

DOI: 10.20103/j.stxb.202502140299

朱鸿娟,李传华,刘翠.1980—2022 年气候格局变化对植被生产力的影响.生态学报,2025,45(17): - .

Zhu H J, Li C H, Liu C. Impact of climate pattern changes from 1980 to 2022 on vegetation productivity. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

# 1980—2022 年气候格局变化对植被生产力的影响

朱鸿娟, 李传华\*, 刘 翠

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**摘要:** 全球气候变化正驱动气候要素空间配置发生系统性重组, 然而气候格局演变对植被生产力的影响机制仍存在显著认知缺口。通过构建气候格局指数, 定量评估 1980—2022 年全球多尺度区域(全球、大洲、国家及区域)气候格局变化对植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)的影响。研究发现:(1) 全球尺度上, 降水格局趋同化导致 NPP 极显著增加, 温度格局趋同化导致 NPP 极显著减少, 由于降水格局变化对 NPP 的影响远大于温度, 所以降水格局主导气候格局对 NPP 的影响;(2) 跨尺度结果显示, 在全球、洲际(亚洲)、国家(中国)及区域(青藏高原)尺度, 气候格局与 NPP 的响应关系一致, 证实该机制在全球变化变暖背景下具有一定的普适性;(3) 1980—2022 年, 多尺度区域气候格局与 NPP 的规律一致, 即气候格局趋同化导致 NPP 极显著增加。本研究首次实现气候格局对植被生产力影响的定量估算, 为改进地球系统模型中生物地球化学循环模块提供了新的理论框架。

**关键词:** 气候变化; 气候格局; 趋同效应; 植被生产力

## Impact of climate pattern changes from 1980 to 2022 on vegetation productivity

ZHU Hongjuan, LI Chuanhua\*, LIU Cui

College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Global climate change is driving systematic reorganization of the spatial configuration of climatic elements. However, significant knowledge gaps remain regarding the mechanisms through which evolving climatic patterns affect vegetation productivity. This study quantitatively assessed the impacts of climatic pattern changes on net primary productivity (NPP) across multiple spatial scales (global, continental, national, and regional) from 1980 to 2022 by constructing a novel climatic pattern index. Research has found: (1) At the global scale, precipitation pattern convergence caused highly significant NPP increases, while temperature pattern convergence led to highly significant NPP decreases. As precipitation pattern changes exerted substantially greater influence on NPP than temperature patterns, precipitation emerged as the dominant climatic factor governing NPP variations; (2) Cross-scale results showed that the response relationship between climate patterns and NPP was consistent at global, continental (Asia), national (China), and regional (Tibetan Plateau) scales, confirming that this mechanism possessed a certain degree of universality within the context of global warming. (3) From 1980 to 2022, all studied scales exhibited the same fundamental relationship: climatic pattern convergence consistently resulted in statistically significant NPP increases. This study has for the first time achieved a quantitative estimation of the impact of climate patterns on vegetation productivity, providing a new theoretical framework for improving the biogeochemical cycle module in Earth system models.

**Key Words:** climate change; climate patterns; convergence effect; vegetation productivity

基金项目: 国家自然科学基金项目(42161058)

收稿日期: 2025-02-14; 网络出版日期: 2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lch\_nwnu@126.com

全球气候变化在空间维度上呈现显著的非均衡性特征,表现为不同地理单元在增温速率(如北极地区较全球均值高 3 倍)、降水趋势(如副热带干旱区减少 20%,高纬度湿润区增加 15%)等关键气候参数上的分异<sup>[1]</sup>。这种空间异质性通过温度-降水协同作用与极端事件空间重构,驱动了地球表层系统的能量分配与水循环路径发生系统性偏移,最终导致“极地加速暖湿化—副热带持续干热化”等全球气候格局重组<sup>[2]</sup>。气候格局变化改变了植被的生存环境,影响了植被的环境适宜性<sup>[3-6]</sup>,重塑了生态系统的相互作用(如物种竞争、物种迁移)<sup>[7-8]</sup>,对植被的分布、生长、生产力及群落结构产生深远影响。

假设在气候变化空间异质性显著的背景下,某一特定地理单元(如栅格)呈现局部气候因子的相对稳定性,而周边区域的气候参数发生显著改变(如极端增温或降水模式重构),从而使其成为植被迁移的“潜在避难所”或新的栖息地<sup>[9]</sup>。这种由区域间气候差异驱动的植被响应机制,不仅体现于物种分布范围的物理迁移<sup>[10-12]</sup>,更通过物种间竞争动态调整(如生态位替代)<sup>[13]</sup>、资源分配效率变化(如光能/水分利用策略转变)以及生态系统功能级联效应(如碳氮循环重构)等过程<sup>[14]</sup>,系统性重塑植被生产力格局。本研究将此类气候格局空间异质性对植被的间接调控机制,定义为“气候格局对植被生产力的影响”。

然而,由于目标区域气候因子(如年均温、降水量)未发生显著变化,传统植被生产力模型(如基于气候参数直接响应关系的参数模型或过程模型)难以有效识别和量化此类空间关联效应<sup>[15]</sup>。其原因在于现有模型框架主要依赖局部气候变量与植被生产力的线性或非线性映射关系,而忽略了区域间气候梯度变化引发的生态位重组机制。这一认知缺口导致对植被生产力估算存在系统性偏差,进而影响气候变化背景下碳政策的制定。

气候格局对植被的影响有很多实例,如地中海气候区(如加州)的灌丛向局部山谷收缩,因这些区域夜间露水凝结量增加(降水未变,但周围干旱加剧),形成“微型绿洲”,维持较高生产力<sup>[9]</sup>。亚马逊南部周边区域降水减少导致干旱压力扩散,即使核心区降水未变,但水力失效风险(如导管栓塞)通过边缘种群的死亡向核心区传递,引发森林碳汇功能的非线性崩溃<sup>[16]</sup>。

气候格局对植被生产力的影响具有多尺度耦合性(局地气候异质性驱动生态过程)和非线性传递特征(能量-水分再分配引发级联效应)<sup>[17]</sup>,其作用机制涉及大气-生物圈-土壤多界面交互,难以通过传统机理模型实现有效解耦。基于此,本研究提出核心科学假设:在保持区域气候均值(温度、降水)恒定的前提下,气候要素的空间异质性变化(即气候格局演变)能够独立引发植被生产力改变。具体而言,当某一地理区域内各空间单元(栅格)的温度与降水发生非均匀变化,但区域整体气候均值维持不变时,植被生产力的变化可归因于气候格局的重新配置。

