

# 中国植被生产力对干湿变化的响应

宋进喜<sup>1,2</sup>, 齐贵增<sup>1,2</sup>, 余敦先<sup>3,4</sup>, 蒋晓辉<sup>1,2</sup>, 毛瑞晨<sup>1,2</sup>

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127;  
3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072;  
4. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 随着全球气温的持续升高, 水资源可利用性对植被生长的影响是否发生了变化仍不清楚。本文评估了 1982—2018 年中国植被生产力对干湿变化响应的长期演变趋势及植被响应的多时间尺度阈值, 这将对降低陆地生态系统管理成本和双碳目标实现具有重要意义。① 在研究期内中国植被生产力的水分胁迫不断增强。② 在多时间尺度干湿变化中, 61.18% 的植被覆盖区存在过干旱化显著抑制了该区域的植被光合作用; 28.89% 的植被覆盖区存在水分过剩显著抑制了该区域的植被光合作用。③ 干旱化显著胁迫植被生产力的最小响应时间缩短, 而水分过剩显著约束植被生产力的最大响应时间延长, 表明干旱化抑制植被生产力影响越来越容易, 水分过剩对植被生产力产生抑制作用越来越困难。因此, 1982—2018 年中国植被生产力的水分约束正在增加。本文结果揭示了气候持续变暖背景下的水资源可利用性对植被生长影响的变化趋势, 为水—碳耦合关系及水碳循环提供科学依据。

**关键词:** GPP; SPEI; 多时间尺度; 变化特征; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202307015

## 1 引言

植被是陆地生态系统的主要组成部分, 对全球碳平衡调节、降低温室气体浓度、维护全球气候稳定有着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。植被对水资源的可利用性严重影响着陆地生态系统的水循环、碳交换和能量流动<sup>[2]</sup>。在全球气温持续升高的背景下, 水分蒸发、植物蒸腾、水汽输送等水循环过程发生了变化<sup>[3]</sup>, 导致饱和蒸气压亏缺 (Vapor Pressure Deficit, VPD) 的提升和土壤含水量减少, 植被生长受到了更多的水分限制, 生态系统稳定性产生了严重的影响<sup>[4-6]</sup>, 全球植被持续变绿并且植被生产力提高也会增加植被的需水量<sup>[7]</sup>, 并且在未来的植被水分限制可能会进一步加剧。越来越频繁发生的极端干旱-热浪复合事件和更强的地表辐射也可能会影响地区的地表植被覆盖和植物生长<sup>[8]</sup>, 这也是陆地生态系统净初级生产力变化的主要推动力之一<sup>[9]</sup>, 从而导致“碳—气候”正反馈调节的改变进一步加速全球气候变暖趋势<sup>[10-12]</sup>, 进一步加剧水资源压力<sup>[13]</sup>。因此, 在多时间尺度和较大的空间尺度上量化评估植被的水分约束变化具有很大的挑战性, 但这对于深入理解气候持续变暖背景下的水资源限制对区域植被的影响具有重要意义。

研究表明, 干旱是由物理过程驱动的陆—气相互作用耦合的事件, 温度升高往往会加剧水资源限制的加剧<sup>[14]</sup>。从已有研究中发现, 水分的减少主要分为正向影响和负面影

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2023-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42041004) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42041004]

作者简介: 宋进喜(1971-), 男, 教授, 主要从事水文学、水生态及水资源研究。E-mail: jinxisong@nwu.edu.cn

1764-1778 页

响<sup>[15]</sup>,一方面在热带雨林或温度为植被生产力变化主要限制因素的高纬度地区一定程度上的降水减少会有利于温度的提升从而促进该区域植被的光合作用,提升植被生产力<sup>[16-17]</sup>;另一方面全球大多数地区干旱对植被存在不同程度的负面影响<sup>[18]</sup>。干旱对植被的负面影响可能表现为光合作用减弱、生物量减少以及死亡率增加等方面<sup>[10]</sup>。干旱对植被的影响是受多种植被生理和环境因素共同作用的复杂过程<sup>[19]</sup>。植被生长的需水量和缺水适应能力决定了植被的抗旱性<sup>[13]</sup>。因为植被生长期不同的生长阶段对水分的需求程度都不相同<sup>[20]</sup>,植被对干湿变化响应也就存在很大差异。因此,量化干湿变化对植被生产力的影响对于理解陆地生态系统碳汇能力至关重要。

已有研究记录了植被生产力对缺水的响应<sup>[19]</sup>。饱和蒸气压亏缺的急剧增加抵消了CO<sub>2</sub>对植被的施肥效应,对全球植被的生长起到了负面影响<sup>[21]</sup>。同时研究指出植被生长的水资源限制有增加趋势,尤其在许多半干旱和干旱地区植被对土壤水分的敏感性明显增加<sup>[22]</sup>。中国大部分地区处于季风区,气温和降水量呈现出显著的季节性差异,加之中国复杂地形的影响,导致中国干旱的发生愈加复杂,成为中国最常见的自然灾害之一<sup>[23-24]</sup>。2010年的极端干旱对中国西南地区植被碳汇产生了极大的限制<sup>[25]</sup>。此外,研究也指出近期陆地生态系统碳汇可能正在发生转变,从上升转为下降的趋势<sup>[26]</sup>,这可能与水分对植被生长的限制有着密不可分的联系<sup>[27-29]</sup>。水分的变化对陆地生态系统碳汇发挥着举足轻重的作用,中国以6.5%的全球植被覆盖区贡献了全球的10%~31%陆地碳汇<sup>[30]</sup>,中国在全球陆地生态系统碳汇中发挥了重要作用,且研究表明未来碳汇潜力将有更大提升<sup>[31-32]</sup>。尽管之前学者已经对植被生长中水分亏缺的各种影响进行了较为详细的研究,但随着全球持续变暖,水资源的时空分配发生改变<sup>[3]</sup>,但干湿变化对中国植被生长的影响长期变化趋势及其存在的空间差异尚不明朗,需要对植被水分胁迫的动态变化进行综合研究。因此,在全球持续变暖情况下,量化植被生产力的水分约束变化趋势对于理解生态系统稳定性,并对开发陆地表面模型具有重要意义,同时可以促进对未来陆地碳汇和全球气候的更精准预测。

因此,本文使用标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)量化干湿程度,使用植被总初级生产力(Gross Primary Production, GPP)作为植被生产力的量化植被指数,定量评估了1982—2018年中国植被生产力对干湿变化响应的长期变化趋势,揭示了干湿变化对植被生产力影响强度、植被响应时间尺度及其响应时间阈值的变化趋势,以为评估未来气候对陆地生态系统碳汇变化趋势和制定应对气候变化方案提供中国智慧和数据支撑。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 数据来源与预处理

中国地形复杂多样,山地面积约占国土面积的2/3以上。中国经纬度跨度巨大且大部分地区处于季风区,虽然雨热同期有利于植被生长,但是气温和降水量呈现出显著的季节性差异,植被GPP呈显著空间异质性(图1)<sup>[23-24]</sup>。

