

中国温带地区植被物候不对称特征及对气候变化的响应

刘世鹏^{1,2}, 周玉科¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 植被物候是反映气候变化对生态系统影响的重要指标。传统研究多聚焦于植被物候的年际变化分析, 但对植被同一年内生长季形态的不对称性研究较少。本研究基于1982年—2022年GIMMS NDVI 3G长时间序列NDVI数据与NOAA气象数据, 从植被生长季返青期与衰落期在时间长度、生产力水平(NDVI均值)、气温均值、降水总量4个维度上的差异出发, 构建植被物候时长不对称指数 $VPAI_L$ (Vegetation Phenology Asymmetry Index of Length)、植被物候生产力不对称指数 $VPAI_V$ (Vegetation Phenology Asymmetry Index of Vegetation index)、气温不对称指数 CAI_{Temp} (Climate Asymmetry Index of Temperature) 以及降水不对称指数 CAI_{Prec} (Climate Asymmetry Index of Precipitation), 探究中国温带地区植被物候的不对称时空特征及其对气候变化的响应机制。结果表明: (1) 在中国北纬 30° 以北区域, 生长季开始期呈显著提前趋势 (-0.077 d/a)、结束期轻度延迟 ($+0.060$ d/a)、生长季长度总体延长 ($+0.101$ d/a), 导致 $VPAI_L$ 呈持续上升趋势, 而 $VPAI_V$ 呈递减趋势。(2) 研究区内72.9%范围出现衰落期长度显著长于返青期 ($VPAI_L > 0$), 97.1%区域衰落期植被生产力高于返青期 ($VPAI_V > 0$), 特别是农田区域NDVI二次生长高峰使 $VPAI_V$ 显著高于其他植被且 $VPAI_L$ 低于周边地区。(3) 气候驱动机制分析表明: 降水不对称 (CAI_{Prec}) 是调控生长期长度不对称的主要因子 (与 $VPAI_L$ 整体相关系数 $R=0.91$, CAI_{Prec} 对 $VPAI_L$ 变化的贡献率达到41.4%), 同时对春秋生长期不对称也具有负向调节作用; 气温不对称 (CAI_{Temp}) 对生长期长度具有辅助调节作用 ($R=0.47$), 但对生产力水平影响不显著 ($R=-0.39$)。 (4) 通过自组织映射SOM (Self-Organizing Map) 分类, 分析得出物候参数特征分布与植被类型分布表现出显著的空间一致性, 因此可利用植被物候参数进行植被类型制图。综上, 本研究在较大空间尺度全面量化植被返青期与衰落期在4个维度上的不对称性特征及其气候调控机制, 拓展了物候学研究维度, 为区域生态模型与碳循环估算提供季节分配机制支撑, 也为农业种植策略、水资源调控与气候适应性生态管理提供了重要参考。

关键词: 植被物候, 不对称指数, 气候变化, 植被生产力, 遥感, NDVI

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 刘世鹏, 周玉科. 2026. 中国温带地区植被物候不对称特征及对气候变化的响应. 遥感学报, 30(7): 2083–2103

Liu S P and Zhou Y K. 2026. Asymmetric characteristics of vegetation phenology and their responses to climate change in temperate regions of China. National Remote Sensing Bulletin, 30(7): 2083–2103 [DOI: 10.11834/jrs.20265296]

1 引言

植被物候是指植物在生长过程中受遗传、气象、土壤等因素共同影响而产生周期性变化的生物学现象 (王敏钰等, 2022), 它包括树木花草生长周期中萌芽、展叶、开花、落叶等 (协子昂等, 2023), 其与生态系统的物质循环、气候变化等直接

关联。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告 (AR6) 指出, 全球表面温度在2011年—2020年上升了 1.09°C (0.95 — 1.20°C), 其中陆地表面温度上升更高, 达到 1.59°C (1.34 — 1.83°C) (Masson-Delmotte等, 2021)。在全球气候变暖背景下, 植被物候对温度、降水等气候因子的响应机制已成为生态学与气候变化研究的核心。

收稿日期: 2025-08-10; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021xjkk0303)

第一作者简介: 刘世鹏, 研究方向为生态遥感。E-mail: liushipeng24@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 周玉科, 研究方向为生态遥感、时空大数据挖掘研究。E-mail: zhoyk@igsrr.ac.cn

心议题之一 (Liu 等, 2016; Yu 等, 2010; Zeng 等, 2021; 俎佳星和杨健, 2016)。研究区 (30°N 以北) 横跨温带季风气候区、温带大陆性气候区及青藏高原高寒气候区, 涵盖常绿阔叶林、落叶林、草原、农田等多元植被类型, 其物候变化不仅受纬度、海拔等地理梯度调控, 还受极端气候事件、城市化、水分利用效率等因素影响 (Ren 等, 2018; 张晶 等, 2023; 谈幸燕 等, 2023), 形成了复杂的时空异质性特征。近年来, 该区域气温呈显著上升趋势, 年降水量逐渐增加, 极端强降水事件增多 (万辛如 等, 2023), 这种气候背景适合用于探究植被物候对气候变化的响应。

传统物候研究多聚焦于生长季开始日期 SOS (Start of Growing Season)、结束日期 EOS (End of Growing Season)、生长峰值时间点 POP (Position of Peak Value) 及生长季长度 LOS (Length of Growing Season) 的单维度变化 (Cong 等, 2013, 2017; Wang 等, 2020), 而忽视了植被在返青期 (SOS—POP) 与衰落期 (POP—EOS) 的过程性差异。事实上, 植物在生长季内的物质积累与能量分配并非对称过程: 春季升温驱动的返青过程受积温、光照限制, 而秋季衰落过程则受降温、霜冻及光周期调控, 二者对气候因子的响应阈值与敏感性存在显著差异 (Zhou, 2019)。这种差异可表现为生长季时间长度不对称、生产力水平不对称及气候因子响应强度不对称, 进而影响生态系统碳同化与呼吸的季节平衡。北半球中高纬度地区植被生长季延长的现象已被广泛证实, 但返青期提前与衰落期的差异会导致光合碳同化与呼吸消耗的季节性偏移, 直接影响区域碳汇效率的估算精度。农田生产力不对称性 (如华北玉米衰落期 NDVI 高峰) 直接关联灌溉制度和种植结构调整。量化这种差异可为双季作物匹配降水分配 (如调整播种期规避春旱)、优化水资源利用提供依据。然而, 当前对物候不对称性的量化研究仍缺乏统一的指标体系, 尤其在区域尺度上, 不同植被类型的不对称特征及其气候驱动机制尚未明晰。

中国温带地区作为全球气候变化的敏感区域, 其植被物候呈现显著的空间异质性, 各类环境要素与植被物候之间的响应关系引起学者们广泛关注。Li 等 (2023) 研究发现月最低气温是影响 1982 年—2014 年中国北方大部分像元生长季开始期的主导因子。Zheng 等 (2022) 提取了 2011 年—

2020 年中国东北地区经 Savitzky-Golay (S-G) 滤波重建的 MODIS 归一化植被指数时间序列数据中的森林物候, 研究发现季前温度, 尤其是前一个冬季的温度, 对当年的 SOS 有显著影响。已有研究学者选取 1982 年—2005 年的 GIMMS NDVI 遥感数据, 采用动态阈值法提取了青藏高原高寒草地的物候信息, 发现气象因子是不同草地类型植被物候变化的主要影响因素, 植被物候期与温度相关程度更高, 高原地区 3400 m 以上, 植被物候易受到海拔的影响 (马晓芳 等, 2016)。Wang 等 (2014) 对比了中国西北干旱地区 1982 年—2006 年基于实地温度和基于卫星的归一化植被指数观测得出的植被物候指标, 研究揭示了水分可利用性对于干旱地区植被物候方面的重要性。Ren 等 (2023) 提取了 1982 年—2015 年中国东北地区植被的生长季开始时间 (SOS), 发现不同植被类型中积雪覆盖变化对 SOS 影响差异显著。已有研究表明, 1982 年—2022 年中国北方植被生长季整体延长, 但不同区域的 SOS 与 EOS 变化速率存在显著差异 (付永硕 等, 2022), 这种差异本质上反映了物候不对称性的时空分异。然而, 现有研究仍存在三方面局限: 一, 多数研究仅关注 SOS 或 EOS 的单一变化, 缺乏对返青期与衰落期过程差异的系统量化; 二, 对气候因子的分析多限于年均值或生长季总量, 忽略了季节分配不对称性 (如返青期与衰落期的气温、降水差异) 对物候的驱动作用; 三, 区域尺度上物候与气候耦合关系的空间分异规律尚未形成系统性认知, 尤其缺乏对农田、草原、森林等不同植被类型的对比分析。