基于上述背景和假设,本研究的基本思路是:首先,选择全球、亚洲、中国和青藏高原四个空间尺度,采用本研究团队提出的一个气候格局指标估算气候格局<sup>[18]</sup>;第二,在保持区域平均温度和总降水量不变的条件下,利用模型估算植被生产力;最后,拟合气候格局与生产力之间的数学关系。本研究的具体科学问题是:(1)当区域平均温度和总降水量保持不变时,空间格局变化对全局植被生产力如何影响;(2)气候格局与 NPP 之间的数学关系是什么;(3)这种数学关系是否会因为空间尺度而改变。本研究属于理论探索,因此选择经典的气候学模型 Thornthwaite 模型,该模型仅基于温度和降水数据估算潜在蒸散量,避免了植被动态对结果的干扰,从而使我们能够更清晰地分析气候因子的独立作用,正好符合本研究的技术要求。为了证明结果的科学性,本研究与流行的 CASA 模型估算结果对比,并进行了理论证明。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究依次从全球尺度、洲际尺度、国家尺度以及区域尺度进行研究,依次选择全球、亚洲、中国和青藏高原为研究区。

## 1.2 数据

### 1.2.1 气象数据

全球的气温与降水月尺度数据来源于 CRU 数据集,该数据已得到广泛应用和评价<sup>[19-20]</sup>,温度数据单位为开尔文(K),降水数据单位为 mm,空间分辨率为 0.5°,下载地址为([https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru\\_ts\\_4.04/cruts.2004151855.v4.04/](https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.04/cruts.2004151855.v4.04/))。在本文中主要用于研究全球和亚洲区域的气候格局。

中国的气温和降水月尺度数据集使用了国家青藏高原科学数据中心中国 1km 分辨率逐月降水量和平均气温数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/>),时间分辨率为月,已被广泛应用到生态学、地学等研究领域<sup>[21-24]</sup>。在本文中主要用于研究中国和青藏高原区域的气候格局。

### 1.2.2 植被生产力数据

本文所使用的 NPP 数据产品涵盖了 1981—2019 年全球逐日数据,是南京大学居为民团队利用植被参数遥感数据、气象数据和大气 CO<sub>2</sub> 浓度等驱动日步长的机理性生态模型 BEPS 生成<sup>[25-26]</sup>。下载地址为(<https://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=612f42ee7e28172cbcd3d80b>)。空间分辨率为 0.072727°×0.072727°,此外,本研究利用 Python 代码将数据转化为 TIF 格式。

## 1.3 方法

### 1.3.1 植被生产力估算模型

NPP 由 Thornthwaite 模型<sup>[27]</sup>计算,该模型由降水和温度数据驱动,公式如下:

$$NPP = 3000 [ 1 - 0.0009695(t-20) ]$$

$$V = \frac{1.05r}{\sqrt{1+(1+1.05r/L)^2}}$$

$$L = 3000 + 25t + 0.05t^3$$

式中,NPP 为年 NPP(g C m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>);V 为年实际蒸散量(mm);L 为年平均蒸散量(mm);t 为年平均气温(°C),r 为年总降水量(mm)。

为了证明结果的科学性,本研究还使用了 CASA 模型<sup>[28-29]</sup>对 NPP 进行估算,并与 Thornthwaite 模型的结果进行对比。

### 1.3.2 气候格局计算方法

本研究采用气候趋同度描述气候格局,它是指栅格与原点的欧式距离,即全球各地气温和降水与全球均值的偏离程度,在前期研究<sup>[18]</sup>中已做了充分的阐述。即以每年的平均气温和降水为原点,以气温和降水与全球均值距平(即 anomaly)为 X 和 Y 轴,各栅格的欧式距离代表该栅格距离全球气候均值的差异(anomaly),将其称为温度趋同度和降水趋同度。如果趋同度为 0,表明全球分布是完全一样的。

为了消除量纲,首先对温度和降水数据进行 Z 标准化,计算公式如下:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

式中,x 表示 1980—2022 年历年各栅格的降水和温度的值,μ 和 σ 分别代表多年降水和温度的平均值和标准差。

其次,逐年逐栅格计算温度趋同度(Temperature convergence, Ctmp),降水趋同度(Precipitation convergence, Cpre)和气候趋同度(Climature convergence, Ccli),计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$Cpre = |Pre_j - Pre_{mean}|$$

$$Ctmp = |Tmp_j - Tmp_{mean}|$$

$$Ccli = \sqrt{(Cpre)^2 + (Ctmp)^2}$$

式中,Tmp<sub>j</sub>、Pre<sub>j</sub>分别表示 1980—2022 年每年各栅格的降水和温度的栅格值,Pre<sub>mean</sub>和 Tmp<sub>mean</sub>分别代表该年的温度和降水的平均值。其中,Cpre、Ctmp 和 Ccli 越小越接近均值,表示越趋同。

### 1.3.3 气候格局对植被生产力影响的估算方法

本研究采用变量控制法估算气候格局对植被生产力的影响,基本思路是保证 1980—2022 年期间每年的气温和降水均值相等,因此 NPP 的差异由气候格局变化引起。具体步骤如下:以 1980 年的年均气温和降水量为基准,处理 1981—2022 年数据。以 1981 年降水为例,首先计算 1981 年降水年均值与 1980 年降水量均值的差值,再将这个差值逐栅格加到 1981 年栅格上,从而确保 1981 年的均值与 1980 年均值相同,并且,1981 年的趋同度并没有改变,其他年份的数据处理过程类似。处理后的气温和降水数据代入 Thornthwaite 模型中,以估算 NPP,由于气温和降水的均值相等,所以 NPP 的变化完全归因于气候格局的变化。最后通过拟合气候因子趋同度与 NPP 散点图和线性方程,揭示气候格局与 NPP 之间的数学关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 全球尺度下气候格局与 NPP 的关系

