

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.087>



1982–2018 年总初级生产力对不同 时空尺度干旱类型的响应

凌肖露¹, 李承刚¹, 牛晓瑞^{2,3}, 刘文昊¹, 周梓童⁴

1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116

2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078

3. 中国气象局-中国地质大学(武汉)极端天气气候与水文地质灾害研究中心, 湖北武汉 430078

4. 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北武汉 430079

摘要: 为准确估测不同类型的干旱对植被生态系统的影响, 基于 Mann-Kendall、Pearson 相关分析等方法, 利用 1982–2018 年的总初级生产力 (GPP) 数据集以及不同时间尺度的干旱指数 (包括 scPDSI、SPEI 和 SPI), 定量评估了我国植被 GPP 对不同时空尺度干旱类型的响应。结果显示, 我国干旱化趋势最显著的区域是内蒙古, 区域平均的 scPDSI、SPEI 和 SPI 分别以每年 0.039、0.026 和 0.004 的速率下降。不同区域的 GPP 与干旱指数的相关性和滞后效应差异显著。华东和华南地区对农业干旱的响应最为显著, 平均滞后时间为 4~6 个月。内蒙古、西北和西南地区对气象干旱的响应更为剧烈, 平均滞后时间为 9~11 个月。华中和华东地区对气象干旱的响应周期较短, 为 0~3 个月。

关键词: 总初级生产力; 气象干旱; 农业干旱; 时滞效应; 累积效应; 遥感; 气候学。

中图分类号: P464

文章编号: 1000-2383(2025)09-3340-17

收稿日期: 2024-08-09

Response of Gross Primary Productivity to Different Types of Drought across Various Spatial and Temporal Scales from 1982 to 2018

Ling Xiaolu¹, Li Chenggang¹, Niu Xiaorui^{2,3}, Liu Wenhao¹, Zhou Zitong⁴

1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

3. CMA-CUG Center for Severe Weather and Climate and Hydro-Geological Hazards, Wuhan 430078, China

4. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: To describe the evolution characteristics of different types of drought and accurately estimate their impact on ecosystems, based on methods such as Mann-Kendall and Pearson correlation coefficients, using the gross primary productivity (GPP) dataset from 1982 to 2018 and concurrent drought indices at different time scales (including scPDSI, SPEI, and SPI), a quantitative assessment was conducted on the response mechanism of the GPP of vegetation in China to different spatiotemporal scales of drought types. The results show that the most significant trend of drought intensification in China is in Inner Mongolia,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 42075114); 江苏高校优势学科建设项目 (No. 140119001); 徐州市重点研发计划 (现代农业) 面上项目 (No. KC21132)。

作者简介: 凌肖露 (1986–), 女, 副教授, 主要从事地理学、气象与气候学、生态遥感和大气环境遥感的综合研究和相关教学工作。ORCID: 0000-0001-9209-1816. E-mail: lingxl@cumt.edu.cn

引用格式: 凌肖露, 李承刚, 牛晓瑞, 刘文昊, 周梓童, 2025. 1982–2018 年总初级生产力对不同时空尺度干旱类型的响应. 地球科学, 50(9): 3340–3356.

Citation: Ling Xiaolu, Li Chenggang, Niu Xiaorui, Liu Wenhao, Zhou Zitong, 2025. Response of Gross Primary Productivity to Different Types of Drought across Various Spatial and Temporal Scales from 1982 to 2018. *Earth Science*, 50(9): 3340–3356.

with the regional averaged scPDSI, SPEI, and SPI declining at an annual rate of 0.039, 0.026, and 0.004, respectively. Further analysis indicates that there are significant differences in the correlation and lag effects between GPP and monthly drought indices in various regions of China. The response to the agricultural drought index is most pronounced in the East China and South China regions, with an average lag time of 4 to 6 months. In contrast, the Inner Mongolia, Northwest, and Southwest regions have a more intense response to meteorological drought, with an average lag time of 9 to 11 months, while the Central and East China regions have a shorter response cycle to meteorological drought, only 0 to 3 months.

Key words: gross primary productivity; meteorological drought; agricultural drought; time-lag effect; cumulative effect; remote sensing; climatology.

0 引言

总初级生产力(gross primary productivity, 简称GPP)作为描述植被光合碳同化作用的关键指标,是陆地生态系统中碳元素进入生态循环的起点,对陆地生态系统的管理和社会的可持续发展具有积极影响(Piao *et al.*, 2013; Campbell *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2023; 王同红等, 2024).干旱是最重要的极端天气之一,同时也是影响范围最大的灾害之一,对社会经济和生态系统都有重要影响(符淙斌等, 2005; 王晨鹏等, 2022).因此,准确描述不同干旱类型的演变特征并准确估测其对生态系统的影响,对于维持未来全球生态系统的碳平衡和降低干旱给人类带来的损失具有重要的现实意义和科学价值.

近年来全球多地遭受了严重的干旱影响,自20世纪80年代以来,旱灾和洪涝等极端气候事件在我国频繁发生,西部地区的湿润条件逐渐减弱,华北东部和中部地区的干旱现象愈发频繁,对我国的经济和人民生活安全构成了严重威胁(Li *et al.*, 2013; 管晓丹等, 2018; 符淙斌和马柱国, 2023; 袁星等, 2024).根据成因和影响,可将干旱划分为气象干旱、水文干旱、农业干旱、社会经济干旱(Douville *et al.*, 2021)、生物物理干旱(姜大膀和王晓欣, 2021)等多种类型.干旱指标是干旱研究中的重点,目前已发展出了一系列多元化的干旱指数,例如基于降水量的标准化降水指数(standardized precipitation index, 简称SPI; McKee *et al.*, 1993),考虑了水分循环的帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, 简称PDSI; Palmer, 1965)、自修正帕尔默干旱指数(scPDSI; Wells *et al.*, 2004),还有考虑了蒸发和干旱的多时间尺度特性的标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, 简称SPEI; Vicente-Serrano *et al.*, 2010)等.赵会超(2020)分析得到,气象干旱在西南地区发生率较高,而在西北地区发

生农业和水文干旱则较多.农业和水文干旱周期在空间上分布较一致,且大于气象干旱周期.

干旱可以使植被生长变得迟缓、生产力效率下降和死亡率增加,因此许多学者在全球和区域尺度上开展了植物与干旱相互作用的研究,研究表明,植被生产力对干旱的响应模式与植被类型、气候背景、环境条件以及干旱的持续时间密切相关(Teuling *et al.*, 2010; Gu *et al.*, 2023; Guan and Huang, 2024; 岳胜如等, 2024).研究表明,GPP异常与北半球的SPI和南半球的SPEI关系最为密切;区域尺度上年度和季节GPP异常对土壤水分亏缺和PDSI最为敏感(Wang *et al.*, 2018).对于不同植被类型,草地、农田在干旱(农业干旱)期间GPP减少,而森林的GPP则有所增加,并存在明显的时滞现象(邹慧等, 2016).中国对于干旱响应最剧烈的地区为草原,森林和沙漠次之,且东部地区较西部地区更加敏感(Xu and Wang, 2016).此外,中国东部的高温 and 中等程度的干旱对于植被的净初级生产力具有一定促进作用,较高度度的干旱则会延迟GPP对降水的响应(Sun *et al.*, 2016).由于植被类型的多样性和对干旱敏感性的差异,以及植被对气候变化反应的复杂性,目前仍无法准确估计植被对于干旱事件及气候变化在区域尺度的响应特征.

基于此,评估区域范围内长期干旱对GPP的影响显得尤为迫切.本研究基于不同时间尺度的干旱指数(包括SPI、SPEI和scPDSI,分别对应气象干旱、农业干旱和生态干旱)和GPP数据,对比分析不同类型干旱对GPP的影响,深入探讨生态系统对于干旱响应的内在机制,以期为制定相应的生态保护和恢复策略提供重要的理论支持和实践意义.

1 数据和方法

1.1 研究区概况

我国幅员辽阔,拥有多样化的地理环境和气候



图1 中国地理位置及区划划分

Fig.1 Geographical location and regional division of China

本文所有中国地图均基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作,地图边界无修改

条件.为了能够更有效地管理和利用气象资源,提高对极端天气事件的响应能力,保障人民的生命财产安全,中国气象局印发了《气象地理区划规范》,以政府、相关部门和社会公众所通识的行政区划为依据,按照范围由大到小、位置由粗到细分成了三个级别.在一级地区区划中,将中国大陆地区划分为10个区,分别是:东北、华北、华东、华中、华南、西南、西北、内蒙古、新疆和西藏(图1).由于海拔较高和独特的高原气候背景,在本文的分区讨论中,没有考虑西藏地区.

1.2 数据来源及处理

1.2.1 GPP数据集 GPP数据来源于马里兰大学

开发的全球陆地表面卫星(GLASS)数据集(梁顺林等, 2023).该数据集提供了1981–2018年全球范围内 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 空间分辨率、8 d和年度时间分辨率的GPP数据.该产品使用了最新版本的EC-LUE模型,综合考虑了影响GPP长期变化趋势的环境变量:大气CO₂浓度、直接和散射辐射通量和大气水汽压(Yuan *et al.*, 2019).GLASS GPP数据的精度和适用性已在北美、欧洲和东亚地区得到了验证,能够代表年际变化和长期趋势,并被广泛地应用于研究不同时空尺度的GPP变化(Zheng *et al.*, 2020).