鉴于此, 为探究中国温带地区植被物候生长季前后的差异及其气候驱动机制, 本研究拟以 1982 年—2022 年 GIMMS NDVI 3G 数据与 NOAA 气象数据为基础, 从植被生长季返青期与衰落期在时间长度、生产力水平 (NDVI 均值)、气温均值、降水总量 4 个维度出发, 构建植被物候时长不对称指数 VPAI_L (Vegetation Phenology Asymmetry Index of Length)、植被物候生产力不对称指数 VPAI_V (Vegetation Phenology Asymmetry Index of Vegetation index)、气温不对称指数 CAI_{Temp} (Climate Asymmetry Index of Temperature) 以及降水不对称指数 CAI_{Prep} (Climate Asymmetry Index of Precipitation), 重点探究: (1) 中国温带植被返青期与衰落期的不对称性时空特征; (2) 气温与降水的季节分配不对称

性对物候不对称性特征的驱动作用；(3) 分析不同植被类型的物候与气候耦合模式之间的差异。并通过 Mann-Kendall 趋势检验、Spearman 相关性分析及自组织映射网络 (SOM) 分类等方法，揭示物候不对称性对气候变化的响应机制，以期为进一步完善区域生态系统管理和土地利用制图提供科学依据。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

30°N 附近是中国乃至东亚地区亚热带与温带气候的过渡带，该纬线附近的气候特征、植被类型及物候节律均呈现显著突变。本研究以 30°N 以北的中国温带区域自然植被作为研究对象，排除了热带、亚热带区域的植被季节性动态不明确的影响。研究区横跨多个气候带，受季风气候影响显著，四季分明，温度和降水季节性变化明显。该地区植被类型复杂多样，主要包括常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶针叶林、草地、灌木、耕地等 (图 1 (a))，植被物候 (如返青期、枯黄期) 对气候因子 (温度、降水) 的响应敏感且可观测性强。研究分别利用 MODIS 卫星的土地覆盖数据和 GIMMS NDVI 3G 数据集剔除了非植被地区 (水体、建筑用地、裸地、积雪冰川等)

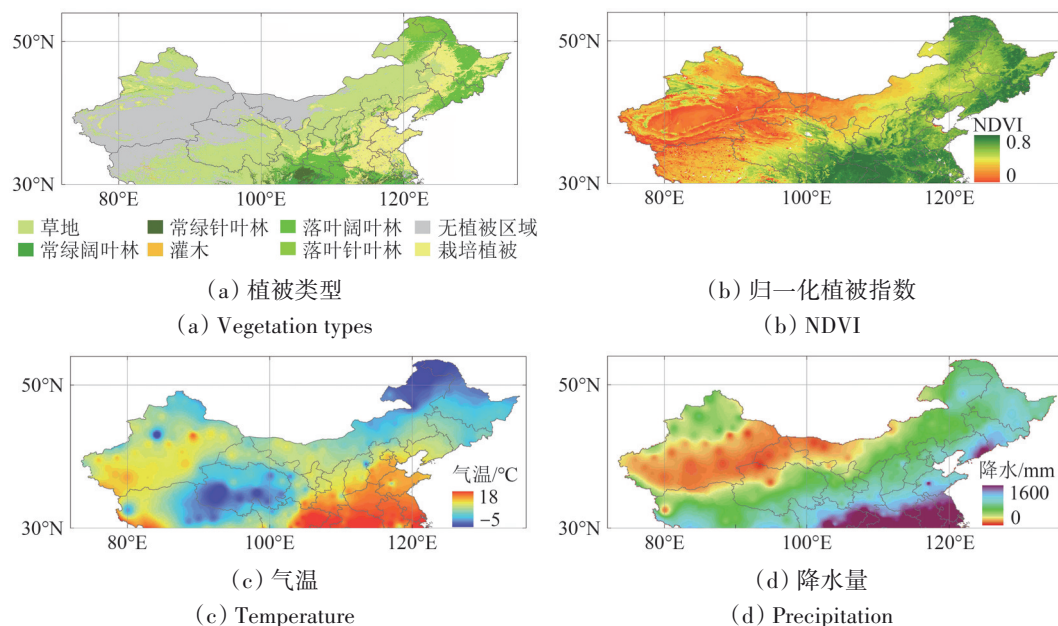
以及 NDVI 年均值 < 0.1 的地区 (植被稀疏地区)，保留植被茂密的区域。

2.2 NDVI 数据

NDVI 数据采用由美国国家航天航空局 (NASA) 开发的第三代长时间序列植被指数数据集 (GIMMS 3G+ V1.2)，其覆盖全球范围，时间跨度长 (1982 年—2022 年)，空间分辨率约为 8 km (0.083°)，时间分辨率为 15 d (Pinzon 等, 2023)。该数据集基于多颗 AVHRR 传感器观测数据生成，并考虑了校准损失、轨道漂移和火山喷发的各种影响，目前广泛应用于植被物候分析、植被生产力估算等诸多领域。中国范围内 NDVI 数据 (图 1 (b)) 在“胡焕庸线”两侧呈现明显的空间分布差异，整体上东南部植被较为茂密，NDVI 值较高，而西北地区、青藏地区植被稀疏，NDVI 值较低。

2.3 气象数据

气温和降水数据来源于美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 下设的国家环境信息中心 (NCEI) (<https://www.ncei.noaa.gov>) 发布的全球站点逐日气象数据集，通过数据筛选、插值、掩膜得到中国范围内 1982 年—2022 年逐日气象栅格数据 (图 1 (c) 和 (d))，空间分辨率为 8 km。



审图号:GS京(2026)0777号

图1 中国温带地区主要植被类型与环境特征

Fig. 1 Major vegetation types and environmental characteristics in temperate regions of China

3 研究方法

3.1 物候特征参数提取

本研究采用双逻辑斯蒂函数 D-L (Double Logistic) 方法对中国 1982 年—2022 年温带地区的 NDVI 时序数据进行重建拟合 (Elmore 等, 2012), 并利用动态阈值法 TRS (Threshold method) 将植被指数增长达到当年该指数振幅一定百分比的时刻定义为生长季的开始时间 (SOS 和 EOS 采用的阈值均为年振幅的 50%), 而该指数降低到当年振幅一定百分比的时刻定义为生长季的结束时间。双逻辑斯蒂函数结合动态阈值法提取各类植被的 SOS、EOS、LOS、春季 NDVI 均值 (Mean Spring value, MSP)、秋季 NDVI 均值 (Mean Autumn Value, MAU) 等物候特征参数准确度较高, 同时在时间和空间上都具有较好的适用性, 适合用于温带地区植被物候特征计算。

3.2 不对称指数定义

本文构建一套植被物候不对称性指数 (VPAI) 和气候不对称指数 (CAI) 是为了量化和描述植被生长季中返青期和衰落期的不对称性及其与气候因子 (如气温和降水) 的关系。VPAI 用于量化植被生长季中返青期 (SOS—POP) 和衰落期 (POP—EOS) 在时间长度、生产力两个维度的不对称性。其中, 返青期和衰落期以植被生长峰值所处的日期 (POP) 为分割点。VPAI 计算公式如下:

$$VPAI_L = \frac{LAU - LSP}{LAU + LSP} \quad (1)$$

$$VPAI_V = \frac{MAU - MSP}{MAU + MSP} \quad (2)$$

式中, $VPAI_L$ 表示植被返青期与衰落期的时长差异, $VPAI_V$ 表示返青期与衰落期的植被生产力差异, LAU、LSP 分别表示返青期和衰落期的时长, MAU、MSP 分别表示返青期和衰落期的 NDVI 均值。 $VPAI_L$ 为正则代表衰落期植被生长期时间长度长于返青期 ($VPAI_V$ 为正则代表衰落期植被生产力高于返青期), 为负则反之, 其绝对值越大, 代表植被返青期与衰落期差异越大, 绝对值越小则代表差异越小。