如图 1 所示为 1980—2022 年期间不同气候格局分别与 Thornthwaite 模型和 CASA 模型模拟的 NPP 之间的关系。对于 Thornthwaite 模型估算的 NPP 而言,降水趋同度与降水基准 NPP 的关系表现为负相关,即降水越趋同植被 NPP 呈显著增大趋势,影响值达到  $35\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ ;气温趋同度与温度基准 NPP 呈显著正相关,即气温越趋同 NPP 越小,但影响的幅度相对较小,约  $1.5\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。

温度趋同度和降水趋同度对 NPP 的影响相反,但是由于降水趋同度的影响远大于温度趋同度,因此气候趋同度(由温度趋同度和降水趋同度计算)与 NPP 的关系与降水趋同度和 NPP 的关系完全一致。即当气候越趋同,植被 NPP 呈显著增长趋势,影响值约  $30\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。可以得出,1980—2022 年气候趋同度对植被 NPP 的影响主要受到降水调控。

CASA 模型得出的植被生产力与气候格局之间的关系与 Thornthwaite 模型得出的结论存在数值上的差异,但规律是一致的,证明了 Thornthwaite 模型估算结果的正确性。其中,数值上存在差异的原因有两点:一是两个模型估算的 NPP 值本身存在差异;二是 Thornthwaite 模型只考虑气温和降水的影响,而 CASA 模型还包括其他影响因子,如人类活动、太阳辐射等。

1980—2022 年期间全球的趋同度变化范围很小,趋同度与 NPP 的关系可能没有普遍性。因此设计了从实际趋同度逐步变为 0 的过程,并拟合趋同度和 NPP 的关系。以 1980 年气温和降水数据为基准,各栅格的气温和降水数据 43 次逐渐靠近完全平均分布,这是一个气温、降水和气候趋同度逐渐减小到 0 的过程。这个过程中,随着降水越趋同,植被 NPP 显著增加;气温越趋同,植被 NPP 显著减少,但其影响值相对较小;气候越趋同,植被 NPP 显著增加。趋同度和 NPP 的规律与图 1 一致,只是数值发生了变化。

### 2.2 洲际尺度和国家尺度下气候格局与 NPP 的关系

1980—2022 年期间亚洲和中国地区降水趋同度与植被 NPP 的关系表现为负相关(图 3),即降水越趋同,植被 NPP 呈显著增大趋势,影响值分别为  $57\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$  和  $59.8\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ ;亚洲和中国气温趋同度与植被 NPP 呈正相关,即温度越趋同 NPP 越小,虽然亚洲温度趋同度的影响更为显著,但两者对 NPP 的影响幅度都非常小,约为  $1.6\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$  和  $0.5\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。

温度趋同度和降水趋同度对 NPP 的影响相反,但是由于降水趋同度的影响远大于温度,因此气候趋同度(由温度趋同度和降水趋同度计算)与 NPP 的关系与降水趋同度和 NPP 的关系完全一致。即当气候越趋同,植被 NPP 呈显著增长趋势,影响值约  $57.4\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$  和  $59.3\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。在 1980—2022 年不论是洲际尺度还是国家尺度,气候趋同度对植被 NPP 的影响主要受到降水调控,这与全球尺度所得到结果一致。

### 2.3 区域尺度下气候格局与 NPP 的关系

1980—2022 年期间青藏高原降水趋同度与 NPP 的关系表现为显著负相关(图 4),即降水越趋同,植被 NPP 呈显著增大趋势,影响值为  $24.8\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ ;青藏高原气温趋同度与植被 NPP 正相关,即气温越趋同 NPP 越小,趋同度对 NPP 的影响幅度较小,约  $0.23\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。

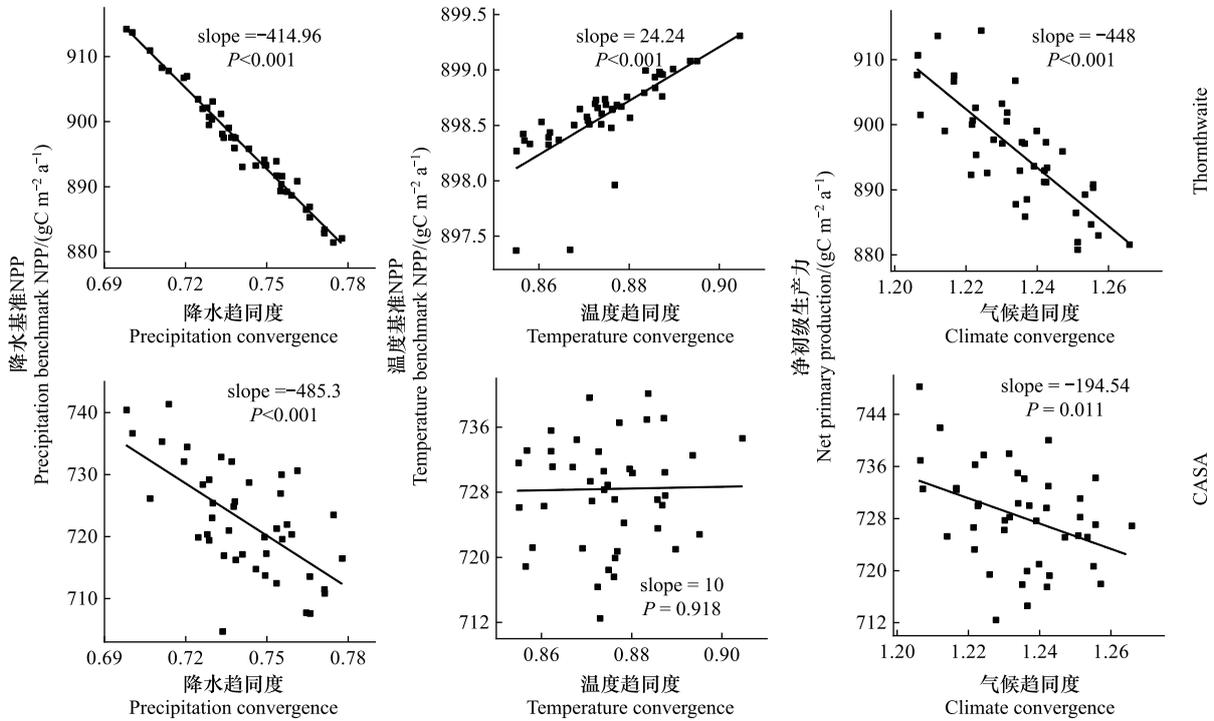


图 1 1980—2022 年全球降水趋同度、温度趋同度和气候趋同度与 NPP 的关系

Fig.1 Relationship between global precipitation convergence, temperature convergence, and climate convergence with NPP from 1980 to 2022