#### (1) 植被总初级生产力

植被的光合作用在陆地生态系统水—碳耦合关系中发挥了极为关键的作用。本文GPP数据集源自国家青藏高原数据中心的全球生态系统GPP数据集(<https://data.tpcdc.ac.cn/zh-hans/data/>),序列为1982—2018年,其时间分辨率为月,空间分辨率为0.05°。该GPP数据能准确反应植被光合作用,并且经过了地面通量站点检测具有精度高的优势,

是监测 GPP 强有力的手段<sup>[33]</sup>, 本文采用 1982—2018 年中国区域的生长季 (4—10 月) 的月 GPP。为避免月尺度 GPP 在植被生长过程中季节性周期特征缩小或放大干湿变化对植被生产力的影响<sup>[15]</sup>。因此依据式 (1) 进行了去季节化处理<sup>[15]</sup>。采用最邻近算法进行重采样插值转化为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ <sup>[34]</sup>。

$$A_{j,i} = \left( \frac{GPP_{j,i} - \overline{GPP}_j}{\sigma} \right) \quad (1)$$

式中:  $A_{j,i}$  表示  $i$  年  $j$  月的 GPP 去除了植被生长过程中的季节性周期特征, 称为 GPP 异常;  $GPP_{j,i}$  为  $i$  年  $j$  月 GPP 的值;  $\overline{GPP}_j$  表示 1982—2018 年  $j$  月 GPP 的平均值;  $\sigma$  表示 1982—2018 年  $j$  月 GPP 的标准差。

## (2) 气象数据

气温和降水量均来自国家青藏高原数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/>), 时间分辨率为月, 空间分辨率为 1 km, 采用最邻近算法进行重采样插值转化为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

## (3) 地表覆盖分布

地表覆盖分布采用国家青藏高原科学数据中心的国家土地利用数据集 (<https://data.tpdc.ac.cn/>), 时间范围是 1980—2015 年, 共 7 期数据, 空间分辨率为 1 km, 并且结合全球 30 m 地表覆盖精细分类产品 V1.0 (<https://data.casearth.cn/>)<sup>[35-37]</sup>, 处理为统一分辨率, 进而共同确定植被分布区域, 使得结果更加精准。

## 2.2 研究方法

### (1) 相关性计算

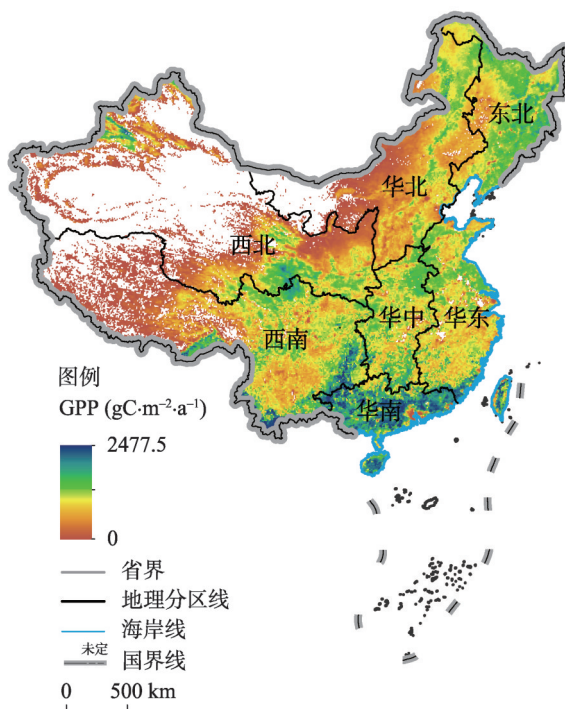
采用公式 (2) 对 1982—2018 年的月 GPP 与多时间尺度 SPEI 进行像元尺度的相关性分析, 判断 GPP 与多时间尺度 SPEI 之间相关性强弱。计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中:  $R_{xy}$  表示 GPP 与多时间尺度 SPEI 之间的相关系数;  $x_i$  表示变量 SPEI 第  $i$  年的值,  $y_i$  表示变量 GPP 第  $i$  年的值,  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  分别表示变量 SPEI、GPP 的平均值。

### (2) SPEI 指数

标准化降水蒸散指数 (SPEI)<sup>[38]</sup> 是一种被广泛应用于衡量水平衡的量化指标, SPEI 指数值越大表示越湿润, 相反 SPEI 指数值越小表示越干旱。SPEI 指数是较为优秀的衡量干湿状况的一种量化指标, 不仅具备帕尔默干旱指数 (Palmer Drought Severity Index,



注: 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, 底图边界无修改。

图1 1982—2018年中国植被总初级生产力均值空间分布  
Fig. 1 Spatial distribution of gross primary production of vegetation in China from 1982 to 2018



PDSI)<sup>[39]</sup>对温度响应灵敏性的优势,也具有标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)<sup>[40]</sup>多时间尺度的优点,适用于在全球变暖的背景下干湿状况量化评估,并且SPEI指数在全球很多地区对干湿状况有着非常良好的评估效果<sup>[41-43]</sup>。因此本文选择SPEI指数用于量化中国干湿状况。

SPEI指数采用Thornthwaite方法计算得到潜在蒸散发,进一步通过log-logistic概率分布对数值序列(降水量与潜在蒸散发的差值)进行拟合。将概率分布函数进行标准化正态分布计算,从而得到SPEI指数。1982—2018年多尺度SPEI(1~24个月时间尺度)计算结果为月数据集,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。详细计算过程参考文献<sup>[38]</sup>。

SPEI指数的时间尺度表示 $n$ 个月的累积干湿平衡状况<sup>[44]</sup>, $n$ 个月时间尺度的SPEI与GPP异常达到显著性( $p < 0.05$ ),表明 $n$ 个月的累积干湿平衡与植被生长之间存在显著关系<sup>[45-46]</sup>。我们计算了多个时间尺度的SPEI(1~24个月尺度),例如,SPEI-1(1个月尺度)表示月干湿平衡状态、SPEI-12代表年尺度的累积的干湿平衡状态,以此类推。

### (3) 植被生产力对干湿变化响应时间尺度及阈值判别

研究指出水分可以对植被影响具有累积性,植被生长在一定时间内对干湿变化的响应具有滞后性,但在不同区域或不同植被类型,植被对水分响应时间尺度存在差异<sup>[47-48]</sup>。因此本文计算了中国植被生长季(4—10月)月GPP异常和多时间尺度SPEI之间的相关系数(每个像元包括24个相关系数),针对相关系数进行汇总,仅保留最大相关系数,得到的最大相关系数所对应的SPEI的时间尺度表示GPP对干湿变化响应的的时间尺度<sup>[10, 13]</sup>。

$$R_m = \max(\text{corr}(\text{SPEI}_m, \text{GPP})) \quad (3)$$

式中: $R_m$ 表示1982—2018年植被生长季月GPP异常与 $m$ 个月时间尺度SPEI的最大相关系数; $\text{SPEI}_m$ 表示 $m$ 个月时间尺度的SPEI值。

同时,本文为了揭示植被生长对干湿变化响应时间的阈值,将GPP异常与多时间尺度SPEI(1~24个月)呈显著正相关的最小SPEI时间尺度表示为植被生产力对干旱化响应最小响应时间;将GPP异常与多时间尺度SPEI(1~24个月)呈显著负相关的最大SPEI时间尺度定义为植被对水分过剩响应最长响应时间<sup>[15]</sup>。以此得出植被生产力抵抗干湿变化的时间尺度阈值。