1.2.2 SPI数据集 SPI数据由全球降水气候学中心(GPCC)提供的降水数据生成,包含多种时间尺

表 1 不同干旱指数的干湿等级划分
Table 1 Classification of wet and dry grades

等级	SPI	SPEI	类型	等级	scPDSI	类型
1	≥ 2	≥ 2	重涝	1	≥ 4	极端湿润
2	[1.5, 2)	[1.5, 2)	中涝	2	[3, 4)	严重湿润
3	[1, 1.5)	[1, 1.5)	轻涝	3	[2, 3)	中等湿润
4	(-1, 1)	(-1, 1)	正常	4	[1, 2)	轻微湿润
5	(-1.5, -1)	(-1.5, -1)	轻旱	5	(-1, 1)	正常
6	(-2, -1.5)	(-2, -1.5)	中旱	6	(-2, -1]	轻微干旱
7	≤ -2	≤ -2	重旱	7	(-3, -2]	中等干旱
				8	(-4, -3]	严重干旱
				9	≤ -4	极端干旱

度,分别是:1、2、3、6、9、12、24、36、48、60和72个月。该数据产品下载自美国国家综合干旱信息系统(NI-DIS),覆盖了1901年至今的SPI数据,空间分辨率是 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。SPI数据首先采用 Γ 分布概率描述降水量的变化,然后进行正态标准化获得(McKee *et al.*, 1993)。SPI分为7个等级,正值表示湿润,负值表示干旱,且绝对值越高表明湿润或者干旱的程度越高(表1)。

1.2.3 SPEI数据 SPEI是常见的干旱指数之一,可用于评估不同时间尺度上的干旱特征以及与自然和经济系统的响应时间。SPEI指数通过监测降水量和潜在蒸散发之间的差异来表征干旱状况,被广泛应用于气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱的监测和预测研究。SPEI同样也包含多种时间尺度,例如1、2、3、6、9、12、24、36和48个月。本研究使用的SPEI数据来自全球标准化降水蒸散指数数据库(SPEI base v2.7),包含了自1901年1月以来的空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,时间分辨率为月的SPEI值(Beguería *et al.*, 2010, 2014; Vicente-Serrano *et al.*, 2010)。该数据集使用的降水数据和潜在蒸发数据来自于英国东英格利亚大学的气候研究机构(CRU TS 4.07)。如表1所示,SPEI的等级划分和SPI一致。

1.2.4 scPDSI数据 scPDSI是PDSI的变体(Palmer, 1965),能够使干旱指数在不同背景气候区域更具可比性。scPDSI考虑了降水和温度的时间序列,同时还包括每个位置的土壤和地表特性。本文数据下载自CRU网站(<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/>),该网站提供了1901—2022年全球范围(不包括南极地区) $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 分辨率的月均干旱指数。数据集使用CRU TS 3.23高分辨率月度气候数据集(Harris *et al.*, 2014)生成全球范围的初步版本(van der Schrier *et al.*, 2013),此后每年

利用CRU TS数据进行更新,本文使用的是4.07版本(Barichivich *et al.*, 2022)。如表1所示,scPDSI的值在-4到4之间,值大于0时为湿润,反之则为干旱,且绝对值越大表明干旱或湿润的等级越高。

1.2.5 数据预处理和质量控制 为保持分析的一致性,笔者将获得的GPP数据以及scPDSI、SPEI和SPI干旱指数重采样至 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 分辨率的网格,并将这些数据处理为月度时间序列。由于夏季是中国植被生长最为旺盛的时段,本研究重点分析了夏季GPP对同时段干旱的响应。除此之外,为了展示不同区域干旱持续时间的变化特征,并研究GPP对不同时间尺度干旱指数的滞后效应,本研究均采用每月数据进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势和突变分析 本文利用Sen斜率和Mann-Kendall显著性检验分析了1982—2018年每个格点和区域平均的GPP和干旱指数的变化趋势。

(1) 对于具有 n 个样本量(各样本之间相互独立)的时间序列 x ,构造一个秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, k = 2, 3, \dots, n, \tag{1}$$

设某一元素 x_i 大于其前面要素的累计数为 r_i 。

(2)定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{var(S_k)}}, \tag{2}$$

其中 $UF_1=0$, $E(S_k)$ 、 $var(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \tag{3}$$

$$var(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}. \tag{4}$$

(3)把时间序列 x 逆序排列 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$,得出 UB_k ,令 $UB_k = -UF_k (k=n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1=0$;

分析绘出的 UF 和 UB 曲线图,若 UF 或 UB 的值大于 0,则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势,当它们超过临界线时,表明上升或下降趋势显著(徐蒙等,2020).当 UF/UB 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间.

1.3.2 变异系数 在分析不同测量单位或变异幅度的数据集时,使用标准差可能会导致误导或不准确的结论.变异系数(CV)能够将标准差标准化到原始测量的均值上,因此更适合于比较不同样本或群体之间的数据离散程度.其计算公式为:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\%, \quad (5)$$

其中 σ 为样本的标准差, μ 表示样本均值.变异系数通常以百分比的形式呈现,使得不同尺度或单位的数据能够在同一标准下进行比较和分析.

1.3.3 干旱对 GPP 的时滞效应 为了分析 GPP 与干旱指数的相关性,引入了 Pearson 相关系数分析两个变量的线性相关程度,公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (6)$$

其中 $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别是变量 X 和 Y 的样本均值.

时滞相关系数用于衡量两个时间序列的时间滞后相关性,通过计算原始序列和对应滞后时间尺度的 Pearson 相关系数来获得.本研究中,笔者计算了 GPP 和 scPDSI、SPEI-01、SPI-01 从同时段到滞后 12 个月的时滞相关系数,以分析 GPP 对干旱的滞后响应时间,寻找对区域 GPP 有着关键影响的时间尺度.

1.3.4 干旱对 GPP 的累积效应 通过计算不同时间尺度的 SPEI、SPI 和 GPP 的相关系数,获得 SPEI、SPI 影响 GPP 的累积时间尺度.具体计算方法如下:首先,计算出 GPP 与 n 个月尺度的 SPEI、SPI 的 Pearson 相关系数($n=1、2、3、6、9、12、24、36、48$);然后将最大相关系数对应的月数视为累积效应的时间尺度,并将最大相关系数确定为累积效应量.

2 结果分析

2.1 GPP 和干旱指数的时空变化特征

由于北半球夏季(6月至8月,简称 JJA)是中国植被生长最茂盛、同时也是干旱事件的高发期,故

本研究重点选择夏季来分析干旱对 GPP 的影响.

图 2 展示了 1982—2018 年夏季平均的 GPP 以及不同干旱指数在 1 个月和 12 个月时间尺度上的空间分布.总体来看,夏季平均的 GPP 呈现出西低东高的分布特征,东北地区(包括长白山、大兴安岭、小兴安岭)和西南地区是两个显著的 GPP 高值区.GPP 较低的区域主要分布在塔里木盆地、柴达木盆地、河西走廊和内蒙古西部地区.

在农业干旱和生态干旱的评估中,scPDSI、SPEI-01 和 SPEI-12 显示出一致的空间分布特征.这些指数表明,在东北、华北、华中、内蒙古、西北和新疆地区,干旱现象明显,且随着时间的延长,干旱现象更为显著.相比之下,气象干旱在短时间尺度上的空间变化相对缓和,主要在西北地区西部、西藏地区西部和西南地区呈现出较弱的干旱特征;然而,随着时间尺度的增加,气象干旱的影响范围逐渐扩大,覆盖了新疆地区东部、西藏、内蒙古西部、西北地区西部、西南和华北地区.

1982—2018 年期间,scPDSI、SPEI-12 和 SPI-12 在四季的空间分布特征保持一致(图略).然而,1 个月时间尺度上的 SPEI 和 SPI 在不同季节显示出较大的变化率.以 SPEI-01 为例,春季除了西藏地区东部、西北地区南部和西南地区外,全国范围内呈现出明显的干旱特征,其中新疆地区尤为严重;夏季整体区域的干旱状况有所减缓,尤其是华东和华南地区呈现出一定的湿润特征;秋季干旱的面积进一步扩大,华中和东北地区北部出现了湿润特征;到了冬季,华东和华北地区的干旱则进一步加剧.

图 3 展示了 1982—2018 年夏季平均的 GPP 以及不同干旱指数在 1 个月和 12 个月时间尺度上的变化趋势,其中只展示了显著性水平检验超过 90% 的点.除了华东、华南和东北部分地区以及新疆地区南部外,中国整体的 GPP 呈现出增加的趋势.尤其是新疆地区西北部和沿西南—东北方向分布的半干旱地区,这些区域与我国三北防护林建设地在空间分布上表现出一致性.此外,西南地区的植被增长程度也较大.从季节演变上看,春季 GPP 增大的地区主要集中在我国东南,涵盖了华东、华中、华南、西南的大部分地区,这可能和春季升温植被进入生长季有关.秋季 GPP 的变化趋势和夏季一致,只是程度较轻;冬季 GPP 的变化趋势很小,但在全国都呈现出轻微增加的趋势.