降水基准 NPP:一直输入 1980 年温度,每年的降水均值与 1980 年相等;温度基准 NPP:一直输入 1980 年降水,每年的温度均值与 1980 年相等;净初级生产力:每年的温度和降水的均值与 1980 年相等

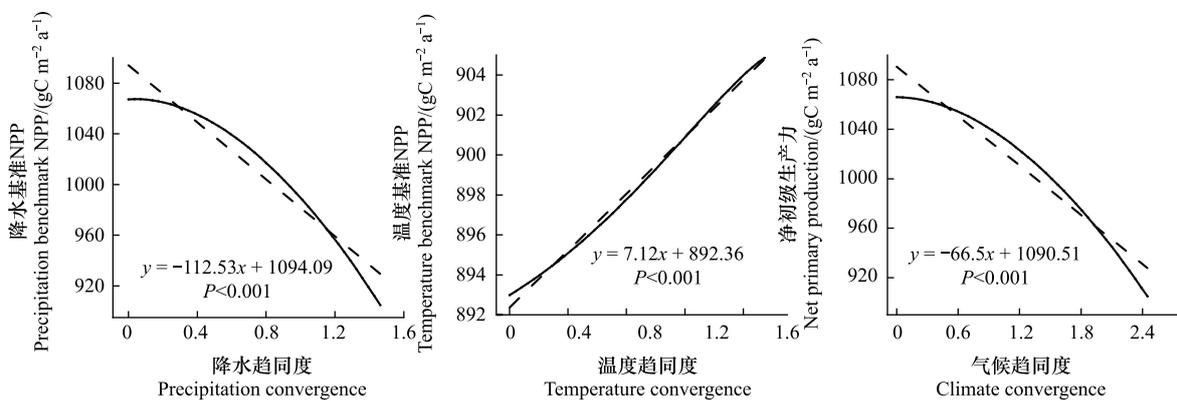


图 2 43 次迭代全球降水趋同度、温度趋同度和气候趋同度与 NPP 的关系

Fig.2 The relationship between global precipitation convergence, temperature convergence, and climate convergence with NPP after 43 iterations

降水基准 NPP:一直输入 1980 年温度,每年的降水均值与 1980 年相等;温度基准 NPP:一直输入 1980 年降水,每年的温度均值与 1980 年相等;净初级生产力:每年的温度和降水的均值与 1980 年相等

青藏高原温度和降水趋同度对 NPP 的影响相反,但是由于降水趋同度的影响远大于温度,因此气候趋同度(由温度趋同度和降水趋同度计算)与 NPP 的关系和降水趋同度与 NPP 的关系完全一致。即当气候越趋同,植被 NPP 呈显著增长趋势,影响值约 24.8g C m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>。在 1980—2022 年青藏高原气候趋同度对植被 NPP 的影响主要受到降水调控,这与全球尺度所得到结果一致。

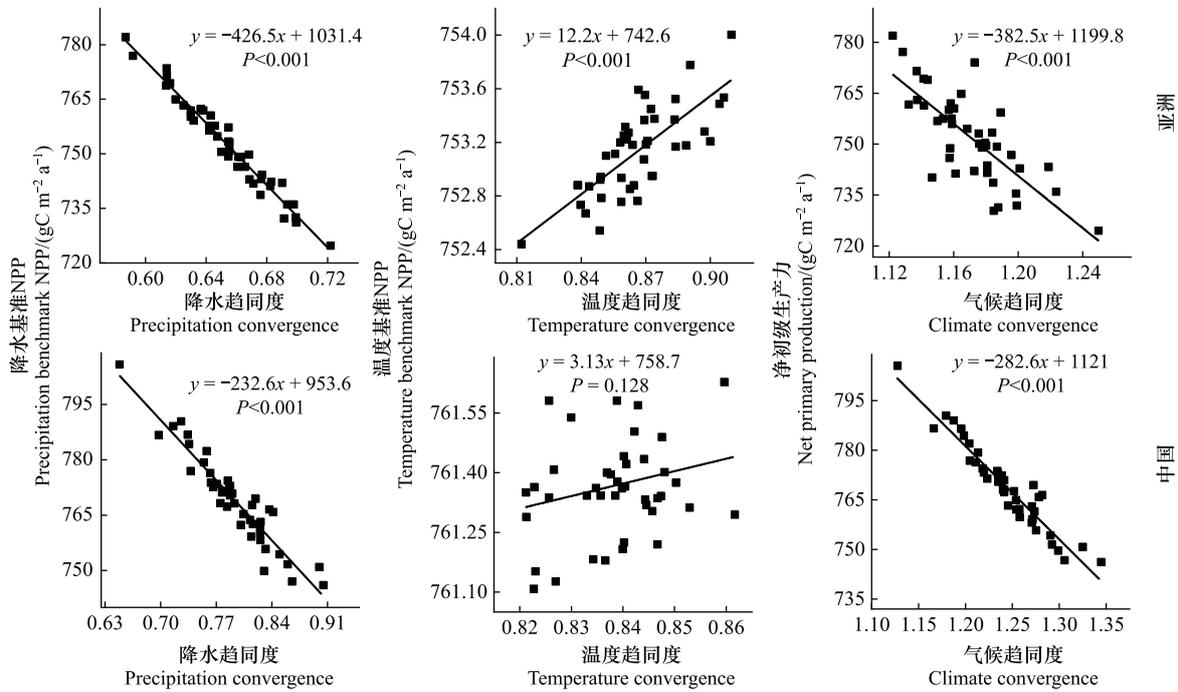


图 3 1980—2022 年亚洲和中国降水趋同度、温度趋同度和气候趋同度与 NPP 的关系

Fig.3 The relationship between precipitation convergence, temperature convergence, and climate convergence with NPP in Asia and China from 1980 to 2022