植被对水减少显著影响最大区域为GPP异常与多时间尺度SPEI(1~24个月)之间有显著正相关( $p < 0.05$ )的复合区域,即:当在多时间尺度SPEI至少有一个时间尺度SPEI与GPP呈显著正相关时,则表示为该区域存在受干旱化而显著制约的可能;同样,植被的最大水过剩区域为GPP异常与多时间尺度SPEI之间有显著负相关( $p < 0.05$ )的复合区域,即:当在多时间尺度SPEI至少有一个时间尺度SPEI与GPP呈显著负相关时,则表示为该区域植被存在受水分过剩而显著制约的可能<sup>[15]</sup>。

本文分别量化了干湿变化抑制植被生产力的时间尺度阈值,即干旱化抑制植被生产力的最小响应时间尺度和水分过剩抑制植被生产力的最大时间尺度,并且在5 a的滑动窗口的基础上,揭示干湿变化抑制植被生产力时间尺度阈值的变化趋势。

### (4) Theil-Sen Median趋势诊断法

通过Sen斜率估计方法判断GPP和SPEI相关系数及时间尺度变化趋势。这是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,计算效率较高,并且对于异常值和缺测的噪音值不敏感,因此常被用于长时间序列数据的趋势分析。

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (4)$$

式中: $j$ 和 $i$ 为时间序列数据;当 $\beta > 0$ 表示变量 $x$ 呈现递增趋势,反之 $x$ 为下降趋势。

### (5) Mann-Kendall 趋势显著性检验

本文采用 Mann-Kendall 法对变化趋势进行显著性检验 (M-K 趋势检验)。M-K 趋势检验是一种分参数的时间序列趋势检验方法, 其优势为不需要检测值服从正态分布, 同时其检测结果具有较强的稳定性。M-K 法计算过程如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

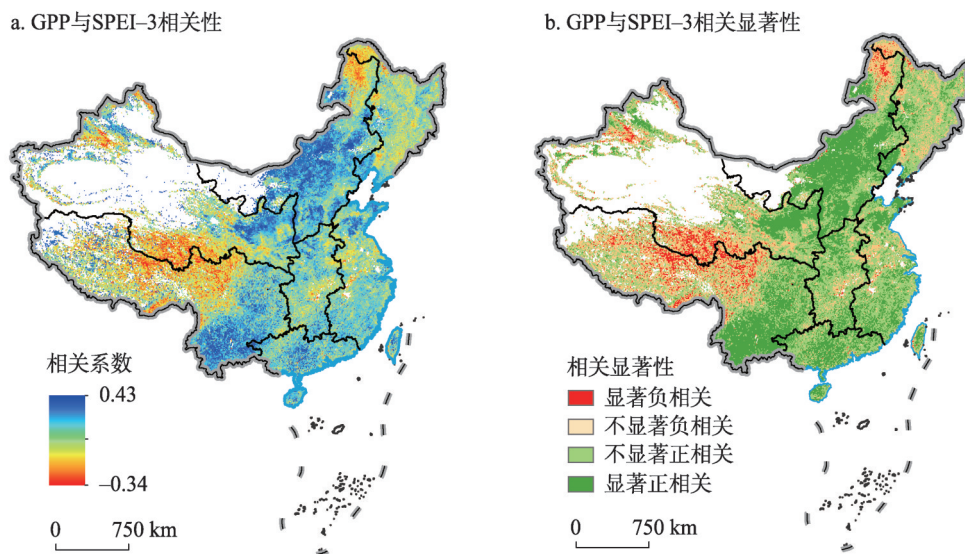
式中:  $S$  表示 M-K 趋势检验统计量, 服从正态分布;  $Z$  表示  $S$  标准正态统计量;  $\text{sgn}$  表示符号函数;  $\text{var}$  表示方差; 通过判别  $Z$  值和指定显著性下的检验阈值来判断变量变化趋势是否呈现显著性,  $\alpha$  为显著性水平, 当  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$  时, 该时间序列具有显著性  $\alpha$  的变化趋势。当  $|Z| > 1.96$  时判断为在 0.05 水平上具有显著性变化。

## 3 结果与讨论

### 3.1 植被生产力对干湿变化的响应关系

本文量化评估了植被生产力与 SPEI 之间的关系。① 当 GPP 与 SPEI 之间的呈显著正相关时 ( $p < 0.05$ ) 意味着越湿润而植被生产力越高, 越干旱而植被生产力越低, 表明水分减少可能会显著抑制植被生产力的提升, 这种情况的区域称为水分亏缺显著抑制区; ② 当 GPP 与 SPEI 之间呈显著负相关时 ( $p < 0.05$ ) 意味着越湿润而植被生产力越低, 而在一定程度的较干旱的条件下植被生产力反而有一定的提升, 表明在这种情况下植被生产力会由于水分过多而抑制植被的光合作用而形成水涝, 亦或者在湿润的条件下出现温度较低和太阳辐射减少的情况下而抑制了植被生产力的提升, 本文中将出现这种情况下的区域称为水分过剩显著抑制区; ③ 当 GPP 与 SPEI 之间呈非显著关系时 ( $p > 0.05$ ) 表明植被生产力不受干湿变化的约束。

1982—2018 年的月 GPP 异常与 SPEI-3 之间相关系数为  $-0.34 \sim 0.43$ , 平均相关系数为 0.06 (图 2a), 相关系数较低是由于植被生产力一部分受水分减少制约 (GPP 与 SPEI 正相关), 一部分受水分过剩制约 (GPP 与 SPEI 负相关), 从而导致平均相关系数较低。GPP 与 SPEI-3 之间呈正相关的区域占比为 72.07%, 其中达到显著正相关的区域占比为 31.13%, 主要分布在中国北方大部分地区 (内蒙古、陕西、山西、河北、北京和天津等大部分区域) 和中国的西南地区 (云南大部分地区和贵州部分地区); GPP 与 SPEI-3 之间呈负相关的区域占比为 27.93%, 其中达到显著负相关的区域占比为 5.32%, 主要分布在大兴安岭地区和青藏高原地区。



注：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,底图边界无修改。

图2 1982—2018年的月GPP异常与SPEI-3相关系数及相关显著性的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of correlation coefficients and significance between GPP anomaly and SPEI-3 in China from 1982 to 2018

从不同地理分区对比得出(图3),华北地区干湿变化对植被影响最为显著,GPP与SPEI-3平均相关系数为0.12,显著正相关区域占比为54.10%;其次为华南、华中、西南、西北地区;而东北地区干湿变化对植被生产力影响最弱,显著正相关区域占比仅为4.22%。

已有研究指出青藏高原西部偏干旱地区水分增多促进植被光合作用<sup>[49-50]</sup>,因此在青藏高原西部地区GPP与SPEI-3呈正相关;而在青藏高原东部偏湿润地区温度则成为植被生长的主要因素,温度升高触发植被叶片气孔打开,导致光合作用增强<sup>[21]</sup>。植被生长不是由水分限制而是由热量限制,形成了短期降水不足反而可能促成了温度和太阳辐射的升高,导致植被生长增强<sup>[51-53]</sup>,这种植被对水分响应模式与高纬度地区植被变化一致。所以在青藏高原东部地区和大兴安岭地区GPP与SPEI-3呈现显著负相关。