在干旱指数方面,scPDSI 和 SPEI 在更长时间

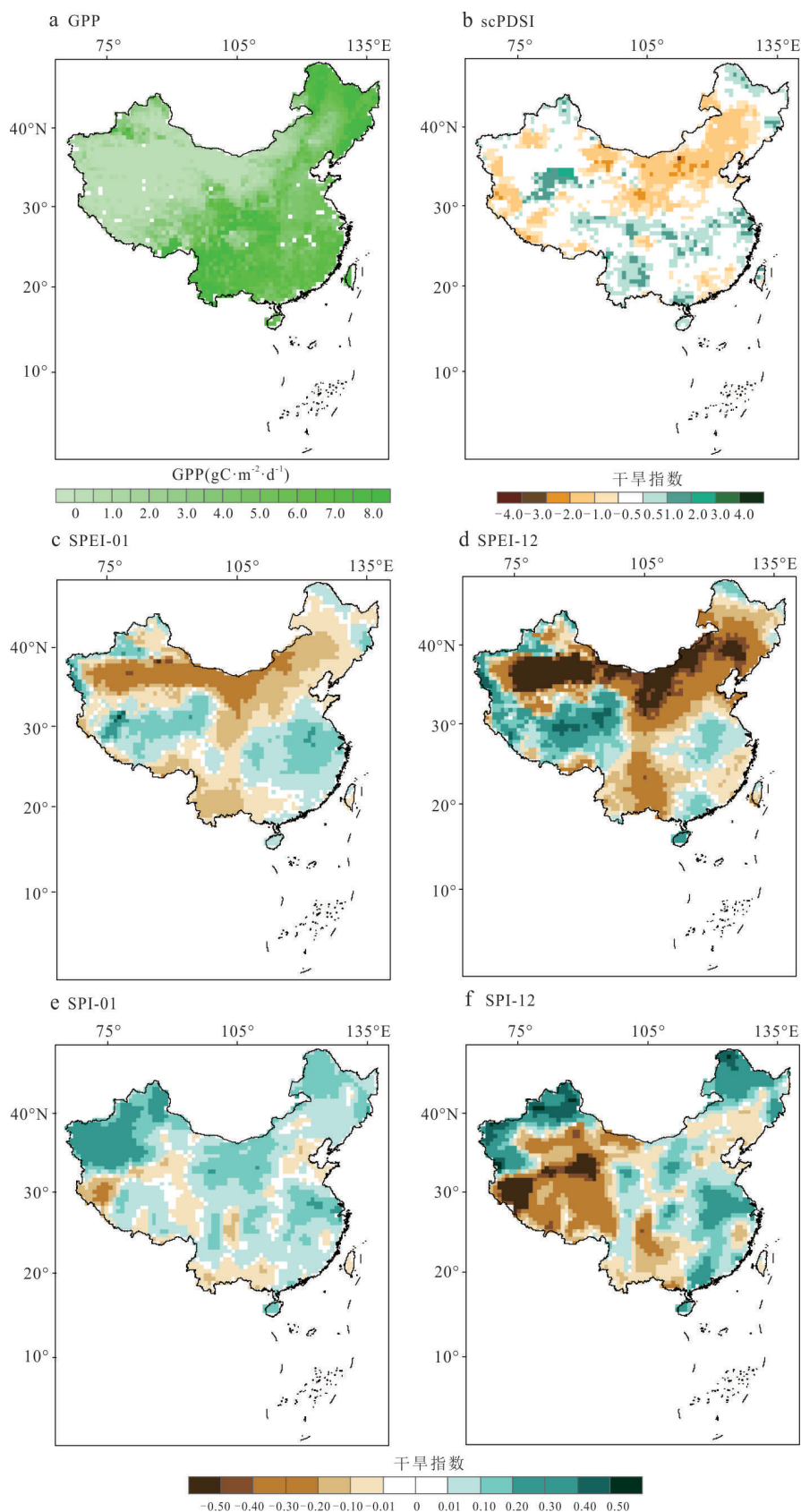


图2 中国1982—2018年夏季平均的GPP (a), scPDSI (b), SPEI-01 (c), SPEI-12 (d), SPI-01 (e), SPI-12 (f)的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the JJA averages for GPP (a), scPDSI (b), SPEI-01 (c), SPEI-12 (d), SPI-01 (e), SPI-12 (f) from 1982 to 2018 over China

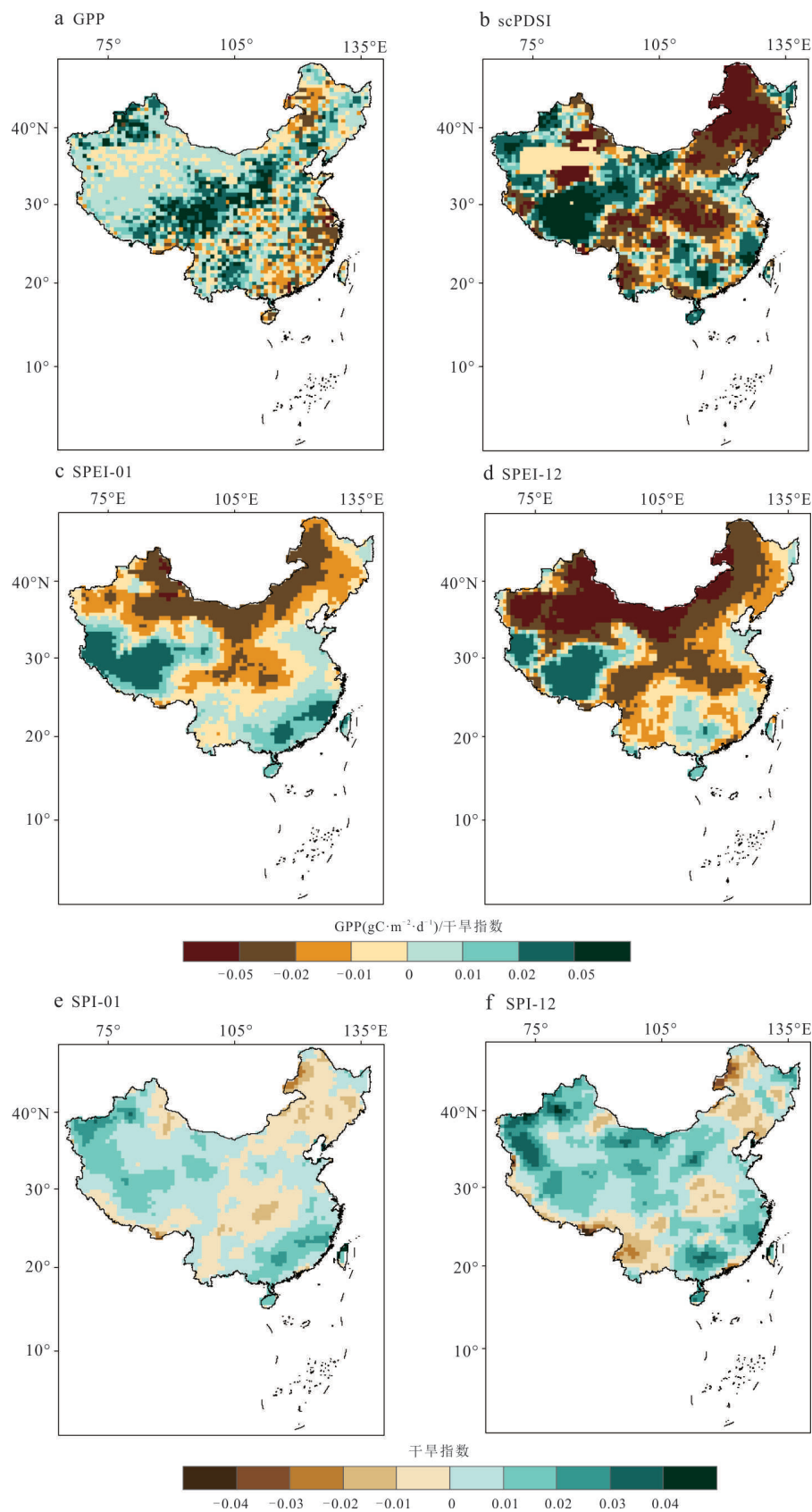


图3 中国1982—2018年夏季平均的GPP (a), scPDSI (b), SPEI-01 (c), SPEI-12 (d), SPI-01 (e), SPI-12 (f)变化趋势的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the trend in changes for the JJA averages for GPP (a), scPDSI (b), SPEI-01 (c), SPEI-12 (d), SPI-01 (e), SPI-12 (f) from 1982 to 2018 over China

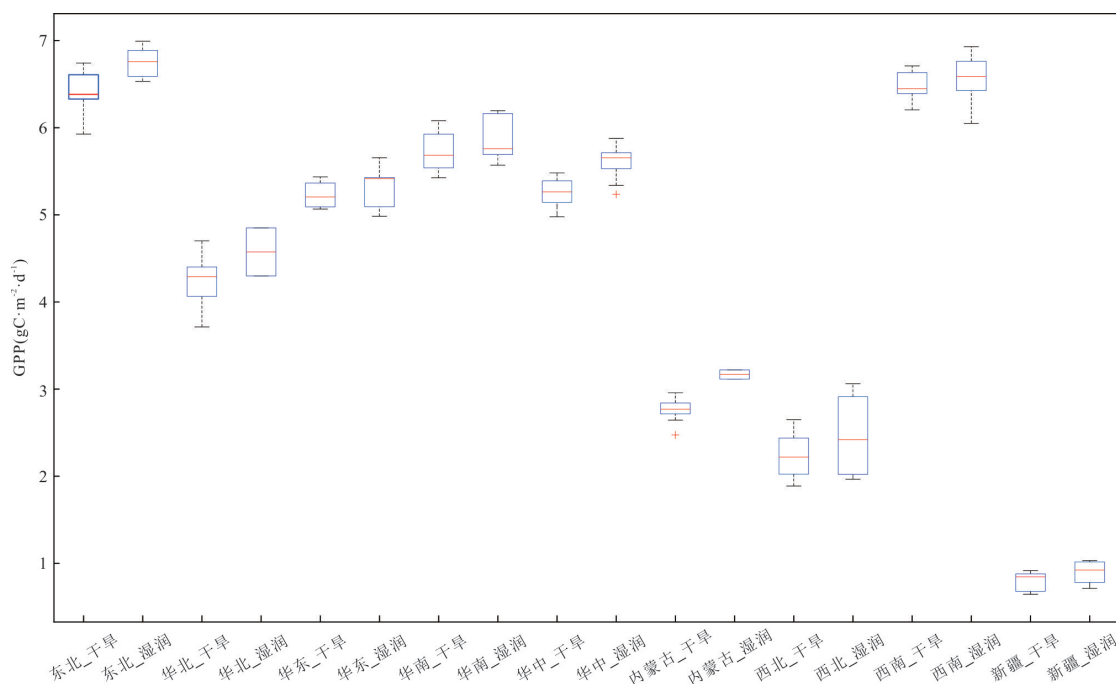


图4 1982—2018年夏季不同区域平均的GPP在干旱和湿润条件的箱图

Fig.4 Boxplot of JJA-averaged GPP under drought and wet conditions in different regions from 1982 to 2018