降水基准 NPP:一直输入 1980 年温度, 每年的降水均值与 1980 年相等; 温度基准 NPP:一直输入 1980 年降水, 每年的温度均值与 1980 年相等; 净初级生产力: 每年的温度和降水的均值与 1980 年相等

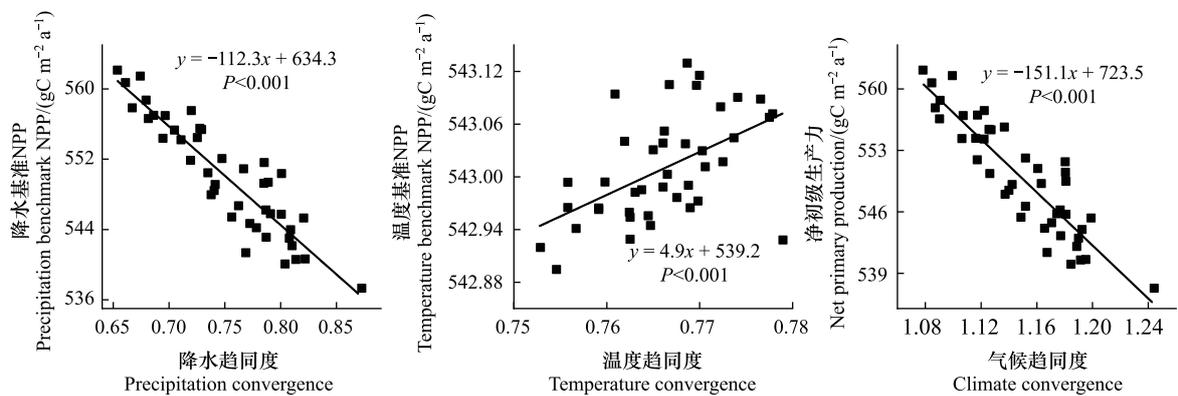


图 4 1980—2022 年青藏高原降水趋同度、温度趋同度和气候趋同度与 NPP 的关系

Fig.4 The relationship between precipitation convergence, temperature convergence, and climate convergence with NPP over the Qinghai-Tibet Plateau from 1980 to 2022

降水基准 NPP:一直输入 1980 年温度, 每年的降水均值与 1980 年相等; 温度基准 NPP:一直输入 1980 年降水, 每年的温度均值与 1980 年相等; 净初级生产力: 每年的温度和降水的均值与 1980 年相等

整体来看, 1980—2022 年在不同的空间尺度区域下, 降水趋同度与 NPP 的关系呈显著负相关, 即降水越趋同, 植被 NPP 呈极显著增加趋势; 温度趋同度与 NPP 的关系呈上升趋势, 除中国呈现不显著上升趋势以外, 其余区域皆呈现极显著上升趋势, 即当温度越趋同 NPP 越小; 不论是哪种空间尺度下, 降水趋同度对 NPP 的影响都大于温度趋同度。因此, 气候趋同度与 NPP 的关系和降水趋同度一致, 即气候趋同度与 NPP 呈现极显著下降趋势, 气候越趋同 NPP 越大。

### 3 讨论

#### 3.1 气候趋同导致 NPP 增加的数学证明

前文提到,气候格局对植被的影响是综合性、系统性和间接性的,很难基于机理去解释。本研究拟基于数学公式进行证明,数学问题假设为:当温度和降水平均分布时,温度和降水的乘积之和为最大值的概率最大。证明如下:Thornthwaite 模型比较复杂,为了简化证明过程,假设  $NPP = T \times P$ ,虽然这个假设并不符合 NPP 与  $T$  和  $P$  之间的规律,但表达了当  $T$  和  $P$  都增加时,NPP 增加的意图。数学假设如下:假设地球有  $i$  个栅格单元, $T[i]$  和  $P[i]$  都大于 0, $T$  和  $P$  的全球均值为固定值  $A$  和  $B$ ,求  $\sum_{i=1}^n T[i] \times P[i]$  为最大值时  $T[i]$  和  $P[i]$  的分布。本研究采用拉格朗日乘法解决这个问题,首先构建拉格朗日函数:

$$f(T, P) = \sum_{i=1}^n T[i] \times P[i] - \lambda \left( \sum_{i=1}^n T[i] - A \right) - \mu \left( \sum_{i=1}^n P[i] - B \right)$$

式中, $\lambda$  和  $\mu$  是拉格朗日乘数。

求拉格朗日函数对  $T[i]$  和  $P[i]$  的偏导数并令其为 0:

$$\frac{\partial f}{\partial T[i]} = P[i] - \lambda = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial P[i]} = T[i] - \mu = 0$$

得:

$$T[i] = \mu$$

$$P[i] = \lambda$$

将结果代入约束条件中,得:

$$\mu n = A$$

$$\lambda n = B$$

解得: $\mu = \frac{A}{n}$ ,  $\lambda = \frac{B}{n}$ 。所以,当  $T[i]$  都等于均值  $\frac{A}{n}$  和  $P[i]$  都等于  $\frac{B}{n}$  时,乘积之和取得最大值。

#### 3.2 降水趋同导致 NPP 增加而温度趋同导致 NPP 减少的说明

在理论上,当温度和降水的分布朝着各自的均值靠近时,可导致  $T[i]$  和  $P[i]$  的乘积之和增加,这是因为在靠近均值的情况下,乘积之和取得最大值的概率会增加,正如 3.1 所证明的。然而,本研究发现温度趋同导致 NPP 减少似乎与 3.1 的理论证明冲突,这是因为气温和降水对 NPP 并不是同等重要,而 3.1 中的两个变量是同等重要的,因此并不能推翻 3.1 的证明。