气候不对称指数 (CAI) 用于量化植被在返青期和衰落期内气温均值 (TEMP) 和降水总和 (PRCP) 的不对称性。CAI 计算公式如下:

$$CAI_{Temp} = \frac{TAU - TSP}{TAU + TSP} \quad (3)$$

$$CAI_{Pr cp} = \frac{PAU - PSP}{PAU + PSP} \quad (4)$$

式中, TAU、TSP 分别表示返青期和衰落期的平均气温; PAU、PSP 分别表示返青期和衰落期的降水总量。 CAI_{Temp} 为正则代表衰落期气温均值高于返青期 ($CAI_{Pr cp}$ 为正则代表衰落期降水总量高于返青期), 反之则代表衰落期低于返青期。CAI 绝对值越大代表返青期与衰落期气候差异越大, 反之差异越小。

受气候条件、干旱等环境因素影响, 温带地区的植被在春季和秋季的生长过程中, 可能表现出优势生长或胁迫生长的不同状态。在保持全年仅有一个主要生长季, 且气候环境无显著极端变化的前提下, 结合当前温带地区植被的生长特征, 可将植被年内的生长过程归纳为 3 种典型形态, 详见图 2: 一是春季生长期与秋季衰退期近似对称, 生长过程稳定 (图 2 (a)); 二是春季快速返青生长, 秋季缓慢衰退, 植被物候曲线左偏 (图 2 (b)); 三是春季缓慢返青, 秋季迅速衰退, 植被物候曲线右偏 (图 2 (c))。本文重点关注后两种不对称性较为显著的生长形态, 并探讨其可能的自然驱动因素。在第 2 种形态中, 春季气温升高、降水充沛且土壤水分适宜, 有利于植被迅速返青生长, 而秋季由于气候条件相对缓和, 植被在光合作用和呼吸作用的共同调节下呈现出缓慢的衰退过程。相反, 在第 3 种形态中, 若春季气候条件不稳定、水分供应不足且温度波动较大, 将延缓植被的返青生长, 使得秋季的有效生长期缩短, 再加之温度快速下降, 植被便会表现出迅速衰退的特征。综合温带地区的气候背景与植被发育特征, 上述两种不对称生长类型能够代表区域内大多数植被的生长模式, 而其他类型则多归属于对称性较强的类别, 如春季与秋季均为快速或缓慢变化的情形, 整体呈现出相对平衡的生长与衰退过程。

3.3 趋势分析

为量化长时间序列物候参数 (如 SOS、EOS) 的变化趋势及其显著性, 研究采用非参数的 Mann-Kendall 趋势检验结合 Sen's 斜率估计进行分析。该方法所采用的数据无需服从正态分布, 对异常值稳健, 适用于气象与遥感等诸多领域的长时间序列分析。计算公式如下:

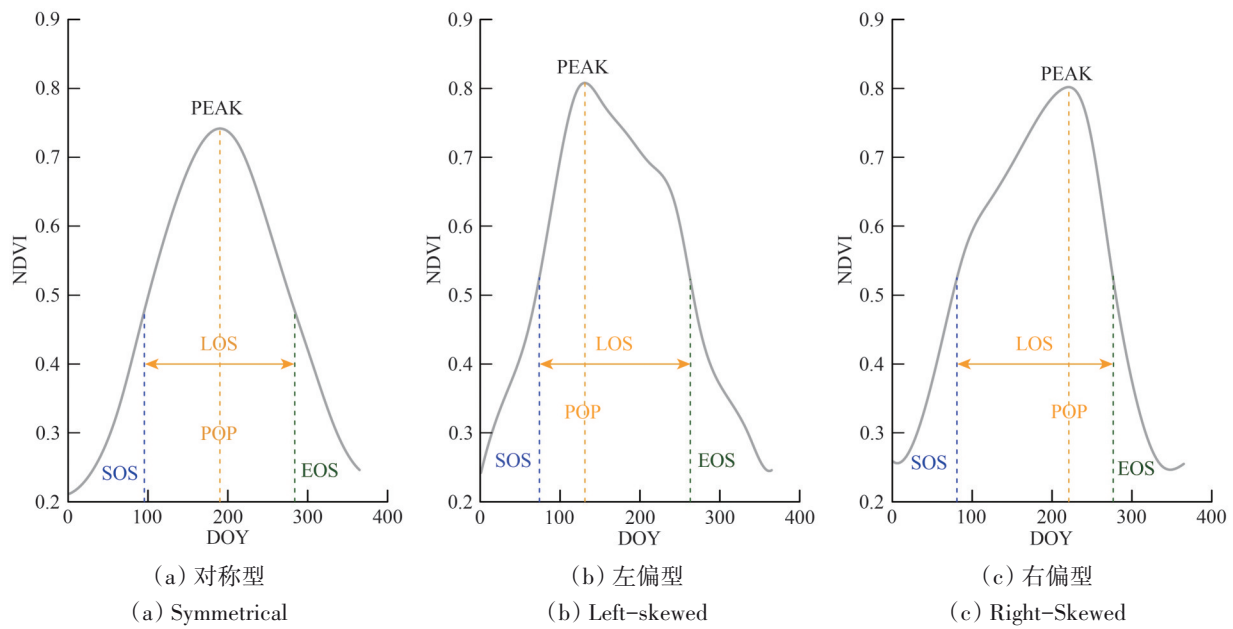


图2 植被关键物候节点及不对称性示意图(NDVI表示归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index);DOY代表一年中的第几天(Day of Year);PEAK表示生长季峰值;SOS表示生长季开始日期;LOS表示生长季长度;POP表示生长季峰值所在日期;EOS表示生长季结束日期)

Fig. 2 Schematic diagram of key vegetation phenological metrics and Asymmetries (NDVI represents the Normalized Difference Vegetation Index; DOY represents the Day of Year; PEAK represents the peak of the growing season; SOS represents the start of the growing season; LOS represents the length of the growing season; POP represents the date of the peak of the growing season; EOS represents the end of the growing season)

$$\beta = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (1 < i < j < n) \quad (5)$$

式中, β 表示研究对象的年际变化趋势, $\beta > 0$ 表示呈上升趋势, $\beta < 0$ 表示呈下降趋势; x_i 、 x_j 分别为第 i 和第 j 年研究对象的数值; n 为时间序列长度。

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (7)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{var } S = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (9)$$

式中, Z_{mk} 为单个序列的统计检验量; S 统计量由研究对象的前后影像数据计算得到; $\text{var } S$ 为 S 统计量的方差, 以上为化简后的求解公式; sgn 为逻辑

判别函数。给定显著性水平 α 下, 当 $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 时, 表明所研究序列在 α 水平上存在显著变化。本研究判断在 0.05 置信水平上研究对象时间序列变化趋势的显著性。

3.4 相关性分析及相对重要性分析

为揭示植被返青期与衰落期各物候参数的不对称性 (VPAI_L 、 VPAI_V) 与气候因子季节分配不对称性 (CAI_{Temp} 、 CAI_{Prep}) 之间的关联, 本研究通过非参数的 Spearman 秩相关检验量化二者之间的非线性关系, 该方法对于异常值不敏感, 且不要求数据为正态分布, 适用于生态与气候数据的相关性分析。计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中, n 表示年份 ($n=41$); x_i 和 y_i 表示进行相关分析的变量; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 表示变量的平均值。 R 的取值范围为 $[-1, 1]$ 。若 $R > 0$, 则说明变量之间呈正相关

关系；若 $R<0$ ，说明二者呈负相关。

本研究采用相对重要性RI (Relative Importance) 分析量化各气候因子对植被物候参数的独立贡献，通过多元线性回归来量化每个网格单元中气候指标在植物生长不对称性长期变化中的各自贡献，解决各气候因子的共线性干扰问题并识别物候变化中最具解释力的主导气候因子。本文通过R中的relaimpo包实现相对重要性分析，计算公式如下：

$$\text{VPAI} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{CAI}_{\text{Temp}} + \beta_2 \times \text{CAI}_{\text{Prep}} + \varepsilon \quad (11)$$

