

1982~2016 年高温干旱对中国极端植被生产力损失的影响

赵冬苑^{1,2} 张丽霞^{2,4} 孙彦坤¹ 于晓晶³

1 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG), 北京 100029

3 新疆大学 地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046

4 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200030

摘要: 研究高温干旱对极端植被生产力的影响有助于深入认识生态系统极端事件, 进而更有效地应对气候变化以减轻高温干旱对农业生产和社会经济的负面影响。本研究基于五套总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)资料、温度和土壤观测资料, 从平均气候态和长期趋势角度研究了高温干旱事件对1982~2016年中国地区极端GPP损失的贡献。从平均气候态来看, 中国地区区域平均极端GPP损失为 $-15.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 高温和干旱的发生频率和贡献相当, 干旱、高温和热旱事件对总GPP损失贡献分别为45%、41%和23%。从长期趋势来看, 1982~2016年中国55%以上的地区极端GPP损失呈现增加趋势, 中国区域平均增加了 $-2.46 \text{ gC m}^{-2} \text{ 35yr}^{-1}$ 。高温、干旱和热旱事件频率的增加均显著贡献于该趋势, 其中干旱发生频率的贡献最大($-2.47 \text{ gC m}^{-2} \text{ 35yr}^{-1}$), 导致中国超过一半(61%)的地区呈现增加趋势。从区域分布特征来看, 1982~2016年中国北方和中部地区极端GPP损失增幅最强且最显著, 是受高温干旱影响的热点区域。本研究从极端GPP损失的变化特征出发, 量化了近几十年中国地区高温干旱事件频率变化的贡献, 指出高温干旱影响中国陆地生态系统碳汇功能的热点区域, 有望为应对气候变化、保护生态环境以及社会经济可持续发展提供科学支持。

关键词: 极端GPP损失 高温 干旱 长期趋势

文章编号: 2023169B

中图分类号: P426.616

文献标志码: A

收稿日期 2024-07-31 网络预出版日期

作者简介 赵冬苑, 女, 1999年出生, 硕士研究生, 主要从事高温干旱变化及其对生态系统影响方面的研究。E-mail: zhaodongyuan@lasg.iap.ac.cn

通讯作者 孙彦坤, E-mail: sunyankun@neau.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42075037 和 42305184

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42075037 and 42305184)

Impacts of high temperature and drought on extreme vegetation productivity losses in China from 1982 to 2016

ZHAO Dongyuan^{1,2}, ZHANG Lixia^{2,4}, SUN Yankun¹, YU Xiaojing³

1 School of Resources and Environment Northeast Agricultural University, Harbin 150030

2 LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 College of Geography & Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046

4 Key Laboratory of Cites' Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

Abstract

Investigating the impact of high temperature and drought on extreme vegetation productivity losses is crucial for a better understanding ecosystem extremes, facilitating better adaptation to climate change and mitigating their impacts on agricultural production and socio-economic systems. Based on five sets of Gross Primary Productivity(GPP)datasets, we study the contribution of high temperature and drought to extreme GPP losses in China from 1982 to 2016, from the perspective of climatology and long-term trends. In terms of climatology, the extreme GPP losses area-averaged in China is $-15.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. The frequency and contributions of high temperature and drought are comparable, with drought, high temperature, and combined high-temperature and drought events contributing 45%,41%,and 23%, respectively, to the total GPP losses. As for the long-term trends from 1982 to 2016, more than 55% of areas in China has experienced an increase in extreme GPP losses, with a regional mean of $-2.46 \text{ gC m}^{-2} \text{ 35 yr}^{-1}$. The increasing frequency of high-temperature, drought, and combined high-temperature and drought events all contribute to this trend significantly, with drought frequency making the largest contribution ($-2.47 \text{ gC m}^{-2} \text{ 35yr}^{-1}$), leading to an increasing trend in over half (61%) of the regions in China. From the perspective of regional distribution, the northern and

central China experienced the most significant and pronounced increases in extreme GPP loss from 1982 to 2016. These areas are the hotspots affected by high-temperature and drought. This study quantifies the contribution of the variation in the frequency of high-temperature and drought events in China over the past few decades to extreme GPP loss. It identified the hotspots of terrestrial ecosystems in China where are greatly affected by increasing frequency of high-temperature and drought, thus providing scientific support for a better adaptation and migration to climate change, and sustainable socioeconomic development.

Keywords: Extreme gross primary productivity loss, High-temperature, Drought, Long-term trend

1 引言

干旱作为全球发生频率最高、持续时间最长、影响面积最广的自然灾害之一 (Dai 2013), 是影响陆地生态系统碳汇功能最主要的胁迫因子 (Zscheischler et al., 2013)。干旱过程常常伴随着高温, 二者的协同耦合作用会进一步加剧削弱生态系统碳汇功能, 甚至使之变成碳源 (Piao et al., 2019; 白慧敏等, 2022)。全球增暖背景下, 高温干旱事件日益频繁和剧烈, 严重威胁着生态系统固碳和维持生物多样性的能力 (Zscheischler et al., 2014a; Fu et al., 2022; Li et al., 2023b)。高温干旱环境会抑制植被的生理调节和适应能力, 加剧水分胁迫, 降低植被生产力, 进而导致生态系统中的水生动植物受损、农作物歉收等 (Grossiord et al., 2020; McDowell et al., 2022)。因此, 深入研究高温干旱过程对中国陆地生态系统损失的影响, 对于维持生态系统健康、应对气候变化、保护生物多样性以及可持续资源管理具有重要意义。

总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 指单位时间和单位面积上绿色植物通过光合作用所积累的有机干物质总量, 决定了进入陆地生态系统的初始有机物质和能量 (Zhang et al., 2016)。极端高温干旱事件会导致陆地生态系统 GPP 严重受损, 其调节和恢复也需要漫长过程。如 2003 年欧洲发生罕见的高温干旱事件, 植被生产力降低了 30%, 抵消了该地区四年对大气二氧化碳的净吸

收 (Ciais et al., 2005)。生态系统极端 GPP 损失事件可定义为 GPP 异常值小于某一百分位数的事件 (Seneviratne et al., 2012; Reichstein et al., 2013)。基于此, Zscheischler 等 (2013) 从时空连续性角度揭示出 1982~2011 年期间 GPP 损失最严重的 1000 次事件导致光合作用碳吸收量减少约 3.5 PgC yr^{-1} , 且超过 50% 的事件可归因于干旱。Li 等 (2023a) 指出极端气候事件导致了约 70% 的极端 GPP 损失事件, 其中高温干旱事件占比高达 31% (Zscheischler et al., 2013; Li et al., 2023a)。

中国是世界上受高温干旱灾害损失最严重的国家之一, 以中国华北和西南地区干旱频率较高, 持续时间较长 (Zhang and Zhou, 2015)。中国地区 GPP 分布整体自东南向西北递减, 平均每年 GPP 为 $6.62 \pm 0.23 \text{ PgC}$ (Yao et al., 2018)。受气候变化、 CO_2 施肥效应和中国森林保护、草地恢复和植树造林等政策的影响, 中国年平均 GPP 整体以 $3.9\% \text{ 10yr}^{-1}$ 的速率增加 (Bo et al., 2022), 且东南和东北地区的增加速率高于西北地区 (Yuan et al., 2022)。与此同时, 中国地区近几十年极端 GPP 损失事件使得年平均 GPP 降低了 2.8%, 40%~50% 的极端 GPP 损失事件与降水匮乏有关, 其中北部和西部地区可归因于气象干旱, 南部地区则更多与极端高温有关 (Chen et al., 2019)。2013 年夏季中国南方发生百年一遇的热浪和干旱, 导致 1960 年以来最严重的农作物减产; 2010 年中国西南地区近 50 年来最严重的春季干旱, 导致该区域 GPP 下降了 4%, 是 2000~2010 年期间年度 GPP 最低的年份 (Zhang et al., 2012)。然而, 中国地区极端 GPP 损失的长期变化以及高温干旱过程对其贡献尚不明确。因此, 本研究着眼于 1982 年以来中国地区极端 GPP 损失的长期变化, 尝试回答以下两个科学问题: (1) 1982~2016 年中国地区极端 GPP 损失呈现何种变化? (2) 高温、干旱及热旱事件对中国极端 GPP 损失气候态和长期趋势的贡献如何?