全球范围内植被的主要胁迫因子与降水有关<sup>[30-33]</sup>。本研究基于实际数据也证明了这一观点,基本思路为:以每年的全球温度和降水均值,把全球分成暖湿、冷湿、冷干和暖干四种气候类型,根据 NPP 产品数据统计得到 1981—2019 年四种气候类型的 NPP 均值,以及全球的 NPP 均值。如图 5 所示可以看出:在全球范围内,暖湿和冷湿两区域的 NPP 平均值(716.4g C m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>和 647.7g C m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)均显著高于全球平均水平(432.7g C m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>),这一现象说明在湿润气候条件下,植被的生长更旺盛,较高的水分供应有利于植被生长<sup>[34-35]</sup>。而冷干和暖干两区域的 NPP 平均值(331.6g C m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>和 151.1g C m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)则显著低于全球平均水平,表明在干燥的气候条件下,植被的生长受到限制,生产力较低<sup>[36-39]</sup>。此外,从 1981 年至 2019 年,暖干和暖湿区域的面积在逐渐扩大,而冷湿和冷干区域的面积在逐渐缩小。这种面积变化趋势与全球气候变暖的现象相吻合,进一步支持了气候格局变化对植被生产力的影响。在暖干区域面积扩大的过程中,尽管降水减少可能对植被生长产生一定的限制作用,但温度的升高可能促进了某些耐旱植被的生长,使得这些区域的 NPP 并没有出现急剧下降<sup>[40-42]</sup>。然而,这种增长可能并不足以弥补冷湿区域面积缩小所带来的 NPP 损失,因为冷湿区域通常拥

有更高的植被生产力和生物多样性<sup>[43-45]</sup>。相比之下,暖湿区域的面积扩大对全球 NPP 的增加起到了更为积极的作用。这些区域不仅拥有充足的水分供应,而且适宜的温度条件促进了植被的快速生长和高产<sup>[46]</sup>。同时,我们也注意到冷湿和冷干区域面积缩小的趋势。这可能是由于全球变暖导致的温度上升,使得原本适宜冷湿植被生长的环境变得不再适宜<sup>[47]</sup>。

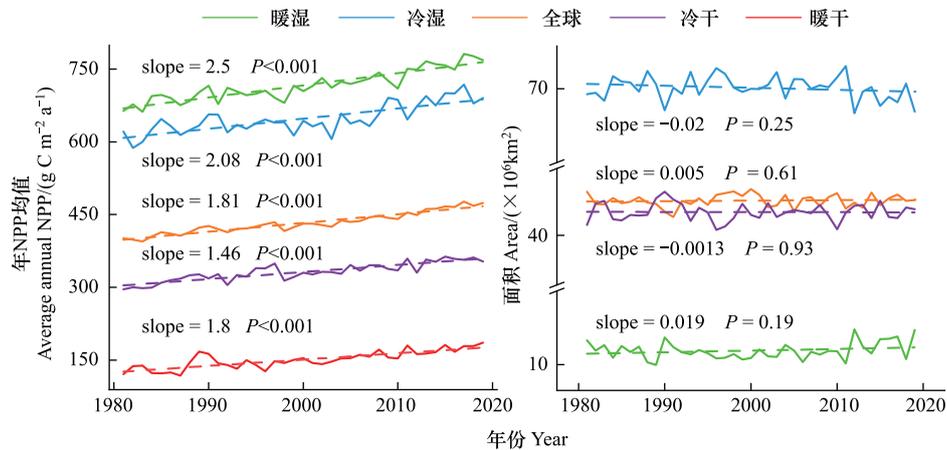


图5 1980—2019 全球不同区域 NPP 均值变化趋势和面积变化趋势

Fig.5 Trends in average NPP and changes in area across different global regions from 1980 to 2019

综合来看,降水是占全球陆地面积 40% 的干旱半干旱区域植被的主要胁迫因子<sup>[48-50]</sup>,温度是高纬度和高寒地区植被(约占 25%)的主要胁迫因子<sup>[51-52]</sup>,两者的协同作用是热带雨林与温带区的主要胁迫因子<sup>[53-56]</sup>。由于干旱区面积大且对降水高度敏感,降水在全球尺度上更具整体影响力。降水格局趋同能减少水分胁迫,因此导致植被生产力增加;温度格局趋同虽会减缓高纬度和高寒地区低温胁迫,但也会抑制热带地区植被光合效率,因此整体导致植被生产力减少。虽然降水和温度趋同化导致生产力相反的变化趋势,但降水对植被生产力的影响大于温度,因此气候趋同导致 NPP 增加。需要指出的是,在特定区域,如水分充足区域的规律还需要进一步验证。还有,如果全球气候剧烈变化,气候格局与 NPP 的关系会改变。

#### 4 结论

研究表明,在不同的空间尺度上,降水趋同能缓解全球水分胁迫从而显著促进植被 NPP 增加,而气温趋同抑制了热带地区植被光合作用导致 NPP 减少,由于前者的影响大于后者,因此气候趋同能显著增加全球植被 NPP。在不同空间尺度上,降水格局和气候格局与 NPP 的关系基本一致,说明该现象在一个相对稳定的气候环境下是一个较普遍的规律。气候格局与 NPP 的规律为:1980—2022 年期间,全球气候格局趋同化导致 NPP 极显著增加,亚洲气候格局趋同化导致 NPP 极显著增加,中国和青藏高原的气候格局趋同化导致 NPP 极显著增加。如果基于此理论建立气候格局与植被生产力的准确数学关系,则有望大大简化全球尺度植被生产力估算模型。本研究的不足之处在于,基于气候学模型得出气候格局对 NPP 的影响值可能与实际值不同,并且,本文仅针对不同空间尺度进行了分析,没有分析不同的气候类型下的影响规律。

#### 参考文献(References):

- [1] Griggs D J, Noguera M. Climate change 2001: the scientific basis. contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Weather*, 2002, 57(8): 267-269.
- [2] Li C H, Zhou M, Dou T B, Zhu T B, Yin H H, Liu L H. Convergence of global hydrothermal pattern leads to an increase in vegetation net primary productivity. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108282.
- [3] Liang Q L, Xu X T, Mao K S, Wang M C, Wang K, Xi Z X, Liu J Q. Shifts in plant distributions in response to climate warming in a biodiversity hotspot, the Hengduan Mountains. *Journal of Biogeography*, 2018, 45(6): 1334-1344.