式中，VPAI（代表 VPAI_L 、 VPAI_V ）作为因变量； CAI_{Temp} 和 CAI_{Prep} 作为自变量； ε 表示未提及但可能对植物生长不对称性变化产生影响的其他因素。

RI表示 CAI_{Temp} 和 CAI_{Prep} 对VPAI的相对重要性指数，计算公式如下：

$$\text{RI}(x_p) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^1 \left(\sum_{\substack{S \subseteq \{x_1, x_2\} / \{x_p\} \\ M \subseteq \{x_1, x_2\} \\ n(S)=j}} \frac{R^2(M) - R^2(S)}{\binom{1}{j}} \right) \quad (12)$$

式中， x_p ($p = 1, 2$) 分别表示变量 CAI_{Temp} 和 CAI_{Prep} ； $\text{RI}(x_p)$ 为变量 CAI_{Temp} 和 CAI_{Prep} 的相对贡献度； M 表示回归模型中 CAI_{Temp} 和 CAI_{Prep} 的样本全集； S 为回归样本子集； $R^2(M)$ 和 $R^2(S)$ 分别为针对 M 和 S 计算的测定系数。

3.5 SOM分类和聚类分析

SOM是一种无监督神经网络方法 (Kohonen, 1990)，兼具降维与聚类功能，适用于高维非线性生态数据的模式识别，通过将高维输入数据（如物候特征与不对称指数）映射到低维（通常2D）网格上，保留拓扑结构，输出层神经元（节点）通过迭代学习逼近输入数据的概率分布，最终形成空间明晰的聚类图。为探究植被物候不对称性与气候不对称性的空间分异规律，本研究采用自组织映射网络，将全国温带地区划分为若干同质区域，验证不同植被分布区的物候与气候的耦合特征，同时有效规避了传统方法中权重系数设定的主观性影响，其优越的容错能力和空间拓扑保持特性为植被物候分区提供了新的分析范式，相比传统聚类方法在空间连续性和维度适应性方面展现出显著优势。针对研究区覆盖的诸多栅格像元，我们采用 VPAI_L 、 VPAI_V 、SOS、EOS和LOS共

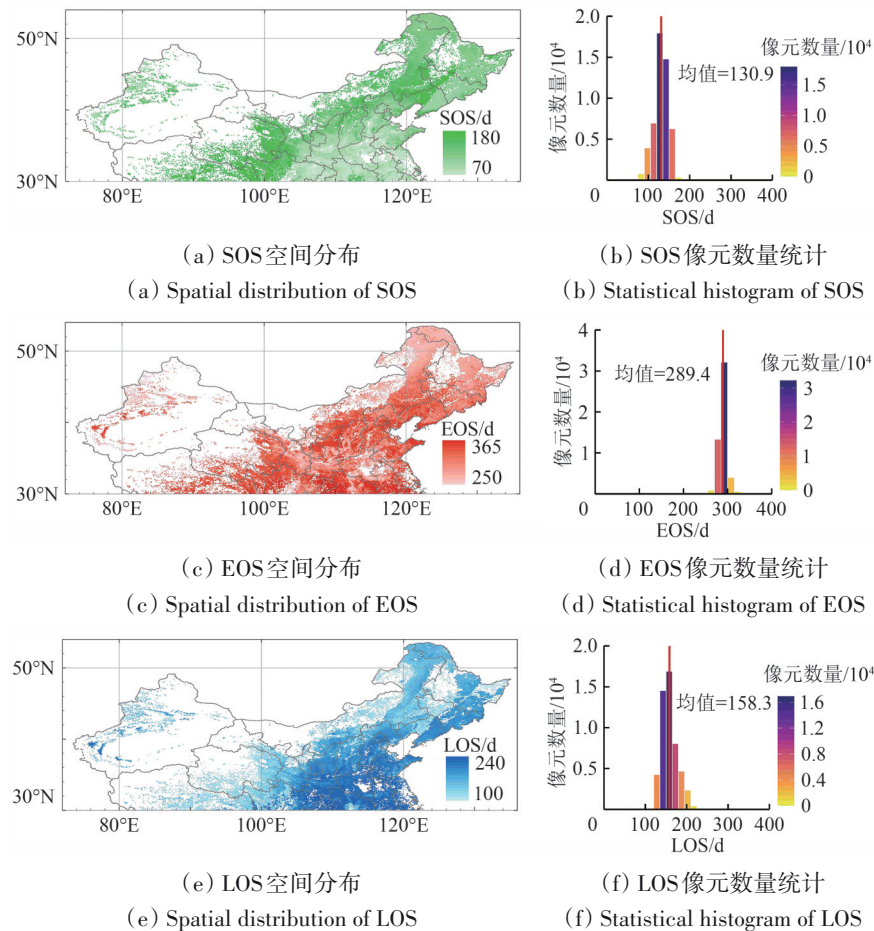
5类核心物候参数作为输入特征，最终确定4×4的六边形网格结构，经过100次迭代训练后模型收敛良好，并通过K-means聚类算法对神经元权重向量进行后续处理，结合轮廓系数分析确定最优聚类数 $K=5$ ，最终实现每个空间像元的物候类型归属判别，生成植被分区专题地图。

4 结果与分析

4.1 植被物候特征

4.1.1 时空变化特征

为分析中国温带地区范围内整体的物候参数特征，计算得到1982年—2022年各类植被物候参数的均值（图3）。可见由于研究区的气候、植被类型等多种因素的不同，植被物候呈现出明显的空间异质性特征。其中：（1）SOS（图3（a））的空间分布呈现显著的“南早北晚、东早西晚”格局。中国西部及东北平原地区（如黑龙江、吉林、辽宁）SOS较晚，而中部及东南沿海地区（如河南、安徽、江苏）SOS普遍较早。在青藏高原东部边缘受地形调控作用影响，SOS差异明显，由东南向西北逐渐推迟。SOS主要集中于一年之中100—160 d（图3（b）），均值为130.9 d），峰值对应温带植被典型生长期起始时间（5月中下旬），与纬度梯度及春季温度变化密切相关；（2）EOS（图3（c））的空间格局表现为“北早南晚、西早东晚”的非对称趋势。黑龙江与内蒙古东部地区、河南、陕西南部地区的EOS最早（对应9月初—10月初），而华南、长江中下游平原及四川盆地华北平原北部EOS最晚。统计分析（图3（d））显示，EOS分布较为集中，多位于270—310 d（均值289.4 d）；（3）LOS（图3（e））的空间分布显示出东南—西北向的梯度特征：东南沿海、长江中下游地区LOS最长（>160 d，全年生长季长于5个月），西北干旱区、内蒙古高原及青藏高原LOS最短（<140 d），黄土高原与东北地区LOS居中（130—170 d）。LOS（图3（f））在时间轴上呈正偏态分布（均值158.3 d），主峰位于140—160 d，表明我国大部分植被生长季长度不足半年，与落叶植物主导的生态系统特征一致。



审图号:GS京(2026)0777号

图3 1982年—2022年中国温带地区植被物候参数多年平均值空间分布图(SOS表示生长季开始日期;EOS表示生长季结束日期;LOS表示生长季长度。柱状图表示3个物候参数统计值分布)