2 资料与方法

2.1 资料介绍

本研究选用五套逐月 GPP 资料, 包括三套基于不同机器学习方法构建的 FLUXCOM GPP 资料和两套基于光能利用率 (Light Use Efficiency, LUE) 模型生

成的 GPP 资料。这些 GPP 资料被广泛应用于生态系统和气候变化研究，如全球总初级生产力的变化和趋势（O'Sullivan et al., 2020）、干旱对北方生态系统生产力的影响（Gampe et al., 2021）、北方中纬度地区的总初级生产力损失和极端水文气候的联系（Li et al., 2023a）等方面。五套数据集的气象输入数据一致，均采用由全球逐月气候数据集 CRU（Climatic Research Unit）与逐 6 小时 NCEP（National Centers for Environmental Prediction）全球大气再分析数据融合得到 CRUNCEP v.8 数据集（Saha et al., 2014）。在研究过程中，考虑到现有 GPP 资料的不确定性，为避免不同观测资料造成的结果差异，对五套 GPP 资料集合平均后开展后续分析。

（1）三套 FLUXCOM GPP 资料所采用的机器学习算法分别是人工神经网络、随机森林和多元自适应回归，利用网格化的气象和卫星植被数据作为输入，将 FLUXCOM 碳通量观测站（全球分布的 224 个站点）测量的陆地和大气之间的净碳交换升尺度到全球范围得到的格点化 GPP 资料（Tramontana et al., 2016）。值得注意的是，三种机器算法得到的 FLUXCOM GPP 中卫星植被数据只约束了 GPP 的季节循环，GPP 的年际变化和趋势完全由输入的气象变量决定，因此该 GPP 资料不包括 CO₂ 的施肥效应，反映 GPP 对气候变化的响应（Jung et al., 2017）。

（2）两套 LUE GPP 资料由双月变化的卫星 GIMMS FPAR3g 驱动的 MODIS 数据，分别基于大叶和两叶两种模型构建方法，采用光能利用率模型生成（Kolby Smith et al., 2016），其计算公式如下：

$$GPP = FPAR \times PAR \times LUE_{max} \times f(T_{min}) \times f(VPD) \quad (1)$$

其中，FPAR 是植被光合有效辐射吸收比例，PAR 是光合有效辐射，LUE_{max}、f(T_{min})和 f(VPD)是根据生物群系类型而变化的最大光能利用效率、最低温度和水汽压差函数。公式（1）假设 LUE 是不随时间变化的，不能捕捉 CO₂ 增加对 GPP 的直接影响（De Kauwe et al., 2016）。因此，公式（1）得到的 LUE GPP 同时包含气候和 FPAR 变化的影响。与前面三套 FLUXCOM GPP 相比，两套 LUE GPP 包含了植被记忆效应。

本研究采用逐月温度和土壤湿度来表征高温、干旱及热旱事件。其中温度资料为英国东英吉利大学气候中心时间序列 4.06 版（CRU TS 4.06）的逐月温度

资料 (Harris et al., 2020)。土壤湿度资料来自荷兰根特大学开发的全球陆地蒸发阿姆斯特丹模型 v3.5 (Global Land Evaporation Amsterdam Model v3.5, GLEAM) 的土壤表层水含量。该资料基于卫星观测和 ERA5 再分析资料计算得出, 其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。为了保持与 GPP 资料一致, 采用双线性插值方法将土壤湿度数据插值到 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的空间分辨率。根据 GPP 数据的重合时间跨度, 本文研究时段选为 1982~2016 年。

2.2 极端 GPP 损失事件和高温干旱事件的检测和归因方法

本文采用百分位数阈值法来判定生态系统极端 GPP 损失事件和极端事件。为去除 CO_2 浓度、气候变化和季节循环的影响, 首先去除 GPP 数据的线性趋势和年循环气候态, 再计算各格点的第 10 百分位数, 低于该阈值则判定为极端 GPP 损失事件 (Li et al., 2023a)。该方法得到的极端事件对极端 GPP 损失的影响的气候态分布及长期趋势与 Zscheischler et al. (2013, 2014a) 定义的方法结果一致, 其优点在于可以量化每个格点上高温、干旱等极端气候事件对极端 GPP 损失的影响, 并且可以分解极端气候事件发生频率及其造成的极端 GPP 损失强度的相对贡献。

该方法采用温度和土壤湿度数据来判别高温、干旱和复合高温干旱三类极端事件。同样对原始数据进行去趋势和季节气候态的处理, 再进行标准化, 分别计算温度和土壤湿度逐 3 月的极端阈值和平均阈值。对于任意格点, 高温事件的极端 (平均) 阈值分别为第 90 (70) 百分位数, 干旱的极端 (平均) 阈值分别为土壤湿度的第 10 (30) 百分位数。当极端 GPP 损失发生时, 对应温度或土壤湿度满足极端阈值或平均阈值的任何一个, 则将极端 GPP 损失事件归因于这一事件。

该归因方法中, 极端阈值的设定是确保至少存在一个导致 GPP 损失的极端事件, 而随着气候条件的变化极端 GPP 损失可能会逐渐减弱, 因此平均阈值的设定是表示极端事件发生后对极端 GPP 损失存在持续影响, 或极端事件发生前对极端 GPP 损失有先决条件 (Li et al., 2023a)。以高温为例, 极端 GPP 损失事件发生前 3 个月内最高温度大于第 90 百分位或平均温度大于第 70 百分位, 则判

定该极端 GPP 损失事件可归因于高温的影响。如果某一极端 GPP 损失事件同时发生了高温和干旱事件，则该事件受到高温干旱复合事件的影响。为简便描述，本文将高温干旱复合事件统称为热旱事件，并将引起 GPP 损失的极端事件分为高温、干旱、热旱和其他影响因子四类事件。

2.3 量化极端 GPP 损失事件频率和强度变化贡献的计算方法

每年极端 GPP 损失 (L) 可表示为极端 GPP 损失月数 (即频率, F) 与对应平均 GPP 损失强度 (I) 的乘积:

$$L = F \cdot I \quad (2)$$

GPP 损失的长期变化 ($\partial L / \partial t$) 可进一步分解为由 GPP 损失频率变化 ($\partial F / \partial t$) 和强度变化 ($\partial I / \partial t$) 引起的损失量:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial t} \cdot \bar{I} + \bar{F} \cdot \frac{\partial I}{\partial t} \quad (3)$$

其中, \bar{F} 和 \bar{I} 表示极端 GPP 损失频率和强度的气候平均态。

进一步将极端 GPP 损失表示为高温 (L_h)、干旱 (L_d)、热旱 (L_{dh}) 和其他影响因子 (L_o) 的贡献, 从而得到每类极端事件的频率和强度变化对极端 GPP 损失趋势的贡献:

$$L = F_h \cdot I_h + F_d \cdot I_d + F_{dh} \cdot I_{dh} + F_o \cdot I_o \quad (4)$$

$$\frac{\partial L_h}{\partial t} = \frac{\partial F_h}{\partial t} \cdot \bar{I}_h + \bar{F}_h \cdot \frac{\partial I_h}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial L_d}{\partial t} = \frac{\partial F_d}{\partial t} \cdot \bar{I}_d + \bar{F}_d \cdot \frac{\partial I_d}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial L_{dh}}{\partial t} = \frac{\partial F_{dh}}{\partial t} \cdot \bar{I}_{dh} + \bar{F}_{dh} \cdot \frac{\partial I_{dh}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{\partial L_o}{\partial t} = \frac{\partial F_o}{\partial t} \cdot \bar{I}_o + \bar{F}_o \cdot \frac{\partial I_o}{\partial t} \quad (8)$$