- [ 4 ] Margalef-Marrase J, Pérez-Navarro M Á, Lloret F. Relationship between heatwave-induced forest die-off and climatic suitability in multiple tree species. *Global Change Biology*, 2020, 26(5): 3134-3146.
- [ 5 ] Pérez Navarro M Á, Sapes G, Battlori E, Serra-Diaz J M, Esteve M A, Lloret F. Climatic suitability derived from species distribution models captures community responses to an extreme drought episode. *Ecosystems*, 2019, 22(1): 77-90.
- [ 6 ] Pan Y X, Yang R, Qiu J X, Wang J Y, Wu J P. Forty-year spatio-temporal dynamics of agricultural climate suitability in China reveal shifted major crop production areas. *Catena*, 2023, 226: 107073.
- [ 7 ] Freeman B G, Lee-Yaw J A, Sunday J M, Hargreaves A L. Expanding, shifting and shrinking: The impact of global warming on species' elevational distributions. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(11): 1268-1276.
- [ 8 ] Suttle K B, Thomsen M A, Power M E. Species interactions reverse grassland responses to changing climate. *Science*, 2007, 315(5812): 640-642.
- [ 9 ] Ackerly D D, Kling M M, Clark M L, Papper P, Oldfather M F, Flint A L, Flint L E. Topoclimates, refugia, and biotic responses to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2020, 18(5): 288-297.
- [ 10 ] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 2011, 333(6045): 1024-1026.
- [ 11 ] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, de Ruffray P, Brisse H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, 320(5884): 1768-1771.
- [ 12 ] Snell R S, Huth A, Nabel J E M S, Bocedi G, Travis J M J, Gravel D, Bugmann H, Gutiérrez A G, Hickler T, Higgins S I, Reineking B, Scherstjanoi M, Zurbriggen N, Lischke H. Using dynamic vegetation models to simulate plant range shifts. *Ecography*, 2014, 37(12): 1184-1197.
- [ 13 ] Wang Y, Pineda-Munoz S, McGuire J L. Plants maintain climate fidelity in the face of dynamic climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(7): e2201946119.
- [ 14 ] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, Swenson N G, Enquist B J. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 2010, 186(3): 593-608.
- [ 15 ] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, Prentice I C, Betts R A, Brovkin V, Cox P M, Fisher V, Foley J A, Friend A D, Kucharik C, Lomas M R, Ramankutty N, Sitch S, Smith B, White A, Young-Molling C. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, 7(4): 357-373.
- [ 16 ] Staal A, Flores B M, Aguiar A P D, Bosmans J H C, Fetzer I, Tuinenburg O A. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(4): 044024.
- [ 17 ] Guan Y L, Liu J G, Cui W H, Chen D L, Zhang J K, Lu H W, Maeda E E, Zeng Z Z, Beck H E. Elevation regulates the response of climate heterogeneity to climate change. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(12): e2024GL109483.
- [ 18 ] Li C H, Liu C, Tsunekawa A, Liu Y F, Yin P, Ma S X, Zhou M, Wu X D. Climate change is leading to a convergence of global climate distribution. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(11): e2023GL106658.
- [ 19 ] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Myneni R B, Chen A P, Chevallier F, Dolman A J, Janssens I A, Peñuelas J, Zhang G X, Vicca S, Wan S Q, Wang S P, Zeng H. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature*, 2013, 501(7465): 88-92.
- [ 20 ] Harris I, Jones P D, Osborn T J, Lister D H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623-642.
- [ 21 ] Li Y G, Liu W, Feng Q, Zhu M, Yang L S, Zhang J T, Yin X W. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi Regions, Northwest China. *Science of The Total Environment*, 2023, 855: 158940.
- [ 22 ] Yu Z, Ciais P, Piao S L, Houghton R A, Lu C Q, Tian H Q, Agathokleous E, Kattel G R, Sitch S, Goll D, Yue X, Walker A, Friedlingstein P, Jain A K, Liu S R, Zhou G Y. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 2022, 13: 5374.
- [ 23 ] Li Y G, Liu W, Feng Q, Zhu M, Yang L S, Zhang J T. Effects of land use and land cover change on soil organic carbon storage in the Hexi regions, Northwest China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 312: 114911.
- [ 24 ] Peng K F, Jiang W G, Ling Z Y, Hou P, Deng Y W. Evaluating the potential impacts of land use changes on ecosystem service value under multiple scenarios in support of SDG reporting: a case study of the Wuhan urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307: 127321.
- [ 25 ] Chen J M, Ju W M, Ciais P, Viovy N, Liu R G, Liu Y, Lu X H. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. *Nature Communications*, 2019, 10: 4259.
- [ 26 ] Liu Y, Zhou Y, Ju W, Wang S, Wu X, He M, Zhu G. Impacts of droughts on carbon sequestration by China's terrestrial ecosystems from 2000 to 2011. *Biogeosciences*, 2014, 11(10): 2583-2599.
- [ 27 ] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world. *Primary Productivity of the Biosphere*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975: 237-263.
- [ 28 ] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [ 29 ] 李传华, 曹红娟, 范也平, 韩海燕, 孙皓, 王玉涛. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例. *生态学报*, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [ 30 ] Zeng X, Hu Z M, Chen A P, Yuan W P, Hou G L, Han D R, Liang M Q, Di K, Cao R C, Luo D N. The global decline in the sensitivity of vegetation productivity to precipitation from 2001 to 2018. *Global Change Biology*, 2022, 28(22): 6823-6833.
- [ 31 ] Liu M, Wang H, Zhai H L, Zhang X C, Shakir M, Ma J Y, Sun W. Identifying thresholds of time-lag and accumulative effects of extreme precipitation on major vegetation types at global scale. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 358: 110239.
- [ 32 ] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Hernández-Clemente R, Zhao Y C, Gaitán J J, Gross N, Saiz H, Maire V, Lehmann A, Rillig M C, Solé R V, Maestre F T. Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.
- [ 33 ] Guan K Y, Pan M, Li H B, Wolf A, Wu J, Medvigy D, Caylor K K, Sheffield J, Wood E F, Malhi Y, Liang M L, Kimball J S, Saleska S R,