尺度上呈现较高的一致性.这些指数显示,东北、华中、新疆和西南地区呈现出明显的变干趋势,而华南、华东地区及西藏地区则显示出一定的变湿趋势. SPEI-01未能有效反映华南地区的干旱情况,但在12个月时间尺度上, SPEI则显示华南地区呈现明显的变干趋势. SPI在不同时间尺度上的分布特征也十分一致,随着时间尺度的增加,由降水引起的干旱特征尤为明显,尤其是东北、华中和西南地区.除了新疆南部和内蒙古西部地区呈现变湿的趋势外, SPI在其他地区所呈现的变干或变湿的趋势与 SPEI相似,只是变化的程度相对较轻.从时间演变上看,不同季节 scPDSI变化趋势的空间分布保持一致,证明了其在刻画干旱的稳定性方面表现较好.

图4展示了不同区域在干旱和湿润条件下GPP的箱型对比,其中干旱和湿润条件分别对应 scPDSI < -1 和 scPDSI > 1 的情况.结果具有一致的趋势:湿润条件下的GPP值显著高于干旱条件.特别是在东北、华中和内蒙古地区,这种差异最为显著,表明这些地区GPP对水分可用性的敏感性较高.相比之下,在华南和新疆地区,干旱和湿润条件下GPP的差异并不明显,这表明在评估水文条件对生态系统的影响时,需要重点考虑地区特异性.

2.2 GPP与干旱指数的变化趋势分析

图5展示了1982—2018年夏季平均的GPP

变异系数,以及不同干旱指数在1个月和12个月时间尺度上的标准差.可以得到,在新疆、西藏、西北和内蒙古地区,夏季GPP的变异系数显著偏高,这意味着这些地区的植被GPP相对于其平均值的离散程度可能达到60%至70%.这种现象可能与这些地区植被GPP值本身较小有关.

在全国范围内,夏季 scPDSI 的标准差表现出较高的一致性.然而,秋季的标准差相对于其他季节更为显著.随着时间尺度的延长, SPEI 和 SPI 的标准差均呈现增大趋势,这反映出 SPEI-12 和 SPI-12 的变异性更为显著.特别地, SPEI 的标准差与 GPP 的变异系数呈现一致的空间分布特征,特别是在新疆、西藏、西北和内蒙古地区,标准差明显偏高,这表明这些区域的干湿变化更为剧烈.另一方面, SPI 的标准差在华南、华东、东北等降水量较为充沛的地区更为显著,并且随着时间尺度的累积,这些地区对气象干旱的响应更加敏感.

图6展示了1982—2018年期间不同区域夏季干旱指数的演变.除华东和华南地区外,其他地区普遍呈现出不同程度的干旱化趋势.其中,内蒙古地区干旱化趋势最为显著,其 scPDSI、SPEI 和 SPI 分别以每年 0.039、0.026 和 0.004 的速率下降;其次是东北、华北和华中地区, scPDSI (SPEI 和 SPI) 的下降速率分别是 0.029/a (0.009/a 和 0.002/a)、

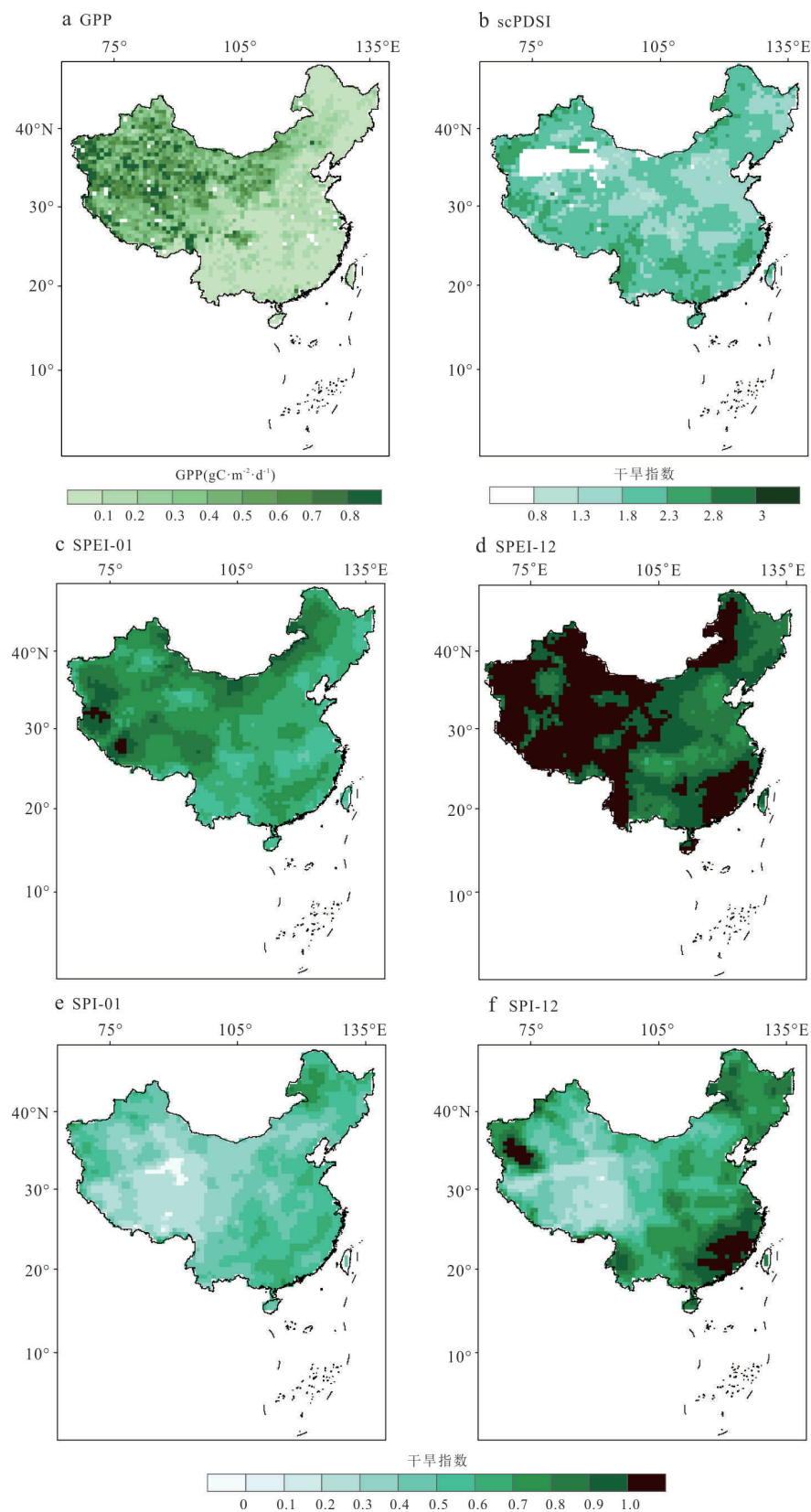


图5 中国1982—2018年夏季平均的GPP (a), scPDSI (b), SPEI-01 (c), SPEI-12 (d), SPI-01 (e), SPI-12 (f)的变异系数(标准差)的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the coefficient of variation (CV) or standard deviation in changes for the JJA averages for GPP (a), scPDSI (b), SPEI-01 (c), SPEI-12 (d), SPI-01 (e), SPI-12 (f) from 1982 to 2018 over China

