵抗力较强,受其影响较小,与干旱的相关性较低^[57]。

4 结论

本文分析了1982—2018年不同的SPEI时间尺度下的干旱空间特征以及不同SPEI时间尺度与植被的变化趋势的相关性,揭示干旱对植被变化的累积影响。主要结论如下:

(1)随着时间尺度的增加,湿润区的干旱情况逐渐加剧。干旱强度值较高的地方,干旱持续时间和干旱严重度数值普遍较低。总体而言,新疆、青藏高原以及东南地区的干旱情况较为严峻,华中、华东大部分区域处于轻旱或者无旱状态。

(2)1982—2018年期间,中国植被主要是处于改善状态,植被显著改善区主要分布在中国中部,植被退化区主要集中在我国东南部、内蒙古和西藏南部。中国植被改善速度的平均值约为 $1.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,约70%地区的植被得到了改善,其中显著改善占比约47.31%。约20%的植被呈退化状态,显著退化占比约6.47%。

(3)中国大部分区域的植被与干旱保持着正相关性关系,尤其是干旱区和半干旱区的植被与干旱关系密切。其中,中长尺度干旱对植被影响占主导,即在中国干旱对植被的影响大多数为累积效应。例如,位于半干旱区东北部分的内蒙古,其植被退化与中期干旱关系密切。

(4)随着植被覆盖率的增加,植被与近短期尺度干旱的相关性增加,干旱到湿润区,近短尺度干旱对植被变化的影响逐步增大。SPEI-6中尺度对轻微变化的植被累积影响最显著,而SPEI-12长尺度对变化显著的植被累积影响更明显。

参考文献(References):

- [1] Trenberth K E, Dai A G, van der Schrier G, Jones P D, Barichivich J, Briffa K R, Sheffield J. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 2014, 4(1): 17-22.
- [2] Balting D F, AghaKouchak A, Lohmann G, Ionita M. Northern Hemisphere drought risk in a warming climate. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2021, 4(1), 1-13.
- [3] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.
- [4] Parry M L. Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [5] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003年中国气温和降水变化及其对于干旱的影响. *气候变化研究进展*, 2005, 1(1): 16-18.
- [6] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 李忆平, 贾建英, 王静. 近60年中国西南地区干旱灾害规律与成因. *地理学报*, 2014, 69(5): 632-639.
- [7] 张翀, 王静, 雷田旺, 马玲, 宋佃星. 退耕还林工程以来黄土高原植被覆盖与地表湿润状况时空演变. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1468-1476.
- [8] 安洁, 付博, 李玮, 彭思源, 李本纲. 东亚地区典型极端气候指标未来预估及高温下人口暴露度研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(5): 884-892.
- [9] 周丹, 张勃, 罗静, 张春玲, 安美玲, 王东. 基于SPEI的华北地区近50年干旱发生强度的特征及成因分析. *自然灾害学报*, 2014, 23(4): 192-202.
- [10] 杜华明, 延军平. 西秦岭地区气候变化特征与干旱灾害趋势. *山地学报*, 2014, 32(1): 58-65.
- [11] 杜文丽, 孙少波, 吴云涛, 宋照亮. 1980—2013年中国陆地生态系统总初级生产力对干旱的响应特征. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 23-35.
- [12] Overland J E, Wang M Y. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2010, 62(1): 1-9.
- [13] Team C, Pachauri R, Meyer L. Climate change 2014: synthesis report: a report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Environmental Policy Collection*, 2014, 27(2): 408.
- [14] Sun S B, Du W L, Song Z L, Zhang D B, Wu X C, Chen B Z, Wu Y T. Response of Gross Primary Productivity to Drought Time-Scales Across China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(4): 19.
- [15] Palmer, W C. Meteorological droughts. U.S. Department of commerce weather bureau research paper, 1965, 45(58): 23-26.
- [16] 梁浩. 基于混合模型的渭河流域水文干旱预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [17] McKee T, Doesken N, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. 1993.
- [18] 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.
- [19] Wang Y J, Fu B J, Liu Y X, Li Y, Feng X M, Wang S. Response of vegetation to drought in the Tibetan Plateau: elevation differentiation and the dominant factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 306: 108468.