以上表明,干旱化抑制植被生产力的区域占比达70%以上,其中显著抑制区将近1/3,而水分过剩抑制植被生产力的面积占比较小,意味着中国大部分区域植被生产力会受到水分减少的影响。

### 3.2 植被生产力对干湿变化的响应程度变化特征

1982—2018年水分对中国植被生产力有明显的抑制作用(图2)。但随着全球气温特

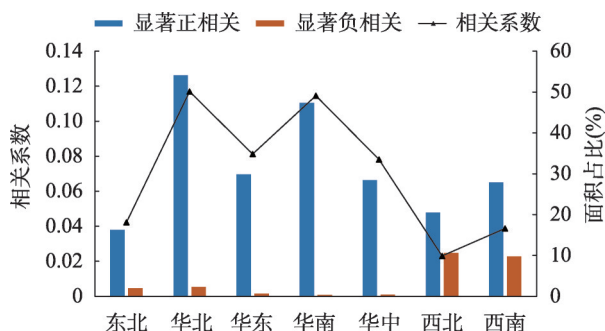
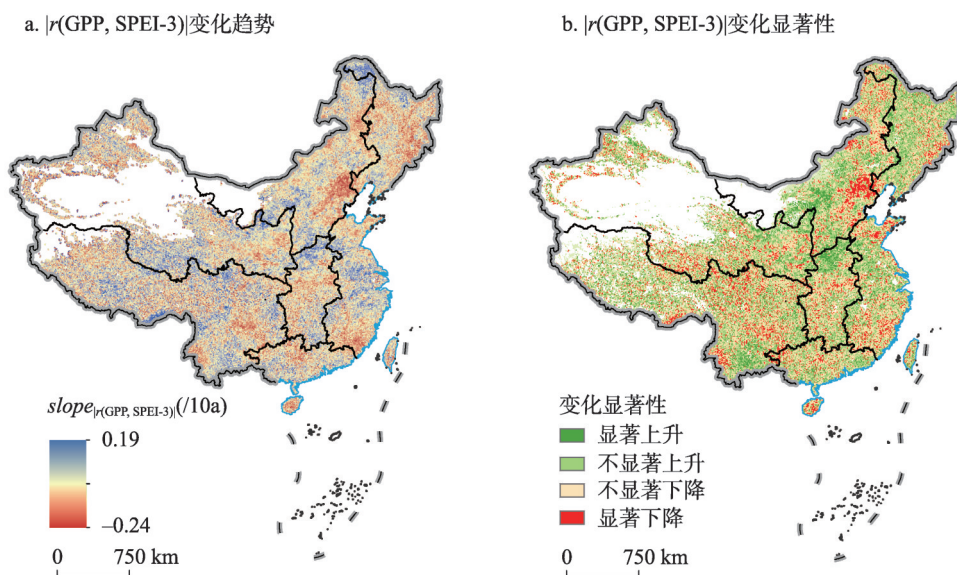


图3 1982—2018年不同地理分区月GPP异常与SPEI-3相关系数和相关显著性占比

Fig. 3 Correlation coefficients and correlation significance percentages of monthly GPP anomalies with SPEI-3 in different geographical regions of China from 1982-2018

续升高,已有研究表明干旱程度可能将更加严重<sup>[4,8]</sup>。本文揭示1982—2018年干湿变化对植被生产的影响程度的变化趋势,即GPP与SPEI-3相关系数绝对值增大( $\text{slope}_{|r(\text{GPP}, \text{SPEI-3})|} > 0$ )表明干湿变化对植被生产力影响程度有增强的趋势;反之表明干湿变化对植被生产力影响程度为减弱趋势。 $|r(\text{GPP}, \text{SPEI-3})|$ 变化范围是 $-0.24 \sim 0.19 / 10\text{a}$ ,其中 $\text{slope}_{|r(\text{GPP}, \text{SPEI-3})|} > 0$ 的区域面积占比为45.79%,主要分布在东北、华北的西部和华中的北部地区(图4)。这可能与温度升高导致植被蒸腾增加和大气饱和蒸汽压亏缺增大(VPD),导致植被生长受到水分制约增强<sup>[54-55]</sup>。而 $\text{slope}_{|r(\text{GPP}, \text{SPEI-3})|} < 0$ 的区域面积占比为54.21%,主要分布在华北平原和长江下游平原的大部分地区。这可能与这些区域农作物水利设施建设有关,丰富的水利设施减弱了水分对植被生长的限制。



注: 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,底图边界无修改。

图4 1982—2018年GPP与SPEI-3相关系数绝对值变化趋势

Fig. 4 Trends in absolute values of GPP and SPEI-3 correlation coefficients in China from 1982 to 2018

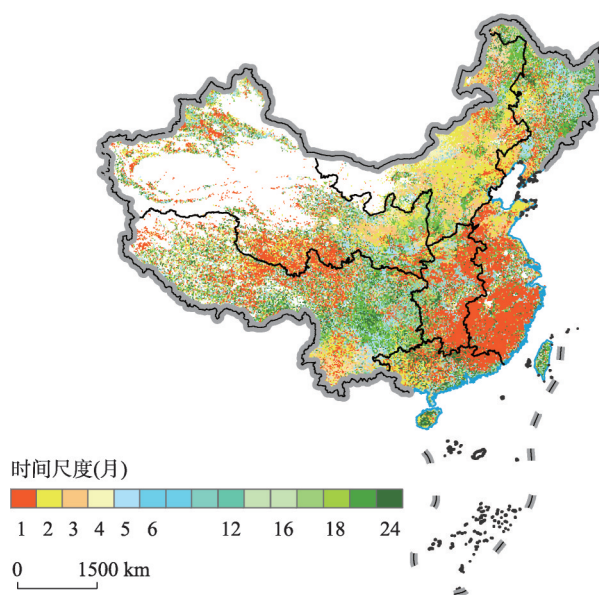
### 3.3 植被生产力对干湿变化响应时间

由于植被对水分的需求或对缺水抵抗力存在差异,因此我们进一步分析了GPP对干湿变化的响应时间尺度。植被生产力对干旱化的响应时间越短表明植被生产力对干旱化的响应越快。由此可以得到中国植被生产力对干湿变化响应的抵抗力,有助于充分了解植被生产力对干湿变化响应的驱动机理。

1982—2018年中国植被生产力对干湿变化响应的平均时间为7.86个月(图5)。在中国七大地理分区对比可知,东北地区植被生产力对干湿变化整体响应时间最长为10.12个月,其次为西南、华南、西北、华中、华北和华东地区。

响应时间为1~3个月时间尺度的区域占比为48.59%,主要分布在华北、西南、华南和青藏高原东部地区。这可能与华东和华南地区植被覆盖度较高对水分需求较大,植被生长对水分变化响应较快,而华北大部分地区植被主要为草地或灌溉农田,植被根系欠发达,因此对干湿变化响应较快。植被对干湿变化响应时间为16~24个月的区域主要集中在东北的大兴安岭、小兴安岭、长白山地区和云贵高原中部地区,区域面积占比为20.01%,这些区域大部分区域主要是多年生林地,而在东北部分地区为针叶林和