其中, F_h , F_d , F_{dh} 和 F_o (I_h , I_d , I_{dh} 和 I_o) 分别代表高温、干旱、热旱和其他影响因子的频率 (强度)。

3 结果分析

3.1 极端 GPP 损失的气候态特征

首先给出 1982~2016 年中国地区年平均 GPP 与极端 GPP 总损失量的气候态分布特征（图 1）。中国区域年平均 GPP 为 $728.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，由西北向东南递增，这与中国地区降水、温度和植被指数的分布特征一致（赵倩倩等,2021）。中国南方地区年平均 GPP 量值可高达 $2400 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，西北地区仅为 $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。按照 2.2 步骤，去除 GPP 的长期趋势和季节循环后，可得极端 GPP 损失的阈值如图 1c 所示，中国区域平均 GPP 损失阈值为 $-4.64 \text{ gC m}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ （图 1c）。进而得到中国地区极端 GPP 损失的气候态（图 1b），全国平均极端 GPP 损失可达 $-15.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，且呈现出两个损失高值中心，分别位于华南地区（ $104^{\circ}\text{E}-117^{\circ}\text{E}$ ， $18^{\circ}\text{N}-26^{\circ}\text{N}$ ）和黄河中上游（ $102^{\circ}\text{E}-110^{\circ}\text{E}$ ， $30^{\circ}\text{N}-38^{\circ}\text{N}$ ），中心强度可超过 $-30 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

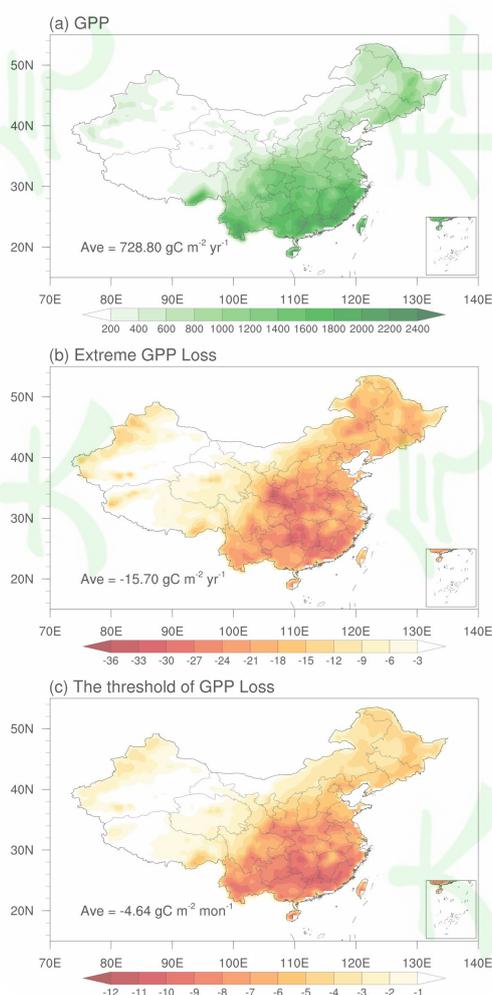


图 1 1982~2016 年中国地区年平均 GPP 与极端 GPP 损失的气候态分布。(a) GPP 气候态 (单位: $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), (b) 极端 GPP 损失的气候态 (单位: $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), (c) 极端 GPP 损失阈值 (第 10 百分位, 单位: $\text{gC m}^{-2} \text{mon}^{-1}$)。

Figure. 1 The spatial distribution of climatology for the annual GPP and extreme GPP loss in China for 1982 - 2016. (a) GPP (units: $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), (b) extreme GPP loss (units: $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), (c) threshold of extreme GPP loss (the 10th percentile, units: $\text{gC m}^{-2} \text{mon}^{-1}$).

进一步考查四类极端事件对中国极端 GPP 损失贡献的气候态分布特征 (图 2)。比较而言, 干旱事件对中国极端 GPP 损失的贡献最大, 区域平均损失量达到 $-6.99 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ (图 2b)。高温事件的贡献次之, 区域平均损失量为 $-6.38 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ (图 2a)。热旱事件导致的中国区域平均极端 GPP 损失为 $-3.58 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ (图 2c), 其他影响因子引起的极端 GPP 损失为 $-5.9 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ (图 2d)。我们用高温、干旱、热旱和其他影响因子导致的极端 GPP 损失分别除以极端 GPP 总损失 (即 $-15.7 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), 得到四类极端事件对中国 GPP 总损失的贡献率分别为 41%, 45%, 23% 和 38%。此外, 高温和干旱导致的极端 GPP 损失水平分布特征类似 (图 2a、b), 二者高值中心可达 $-16 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$, 均位于内蒙古东部 ($118^{\circ}\text{E}-126^{\circ}\text{E}$, $41^{\circ}\text{N}-50^{\circ}\text{N}$)、黄河中上游 ($102^{\circ}\text{E}-110^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N}-38^{\circ}\text{N}$) 和长江流域 ($105^{\circ}\text{E}-115^{\circ}\text{E}$, $22^{\circ}\text{N}-28^{\circ}\text{N}$)。其他影响因子导致的 GPP 损失高值中心则主要位于华南地区 ($108^{\circ}\text{E}-120^{\circ}\text{E}$, $22^{\circ}\text{N}-27^{\circ}\text{N}$)。

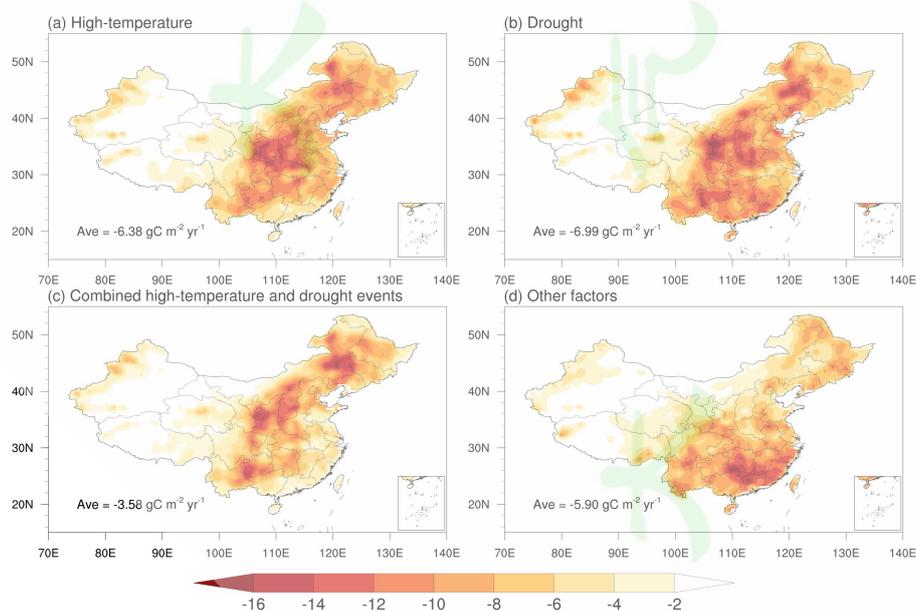


图 2 1982~2016 年中国地区四类极端事件因子导致的极端 GPP 损失（单位： $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ）的气候态分布。（a）高温，（b）干旱，（c）热旱，（d）其他影响因子

Figure. 2 The spatial distribution of climatology for the extreme GPP loss (units: $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) induced by four categories of extreme events in China from 1982 to 2016. (a) high-temperature, (b) drought, (c) combined high-temperature and drought events, (d) other factors.