- [20] Manesh M B, Khosravi H, Alamdarloo E H, Alekasir M S, Gholami A, Singh V P. Linkage of agricultural drought with meteorological drought in different climates of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(1): 1025-1033.
- [21] Li C L, Leal Filho W, Yin J, Hu R C, Wang J, Yang C S, Yin S, Bao Y H, Ayal D Y. Assessing vegetation response to multi-time-scale drought across Inner Mongolia Plateau. *Journal of cleaner production*, 2018, 179: 210-216.
- [22] 李峥嵘, 彭涛, 林青霞, 董晓华, 刘冀, 常文娟, 喻丹, 王高旭. 三峡水库影响下长江中下游水文干旱演变及对气象干旱的响应. *湖泊科学*, 2022, 34(5): 1683-1696.
- [23] Liu C H, Yang C P, Yang Q, Wang J. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 2021, 11: 1280.
- [24] 左冬冬, 侯威, 颜鹏程, 封秦晨. 基于游程理论和两变量联合分布的中国西南地区干旱特征研究. *物理学报*, 2014, 63(23): 230204.
- [25] Li X, He B B, Quan X W, Liao Z M, Bai X J. Use of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to characterize the drying trend in southwest China from 1982-2012. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10917-10937.
- [26] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(2): 678-691.
- [27] 刘世梁, 田韞钰, 尹艺洁, 安南南, 董世魁. 云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应. *生态学报*, 2016, 36(15): 4699-4707.
- [28] 刘洋洋, 任涵玉, 呼天明, 杨培志, 巴桑参木决, 张伟, 张志新, 温仲明, 章钊颖. 中国草地 NDVI 时空动态对多尺度干旱的响应. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 153-161, 168.
- [29] 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.
- [30] 郑国光. 《中国气候》. *气象*, 2019, 45(4): 592.
- [31] Wang Q F, Zeng J Y, Qi J Y, Zhang X S, Zeng Y, Shui W, Xu Z H, Zhang R R, Wu X P, Cong J. A multi-scale daily SPEI dataset for drought characterization at observation stations over mainland China from 1961 to 2018. *Earth System Science Data*, 2021, 13(2): 331-341.
- [32] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [33] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [34] Liu Q, Wang L Z, Qu Y, Liu N F, Liu S H, Tang H R, Liang S L. Preliminary evaluation of the long-term GLASS albedo product. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(sup1): 69-95.
- [35] 梁顺林. 全球变化与地球系统科学系列·全球陆表特征参量(GLASS)产品:算法、验证与分析. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [36] 李智斌, 赵林, 刘广岳, 邹德富, 汪凌霄, 杨斌, 杜二计, 胡国杰, 周华云, 王翀, 幸赞品, 赵建婷, 殷秀峰, 迟鸿飞, 谭昌海, 陈文. 冻结季沱沱河源多年冻土区活动层土壤水分含量分析. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 56-68.
- [37] 缪文飞, 刘时银, 朱钰, 段仕美, 韩丰泽. 梅里雪山地区气温和降水的时空分异及海拔效应. *气候变化研究进展*, 2022, 18(3): 328-342.
- [38] Trabucco A, Zomer R J. Global aridity index and potential evapotranspiration (ET0) climate database v2. CGIAR Consort Spat Inf, 2018, 10: m9.
- [39] Michael C, Charles H, James R, Hill J, Stefan S, Graham V M. World atlas of desertification. 2018.
- [40] Arino O, Ramoino F. Land cover CCI, product user guide version 2.0. Louvain-la-Neuve, 2017.
- [41] 高晓瑜, 汤鹏程, 张莎, 屈忠义, 杨威. 内蒙古各气候区主要作物生长季干旱特征及其与响应因子回归模型. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1410-1427.
- [42] Yevjevich V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Journal of Hydrology*, 1969, 7(3): 353.
- [43] Guo H, Bao A M, Liu T, Jiapaer G, Ndayisaba F, Jiang L L, Kurban A, De Maeyer P. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966-2015. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1523-1538.
- [44] Chatfield C. an introduction. 2nd ed. London: Chapman and Hall, 1980.
- [45] 秦大辉, 杨灵, 谌伦超, 段云飞, 贾宏亮, 李贞培, 马建琴. 基于多源数据的新疆干旱特征及干旱模型研究. *自然资源遥感*, 2022, 34(1): 151-157.
- [46] 杨小平, 杜金花, 梁鹏, 张德国, 陈波, Patrick Rioual, 张峰, 李鸿威, 王旭龙. 晚更新世以来塔克拉玛干沙漠中部地区的环境演变. *科学通报*, 2021, 66(24): 3205-3218.
- [47] 王劲松, 姚玉璧, 王莺, 王素萍, 刘晓云, 周悦, 杜昊霖, 张宇, 任余龙. 青藏高原地区气象干旱研究进展与展望. *地球科学进展*, 2022, 37(5): 441-461.
- [48] Yuan X, Wang L Y, Wu P L, Ji P, Sheffield J, Zhang M. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. *Nature Communications*, 2019, 10: 4661.
- [49] Ge W Y, Han J Q, Zhang D J, Wang F. Divergent impacts of droughts on vegetation phenology and productivity in the Yungui Plateau, southwest China. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107743.
- [50] 涂又, 姜亮亮, 刘睿, 肖作林, 闵婕. 1982—2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 75-84.
- [51] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [52] 滑永春, 张恒, 王冰, 斯钦毕力格. 1982—2015 年内蒙古地区 NDVI 时空变化及驱动力分析. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2021, 41(6): 175-182.
- [53] 吴统文, 钱正安. 青藏高原原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析. *气象学报*, 2000, 58(5): 570-581.
- [54] Qian Y, Zheng Y, Zhang Y, Miao M. Responses of China's summer monsoon climate to snow anomaly over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(6): 593-613.
- [55] 孔冬冬, 张强, 顾西辉, 王月, 李华贞. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析. *生态学报*, 2016, 36(24): 7908-7918.
- [56] 刘倪, 夏伟, 吴晓蔚, 丁杰, 徐建斌, 范小雷. 几种参考作物蒸散量计算方法的比较. *河北科技大学学报*, 2009, 30(1): 17-24.
- [57] 尉毓姣, 朱琳, 曹鑫宇, 余慧琳. 基于转移函数分析的蒙东地区不同类型植被变化对干旱的响应. *地球科学: 1-16* [2023-01-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220808.1731.046.html>