注: 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, 底图边界无修改。

图5 1982—2018年植被生产力对干湿变化响应的的时间尺度

Fig. 5 Time-scale of vegetation productivity response to wet and dry changes in China from 1982 to 2018

针阔混交林, 植被高大、储存养分能力较强, 而且在水分不足时, 树木、灌丛等根系会向土壤深层延伸汲取水分<sup>[56]</sup>, 因此该区植被能够抵抗长时间尺度干湿变化, 响应时间较长。

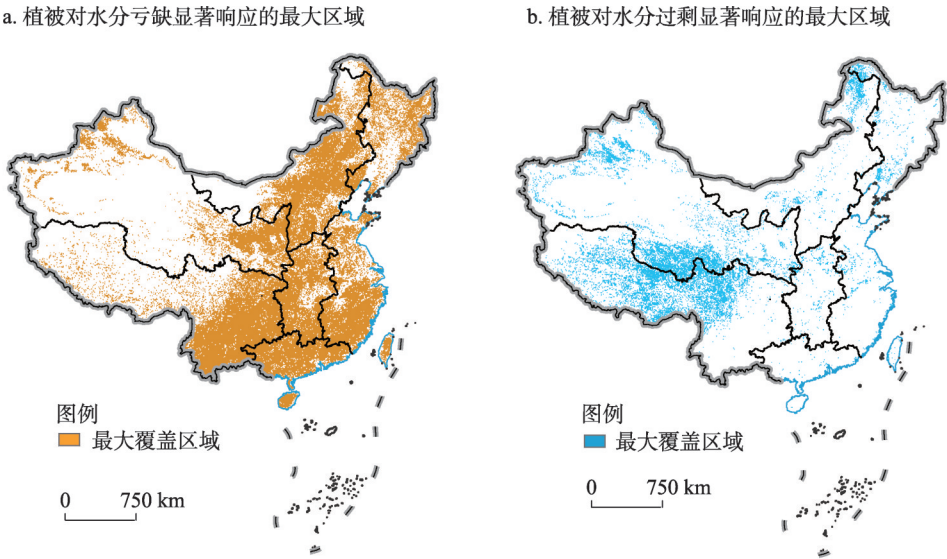
### 3.4 水分亏缺和水分过剩对植被生产力的影响

**3.4.1 水分亏缺和水分过剩对植被生产力发生显著影响的最大区域** 1982—2018年61.18%的中国植被覆盖区的GPP至少与某1个或多个时间尺度的SPEI(1~24个月时间尺度范围内)呈显著正相关( $p < 0.05$ ) (图6a), 表明在过去37年中, 有61.18%的地区至少有1个月或多个月的时间尺度的水分亏缺显著抑制了该区域的植被光合作用; 有28.89%的中国植被覆盖区GPP与某1个或多个时间尺度的SPEI呈显著负相关( $p < 0.05$ ), 表明28.89%的地区至少有1个月或多个月时间尺度的水分过剩显著抑制了植被的光合作用。

**3.4.2 水分亏缺和水分过剩显著影响植被生产力的时间尺度阈值及其变化趋势** 水资源的可利用性对植被生长有累积影响, 同时在一定程度上植被生长会对干湿变化产生滞后性, 揭示水分亏缺和水分过剩变化对植被生产力产生抑制效果的时间阈值, 这对降低陆地生态系统管理成本和双碳目标实现具有重要意义。本文分别量化了1982—2018年植被生产力对水分亏缺和水分过剩响应时间差异, 将水分减少与首次监测到水分减少对植被生产力产生显著影响的时间尺度称为植被生产力对水分胁迫的最小的响应时间; 而将水分增多与监测到干湿变化对植被生产力产生显著影响的最大时间尺度称为水分过剩最大周期, 表明水分增多对植被生产力产生抑制效果的最大响应时间。

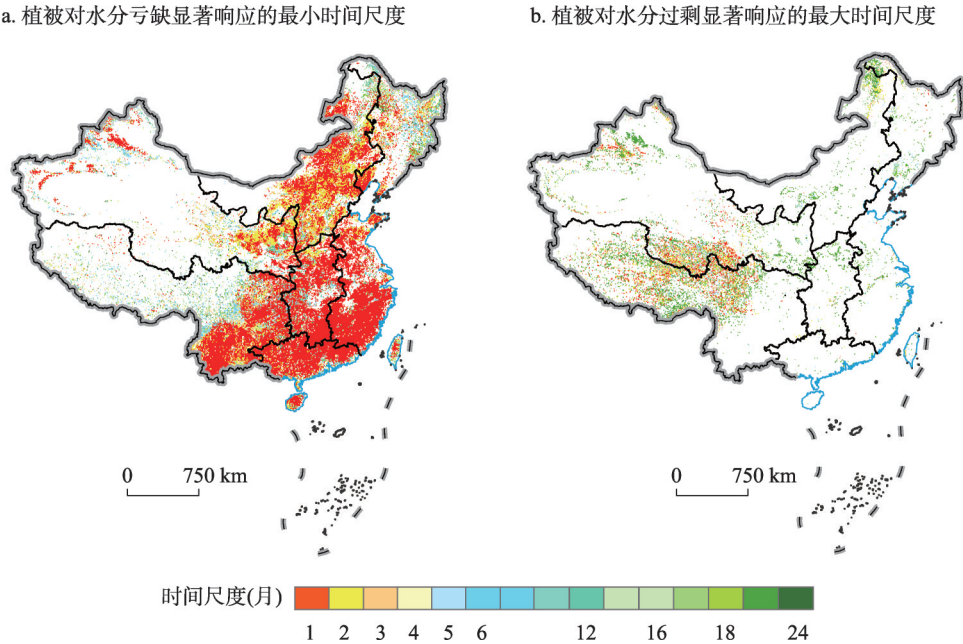
由图7a可知, 1982—2018年GPP与SPEI显著正相关地区的最小时间尺度平均为3.42个月。其中主要为1~2个月时间尺度, 其空间区域占研究区的比例为44.56%。植被响应的最小时间尺度为1个月区域主要分布内蒙古东部、华北部地区和南方大部分地区。中





注：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,底图边界无修改;a图为GPP与SPEI呈显著正相关的最大复合面积,b图为GPP与SPEI呈显著负相关的最大复合面积。

图6 1982—2018年水分亏缺和水分过剩对植被生产力存在显著影响的最大区域空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of the largest areas of vegetation deficit and water surplus zones of China from 1982 to 2018



注：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,底图边界无修改。

图7 1982—2018年植被生产力分别对水分亏缺和水分过剩显著响应的的时间阈值  
Fig. 7 Time-scale thresholds of significant response of vegetation productivity to water deficit and water surplus in China from 1982 to 2018