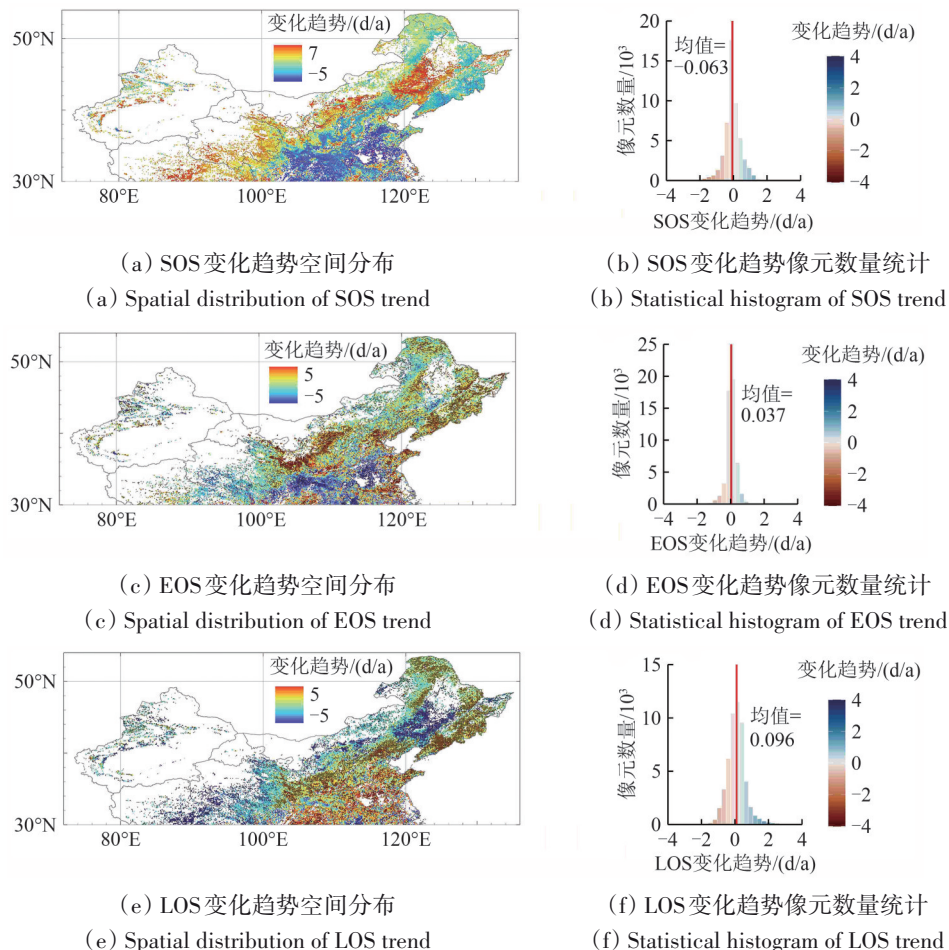
Fig. 3 Spatial distribution of multi-year average vegetation phenological parameters in temperate regions of China from 1982 to 2022 (SOS, EOS, and LOS represent the start, end, and length of the growing season, respectively. The histograms illustrate the statistical distributions of the three phenological parameters)

本文应用Sen斜率对研究区的SOS、EOS和LOS进行逐像元多年趋势分析,同时运用Mann-kendall趋势分析方法评估其显著性,结果见图4。可见(1)SOS变化趋势(图4(a))呈现显著的空间异质性,沿“胡焕庸线”两侧分布差异明显,研究区31%的区域SOS呈现显著提前趋势,22.11%的区域呈现显著延迟趋势,46.89%的区域无明显变化特征。其中华北平原、四川盆地及长江中下游平原表现出最强烈的提前趋势(-0.5 — -2 d/a),反映春季增温对物候的显著驱动作用。东北平原中部、黄土高原地区、青藏高原地区呈现出SOS延迟的趋势。值得注意的是,受地形、气温、降水等多种因素的影响,西南山地与青藏高原之间过渡地带、黄土高原及秦岭-淮河过渡地带差异性较大,由东南向西北地区SOS变化趋势

由提前逐渐变为推迟。SOS变化率多集中在 -1 — 1 (图4(b),均值 -0.063 d/a),与北半球中纬度地区物候提前的结论一致。(2)EOS趋势(图4(c))与SOS呈现显著的空间互补性,整体以推迟为主,研究区20.9%的区域EOS呈现推迟趋势,10.39%的区域呈现提前趋势,68.71%的区域无明显变化特征。华北、东北及黄土高原推迟最显著($+0.5$ — 1 d/a),局部超过 $+2$ d/a,这与秋季温度上升及降雨增多密切相关。相反,秦岭淮河以南地区、高海拔区域出现EOS提前趋势。EOS变化值集中在 -1 — 1 d/a(图4(d)),均值为 0.096 d/a。(3)LOS变化(图4(e))集中在东部农牧交错带、华北平原及西南山地增长最显著($+0.5$ — 2 d/a),而青藏高原边缘、东北平原中部与华南局地出现缩短现象。研究区25.41%的区域LOS呈现延长趋势,

20.43%的区域呈现缩短趋势,整体呈现延长趋势。LOS整体集中于 $-0.5\sim 0.5$ (图4 (f)),呈右偏分布 (均值 $+0.037$ d/a),10 a尺度整体延长约0.37 d。

华北以及山东等农业区“SOS提前+EOS推迟”协同作用导致LOS增幅达 $1\sim 5$ d/10 a,表明通过改变作物物候期可能促进作物生长进而影响产量高低。



审图号:GS京(2026)0777号

图4 1982年—2022年中国温带地区植被物候参数变化趋势图(SOS表示生长期开始日期;EOS表示生长期结束日期;LOS表示生长期长度。黑点所在区域表示通过显著性检验($P<0.05$);柱状图表示3个物候参数变化趋势分布)

Fig. 4 Trends of vegetation phenological parameters in temperate regions of China from 1982 to 2022 (SOS, EOS, and LOS represent the start, end, and length of the growing season, respectively. The regions with black dots indicate statistical significance ($P<0.05$); the histograms illustrate the distributions of the variation trends of the three phenological parameters)

通过计算每年的物候参数均值,绘制得到多年物候特征变化曲线图,结果见图5。可见各物候参数年际变化波动较大。其中:(1)研究区内SOS (图5 (a))呈现显著的提前趋势,SOS的提前速率为 0.077 d/a,在41年研究期内累计提前约3 d。值得注意的是,1998年出现异常低值(DOY=126.3),可能与该年强厄尔尼诺事件导致的春季异常增温有关。SOS的提前趋势与北半球温带地区普遍观测到的春季物候提前现象一致,主要归因于气候变暖

背景下春季积温的显著增加。(2)EOS (图5 (b))表现出微弱的延迟趋势,年均延迟 0.06 d,整体在研究期内仍累计延迟约 2.4 d。EOS的年际波动性较大,可能受气候因子和非气候因子(如光周期限制)等多种因素的共同调控。(3)LOS (图5 (c))呈现显著的延长趋势,LOS以 0.101 d/a的速率增加,在研究期内累计延长约 4.1 d,这一趋势与北半球温带地区普遍观测到的生长季延长现象具有一致性。

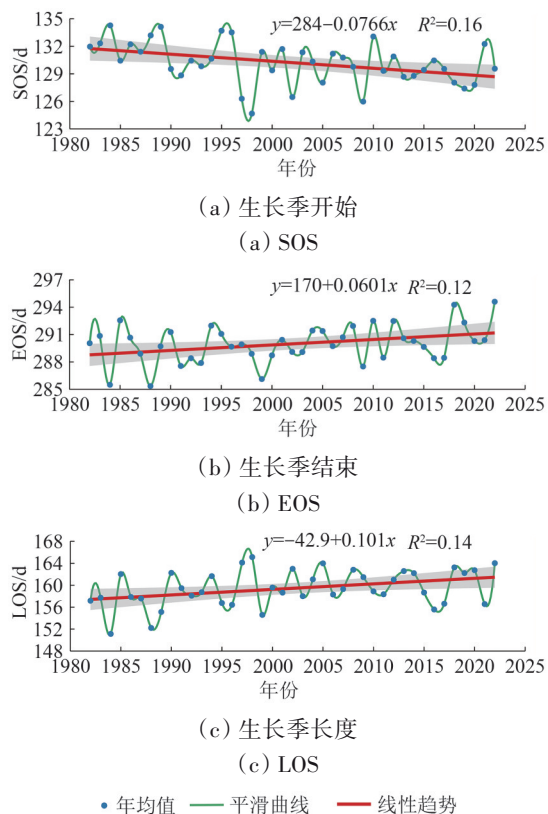


图5 1982年—2022年中国温带地区植被物候参数年际变化情况

Fig. 5 Interannual variation of vegetation phenological parameters in the temperate regions of China from 1982 to 2022