- Berry J, Joiner J, Lyapustin A I. Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. *Nature Geoscience*, 2015, 8(4): 284-289.
- [34] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [35] Hu Z Y, Dai Q H, Li H Y, Yan Y J, Zhang Y, Yang X, Zhang X Y, Zhou H, Yao Y W. Response of ecosystem water-use efficiency to global vegetation greening. *Catena*, 2024, 239: 107952.
- [36] Buermann W, Forkel M, O'Sullivan M, Sitch S, Friedlingstein P, Haverd V, Jain A K, Kato E, Kautz M, Lienert S, Lombardozzi D, Nabel J E M S, Tian H Q, Wiltshire A J, Zhu D, Smith W K, Richardson A D. Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity. *Nature*, 2018, 562(7725): 110-114.
- [37] Xu W F, Yuan W P, Wu D H, Zhang Y, Shen R Q, Xia X S, Ciais P, Liu J X. Impacts of record-breaking compound heatwave and drought events in 2022 China on vegetation growth. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 344: 109799.
- [38] Li X Y, Piao S L, Huntingford C, Peñuelas J, Yang H, Xu H, Chen A P, Friedlingstein P, Keenan T F, Sitch S, Wang X H, Zscheischler J, Mahecha M D. Global variations in critical drought thresholds that impact vegetation. *National Science Review*, 2023, 10(5): nwad049.
- [39] Gao S, Liang E Y, Liu R S, Babst F, Camarero J J, Fu Y H, Piao S L, Rossi S, Shen M G, Wang T, Peñuelas J. An earlier start of the thermal growing season enhances tree growth in cold humid areas but not in dry areas. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(4): 397-404.
- [40] Huang K, Xia J Y, Wang Y P, Ahlström A, Chen J Q, Cook R B, Cui E Q, Fang Y Y, Fisher J B, Huntzinger D N, Li Z, Michalak A M, Qiao Y, Schaefer K, Schwalm C, Wang J, Wei Y X, Xu X N, Yan L M, Bian C Y, Luo Y Q. Enhanced peak growth of global vegetation and its key mechanisms. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(12): 1897-1905.
- [41] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, Slayback D, Shabanov N V, Myneni R B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [42] Yang Y T, Guan H D, Shen M G, Liang W, Jiang L. Changes in autumn vegetation dormancy onset date and the climate controls across temperate ecosystems in China from 1982 to 2010. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 652-665.
- [43] Zhang Y, Peng C H, Li W Z, Tian L X, Zhu Q A, Chen H, Fang X Q, Zhang G L, Liu G B, Mu X M, Li Z B, Li S Q, Yang Y Z, Wang J, Xiao X M. Multiple afforestation programs accelerate the greenness in the 'Three North' region of China from 1982 to 2013. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 404-412.
- [44] Goulden M L, McMillan A M S, Winston G C, Rocha A V, Manies K L, Harden J W, BOND-LAMBERTY B P. Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 855-871.
- [45] Kreft H, Jetz W. Global patterns and determinants of vascular plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(14): 5925-5930.
- [46] Stephenson N L. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. *The American Naturalist*, 1990, 135(5): 649-670.
- [47] Park C E, Jeong S J, Joshi M, Osborn T J, Ho C H, Piao S L, Chen D L, Liu J G, Yang H, Park H, Kim B M, Feng S. Keeping global warming within 1.5 °C constrains emergence of aridification. *Nature Climate Change*, 2018, 8(1): 70-74.
- [48] Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 25-51.
- [49] Currier C M, Sala O E. Precipitation versus temperature as phenology controls in drylands. *Ecology*, 2022, 103(11): e3793.
- [50] Zhang Y, Gentile P, Luo X Z, Lian X, Liu Y L, Zhou S, Michalak A M, Sun W, Fisher J B, Piao S L, Keenan T F. Increasing sensitivity of dryland vegetation greenness to precipitation due to rising atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature Communications*, 2022, 13: 4875.
- [51] Elmendorf S C, Henry G H R, Hollister R D, Björk R G, Björkman A D, Callaghan T V, Collier L S, Cooper E J, Cornelissen J H C, Day T A, Fosaa A M, Gould W A, Grétarsdóttir J, Harte J, Hermanutz L, Hik D S, Hofgaard A, Jarrad F, Jónsdóttir I S, Keuper F, Klanderud K, Klein J A, Koh S, Kudo G, Lang S I, Loewen V, May J L, Mercado J, Michelsen A, Molau U, Myers-Smith I H, Oberbauer S F, Pieper S, Post E, Rixen C, Robinson C H, Schmidt N M, Shaver G R, Stenström A, Tolvanen A, Totland Ø, Troxler T, Wahren C H, Webber P J, Welker J M, Wookey P A. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time. *Ecology Letters*, 2012, 15(2): 164-175.
- [52] Piao S L, Tan J G, Chen A P, Fu Y H, Ciais P, Liu Q, Janssens I A, Vicca S, Zeng Z Z, Jeong S J, Li Y, Myneni R B, Peng S S, Shen M G, Peñuelas J. Leaf onset in the Northern Hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 2015, 6: 6911.
- [53] Malhi Y, Aragão L E O C, Galbraith D, Huntingford C, Fisher R, Zelazowski P, Sitch S, McSweeney C, Meir P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(49): 20610-20615.
- [54] Phillips O L, van der Heijden G, Lewis S L, López-González G, Aragão L E O C, Lloyd J, Malhi Y, Monteagudo A, Almeida S, Dávila E A, Amaral I, Andelman S, Andrade A, Arroyo L, Aymard G, Baker T R, Blanc L, Bonal D, de Oliveira Á C A, Chao K J, Cardozo N D, da Costa L, Feldpausch T R, Fisher J B, Fyllas N M, Freitas M A, Galbraith D, Gloor E, Higuchi N, Honorio E, Jiménez E, Keeling H, Killeen T J, Lovett J C, Meir P, Mendoza C, Morel A, Vargas P N, Patiño S, Peh K S, Cruz A P, Prieto A, Quesada C A, Ramírez F, Ramírez H, Rudas A, Salamáno R, Schwarz M, Silva J, Silveira M, Ferry Slik J W, Sonké B, Thomas A S, Stropp J, Taplin J R D, Vásquez R, Vilanova E. Drought-mortality relationships for tropical forests. *New Phytologist*, 2010, 187(3): 631-646.
- [55] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J H, Allard G, Running S W, Semerci A, Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [56] Wang Y X, Peng L, Yue Y M, Chen T T. Global vegetation-temperature sensitivity and its driving forces in the 21st century. *Earth's Future*, 2024, 12(2): e2022EF003395.