我们进一步给出了中国地区极端 GPP 损失事件对应的四类极端事件发生频率的气候态分布特征（图 3）。从高温干旱事件来看，由于旱引起的极端 GPP 损失事件发生频率最高（图 3b），全国区域平均可达每年 0.8 个月，呈现出由北向南递减的分布特征，高值区位于内蒙古和新疆地区，每年发生频率可超过 1.6 个月，高温次之，全国区域平均可达每年 0.75 个月（图 3a）。全国平均而言，热旱引起的极端 GPP 损失事件发生频率为每年 0.4 个月（图 3c），其他影响因子为每年 0.77 个月，但其区域差异不及高温干旱事件明显（图 3d）。

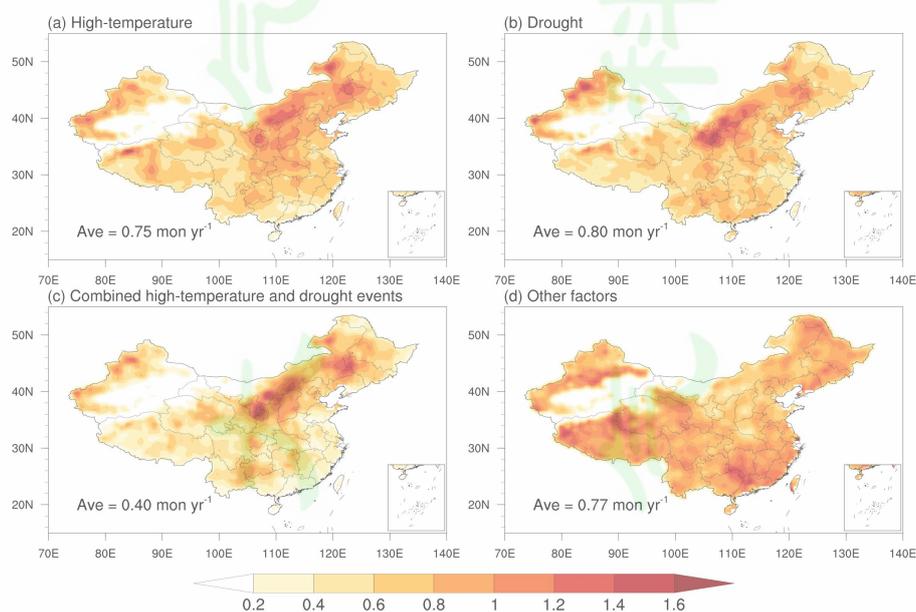


图 3 1982~2016 年中国极端 GPP 损失对应的四类极端事件因子发生频率（单位： mon yr^{-1} ）的气候态分布。（a）高温，（b）干旱，（c）热旱，（d）其他影响因子

Figure. 3 The spatial distribution for the climatological mean frequency (mon yr^{-1}) of

four categories of extreme events associated with extreme GPP loss in China from 1982 to 2016. (a) high-temperature, (b) drought, (c) combined high-temperature and drought events, (d) Other factors.

图 4 进一步展示了中国地区四类极端事件导致的极端 GPP 损失平均强度的分布。其中，热旱事件导致的极端 GPP 损失平均强度最强，中国区域平均高达 $-8.78\text{gC m}^{-2}\text{ mon}^{-1}$ ，其高值中心位于黄河中上游及长江流域，强度可超过 $-16\text{gC m}^{-2}\text{ mon}^{-1}$ （图 4c）。高温和干旱事件引起的极端 GPP 损失平均强度次之，区域平均分别为 $-8.30\text{gC m}^{-2}\text{ mon}^{-1}$ 和 $-8.45\text{gC m}^{-2}\text{ mon}^{-1}$ ，且二者的大值中心较为一致（图 4a、b）。其他影响因子导致的极端 GPP 损失平均强度的全国平均为 $-7.67\text{gC m}^{-2}\text{ mon}^{-1}$ ，呈现出由西向东递增的分布特征（图 4d）。

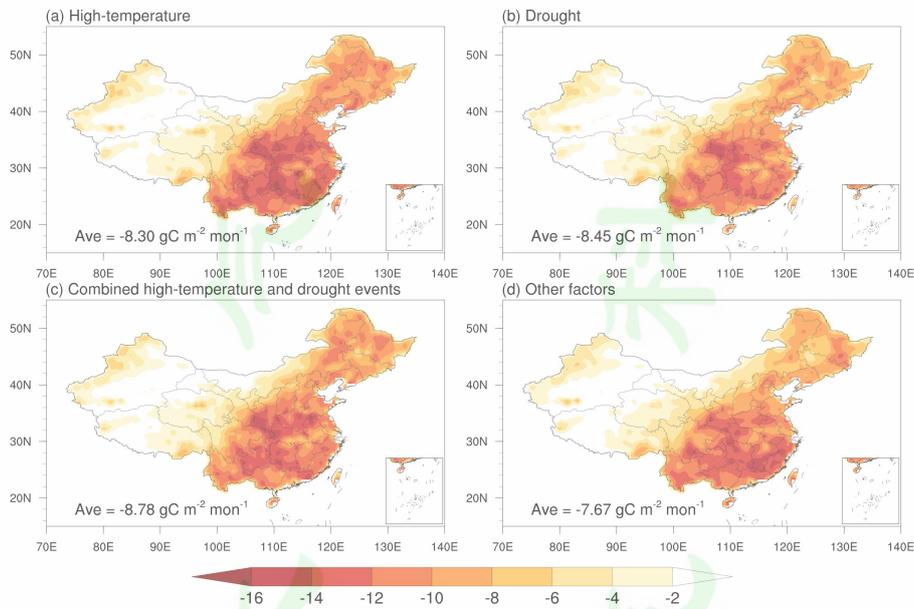


图 4 1982~2016 年中国地区四类极端事件因子导致的平均极端 GPP 损失强度(单位: $\text{gC m}^{-2}\text{ mon}^{-1}$) 的气候态分布。(a) 高温，(b) 干旱，(c) 热旱，(d) 其他影响因子

Figure. 4 The spatial distribution of climatology for the intensity of extreme GPP loss (units: $\text{gC m}^{-2}\text{ mon}^{-1}$) caused by four categories of extreme events in China from 1982 to 2016. (a) high-temperature, (b) drought, (c) combined high-temperature and drought events, (d) other factors.

3.2 极端 GPP 损失的长期趋势

为探究中国地区近几十年极端 GPP 损失的长期变化，我们首先比较了 1982~2016 年中国地区年平均 GPP 和极端 GPP 损失的长期趋势（图 5）。就年平均 GPP 而言（图 5a），1982~2016 年中国区域 GPP 整体增长了 9.35 gC m^{-2} ，除内蒙古东部、东北地区、河南等部分地区，中国 62% 以上的地区 GPP 呈增加趋势，其中尤以中国西北、青藏高原地区和西南地区的趋势最为显著。由于不同地区 GPP 的增减趋势相互抵消，全国平均 GPP 的长期趋势并未通过 10% 的显著检验。年平均 GPP 增加趋势表明中国生态系统的固碳能力有所增加，前人研究指出其原因在于近年来 CO_2 浓度和温度上升有利于生态系统植被生产力的积累（Zscheischler et al., 2014b; Piao et al., 2013）。此外，“退耕还林工程”等生态环境修复政策的施行（Zhang et al., 2022; 韩云环等, 2023），使得目前中国的人工林主要为中幼龄林，比老林具有更大的碳汇潜力（Piao et al., 2022）。然而，伴随着 1982~2016 年年平均 GPP 的增加，中国 55% 以上的地区极端 GPP 损失呈现加剧趋势，其中内蒙古东部和长江流域最为严重。中国区域平均极端 GPP 损失整体增加了 -2.46 gC m^{-2} ，约占其气候平均值的 15.7%，说明极端事件对中国地区生态系统的胁迫作用日益加剧。

整体而言，1982~2016 年中国地区平均 GPP 没有显著趋势，但呈现一定的年代际变化特征，在 1990~1994 年和 2012~2016 年偏高，2004~2008 年偏低（图 5b）。中国地区极端 GPP 损失呈现类似的年代际变化，但整体却呈现不显著的下降趋势。从中国区域平均来看，年均 GPP 及极端 GPP 损失均呈现较大的变化幅度，二者的年际变率分别为 $9.98 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 和 $3.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，极端 GPP 损失的变率占年均 GPP 变率的 39%，由此可见极端 GPP 损失变率对年平均 GPP 变率的重要性（表 1）。