国南方和北方植被对水分减少的相应存在差异, 北方地区植被长期生长在水分不足的环境中, 如果发生水分减少等干旱事件北方地区植被响应时间尺度略高于东南部地区。尽管北方大部分地区植被对干湿变化响应敏感性更高(图2)但由于北方大部分地区植被在长期处于水分不足的自然条件下, 此地区植被形成了适应干旱的特征, 因此对干湿变化响应周期略长<sup>[57-58]</sup>。而在南方大部分地区一旦发生水分减少等干旱事件, 植被迅速做出反应。此地区植被覆盖度和温度更高, 导致植被蒸腾更高从而水分需求量更大<sup>[59]</sup>, 触发植被响应的阈值也较高, 植被对水分亏缺的抵抗力较低, 植被生产力损失风险更高, 因此对水分减少响应较快<sup>[58, 60-61]</sup>。而在东北地区植被对水分减少响应的最小时间尺度阈值在8个月以上, 东北北部地区主要为林地, 植被根系发达, 因此对水分减少的响应时间更长<sup>[62]</sup>。

在植被对水分过剩显著响应最大时间尺度研究中发现, GPP与SPEI显著负相关的地区最大时间尺度平均为12.27个月, 其中24个月尺度区域占比最高为研究区的3.85%, 其次为1个月尺度区域占研究区的2.19%。主要分布在青藏高原地区、东北大兴安岭和天山等地区(图7b)。同时在气温升高背景下, 可能与东北大兴安岭地区和青藏高原南部地区主要为针叶林且温度较低有关, 一定程度的干旱往往会伴随有热量的增加从而促进植被光合作用<sup>[53, 63]</sup>。

通过植被生产力对水分亏缺和水分过剩变化响应时间尺度的阈值的5 a滑动趋势分析(图8), 可以看出植被生产力对水分亏缺和水分过剩显著响应的时间阈值的变化趋势。

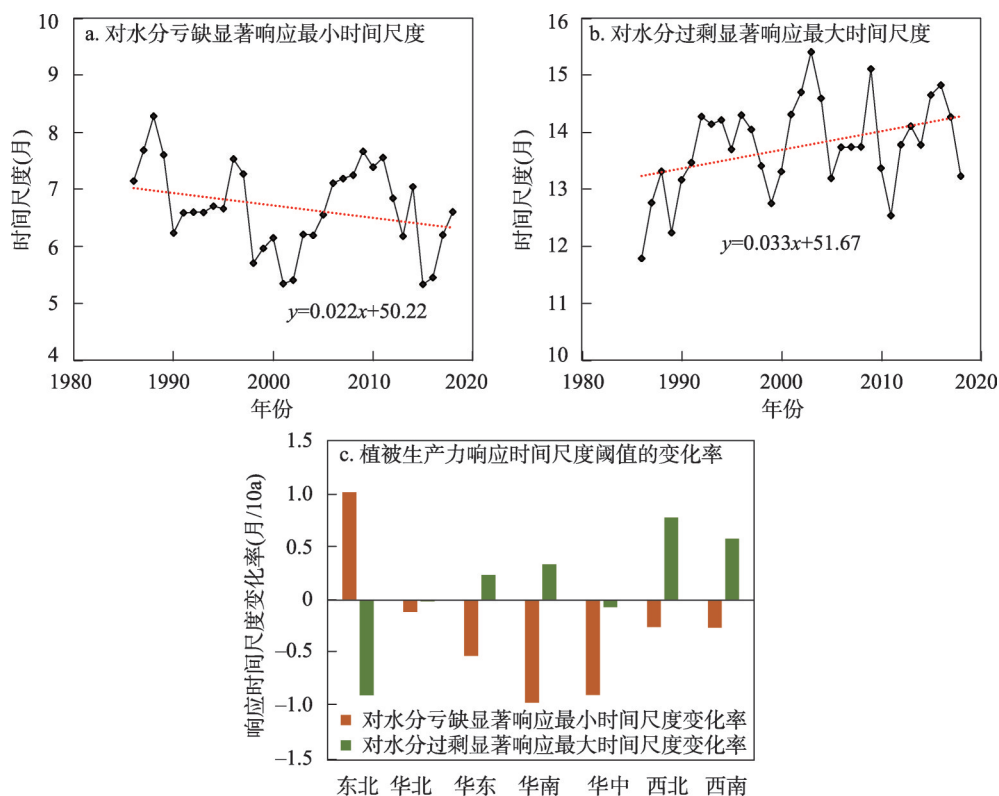


图8 1982—2018年植被生产力分别对水分亏缺和水分过剩显著响应的的时间尺度阈值(5 a滑动窗口)

Fig. 8 Characteristics of changes in time-scale thresholds of significant response of vegetation productivity to water deficit and water surplus in different regions of China from 1982 to 2018

1982—2018年在对水分减少显著响应区,植被生产力对水分减少显著响应最小时间尺度呈下降趋势,变化速率为每10 a缩短0.22个月(图8a),表明植被生产力对水分亏缺响应时间越来越快。但在水分过剩显著抑制植被生产力的区域中,植被生产力响应最长时间尺度增加,变化速率为每10 a延长0.33个月(图8b),表明水分过剩影响植被生产力的最大时间尺度延长,这可能与这些区域均分布在高海拔山地,随着气温升高冰川积雪融水增多导致最大水分过剩期延长。

但植被生产力对水分亏缺和水分过剩变化响应时间尺度阈值的空间差异性很大(图8c),只有东北地区植被生产力对干旱化显著响应的最小时间尺度延长,表明一旦发生水分减少对植被影响越来越困难;而其他六大区域均为缩短趋势,表明干旱化影响越来越容易,植被抗旱能力减弱。东北地区水分过剩显著抑制植被生产力的最长时间尺度缩短,表明一旦发生降水增多对植被生产力的抑制越来越容易,同时华东地区也存在同样的变化趋势;其他五大区域均为水分过剩显著抑制植被生产力的最长时间尺度延长,表明湿润化抑制植被生产力越来越困难。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本文评估了1982—2018年中国植被生产力对干湿变化响应的长期变化趋势及触发植被响应的的时间尺度阈值。主要结论为:① 1982—2018年GPP异常与SPEI-3之间呈正相关的区域占比为72.07%,呈负相关的区域占比为27.93%,中国大部分区域植被生产力受到水分制约。有45.79%的区域GPP与SPEI-3相关系数为增大趋势( $slope_{(GPP, SPEI-3)} > 0$ ),水分显著约束强度增强。② 研究区内植被生产力对干湿变化响应的的时间尺度为7.86个月,其中1~3个月时间尺度区域占比最高为48.59%,主要分布在华北和华南大部分地区。③ 在多时间尺度下,有61.18%的地区至少有1个月或多个月的水分亏缺显著抑制了该区域的植被光合作用;28.89%的地区至少有1个月或多个月的水分过剩抑制了该区域的植被光合作用。④ 对多时间尺度干湿变化显著响应的区域中,GPP与SPEI显著正相关的最小时间尺度平均为3.42个月并且以每10 a缩短0.22个月的速率变化;GPP与SPEI显著负相关的地区最大时间尺度平均为12.27个月并且以每10 a延长0.33个月的速率变化。因此,1982—2018年中国植被生产力的水分约束正在增加。