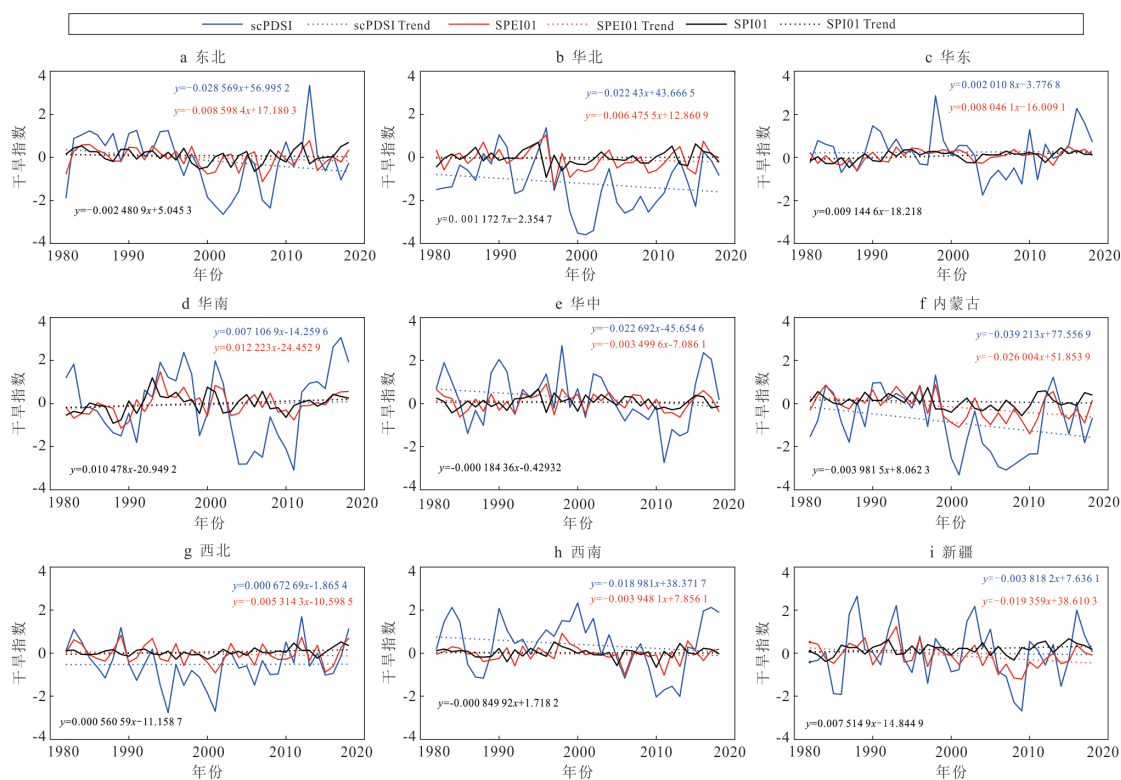


图6 1982—2018年不同区域夏季干旱指数随时间的变化

Fig.6 Temporal changes in the summer drought index across various regions from 1982 to 2018

a. 东北; b. 华北; c. 华东; d. 华南; e. 华中; f. 内蒙古; g. 西北; h. 西南; i. 新疆

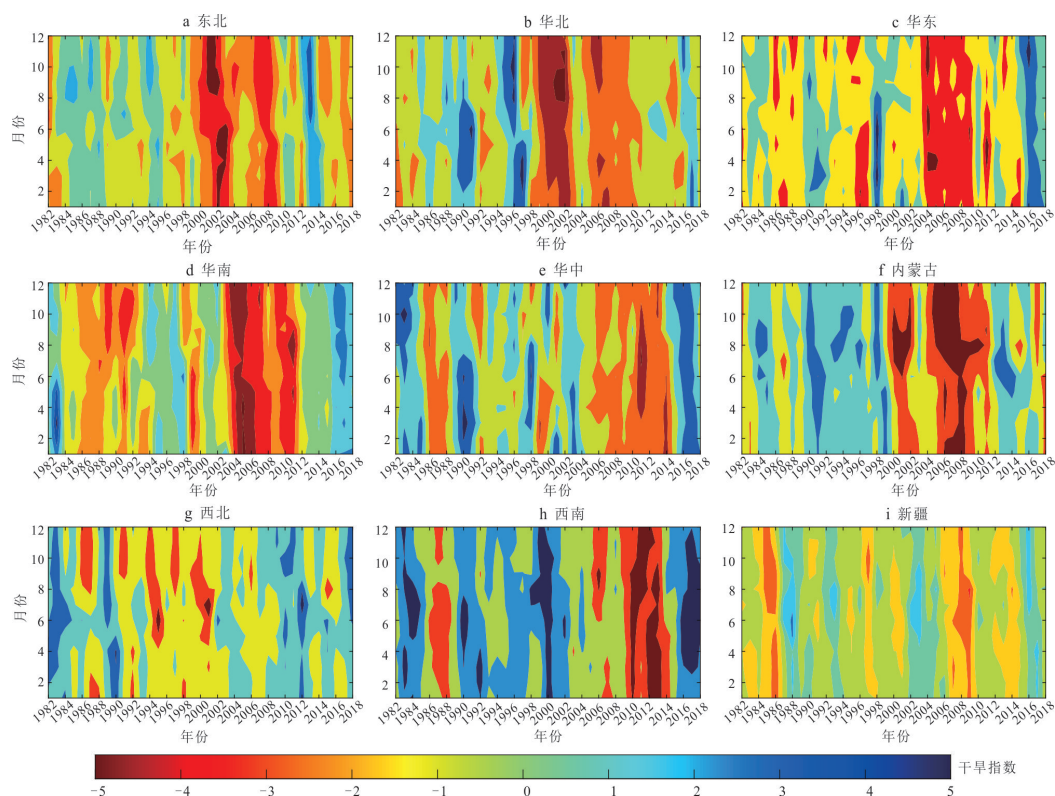


图7 1982—2018年不同区域scPDSI的时间变化

Fig.7 Variation of drought duration in different regions from 1982 to 2018

a. 东北; b. 华北; c. 华东; d. 华南; e. 华中; f. 内蒙古; g. 西北; h. 西南; i. 新疆

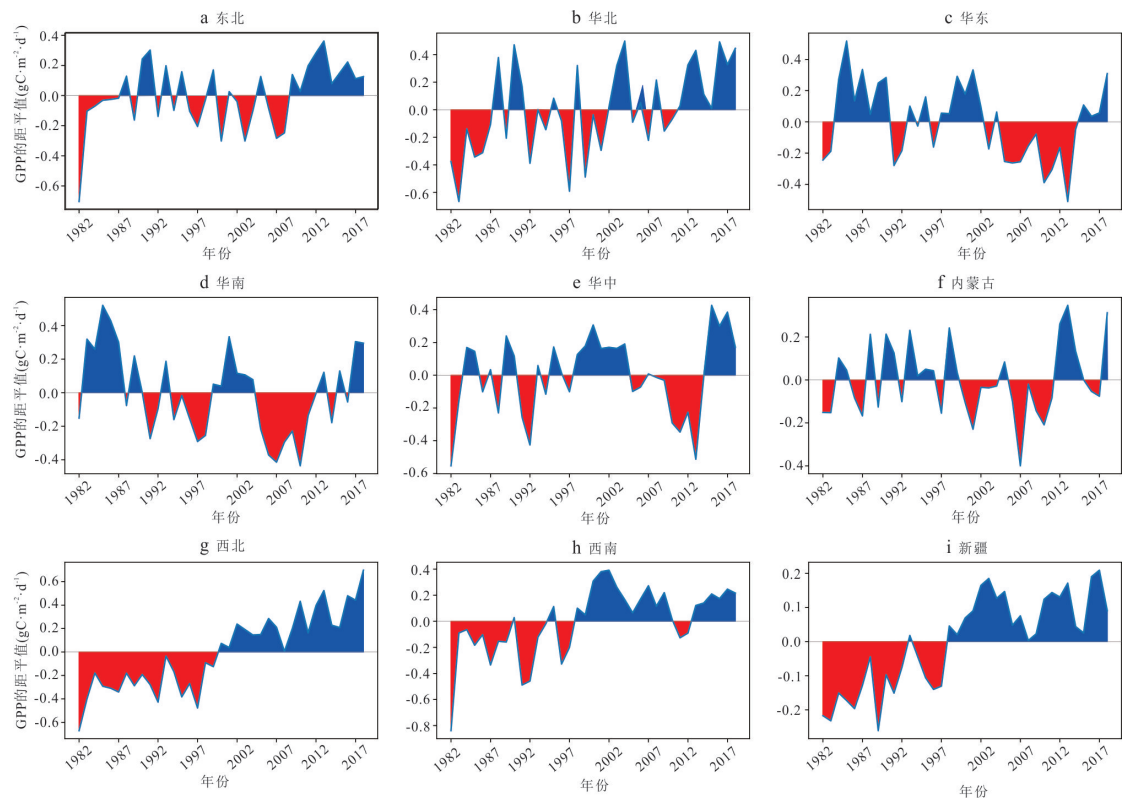


图 8 1982—2018 年不同区域夏季 GPP 的距平演变
Fig.8 Evolution of summer GPP anomaly in various regions from 1982 to 2018

0.022/a (0.006/a 和 0.001/a)、0.023/a (0.003/a 和 0.0002/a). 西北地区虽然在某些年份遭遇了严重的干旱事件,但同时也经历了剧烈的干湿交替现象. 总体而言,西北地区整体呈现出干-湿-干的变化趋势. 西南地区与西北地区相似,也经历了剧烈的干湿交替变化过程,整体呈现出先干后湿的变化趋势.

图 7 展示了 1982—2018 年间不同区域干旱持续时间的变化情况. 在这 37 年的时间跨度内,各区域的干旱时间展现出显著的地域差异以及时间上的波动性. 东北、华东、华南在整个时间跨度内呈现出干旱的特征,其中华北在 2000—2003 年期间的干旱程度最强. 华北、内蒙古呈现先湿后干的变化特性,转折点在 1997—1999 年附近,其中华北和内蒙古均在 2000—2003 和 2006—2008 年期间出现了较大程度的干旱. 西南地区在 1986—1989 年期间出现了严重干旱,之后 1990—2004 年呈现较湿润的情况,2005—2014 年复旱,之后又呈现湿润的变化特征.

从 1982—2018 年夏季区域平均的 GPP 距平值来看(图 8),除了华南和华东地区外, GPP 整体呈现上升趋势,其中上升趋势最明显的地区

是西北、西南和新疆. 东北、华东、华南、华中和内蒙古地区的负距平发生的时段和极端干旱发生的时段有很好的对应关系,和一般干旱的对应关系并不强烈. 此外,1982、1992 和 1997 年西北地区的 GPP 呈现出极大负距平,这期间也是西北地区干旱较严重的时段. 西南地区的 GPP 在 2012 年由正距平转成了负距平,同时段在西南地区发生了严重的持续干旱(2010—2014).