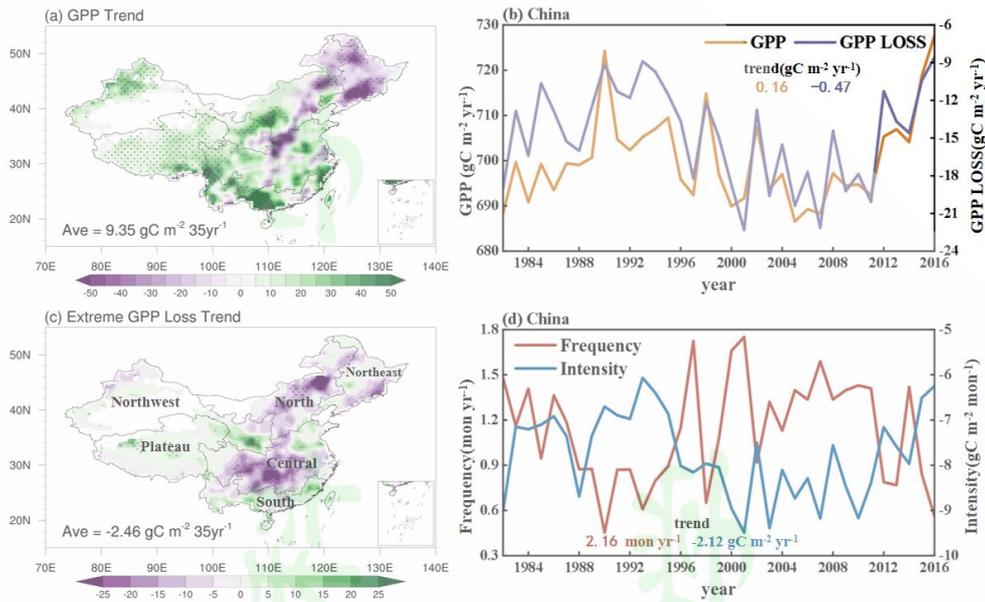


图 5 1982~2016 年中国地区年平均 GPP 和极端 GPP 损失的长期变化特征。(a) 年平均 GPP 的长期趋势 (单位: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$), (b) 区域平均 GPP 和极端 GPP 损失的时间序列 (单位: $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), (c) 极端 GPP 损失的长期趋势 (单位: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$), (d) 极端 GPP 损失发生频率 (单位: mon yr^{-1}) 和平均强度 (单位: $\text{gC m}^{-2} \text{mon}^{-1}$) 的时间序列。图 a 和 c 中打点区域通过 10% 显著性检验, 曲线标注区域为全国分区。

Figure. 5 The long-term trends of annual mean GPP and extreme GPP loss in China from 1982 to 2016. (a) long-term trend of GPP (units: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$), (b) time series of GPP and extreme GPP loss (units: $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), (c) long-term trend of extreme GPP loss (units: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$), (d) time series of extreme GPP loss frequency (units: mon yr^{-1}) and intensity (units: $\text{gC m}^{-2} \text{mon}^{-1}$). The dotted area is statistically significant at 10% level in a and c, and the circled region is the subregions which will be studied later.

依据极端 GPP 损失长期趋势的分布特征, 我们将中国划分为六个子区域 (见图 5c 分区), 进一步统计考查了各子区域平均 GPP 和极端 GPP 损失的演变特征 (表 1)。从年际变率来看, 受气候平均值的影响, 南方地区极端 GPP 损失变率最高, 可达 $7.12 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 高原地区贡献最小, 仅为 $1.71 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。从长期变化来看, 北方、东北和中部地区主导了中国平均 GPP 和极端 GPP 损失的长

期趋势。其中，东北地区平均 GPP 和极端 GPP 损失均呈现减少趋势，说明该地区生态系统的固碳能力显著减弱。中部地区极端 GPP 损失增加幅度最大(-7.33 gC m⁻² 35yr⁻¹)，约占其气候平均值的 30%。

表 1 1982~2016 年中国及其子区域年平均 GPP 和极端 GPP 损失对应的统计信息

Table 1 Statistical results of the annual GPP and extreme GPP losses area-averaged over China and its subregions during 1982~2016

区域	气候平均 (gC m ⁻² yr ⁻¹)		年际变率(标准差) (gC m ⁻² yr ⁻¹)		长期趋势 (gC m ⁻² 35yr ⁻¹)		频率 (mon 35yr ⁻¹)	平均强度 (gC m ⁻² 35yr ⁻¹)
	年平均	极端损失	年平均	极端损失	年平均	极端损失	极端损失	极端损失
中国	728.8	-15.7	9.98	3.9	9.35	-2.46	0.08	-0.43
西北	333.4	-12.06	8.30	4.28	10.65*	1.12	-0.08	0.33
北方	425.27	-16.19	14.28	5.49	-5.52	-7.17	0.31	-1.72*
东北	777.44	-17.53	15.62	7.08	-20.05*	-2.47	0.63	-0.74
高原	225.55	-6.32	4.71	1.71	11.17	1.92	-0.31	0.26
中部	1219.7	-21.87	21.62	6.16	7.3	-7.33	0.21	-1.02
南部	1710.9	-23.1	21.84	7.12	25.67*	0.92	0.04	0.37

*表示通过了 10% 的显著性检验

我们进一步给出了 1982~2016 年中国区域极端 GPP 损失频率和平均强度的演变序列（图 5d）。可以看到中国地区整体趋势虽不显著，但在 2002~2010 年内极端 GPP 损失的频率呈现增加趋势，平均强度则呈现减弱趋势，该时间段频率和平均强度的趋势分别为 9.78mon yr⁻¹ 和 -0.85gC m⁻² mon⁻¹，表明在这一时段内极端 GPP 损失主要由频率主导。根据公式（3）我们分别对 1982~2016 年六个子区域极端 GPP 损失频率和平均强度的变化进行了统计（表 1），可以看到东北地区极端 GPP 事件的发生频率最高，区域平均可达 0.63 个月；而北方和中部地区极端 GPP 损失的强度较大，区域平均超过 -1 gC m⁻²。可见，中国极端 GPP 损失的整体变化趋势由上述地区主导。

3.3 高温、干旱和热旱对极端 GPP 损失变化的贡献

为探究极端事件对中国极端 GPP 损失贡献的长期变化，我们进一步考查了 1982~2016 年中国四类极端事件导致的极端 GPP 损失长期变化的分布特征（图 6）。具体而言，由于干旱事件引起的极端 GPP 损失变化趋势最明显，中国 60% 以上的地区呈现加剧趋势，区域平均增量为 -2.57 gC m⁻²，约占其气候平均的 36.8%（图

6b)。高温和热旱事件导致的中国平均极端 GPP 损失增量依次为 -0.6 gC m^{-2} 和 -1.16 gC m^{-2} (图 6a、c)。整体来看,三类极端事件引起的极端 GPP 损失分布一致,损失高值区均出现在中国北方和西南地区,中心可达 $-15 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ 。1982~2016 年,其他影响因子引起的全国区域平均的极端 GPP 损失增量为 -0.45 gC m^{-2} ,高值区位于中部和东北地区,而在黄河流域,其他影响因子造成的极端 GPP 损失有所下降,其趋势强度为 $6 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$,且通过了 10%的显著性检验。值得注意的是,长江流域地区极端 GPP 损失的加剧由四类极端事件因子共同造成,其中干旱影响最为严重;而东北地区的极端 GPP 损失则主要由其他影响因子导致,这可能与东北地区台风和洪涝的影响有关(雷小途等,2002)。从各子区域来看,北方和中部地区的极端 GPP 损失的区域平均可达 $-6 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$,主导了中国地区的极端 GPP 损失(图 8a)。在高原地区高温干旱事件反而减缓了极端 GPP 损失,由于温度升高促进了该地区植被的光合作用(黄玫等,2008;Anav et al., 2015)。