### 4.2 展望

植被的光合作用在陆地生态系统能量流动和碳循环中发挥了极为关键的作用,评估植被生产力对气候响应是制定气候变化应对方案和精准预估未来气候变化影响的重要步骤和科学揭示陆地生态系统服务能力的重要前提<sup>[64]</sup>。随着全球持续变暖导致陆面蒸发和植物蒸腾过程等水分过程发生改变<sup>[3]</sup>,在此基础上本文揭示了水资源可用性对植被影响的长期变化趋势,这将对量化评估陆地生态系统水碳耦合关系及其变化趋势具有重要意义。本文从不同角度提供了多条论据揭示了过去37年中国植被生产力的水资源限制增加。同时中国植被绿化率持续提升会增加植被的需水量,加之未来可能继续升温,未来可能受到水资源可用性限制的区域会进一步扩张而且水资源限制程度可能进一步增强,导致植被固碳潜力下降的风险提高<sup>[3, 24]</sup>。已有研究指出制备的水分胁迫可能潜藏在植被整体持续变绿之下,这可能导致植被的水分胁迫成为陆地生态系统碳汇增长的重要阻碍因素<sup>[2, 65]</sup>,在一定程度上抵消CO<sub>2</sub>上升和氮沉降对植被的促进作用<sup>[15, 66]</sup>,从而导致碳汇潜力增长乏力,这些影响因素的影响需要在今后研究中系统量化评估。

本文重点关注植被生长的水资源可利用性影响。但植被生长对水分变化的响应也受到其他因素的干扰。温度、辐射、CO<sub>2</sub>等对植被的光合作用均有着直接或间接的影响<sup>[65]</sup>, 这些影响因素会对本文研究结果产生干扰, 并且人为活动的影响同样不可忽视<sup>[67]</sup>, 在今后研究中要剥离其他因素的影响提高水资源可用性对植被影响的研究精度。本文中涉及到的水分胁迫主要是大气干旱, 而SPEI对土壤干旱的表征要略差, 在今后研究中为了更好地从多角度揭示干湿变化对植被光合作用的潜在机理, 需要建立科学综合的水—碳耦合模型, 综合分析植被光合作用影响机制。

## 参考文献(References)

- [1] Wang S, Fu B J, Wei F L, et al. Drylands contribute disproportionately to observed global productivity increases. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(2): 224-232.
- [2] Mo Xingguo, Liu Suxia, Hu Shi. Co-evolution of climate-vegetation-hydrology and its mechanisms in the source region of Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1730-1744. [莫兴国, 刘苏峡, 胡实. 黄河源区气候—植被—水文协同演变及成因辨析. *地理学报*, 2022, 77(7): 1730-1744.]
- [3] Zhang Yongqiang, Kong Dongdong, Zhang Xuanze, et al. Impacts of vegetation changes on global evapotranspiration in the period 2003-2017. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 584-594. [张永强, 孔冬冬, 张选泽, 等. 2003—2017年植被变化对全球陆面蒸散发的影响. *地理学报*, 2021, 76(3): 584-594.]
- [4] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [5] Zhou Q W, Luo Y, Zhou X, et al. Response of vegetation to water balance conditions at different time scales across the karst area of southwestern China: A remote sensing approach. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 460-470.
- [6] Wang L L, She D X, Xia J, et al. Revegetation affects the response of land surface phenology to climate in Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 860: 160383. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160383.
- [7] Chen C, Park T, Wang X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [8] Zhang Q, She D X, Zhang L P, et al. High sensitivity of compound drought and heatwave events to global warming in the future. *Earth's Future*, 2022, 10 (11): e2022EF002833. DOI: 10.1029/2022EF002833.
- [9] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.
- [10] Zhang Q, Kong D D, Singh V P, et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. *Global and Planetary Change*, 2017, 152: 1-11. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2017.02.008.
- [11] Ivits E, Horion S, Fensholt R, et al. Drought footprint on European ecosystems between 1999 and 2010 assessed by remotely sensed vegetation phenology and productivity. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 581-593.
- [12] Ma Z H, Peng C H, Zhu Q A, et al. Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests. *PNAS*, 2012, 109(7): 2423-2427.
- [13] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *PNAS*, 2013, 110(1): 52-57.
- [14] Zhou S, Williams A P, Lintner B R, et al. Soil moisture-atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. *Nature Climate Change*, 2021, 11(1): 38-44.
- [15] Jiao W Z, Wang L X, Smith W K, et al. Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3777. DOI: 10.1038/s41467-021-24016-9.
- [16] Saleska S R, Didan K, Huete A R, et al. Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science*, 2007, 318(5850): 612.
- [17] Kreuzwieser J, Rennenberg H. Molecular and physiological responses of trees to waterlogging stress. *Plant, Cell & Environment*, 2014, 37(10): 2245-2259.
- [18] Buermann W, Forkel M, O'sullivan M, et al. Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity. *Nature*, 2018, 562(7725): 110-114.
- [19] Chen T, Werf G R, Jeu R A M, et al. A global analysis of the impact of drought on net primary productivity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(10): 3885-3894.



- [20] Li C L, Leal Filho W, Yin J, et al. Assessing vegetation response to multi-time-scale drought across inner Mongolia plateau. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179: 210-216.
- [21] Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaax1396. DOI: 10.1126/sciadv.aax1396.
- [22] Li W T, Migliavacca M, Forkel M, et al. Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3959. DOI: 10.1038/s41467-022-31667-9.
- [23] Yin Y H, Ma D Y, Wu S H. Enlargement of the semi-arid region in China from 1961 to 2010. *Climate Dynamics*, 2019, 52(1): 509-521.
- [24] Zhang Shizhe, Zhu Xiufang, Liu Tingting, et al. Drought characteristics and risk hazard in China based on multidimensional Copula model. *Arid Land Geography*, 2022, 45(2): 333-345. [张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 基于多维 Copula 的中国干旱特征及危险性分析. *干旱区地理*, 2022, 45(2): 333-345.]
- [25] Shao H, Zhang Y D, Yu Z, et al. The resilience of vegetation to the 2009/2010 extreme drought in southwest China. *Forests*, 2022, 13(6): 851. DOI: 10.3390/f13060851.
- [26] Peñuelas J, Ciais P, Canadell J G, et al. Shifting from a fertilization-dominated to a warming-dominated period. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(10): 1438-1445.
- [27] Li Jiayu, She Dunxian, Zhang Liping, et al. Multi-scale response characteristics and mechanism of vegetation to meteorological drought on the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 280-289. [李家誉, 余敦先, 张利平, 等. 黄土高原植被变化对气象干旱多尺度响应特征与机制. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 280-289.]
- [28] Zhou S, Williams A P, Berg A M, et al. Land-atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity. *PNAS*, 2019, 116(38): 18848-18853.
- [29] Wang L X, Jiao W Z, MacBean N, et al. Dryland productivity under a changing climate. *Nature Climate Change*, 2022, 12(11): 981-994.
- [30] Piao S L, He Y, Wang X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects. *Science China: Earth Sciences*, 2022, 65(4): 641-651.
- [31] Yang Yuanhe, Shi Yue, Sun Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. *Science China: Vitae*, 2022, 52(4): 534-574. [杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534-574.]
- [32] Zhou Guangsheng, Zhou Mengzi, Zhou Li, et al. Advances in the carbon sink potential of terrestrial ecosystems in China. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(31): 3625-3632. [周广胜, 周梦子, 周莉, 等. 中国陆地生态系统增汇潜力研究展望. *科学通报*, 2022, 67(31): 3625-3632.]
- [33] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, et al. 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142569.
- [34] Wang Songhan, Zhang Yongguang. Long-term (1982-2018) global gross primary production dataset based on NIRv. Beijing: National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2020. [王松寒, 张永光. 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). 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2020.]
- [35] Zhang X A, Liu L Y, Wu C S, et al. Development of a global 30 m impervious surface map using multisource and multitemporal remote sensing datasets with the Google Earth Engine platform. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1625-1648.
- [36] Zhang X A, Liu L Y, Chen X D, et al. GLC\_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [37] Liu L Y, Zhang X A, Gao Y A, et al. Finer-resolution mapping of global land cover: Recent developments, consistency analysis, and prospects. *Journal of Remote Sensing*, 2021: 5289697. DOI: 10.34133/2021/5289697.
- [38] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [39] Palmer W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 1968, 21(4): 156-161.
- [40] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. The 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. Anaheim, 1993.
- [41] Byakatonda J, Parida B P, Moalafhi D B, et al. Analysis of long term drought severity characteristics and trends across semiarid Botswana using two drought indices. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 492-508.