2.3 干旱对 GPP 的滞后效应

本文通过计算各区域的 GPP 与 scPDSI、SPEI-01、SPI-01 的 Pearson 相关系数,得到最大相关系数值及其对应的滞后月数(图 9),图中有数值的格点表示通过了 90% 的水平显著性检验. 可以得到,中国大部分地区的干旱指数与滞后的 GPP 呈正相关,其中 SPI 与滞后的 GPP 相关性最强,最大相关系数较高的区域主要集中在西藏、西北、西南和东北地区,相关系数超过了 0.4.

GPP 对气象干旱的滞后响应时间明显长于对农业干旱和生态干旱. 在全国范围内, GPP 对 scPDSI 的响应时间控制在 0~1 个月. 然而,在东北西部、华东、华南地区,响应时间为 6~8 个月;在西北和西藏地区,响应时间甚至超过了 10 个月. SPEI 与

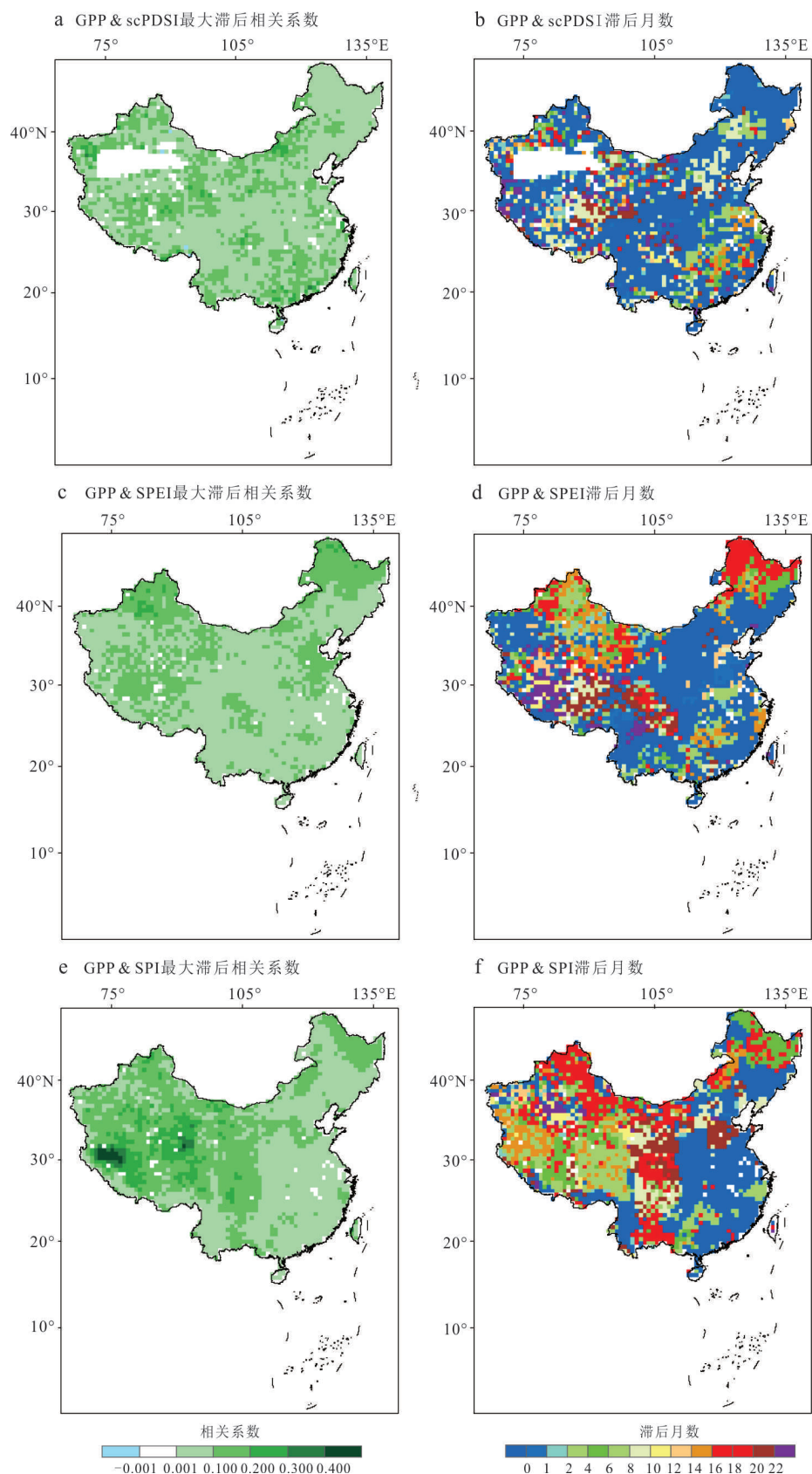


图9 中国1982—2018年GPP分别与scPDSI、SPEI-01和SPI-01的最大相关系数(a、c和e)和滞后月数(b、d和f)

Fig.9 Maximum correlation coefficient (a, c, e) and lag months (b, d, f) between GPP, scPDSI, SPEI-01, and SPI-01 respectively in China from 1982 to 2018

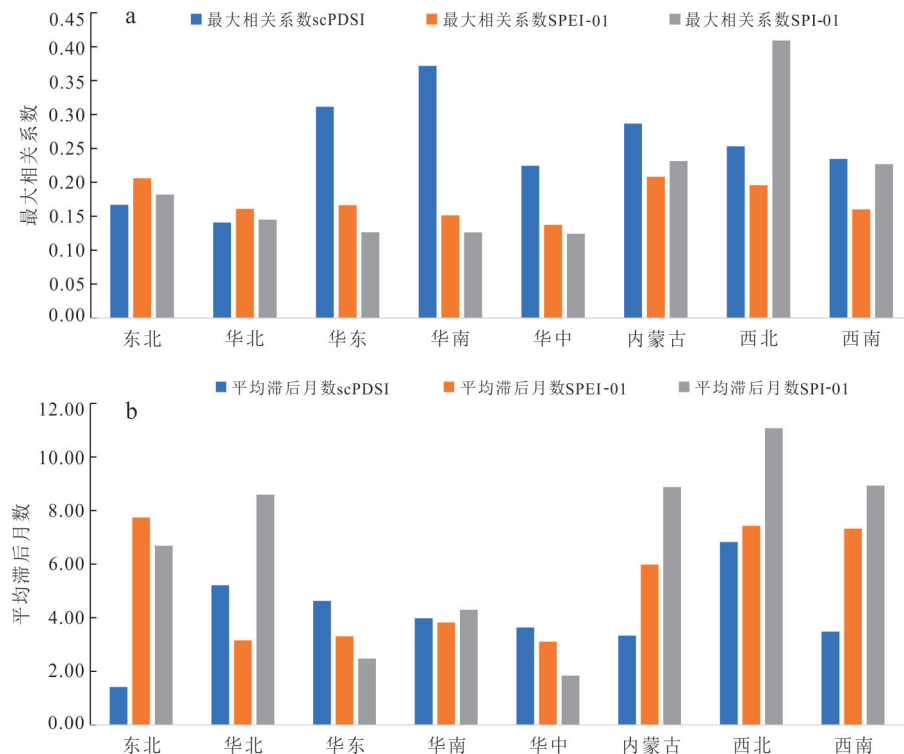


图 10 1982—2018 年不同区域平均的 GPP 和月度干旱指数(scPDSI、SPEI-01 和 SPI-01)的(a)最大相关系数和(b)平均滞后月数

Fig.10 Maximum correlation coefficients (a) and average lag months (b) between the average GPP and the monthly drought indices (scPDSI, SPEI-01, and SPI-01) for different regions from 1982 to 2018

scPDSI 的响应时间在空间分布上保持一致,不同的是,在东北地区北部(主要覆盖着寒温带针叶林),GPP 对 SPEI-01 的滞后响应时间最长,可达 16~20 个月.在表现出与气象干旱有时滞效应的区域中,华中、华南、华东地区的 GPP 对气象干旱保持了 0~1 个月的时滞响应,东北和西藏地区保持了约 6~8 个月的时滞响应,新疆地区的时滞效应时间约 16~18 个月,而西南地区则表现出超过 22 个月的显著时滞效应.

图 10 展示了 1982—2018 年不同区域平均的 GPP 和月度干旱指数(scPDSI, SPEI-01 和 SPI-01)的最大相关系数和平均滞后月数.总体而言,GPP 对 scPDSI 的时滞相关系数在华东和华南地区最大,平均周期在 4~6 个月.对气象干旱响应最剧烈的区域分布在内蒙古、西北和西南地区,最大时滞相关系数分别为 0.23、0.41 和 0.23,平均滞后月数为 9~11 个月.对气象干旱响应周期较短的区域在华中和华东地区,为 0~3 个月,最大相关系数分别为 0.12 和 0.13.

2.4 干旱对 GPP 的累积效应

不同一级区域月度 GPP 与不同时间尺度干

旱指数的相关系数如图 11 所示.其中,GPP 与 scPDSI 相关性较高的地区为东北、华北、华中和内蒙古,相关系数分别为 0.48、0.53、0.36 和 0.63,相关性较差的地区为西北、华南和新疆地区.