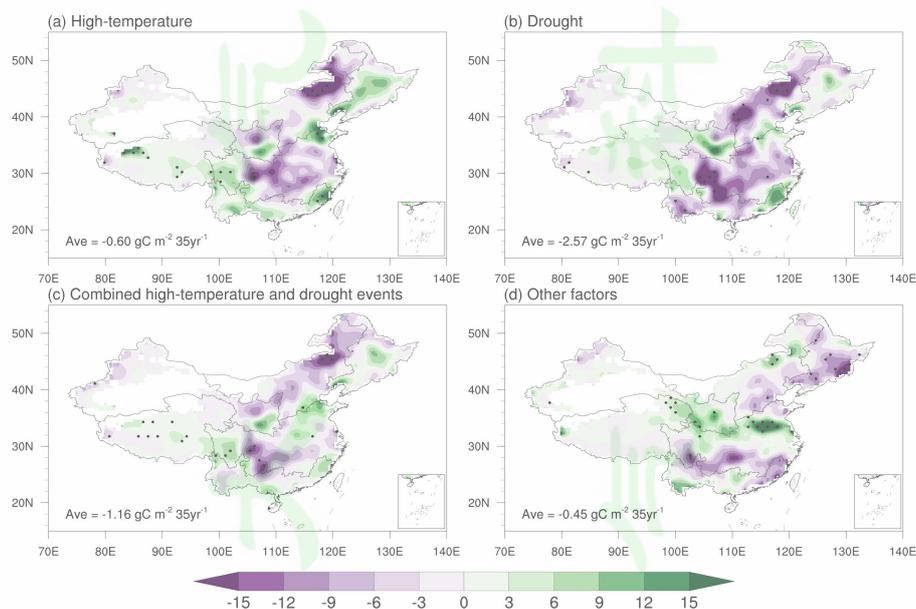


图 6 1982~2016 年中国地区四类极端事件导致的极端 GPP 损失的长期趋势 (单位: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$)。 (a) 高温, (b) 干旱, (c) 热旱, (d) 其他。打点区域通过 10%显著性检验。

Figure. 6 The long-term trends (units: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$) of the extreme GPP loss caused by four categories of extreme events in China from 1982 to 2016.(a) high-temperature,

(b) drought, (c) combined high-temperature and drought events, (d) other factors The dotted area is statistically significant at 10% level.

根据公式（5~8），我们进一步考查了中国地区四类极端事件的频率变化及其对应的极端 GPP 损失强度变化所导致的极端 GPP 损失趋势的变化分布，并对中国及六个子区域分别进行了统计（图 7、8）。可明显看出，高温、干旱和热旱三类极端事件的频率变化是引起极端 GPP 损失加剧的主要原因（图 7a~c、e~g）。具体而言，干旱的频率变化导致的极端 GPP 损失量最大，中国 63%以上的区域极端 GPP 损失呈现增加趋势，区域平均为 $-2.47 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ ，约占干旱导致的极端 GPP 损失趋势的 96.1%（图 7b）。热旱事件频率增加导致的中国极端 GPP 损失次之，区域平均为 $-1.06 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ ，约占热旱导致的总极端 GPP 损失趋势的 91.4%（图 7c）。高温频率变化导致的极端 GPP 损失中国区域平均为 $-0.5 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ ，约占高温导致的极端 GPP 损失趋势的 83.3%，大值中心与图 6 一致，位于北方和中部地区，可达 $-15 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ （图 7a），其中北方地区最为严重，原因在于高温干旱事件引起了植被的水分胁迫，而干旱地区植被对水分变化更加敏感（Guha et al., 2018）。从其他影响因子的影响来看，其他影响因子的强度变化大于频率变化的贡献，其强度变化导致的中国区域平均极端 GPP 损失趋势为 $-0.47 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ ，未通过显著性检验。其他影响因子频率变化导致的极端 GPP 损失负趋势呈现出两个高值中心，分别位于东北和中部地区，极端 GPP 损失的正趋势则位于江淮流域，未通过显著性检验（图 7d、h）。

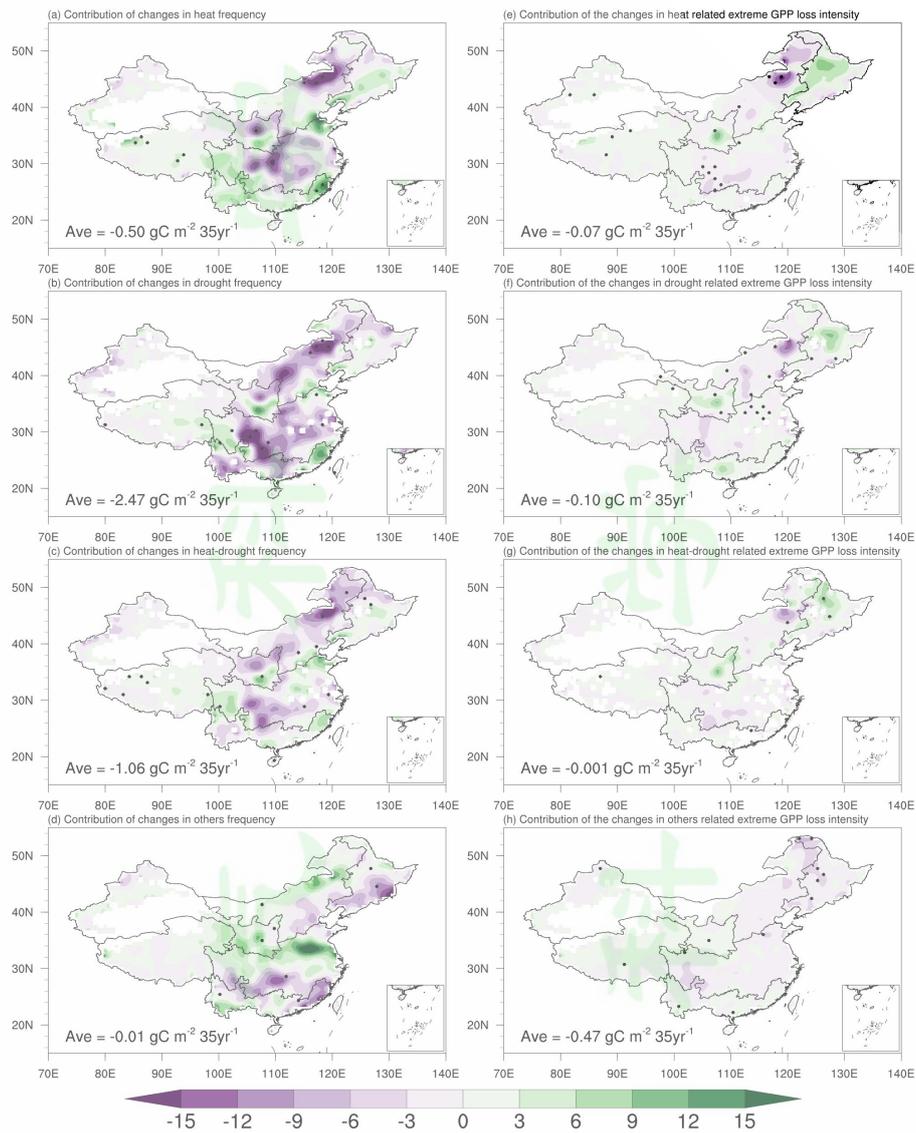


图 7 1982-2016 年中国地区四类极端事件对应 GPP 损失频率和强度变化导致的极端 GPP 损失的长期趋势（单位： $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ ）。（a~d）频率，（e~h）强度。打点区域通过 10%显著性检验。

Figure. 7 The long-term trends of extreme GPP losses (units: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$) caused by changes in frequency and intensity of extreme GPP loss associated with four categories of extreme events in China from 1982 to 2016. (a~d) frequency, (e~h) intensity. The dotted area is statistically significant at 10% level.