4.1.2 不同植被类型物候特征

由图6可见不同植被类型的全年NDVI曲线特征存在明显差异。其中草地的NDVI均值明显小于其他植被，栽培植被（如山东地区小麦和玉米轮种）存在双峰特征。基于中国温带地区7类主要植被类型的物候参数统计分析（图7）结果表明：不同植被类型在生长季关键物候指标上呈现显著差异。常绿阔叶林其生长季开始最早（约4月底），结束最迟（约10月中下旬），形成最长持续期（LOS均值为181 d）；相较之下，常绿针叶林生长季长度略短于常绿阔叶林，这与常绿树种保持常年光合活性的生物学特性一致。而草地的生长季最短（153 d），反映草本植物对寒冷气候的敏感响应。落叶林的SOS较常绿林显著推迟，而EOS相对提前，导致LOS缩短至160 d左右；栽培植被的物候特征显著偏离自然植被格局：人为干预使其SOS（均值为126 d）明显晚于落叶阔叶林，而

EOS（均值为290 d）早于常绿林类型。从物候不对称性维度看，落叶针叶林呈现最显著的时长不对称性特征（ $VPAI_L$ 均值0.2752），远高于常绿针叶林（0.1413）和栽培植被（0.0892），表明落叶针叶林的衰落期长度明显长于返青期。这种差异源于落叶林通过延长衰落期实现最大化回收氮、磷等关键养分，而在返青期为规避春季冻害（如晚霜）多选择温度稳定后快速展叶以缩短脆弱期，这种独特的生理机制致使其 $VPAI_L$ 显著高于其他植被。草地、常绿阔叶林、常绿针叶林以及栽培植被 $VPAI_L$ 均有约25%地区 $VPAI_L < 0$ ，表明部分干旱区这4种植被受水分限制呈现“返青期延长、衰落期缩短”的生存策略。植被生产力不对称性（ $VPAI_V$ ）揭示更复杂的资源分配模式。栽培植被和草地的 $VPAI_V$ 较高（均值分别为0.0035和0.0033），反映农业系统与草甸在衰落期维持较高叶绿素活性的能力。具体而言，华北平原的冬小麦和玉米轮作形成“双峰生长曲线”，玉米生长期（夏季末）推升衰落期NDVI均值，而典型草原区则因秋季水分再分配（季风降雨）促进植被再生。同时栽培植被的IQR（Interquartile Range，四分位距）最大为0.0025，说明不同农作物的春秋季节生产力水平差异较大。常绿阔叶林 $VPAI_V$ 均值最低仅为0.0014，表明其返青期与衰落期生产力水平（NDVI均值）差异较小，季节波动不明显。

4.2 气候变化特征

中国作为世界上地理面积第三大的国家，其气候特征极为丰富多样。从整体上看，中国温带地区的年均气温呈现出明显的地域性差异（图1（c））。以105°E为界，中国的气候可分为两大区域。在此线以东，年均气温随纬度的降低而逐渐升高，显示出从北到南的温暖化趋势。而在105°E以西，年均气温的分布则更为复杂，呈现出由东南向西北先降低后升高的趋势。这种特殊的分布格局，与该地区的复杂地形地貌，特别是青藏高原的隆起有着密切的关系。年降水量的分布呈现出由东南向西北逐渐递减的趋势，一、二、三级地形阶梯差异显著。东南沿海地区受季风影响，气候湿润，而西北地区地势较高阻挡季风深入降水较少。

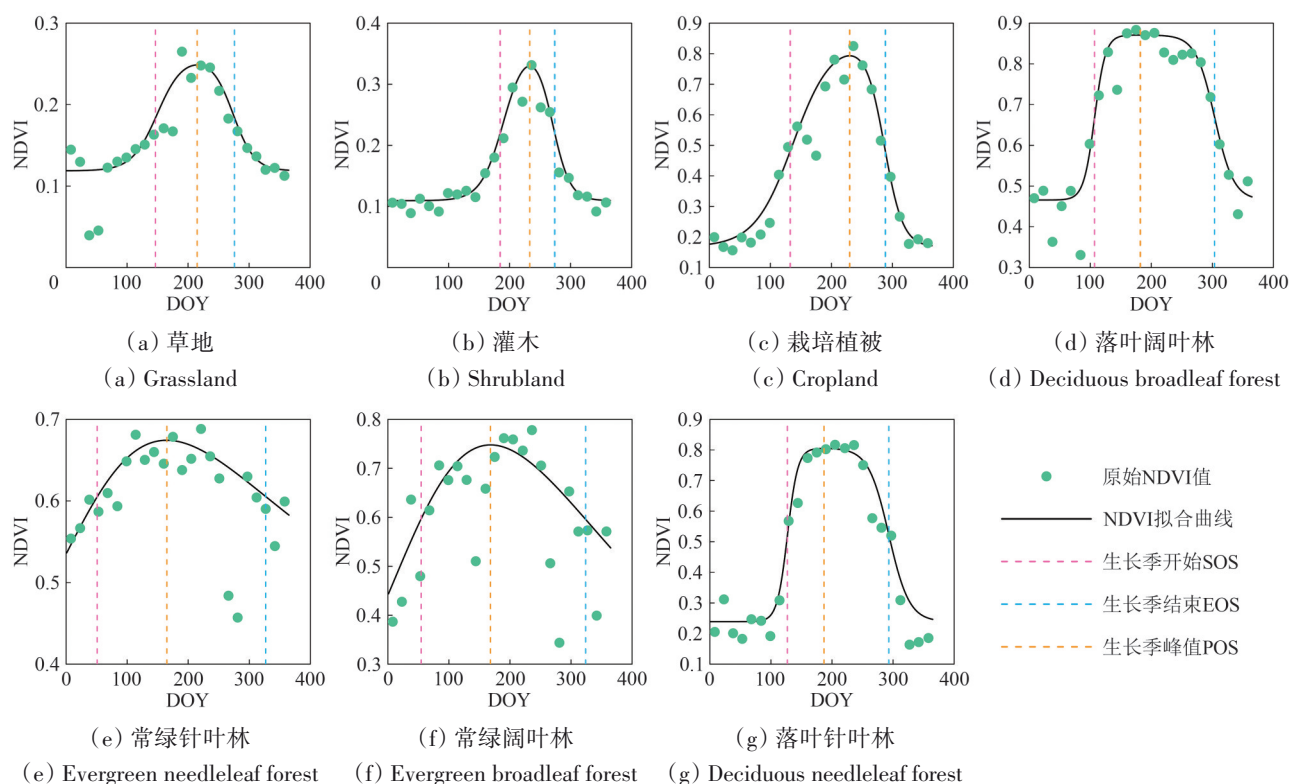
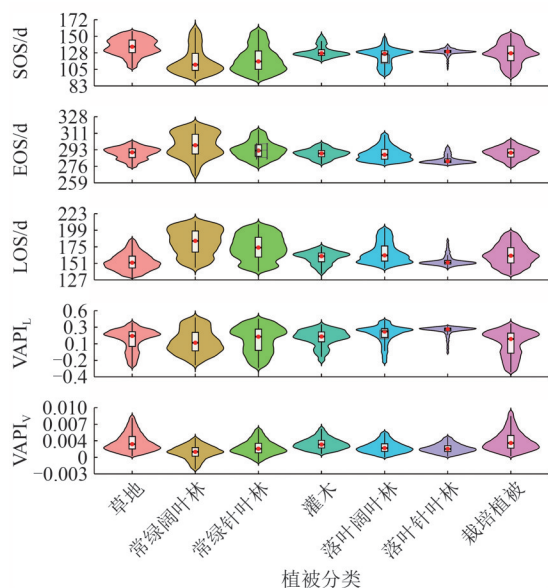
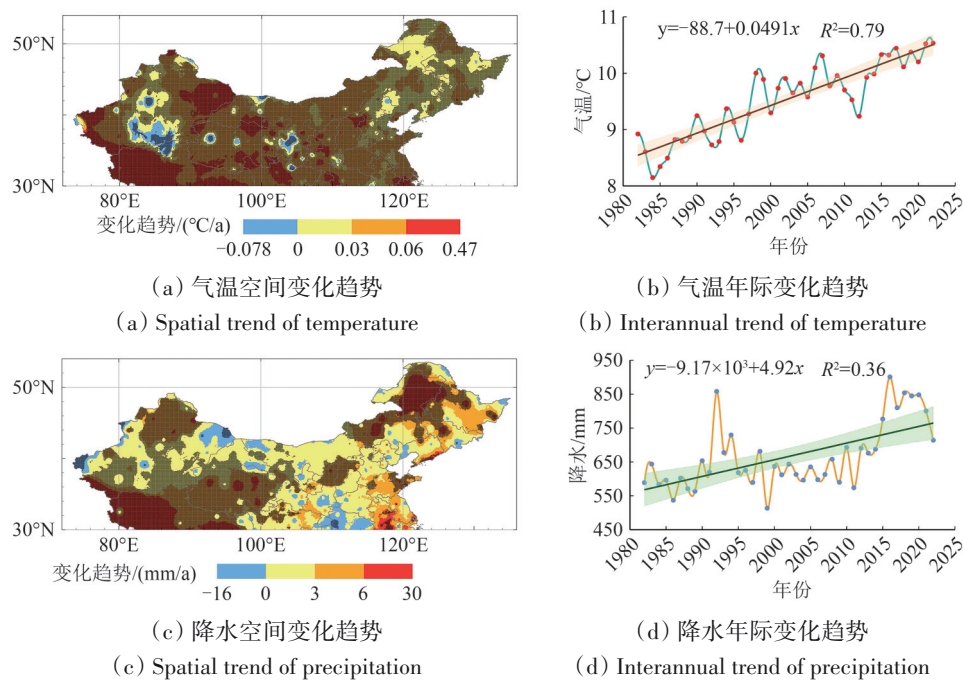