图 11 同样展示了不同时间尺度的农业干旱和气象干旱对 GPP 的累积效应.SPEI 和 GPP 在华北地区、内蒙古地区的最大相关系数出现在 2 个月的累积时间尺度,相关系数值分别为 0.58 和 0.67;在华中、西南地区最大相关系数出现在 3 个月的累积时间尺度,相关系数值分别为 0.40 和 0.25;东北地区的最大累积时间尺度为 9 个月,相关系数为 0.67;华中地区为 12 个月,相关系数为 0.40;而在华东、华南的最大相关系数则出现在 48 个月的最长时间尺度上,相关系数分别是 0.44 和 0.43.在新疆和西北地区,SPEI 和 GPP 呈负相关,且最大负相关系数的绝对值出现在 48 个月,值分别为 -0.73 和 -0.41.由此可得,华北、华中、内蒙古、西南地区对农业干旱的敏感度较高,东北的敏感性适中,华东、华南地区对农业干旱的敏感性较低.

对于气象干旱而言,在华东和华南地区,SPI 与 GPP 的相关性并不明显;除了西南地区干旱指数和

	东北	华北	华东	华南	华中	内蒙古	西北	西南	新疆
scPDSI	0.57***	0.42***	0.24	0.31***	0.52***	0.72***	0.19	0.16	0.29***
SPEI-01	0.48***	0.53***	0.17	-0.15	0.36***	0.63***	-0.02	0.10	-0.22
SPEI-02	0.59***	0.58***	0.09	-0.16	0.37***	0.67***	-0.03	0.17	-0.28**
SPEI-03	0.61***	0.55***	0.09	-0.18	0.40***	0.64***	-0.10	0.25	-0.32**
SPEI-06	0.62***	0.41***	0.07	-0.04	0.27***	0.54***	-0.29**	0.18	-0.35**
SPEI-09	0.67***	0.49***	0.03	0.04	0.29***	0.55***	-0.26	0.15	-0.31**
SPEI-12	0.59***	0.44***	0.01	0.12	0.40***	0.53***	-0.16	0.13	-0.39**
SPEI-24	0.38***	0.19	0.14	0.27***	0.40***	0.37***	-0.23	0.02	-0.52**
SPEI-36	0.37***	0.14	0.40***	0.31***	0.38***	0.34***	-0.33**	-0.04	-0.64**
SPEI-48	0.40***	-0.05	0.44***	0.43***	0.29***	0.27***	-0.41**	0.00	-0.73**
SPI-01	0.13	0.02	-0.23	0.06	0.11	0.06	0.33***	0.11	0.22
SPI-02	0.18	0.03	-0.19	-0.03	0.15	0.05	0.28***	0.21	0.14
SPI-03	0.11	0.04	-0.14	-0.10	0.16	0.06	0.30***	0.33***	0.14
SPI-06	0.01	0.02	-0.04	-0.05	0.13	0.01	0.28***	0.29***	0.13
SPI-09	0.07	0.02	0.02	-0.06	0.21	0.01	0.31***	0.20	0.22
SPI-12	0.15	0.17	0.07	0.02	0.22	0.29***	0.45***	0.09	0.33***
SPI-24	0.50***	0.54***	-0.06	0.00	0.43***	0.66***	0.60***	0.27***	0.55***
SPI-36	0.43***	0.43***	0.02	0.09	0.51***	0.63***	0.61***	0.22	0.59***
SPI-48	0.44***	0.48***	0.16	0.13	0.52***	0.60***	0.58***	0.20	0.61***

图 11 1982—2018 年夏季不同区域平均的 GPP 和不同时间尺度干旱指数的相关系数

Fig.11 Correlation coefficients between average GPP and drought indices at different time scales in various regions during the summer months from 1982 to 2018

其中***表示通过了 90% 的置信度检验

GPP 的最大累积时间尺度出现在 3 个月(相关系数值为 0.33)时间尺度上,其他地区的 SPI 和 GPP 的相关系数最大值都出现在 24~48 个月的时间尺度上.这意味着,西南地区对气象干旱的敏感度较高,除了华东和华南地区,东北、华北、华中、内蒙古、西北和新疆地区对气象干旱的敏感度较低,长时间的降水亏缺才会对这些地区产生影响.

3 讨论

本文研究结果揭示了农业干旱、生态干旱和气象干旱对我国植被 GPP 具有显著的时滞和累积效应.这些效应表明,前期水分条件对 GPP 具有重要影响.在干旱地区,如西北、新疆和西藏,植被对干旱条件的适应性导致 GPP 对气象干旱的响应时间较长.相反,在水分条件较为充足的华东、华南和东北南部地区,GPP 对干旱的响应时间

较短,通常在 0 至 2 个月之间.这一发现与陆建涛等(2023)的研究结果相呼应,他们发现草地对干旱的滞后效应随着干旱强度的增加而延长.

进一步分析表明,植被类型对不同干旱类型的响应存在显著差异.结合中国的行政区划和主要植被类型,笔者发现温带荒漠区(如新疆)、青藏高原高寒植被区(如西藏)及其过渡区(如西北)的 GPP 对干旱的时滞响应时间较长,这可能与这些地区海拔较高有关.影响植被生长的因素不仅包括水分,还与温度密切相关,这一点与顾锡羚等(2021)的研究相一致.与此同时,温带草原区(如内蒙古东部)、暖温带落叶阔叶林区(如华东)和亚热带常绿阔叶林区(如华南、西南)的植被对干旱的响应时间相对较短,这可能与这些植被类型及所处的区域对水分的需求更加迫切有一定的关系.

在探讨 GPP 与不同干旱指数的时滞效应时,笔者将时间尺度定在了 24 个月,这与以往的很多研究

(顾锡羚等, 2021; 张世喆等, 2022; 陆建涛等, 2023)将滞后时间定义在 12 个月不同. 研究表明, 干旱对陆地生态系统 GPP 的影响可能会持续几个月甚至几年(von Buttlar *et al.*, 2018), 因此适当延长滞后时间, 可以探讨干旱与 GPP 更长时间尺度上的滞后效应. 但这种干旱遗留效应和植物的种类、水分利用和水力响应有很大的关系(Wu *et al.*, 2018), 如何区分年际效应和季节效应仍需要进一步探讨(杜文丽等, 2020).

本研究以不同干旱指数替代了不同的干旱类型, 但没有考虑其他干旱因素的影响, 例如干旱持续的时间、高温-干旱复合事件、骤旱等因素. 此外, 本文在分析 GPP 对干旱的响应机理时, 未考虑人类活动对 GPP 的影响, 例如植树造林、灌溉、放牧等活动, 这些人类活动对 GPP 也会产生不可忽视的影响.

4 结论

本文研究了 1982—2018 年我国不同地区植被 GPP 及不同干旱指数的时空变化特征, 评估了干旱对 GPP 的时滞和累积效应, 得到的结论如下:

(1) 1982—2018 年期间, 中国各地地区的 GPP 整体呈现上升的趋势, 尤其是沿西南-东北方向的半干旱地区和西南地区的 GPP 呈现明显的增加趋势. 除了华东、华南和西藏地区, 其他地区都有明显的干旱化趋势, 干旱化趋势最明显的区域是内蒙古, 其 scPDSI、SPEI 和 SPI 分别以 0.039/a、0.026/a 和 0.004/a 的速率下降.

(2) GPP 变异系数的空间分布与 SPEI 的标准差保持一致, 且随着时间尺度的延长, SPEI 和 SPI 的标准差增大, 尤其在新疆、西藏、西北和内蒙古地区干湿变化剧烈, 而华南、华东、东北等降水充沛地区的 SPI 对气象干旱的响应随时间尺度累积变得更加敏感.

(3) 从不同区域 GPP 与月度干旱指数之间的相关性与时滞效应来看, 对农业干旱指数(scPDSI)响应最显著的区域为华东和华南地区, 平均滞后 4~6 个月; 而对气象干旱响应最显著的区域为内蒙古、西北和西南地区, 平均滞后 9~11 个月, 华中和华东地区对气象干旱的响应周期较短, 仅为 0~3 个月.

(4) 华北和内蒙古地区对 2 个月累积时间尺度的 SPEI 最为敏感, 而华东和华南地区则在 48 个月时间尺度上才显示出较高的相关性. 此外, 新

疆和西北地区 SPEI 与 GPP 呈现负相关, 表明这些地区对干旱的响应可能与其他地区不同. 对于气象干旱, 西南地区显示出较高的敏感度, 而其他多数地区需要更长时间的降水亏缺才会受到影响.