根据 1982~2016 年中国及其子区域平均极端 GPP 损失的总长期趋势及三类极端事件贡献的统计结果（图 8），中国地区极端 GPP 损失的热点地区位于北方和中部地区，极端 GPP 损失的增量分别为 -7.16gC m^{-2} 和 -7.17gC m^{-2} ，其中干旱

引起的极端 GPP 损失加剧最为严重，增量分别为 -6.29gC m^{-2} 和 -5.38gC m^{-2} ，而干旱频率变化是导致极端 GPP 损失增加的主要原因，区域平均分别为 -5.03gC m^{-2} 和 -4.72gC m^{-2} 。

高原地区极端 GPP 损失有所缓解，区域平均为 1.9gC m^{-2} ，高温的贡献最显著，为 1.32gC m^{-2} ，其中高温频率变化是主导因素，为 0.9gC m^{-2} 。南方地区干旱和其他影响因子分别导致了 -1.74gC m^{-2} 和 -1.07gC m^{-2} 的极端 GPP 损失增量，但高温事件缓解了极端 GPP 损失，区域平均为 3.98gC m^{-2} ，其中高温频率变化贡献较大，区域平均为 3.54gC m^{-2} 。综上，南方地区极端 GPP 损失呈现减少趋势，区域平均 0.91gC m^{-2} 。其他影响因子导致东北地区极端 GPP 损失增加了 -5.36gC m^{-2} ，但高温干旱事件对东北地区极端 GPP 损失有所缓解，高温最显著，区域平均为 3.05gC m^{-2} ，其中高温强度变化的贡献较大，区域平均为 1.79gC m^{-2} 。

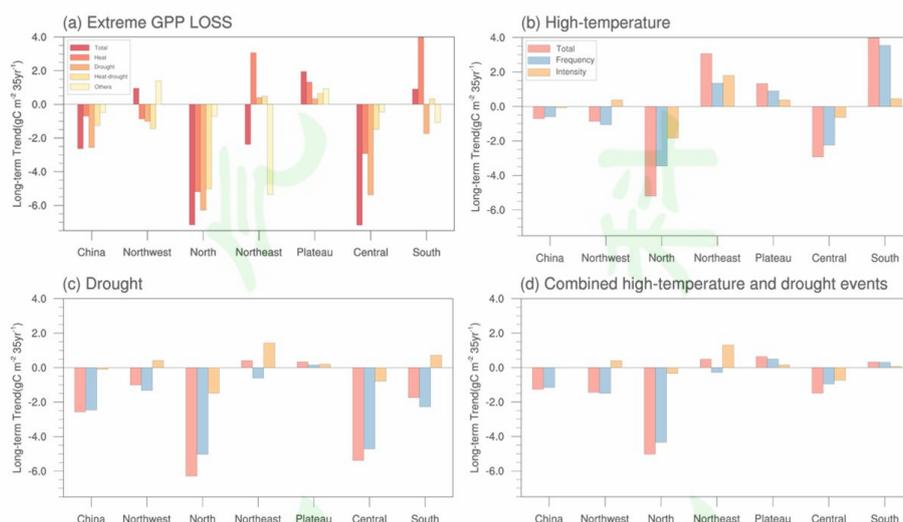


图 8 (a) 1982~2016 年中国及其子区域平均的极端 GPP 损失的总长期趋势及三类极端事件的贡献 (单位: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$)，(b)~(d) 同 (a)，但为高温、干旱、热旱事件导致的极端 GPP 损失总趋势 (红色)、及其频率变化 (蓝色) 和对应极端 GPP 损失强度变化 (橙色) 导致的极端 GPP 损失的长期趋势 ($\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$)

Figure. 8 (a) Long-term trend (units: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$) of extreme GPP loss area-averaged in China and six sub-regions from 1982 to 2016, and the respective contributions of high-temperature, drought, combined high-temperature and drought

and other factors. (b)-(d) The long-term trend (units: $\text{gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$) of extreme GPP loss caused by changes in (b) high-temperature, (c)drought and (d) combined high-temperature and drought (red bars), and the contributions from changes in their frequency (blue bars) and extreme GPP loss intensity (orange bars).

4 结论

本文基于五套 GPP 资料、气象和土壤观测资料，阐明了 1982~2016 年中国地区极端 GPP 损失的气候态特征和长期趋势，并探究了高温、干旱、热旱事件对极端 GPP 损失的贡献。主要结论如下：

(1) 从气候平均来看，中国地区区域平均极端 GPP 损失为 $-15.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，损失高值中心位于华南地区（ $104^{\circ}\text{E}-117^{\circ}\text{E}$ ， $18^{\circ}\text{N}-26^{\circ}\text{N}$ ）和黄河中上游（ $102^{\circ}\text{E}-110^{\circ}\text{E}$ ， $30^{\circ}\text{N}-38^{\circ}\text{N}$ ）。具体而言，干旱对中国地区极端 GPP 损失的贡献最大，区域平均损失量为 $-6.99 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ；高温和热旱导致的中国区域平均极端 GPP 损失分别为 $-6.38 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 和 $-3.58 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

(2) 从四类极端事件因子造成的极端 GPP 损失的频率和强度的气候平均来看，中国地区由干旱引起极端 GPP 损失的频率最高，区域平均可达 0.8 mon yr^{-1} ；高温、干旱、热旱的强度对中国地区极端 GPP 损失贡献的强度相当，中国地区区域平均损失量均超过 $-8 \text{ gC m}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ ，其中由热旱引起极端 GPP 极端损失的强度最高，可达 $-8.78 \text{ gC m}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 。

(3) 从长期趋势来看，尽管 1982~2016 年中国超过 62% 的地区年平均 GPP 呈增加趋势，但在中国 55% 以上的地区极端 GPP 损失亦呈现加剧趋势，区域平均增加了 $-2.46 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ 。具体而言，由干旱引起的极端 GPP 损失增加趋势最明显，中国 60% 以上的地区呈增加趋势，区域平均增加了 $-2.57 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ ，约占其气候平均的 36.8%；其次为热旱，此类事件导致的中国平均极端 GPP 损失为 $-1.16 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ ；高温事件影响仅为 $-0.6 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ 。

(4) 高温、干旱和热旱的频率增加是中国地区 1982~2016 年极端 GPP 损失加剧的主要原因。干旱频率变化对极端 GPP 损失的贡献最大，导致中国 63% 以上的区域极端 GPP 损失呈现增加趋势，区域平均为 $-2.47 \text{ gC m}^{-2} 35\text{yr}^{-1}$ ，约占干旱

导致的极端 GPP 损失总趋势的 96.1%。热旱频率变化引起的中国区域平均极端 GPP 损失为 $-1.06 \text{ gC m}^{-2} \text{ 35yr}^{-1}$ ，约占热旱导致的极端 GPP 损失总趋势的 91.4%。高温频率变化导致的中国区域平均极端 GPP 损失为 $-0.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ 35yr}^{-1}$ ，约占高温导致的极端 GPP 损失总趋势的 83.3%。从各分区统计结果来看，北方和中部地区主导了中国的极端 GPP 损失，增量分别为 -7.16 gC m^{-2} 和 -7.17 gC m^{-2} 。

参考文献 (References)