图6 温带地区主要植被类型NDVI变化曲线及关键物候节点

Fig. 6 NDVI variation curves and key phenological points of major vegetation types in temperate regions of China

图7 温带地区主要植被类型各物候参数时间分布图 (SOS表示生长季开始日期;EOS表示生长季结束日期; LOS表示生长季长度;VPAI_L表示植被物候时长不对称指数;VPAI_V表示植被物候生产力不对称指数)Fig. 7 Temporal distribution of phenological parameters for major vegetation types in temperate regions of China (SOS, EOS, and LOS represent the start, end, and length of the growing season, respectively. VPAI_L represents the Vegetation Phenology Asymmetry Index of Length, and VPAI_V represents the Vegetation Phenology Asymmetry Index of Productivity)

对中国温带地区1982年—2022年气温与降水变化趋势进行分析, 结果表明: 研究区在过去40年中经历了显著的气候变化过程。在空间格局上, 86.52%区域呈现出升温趋势(图8(a)), 尤其在新疆南部、黄土高原及东北大部分地区升温最为显著, 年均升温率普遍达到0.03 °C/年以上, 个别区域甚至超过0.05 °C/年, 仅在局部高原或边缘区域表现出轻微降温。与此对应, 年均气温变化趋势图(图8(b))进一步证实了气温总体显著升高的态势。相较之下, 降水的空间分布变化趋势存在较大区域差异(图8(c)), 49.1%区域降水呈现显著上升趋势, 50.07%区域无显著变化特征。西部干旱半干旱地区如西藏、青海及内蒙古东部等地降水总体呈增加趋势, 年均增幅在3—6 mm, 部分地区甚至超过10 mm, 而在湖北省北部、新疆西部等地区则表现为微弱的减少趋势。降水年际变化(图8(d))显示, 研究期内的年均降水量虽有波动, 但总体呈现缓慢上升趋势。综上, 中国温带地区在过去40年中整体呈现出气温升高趋势, 而降水则呈现出空间异质性显著、年际波动较大的变化特征, 整体略有增加但趋势不够显著, 呈现出“升温+弱增湿”的气候变化模式。



审图号:GS京(2026)0777号

图8 1982年—2022年温带地区气温降水变化趋势(黑点所在像元表示通过显著性检验($P < 0.05$),折线图表示气温和降水的年际变化情况)

Fig. 8 Trends of temperature and precipitation in temperate regions of China from 1982 to 2022 (Pixels with dots denote statistical significance ($P < 0.05$). The line charts illustrate the interannual variations in temperature and precipitation)

4.3 不对称指数时空格局分布

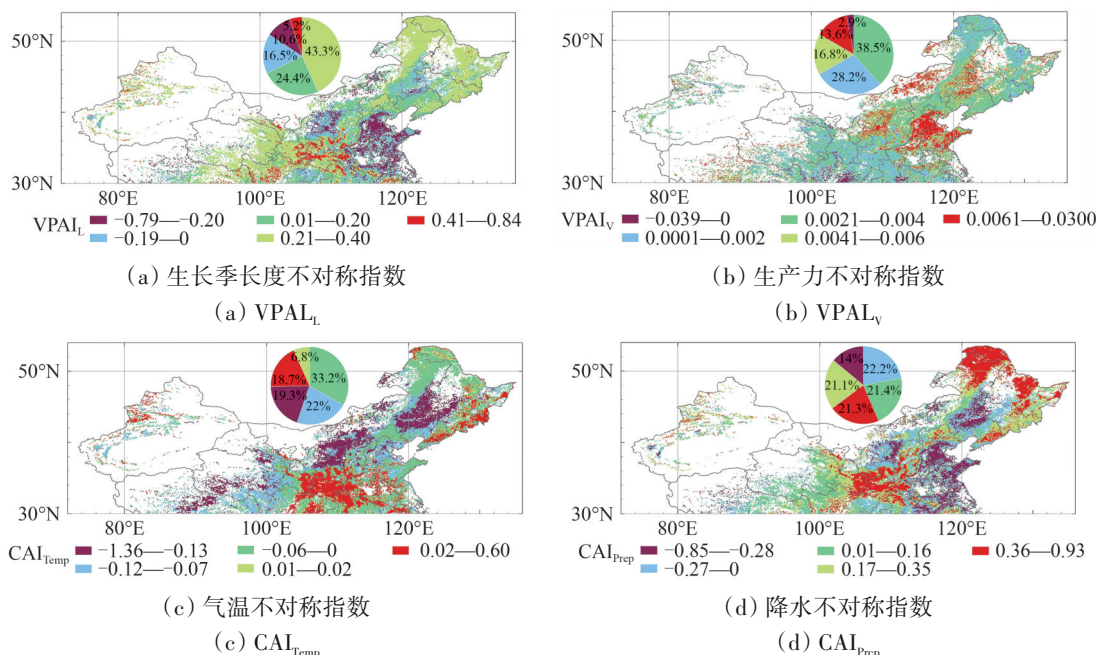
4.3.1 空间格局

VPAI用于描述植被生长期(生长季与衰落季)不同物候参数间的差异,该指数将植被的生长指数进行归一化,并有助于揭示生长季内植物对气候变化的敏感性。研究结果表明:(1) VPAI_L的分布呈现出明显的区域差异(图9(a))。东北平原中部、陕西省北部、中东部平原及沿海地区(河南、山东、江苏) VPAI_L指数值较低(< 0),说明衰落期长度短于返青期长度;而东北地区北部及东部、秦岭以南地区、青藏高原东部地区则出现较高的VPAI_L值(> 0),表明衰落期长度远大于返青期。研究区范围内72.9%的区域VPAI_L值为正,表明大部分区域衰落期长度长于返青期长度。东北平原(42°N — 48°N)和青海省东南部VPAI_L绝对值普遍低于0.2,反映生长季时间分配相对均衡。研究区84.2%的VPAI_L绝对值 < 0.4 ,而高不对称性区域(> 0.4)仅占15.8%,表明我国大部分生态系统具有稳定的物候时间分配模式。(2) VPAI_V

的空间异质性同样较为显著(图9(b)),除四川盆地少部分地区VPAI_V < 0 外(返青期NDVI均值大于衰落期NDVI均值,占比2.9%),全国绝大部分地区VPAI_V > 0 (返青期NDVI均值小于衰落期NDVI均值,占比97.1%)。研究区38.5%的VPAI_V < 0.0002 ,返青期与衰落期植被生产力差异较小,符合温带落叶林的自然生长规律;而高值区(VPAI_V > 0.006 ,占比13.6%)集中分布在山东、河北南部农耕地区,原因在于该地区农作物一年两熟,7、8月份为玉米生长旺季,NDVI值骤升,扩大了植被返青期衰落期的生产力差异。(3) CAI_{Temp}分布呈现“南高北低、东高西地”的分布特征(图9(c))。秦岭淮河以南地区(如陕西省南部、河南省西部)、东北地区东部(国境线附近)CAI_{Temp}值为正,占比25.5%,反映该地区植被衰落期平均气温低于返青期平均气温。全国绝大部分地区(尤其是黄土高原北部、东北平原中部)CAI_{Temp} < 0 ,占比74.5%,反映该区域植被返青期气温高于衰落期气温。(4) CAI_{Prec}高值区(> 0.355)集中在陕西省南部、甘肃省东南部以及中国北纬 50°N 附近(图9(d)),