References

- Barichivich, J., Osborn, T. J., Harris, I., et al., 2022. Monitoring Global Drought Using the Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index [in “State of the Climate in 2021”]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(8): S31–S33. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0092.1>
- Beguéría, S., Vicente-Serrano, S. M., Angulo-Martínez, M., 2010. A Multiscalar Global Drought Dataset: The SPEIbase: A New Gridded Product for the Analysis of Drought Variability and Impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10): 1351–1356. <https://doi.org/10.1175/2010bams2988.1>
- Beguéría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., et al., 2014. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Revisited: Parameter Fitting, Evapotranspiration Models, Tools, Datasets and Drought Monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10): 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Campbell, J. E., Berry, J. A., Seibt, U., et al., 2017. Large Historical Growth in Global Terrestrial Gross Primary Production. *Nature*, 544(7648): 84–87. <https://doi.org/10.1038/nature22030>
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., et al., 2021. Water Cycle Changes. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., et al., eds., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Du, W. L., Sun, S. B., Wu, Y. T., et al., 2020. The Responses of Gross Primary Production to Drought in Terrestrial Ecosystems of China during 1980–2013. *Chinese Journal of Ecology*, 39(1): 23–35 (in Chinese with English abstract).
- Fu, C. B., An, Z. S., Guo, W. D., 2005. Evolution of life-Supporting Environment in Our Nation and the Predictive Study of Aridification in Northern China (I): Main Scientific Issues and Achievements. *Advance in Earth Sciences*, 20(11): 1157–1167 (in Chinese with English abstract).
- Fu, C. B., Ma, Z. G., 2023. Progress and Reflection on the Study of Interdecadal Changes in Dry and Wet Conditions in Global Arid and Semiarid Regions. *Transactions*

- of *Atmospheric Sciences*, 46(4): 481—490 (in Chinese with English abstract).
- Ge, J., Huang, X., Zan, B. L., et al., 2023. Local Surface Cooling from Afforestation Amplified by Lower Aerosol Pollution. *Nature Geoscience*, 16(9): 781—788. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01251-x>
- Guan, X. D., Huang, J. P., 2024. Constructing Semi-Arid Ecological Barriers to Prevent Desertification. *The Innovation Geoscience*, 2(2): 100067. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2024.100067>
- Guan, X. D., Shi, R., Kong, X. N., et al., 2018. An Overview of Researches on Land - Atmosphere Interaction over Semi-Arid Region under Global Changes. *Advances in Earth Science*, 33(10): 995—1004 (in Chinese with English abstract).
- Gu, T. H., Guan, X. D., Huang, J. P., et al., 2023. The Turning of Ecological Change in the Yellow River Basin. *Hydrological Processes*, 37(12): e15055. <https://doi.org/10.1002/hyp.15055>
- Gu, X. L., Guo, E. L., Yin, S., et al., 2021. Assessment of the Cumulative and Lagging Effects of Drought on Vegetation Growth in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 29(6): 1301—1310 (in Chinese with English abstract).
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., et al., 2014. Updated High-Resolution Grids of Monthly Climatic Observations—The CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3): 623—642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Jiang, D. B., Wang, X. X., 2021. A Brief Interpretation of Drought Change from IPCC Sixth Assessment Report. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 44(5): 650—653 (in Chinese with English abstract).
- Li, B., Su, H. B., Chen, F., et al., 2013. The Changing Characteristics of Drought in China from 1982 to 2005. *Natural Hazards*, 68(2): 723—743. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0649-3>
- Liang, S. L., Chen, X. N., Chen, Y., et al., 2023. Updates on Global LAnd Surface Satellite (GLASS) Products Suite. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(4): 831—856 (in Chinese with English abstract).
- Lu, J. T., Peng, J., Li, G. Y., et al., 2023. 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*, 43(23): 9745—9757 (in Chinese with English abstract).
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim.
- Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. Office of Climatology Research Paper 45, Weather Bureau, Washington, D.C.
- Piao, S. L., Sitch, S., Ciais, P., et al., 2013. Evaluation of Terrestrial Carbon Cycle Models for Their Response to Climate Variability and to Trends. *Global Change Biology*, 19(7): 2117—2132. <https://doi.org/10.1111/gcb.12187>
- Sun, B. F., Zhao, H., Wang, X. K., 2016. Effects of Drought on Net Primary Productivity: Roles of Temperature, Drought Intensity, and Duration. *Chinese Geographical Science*, 26(2): 270—282. <https://doi.org/10.1007/s11769-016-0804-3>
- Teuling, A. J., Seneviratne, S. I., Stöckli, R., et al., 2010. Contrasting Response of European Forest and Grassland Energy Exchange to Heatwaves. *Nature Geoscience*, 3(10): 722—727. <https://doi.org/10.1038/ngeo950>
- van der Schrier, G., Barichivich, J., Briffa, K. R., et al., 2013. A ScPDSI-Based Global Data Set of Dry and Wet Spells for 1901—2009. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10): 4025—4048. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50355>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696—1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- von Buttlar, J., Zscheischler, J., Rammig, A., et al., 2018. Impacts of Droughts and Extreme-Temperature Events on Gross Primary Production and Ecosystem Respiration: A Systematic Assessment across Ecosystems and Climate Zones. *Biogeosciences*, 15(5): 1293—1318. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1293-2018>
- Wang, C. P., Huang, M. T., Zhai, P. M., 2022. New Progress and Enlightenment on Different Types of Drought Changes from IPCC Sixth Assessment Report. *Acta Meteorologica Sinica*, 80(1): 168—175 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Y., He, B., Zhang, Y. F., et al., 2018. Response of Ecosystem Productivity to Dry/Wet Conditions Indicated by Different Drought Indices. *Science of the Total Environment*, 612: 347—357. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.212>
- Wang, T. H., Wang, X. F., Zhang, S. L., et al., 2024. Interannual Change Control Mechanism of Carbon Flux in Inland River Basins in Cold and Arid Regions.

- Earth Science*, 49(5): 1907—1919 (in Chinese with English abstract).
- Wells, N., Goddard, S., Hayes, M. J., 2004. A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, 17(12): 2335—2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2335:ASPSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPSI>2.0.CO;2)
- Wu, X., Liu, H., Li, X., et al., 2018. Differentiating Drought Legacy Effects on Vegetation Growth over the Temperate Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 24: 504—516. <https://doi.org/10.1111/gcb.13920>
- Xu, H. J., Wang, X. P., 2016. Effects of Altered Precipitation Regimes on Plant Productivity in the Arid Region of Northern China. *Ecological Informatics*, 31: 137—146. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.12.003>
- Xu, M., Guan, Z. Y., Cai, Q., 2020. Spatial and Temporal Evolution Features of Cooling Extremes in China during Winter Half Year from 1960 to 2015. *Journal of the Meteorological Sciences*, 40(6): 733—743 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. P., Zheng, Y., Piao, S. L., et al., 2019. Increased Atmospheric Vapor Pressure Deficit Reduces Global Vegetation Growth. *Science Advances*, 5(8): eaax1396. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1396>
- Yuan, X., Wang, Y. M., Zhou, S. Y., et al., 2024. Multi-scale Causes of the 2022 Yangtze Mega-Flash Drought under Climate Change. *Scientia Sinica Terrae*, 54(8): 2690—2702 (in Chinese with English abstract).
- Yue, S. R., Wang, L. C., Cao, Q., et al., 2024. Vegetation Dynamics and Potential Factors Driving Mechanisms in the Tarim River Basin. *Earth Science*, 49(9): 3399—3410 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Z., Zhu, X. F., Liu, T. T., et al., 2022. Response of Gross Primary Production to Drought under Climate Change in Different Vegetation Regions of China. *Acta Ecologica Sinica*, 42(8): 3429—3440 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H. C., 2020. Study on the Temporal and Spatial Changes of Different Types of Drought and Their Relationship (Dissertation). Northwest A&F University, Xianyang, 56—72 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y., Shen, R. Q., Wang, Y. W., et al., 2020. Improved Estimate of Global Gross Primary Production for Reproducing Its Long-Term Variation, 1982—2017. *Earth System Science Data*, 12(4): 2725—2746. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2725-2020>
- Zou, H., Gao, G. Y., Fu, B. J., 2016. The Relationship between Grassland Ecosystem and Soil Water in Arid and Semiarid Areas: A Review. *Acta Ecologica Sinica*, 36(11): 3127—3136 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 杜文丽, 孙少波, 吴云涛, 等, 2020. 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. *生态学报*, 39(1): 23—35.
- 符淙斌, 安芷生, 郭维栋, 2005. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(I): 主要研究成果. *地球科学进展*, 20(11): 1157—1167.
- 符淙斌, 马柱国, 2023. 全球干旱/半干旱区年代尺度干湿变化研究的进展及思考. *大气科学学报*, 46(4): 481—490.
- 管晓丹, 石瑞, 孔祥宁, 等, 2018. 全球变化背景下半干旱区陆气机制研究综述. *地球科学进展*, 33(10): 995—1004.
- 顾锡岭, 郭恩亮, 银山, 等, 2021. 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*, 29(6): 1301—1310.
- 姜大膀, 王晓欣, 2021. 对 IPCC 第六次评估报告中有关干旱变化的解读. *大气科学学报*, 44(5): 650—653.
- 梁顺林, 陈晓娜, 陈琰, 等, 2023. 陆表卫星遥感 GLASS 产品集的研发新进展. *遥感学报*, 27(4): 831—856.
- 陆建涛, 彭建, 李刚勇, 等, 2023. 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*, 43(23): 9745—9757.
- 王晨鹏, 黄萌田, 翟盘茂, 2022. IPCC AR6 报告关于不同类型干旱变化研究的新进展与启示. *气象学报*, 80(1): 168—175.
- 王同红, 王旭峰, 张松林, 等, 2024. 寒旱区内陆河流域碳通量年际变化控制机制. *地球科学*, 49(5): 1907—1919.
- 徐蒙, 管兆勇, 蔡倩, 2020. 1960—2015年中国冬半年极端降温过程事件的时空演变特征. *气象科学*, 40(6): 733—743.
- 袁星, 王钰森, 周诗珂, 等, 2024. 气候变化下 2022 年长江特大骤旱的多尺度成因分析. *中国科学: 地球科学*, 54(8): 2690—2702.
- 岳胜如, 王伦澈, 曹茜, 等, 2024. 塔里木河流域植被动态及潜在因素驱动机制. *地球科学*, 49(9): 3399—3410.
- 张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 等, 2022. 气候变化下中国不同植被区总初级生产力对干旱的响应. *生态学报*, 42(8): 3429—3440.
- 赵会超, 2020. 不同类型干旱的时空变化规律及其关系研究 (硕士学位论文). 咸阳: 西北农林科技大学, 56—72.
- 邹慧, 高光耀, 傅伯杰, 2016. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展. *生态学报*, 36(11): 3127—3136.