- Anav A, Friedlingstein P, Beer C, et al. 2015. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review [J]. *Rev. Geophys.*, 53(3):785-818. doi:10.1002/2015RG000483
- 白慧敏, 龚志强, 孙桂全, 等. 2022. 气象要素对华北地区夏季植被覆盖度的影响[J]. *大气科学*, 46(1):27-39. BAI Huimin, GONG Zhiqiang, SUN Guiquan, et al. 2022. Influence of Meteorological Elements on Summer Vegetation Coverage in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(1):27-39. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20233
- BO Y, Li X K, Liu K, 2022. Three Decades of Gross Primary Production (GPP) in China: Variations, Trends, Attributions, and Prediction Inferred from Multiple Datasets and Time Series Modeling [J]. *Remote Sens.*, 14(11):2564. doi:10.3390/rs14112564
- Chen W Z, Zhu D, Huang C J, et al. 2019. Negative extreme events in gross primary productivity and their drivers in China during the past three decades [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 275(15):47-58. doi:10.1016/j.agrformet.2019.05.002
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 [J]. *Nature*, 437(7058):529-533. doi:10.1038/nature03972
- Dai A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nat. Clim. Change*, 3(1):52-58. doi:10.1038/nclimate1633
- De Kauwe M G, Keenan T F, Medlyn B E, et al. 2016. Satellite based estimates underestimate the effect of CO₂ fertilization on net primary productivity [J]. *Nat. Clim. Change*, 6(10):892-893. doi:10.1038/nclimate3105
- Fu Z, Ciais P, Prentice I C, et al. 2022. Atmospheric dryness reduces photosynthesis along a

- large range of soil water deficits [J]. *Nat. Commun.*, 13(1):989. doi:10.1038/s41467-022-28652-7
- Gampe D,Zscheischler J,Reichstein M, et al. 2021. Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades [J]. *Nat. Clim. Change*, 11(9):772-779. doi:10.1038/s41558-021-01112-8
- Grossiord C,Buckley T N,Cernusak L A, et al. 2020. Plant responses to rising vapor pressure deficit [J]. *New Phytol.*, 226(6):1550-1566. doi:10.1111/nph.16485.
- Guha A,Han J,Cummings C, et al. 2018. Differential ecophysiological responses and resilience to heat wave events in four co-occurring temperate tree species [J]. *Environ. Res. Lett.*, 13(6):065008. doi:10.1088/1748-9326/aabcd8
- 韩云环,马柱国,李明星,等. 2023. 中国不同干湿区植被变化及其与气候因子的关系[J]. *大气科学*, 47(6):1680–1692. Han Yunhuan, Ma Zhuguo, Li Mingxing, et al. 2023. Vegetation Changes and Their Relationship with Climate Factors in Different Dry/Wet Areas over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(6):1680–1692. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2210.21258
- Harris I,Osborn T J,Jones P,Lister D. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. *Sci. Data*, 7(1):109. doi:10.1038/s41597-020-0453-3
- 黄玫,季劲钧,彭莉莉. 2008. 青藏高原 1981~2000 年植被净初级生产力对气候变化的响应[J]. *气候与环境研究*, 13(5):608-616. Huang Mei, Ji Jinjun, Peng Lili, 2008. The Response of Vegetation Net Primary Productivity to Climate Change during 1981–2000 in the Tibetan Plateau [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(5):608-616. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.05.03
- Jung M,Reichstein M,Schwalm C R, et al. 2017. Compensatory water effects link yearly global land CO₂ sink changes to temperature [J]. *Nature*, 541(7638):516-520, doi:10.1038/nature20780
- Kolby Smith W,Reed S C,Cory C, et al. 2016. Large divergence of satellite and Earth system model estimates of global terrestrial CO₂ fertilization [J]. *Nat. Clim. Change*, 6(3):306-310. doi:10.1038/nclimate2879

- 雷小途,陈联寿. 2002. 西北太平洋热带气旋活动的纬度分布特征 [J]. 应用气象学报, 13(2): 218-227. Lei Xiaotu, Chen Lianshou, 2002. Latitude distribution of tropical cyclone activity in the Northwest Pacific Ocean [J]. Journal of applied meteorology (in Chinese), 13(2):218-227. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.02.011
- Li J, Bevacqua E, Wang Z L, et al. 2023a. Hydroclimatic extremes contribute to asymmetric trends in ecosystem productivity loss [J]. Commun. Earth Environ., 4(1):197. doi:10.1038/s43247-023-00869-4
- Li X Y, Piao S L, Huntingford C, et al. 2023b. Global variations in critical drought thresholds that impact vegetation [J]. Natl. Sci. Rev., 10(5):nwad049. doi:10.1093/nsr/nwad049
- McDowell N G, Sapes G, Pivovarov A, et al. 2022. Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit [J]. Nat. Rev. Earth Environ., 3(5):294-308. doi:10.1038/s43017-022-00272-1
- O' Sullivan M, K Smith W, Sitch S, et al. 2020. Climate-Driven Variability and Trends in Plant Productivity Over Recent Decades Based on Three Global Products [J]. Glob. Biogeochem. Cycles, 34(12):e2020GB006613. doi:10.1029/2020GB006613
- Piao S L, He Y, Wang X H, et al. 2022. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects [J]. Sci. China Earth Sci., 65(4):641-651. doi:10.1007/s11430-021-9892-6
- Piao S L, Sitch S, Ciais P, et al. 2013. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends [J]. Glob. Change Biol., 19(7):2117-2132. doi:10.1111/gcb.12187
- 朴世龙, 张新平, 陈安平, 等. 2019. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 49(9):14. Piao Shilong, Zhang Xinping, Chen Anping, et al. 2019. Impact of extreme climate events on the carbon cycle of terrestrial ecosystems [J]. Chinese Science: Earth Sciences (in Chinese), 49(9):14. doi:10.1360/N072018-00316
- Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. 2013. Climate extremes and the carbon cycle [J]. Nature, 500(7462):287-295. doi:10.1038/nature12350
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2 [J]. J. Clim., 27(6):2185-2208. doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1

- Seneviratne S I, Nicholls N, Easterling D, et al. 2012. Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment [J]. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, 109-230. doi:10.1017/CBO9781139177245.006
- Tramontana G, Jung M, Schwalm C R, et al. 2016. Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms [J]. *Biogeosciences*, 13(14):4291-4313. doi:10.5194/bg-13-4291-2016
- Yao Y T, Wang X H, Li Y, et al. 2018. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years [J]. *Glob. Change Biol.*, 24(1):184-196. doi:10.1111/gcb.13830
- Yuan W P, Lin S R, Wang X Y, et al. 2022. Progress of studies on satellite-based terrestrial vegetation production models in China [J]. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.*, 46(6): 889-908. doi:10.1177/03091333221114864
- 赵倩倩, 张京朋, 赵天保, 等. 2021. 2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应 [J]. *高原气象*, 40(2):292-301. Zhao Qianqian, Zhang Jingpeng, Zhao Tianbao, et al. 2021. Vegetation changes and its response to climate change in China Since 2000 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 40(2):292-301. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00025
- Zhang L X, Zhou T J, 2015. Drought over East Asia: A Review [J]. *J. Clim.*, 28(8):3375-3399. doi:10.1175/JCLI-D-14-00259.1
- Zhang L, Xiao J F, Li J, et al. 2012. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China [J]. *Environ. Res. Lett.*, 7(4):045706. doi:10.1088/1748-9326/7/4/045706
- Zhang X Y, Liu K, Wang S D, et al. 2022. Spatiotemporal evolution of ecological vulnerability in the Yellow River Basin under ecological restoration initiatives [J]. *Ecol. Indic.*, 135:108586. doi:10.1016/j.ecolind.2022.108586
- Zhang Y L, Song C H, Sun G, et al. 2016 Development of a coupled carbon and water model for estimating global gross primary productivity and evapotranspiration based on eddy flux and remote sensing data [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 223:116-131. doi:10.1016/j.agrformet.2016.04.003

Zscheischler J, Mahecha M D, Harmeling S, et al. 2013. Detection and attribution of large spatiotemporal extreme events in Earth observation data [J]. *Ecol. Inform.*, 15:66-73. doi:10.1016/j.ecoinf.2013.03.004

Zscheischler J, Michalak A M, Schwalm C, et al. 2014a. Impact of large-scale climate extremes on biospheric carbon fluxes: An intercomparison based on MsTMIP data [J]. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 28(6):585-600. doi:10.1002/2014GB004826

Zscheischler J, Reichstein M, von Buttlar J, et al. 2014b. Carbon cycle extremes during the 21st century in CMIP5 models: Future evolution and attribution to climatic drivers [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 41(24):8853-8861. doi: 10.1002/2014GL062409