- [42] Tong S Q, Lai Q, Zhang J Q, et al. Spatiotemporal drought variability on the Mongolian Plateau from 1980-2014 based on the SPEI-PM, intensity analysis and Hurst exponent. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1557-1565.
- [43] Qi Guizeng, Bai Hongying, Meng Qing, et al. Climate change in the Qinling Mountains in spring during 1959-2018. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1079-1091. [齐贵增, 白红英, 孟清, 等. 1959—2018年秦岭南北春季气候时空变化特征. *干旱区研究*, 2019, 36(5): 1079-1091.]
- [44] Jiao W Z, Tian C, Chang Q, et al. A new multi-sensor integrated index for drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 74-85.
- [45] Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno J I, et al. A new global 0.5 gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [46] Begueria-Portugues S, Vicente-Serrano S M, Angulo-Martínez M, et al. The Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI): A multiscalar drought index. 10th EMS Annual Meeting, 2010: EMS2010-562.
- [47] Wen Y Y, Liu X P, Xin Q C, et al. Cumulative effects of climatic factors on terrestrial vegetation growth. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(4): 789-806.
- [48] Tei S, Sugimoto A. Time lag and negative responses of forest greenness and tree growth to warming over circumboreal forests. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 4225-4237.
- [49] Zhu Z, Wang H, Harrison S P, et al. Optimality principles explaining divergent responses of alpine vegetation to environmental change. *Global Change Biology*, 2023, 29(1): 126-142.
- [50] Liu D J, Zhang C, Ogaya R, et al. Increasing climatic sensitivity of global grassland vegetation biomass and species diversity correlates with water availability. *New Phytologist*, 2021, 230(5): 1761-1771.
- [51] Shi P F, Zeng J Y, Chen K S, et al. The 20-year spatiotemporal trends of remotely sensed soil moisture and vegetation and their response to climate change over the Third Pole. *Journal of Hydrometeorology*, 2021, 22(11): 2877-2896.
- [52] Keenan T F, Riley W J. Greening of the land surface in the world's cold regions consistent with recent warming. *Nature Climate Change*, 2018, 8(9): 825-828.
- [53] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [54] Yuan W, Zheng Y, Piao S, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 2016, 5(8): eaax1396. DOI: 10.1126/sciadv.aax1396.
- [55] Lu H B, Qin Z C, Lin S R, et al. Large influence of atmospheric vapor pressure deficit on ecosystem production efficiency. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1653. DOI: 10.1038/s41467-022-29009-w.
- [56] Davidson E A, Verchot L V, Cattáneo J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [57] Luo W T, Griffin-Nolan R J, Ma W, et al. Plant traits and soil fertility mediate productivity losses under extreme drought in  $C_3$  grasslands. *Ecology*, 2021, 102(10): e03465. DOI: 10.1002/ecy.3465.
- [58] Wei X N, He W, Zhou Y L, et al. Global assessment of lagged and cumulative effects of drought on grassland gross primary production. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108646. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108646.
- [59] Yuan W P, Cai W W, Chen Y, et al. Severe summer heatwave and drought strongly reduced carbon uptake in southern China. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 18813. DOI: 10.1038/srep18813.
- [60] Xu H, Zhao C, Wang X. Spatiotemporal differentiation of the terrestrial gross primary production response to climate constraints in a dryland mountain ecosystem of northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 276/277: 107628. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107628.
- [61] Yang Y, Guan H, Batelaan O, et al. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 23284. DOI: 10.1038/srep23284.
- [62] Guo W W, Huang S Z, Huang Q, et al. Drought trigger thresholds for different levels of vegetation loss in China and their dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 331: 109349. DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109349.
- [63] Ma T X, Liang Y, Li Z Y, et al. Age-related patterns and climatic driving factors of drought-induced forest mortality in Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 332: 109360. DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109360.
- [64] Qi Guizeng, Bai Hongying, Zhao Ting, et al. Sensitivity and areal differentiation of vegetation responses to hydrothermal dynamics on the northern and southern slopes of the Qinling Mountains in Shaanxi province. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 44-56. [齐贵增, 白红英, 赵婷, 等. 秦岭陕西段南北坡植被对干湿变化响应敏感性及空间差异. *地理学报*, 2021, 76(1): 44-56.]

- [65] Deng Y, Wang X H, Lu T P, et al. Divergent seasonal responses of carbon fluxes to extreme droughts over China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 328: 109253. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109253.
- [66] Zhou S, Zhang Y, Park Williams A, et al. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau5740. DOI: 10.1126/sciadv.aau5740.
- [67] Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961-974. [金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.]

## Response of vegetation productivity to wet and dry changes in China

SONG Jinxi<sup>1,2</sup>, QI Guizeng<sup>1,2</sup>, SHE Dunxian<sup>3,4</sup>, JIANG Xiaohui<sup>1,2</sup>, MAO Ruichen<sup>1,2</sup>

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** As global temperatures continue to rise, the impact of water availability on vegetation productivity remains unclear. This study aims to assess the long-term trends of vegetation productivity response to wet and dry changes and the time-scale thresholds of vegetation response in China from 1982 to 2018, which will be important for reducing the management costs of terrestrial ecosystems and achieving the goals of carbon peaking and carbon neutrality. Results show that: (1) Water stress on vegetation productivity in China has increased throughout the study period. (2) In multiple time scale dry and wet variations, 61.18% of the vegetated cover areas had water deficit significantly inhibiting vegetative photosynthesis. In contrast, 28.29% of the vegetated cover areas had water surplus significantly inhibiting vegetative photosynthesis. (3) The minimum response time for vegetation productivity significantly stressed by aridification has been shortened, while the maximum response time for vegetation productivity significantly constrained by water surplus has been lengthened. These observations indicate that it became easier for aridification to suppress vegetation productivity effects and more difficult for the water surplus to produce suppressive effects on vegetation productivity. Consequently, the water constraint on vegetation productivity in China has been intensifying over the past 37 years. These findings shed light on the evolving trend of water availability in the face of ongoing climate warming, providing a scientific basis for understanding the coupling relationship between water and carbon, as well as the water-carbon cycle.

**Keywords:** GPP; SPEI; multiple time-scales; changing trends; China