说明该地区植被衰落期降雨量明显高于返青期降雨量，而陕西省北部、山东、安徽等省份以及东北平原中部地区 $CAI_{Prep} < 0$ ，对应该区域植被返青期降水总量高于衰落期。整体来看，全国大部分区

域（占比 63.8%）植被衰落期降雨量高于返青期降雨量，这与我国季风气候特征符合，春季温和少雨，夏秋炎热多雨。



审图号:GS京(2026)0777号

图9 1982年—2022年中国温带地区不对称指数多年均值空间分布图(饼图代表各分类面积占比)

Fig. 9 Spatial distribution of multi-year average asymmetry index in temperate regions of China from 1982 to 2022 (The pie charts represent the area proportion of each classification)

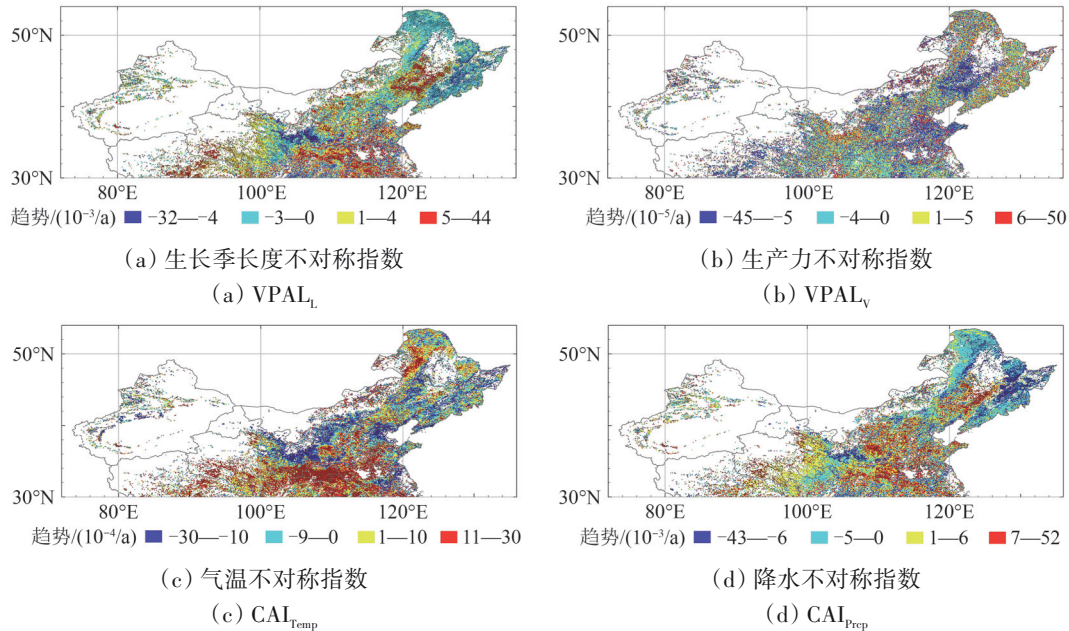
4.3.2 不对称指数趋势分析

为深入揭示植被生长季中返青期与衰落期的不对称性演变特征及其潜在驱动机制，本文从时间和空间两个维度系统分析了1982年—2022年中国温带地区植被物候与气候不对称的变化趋势。通过逐像元趋势分析，可以全面刻画各区域返青期与衰落期在时长、生产力及其气候因子响应方面的不对称演变模式，进而揭示典型区域物候过程对气候变化的敏感性和差异性，结果见图10。可见：(1) $VPAL_L$ (图10(a))显示了植被生长季中返青期与衰落期时长差异的变化趋势。从空间分布上看，大小兴安岭、长白山地区、黄土高原西部主要呈现缩减趋势（蓝色区域），表明在这些区域衰落期时长相对于返青期有所缩短，即返青期更长；而在华中地区、长江中下游地区以及

东北平原等区域则以红黄色为主，反映出衰落期相对更长或返青期缩短的趋势显著增强。(2) $VPAL_V$ (图10(b))反映了返青期与衰落期NDVI均值差异的变化趋势，主要衡量两阶段生产力强度的偏移。东北平原和山东河南地区大面积出现负向趋势（蓝色区域），表明返青期NDVI均值相对衰落期逐渐缩小，即春季生长强度减弱，秋季相对增强，这在一定程度上体现出秋季光温条件改善的影响。而在其他区域变化相对较弱或趋于稳定，生产力不对称性波动较小。(3) CAI_{Temp} (图10(c))展示了返青期和衰落期内平均气温差异的变化趋势，是影响植被物候不对称性的重要气候因素。北纬35度以南大部分区域表现出显著的正向趋势（红色），表明该区域衰落季温度升高或者返青期温度下降，从而对生长季划分产生影响；而部分西北内陆区、华北平原局部、东北部分地区则

显示出负向变化（蓝色），说明返青期气温相较于衰落期在逐年升高，可能与春季气温快速回升有关。这种区域差异表明，春秋气温升温不同步，进而驱动物候过程不对称发展。(4) CAI_{Prep} （图10（d））揭示了返青期与衰落期降水总量的差异趋势。黄土高原东部、华北及东北平原地区显示正向变化，表明秋季（返青期）降水增加幅度大于春季；而

在甘肃省东部、大小兴安岭以及长白山地区则出现显著的负向趋势，说明返青期降水增多或衰落期降水减少的现象较为突出。总体上，降水在两个生长期间的不对称性呈现较强的区域性差异，可能对植被在不同季节的生长节奏产生重要调控作用，特别是影响返青期开始时间和衰落期持续性。



审图号:GS京(2026)0777号

图10 1982年—2022年中国温带地区不对称指数变化趋势图(黑点所在像元表示通过显著性检验($P < 0.05$))

Fig. 10 Trends of asymmetry index in temperate regions of China from 1982 to 2022 (Pixels with black dots denote statistical significance ($P < 0.05$))

通过计算研究区范围内逐年不对称指数的均值，分析近41年不对称指数均值变化趋势（图11）。结果表明：(1) 中国温带地区 $VPAL_L$ 呈现显著的上升趋势（图11（a）），年均增长值为0.0018，研究期内累计增加0.074。 $VPAL_L$ 增长表明植被返青期缩短，衰落期延长，两个生长期之间的差异逐渐扩大。(2) $VPAL_V$ 呈现显著的下降趋势（图11（b）），年均减少-0.0000365，相当于41年间累计下降约0.0015。 $VPAL_V$ 下降表明衰落期与返青期之间的生产力差异在逐渐缩小。(3) 气温不对称指数 (CAI_{Temp}) 呈现微弱的正向变化趋势且逐渐趋近于0（图11（c）），其年均增长0.00037，相当于41年间累计增加约0.015，植被春秋季节气温差异逐渐缩小。

CAI_{Temp} 整体变化幅度为0.077（-0.093—-0.016），表明温度季节分配格局存在显著年际波动。(4) 降水不对称指数 (CAI_{Prep}) 呈现微弱的正向增长趋势（图11（d）），植被春秋季节降水总和差异逐渐扩大。在1999年出现一个异常值0.2539，原因是在1999年华北地区出现大面积的严重干旱，植被返青期出现大面积的无降水现象，促使 CAI_{Prep} 的值出现大幅度的上升（最大值为1），致使全年的 CAI_{Prep} 的值整体上升。综上所述，1982年—2022年中国温带地区植被在生长季时长、生产力方面的不对称性指数空间分布特征和时间演变趋势均存在显著差异，这种不对称性推测主要受到区域气温变暖和降水季节分配变化的共同驱动。

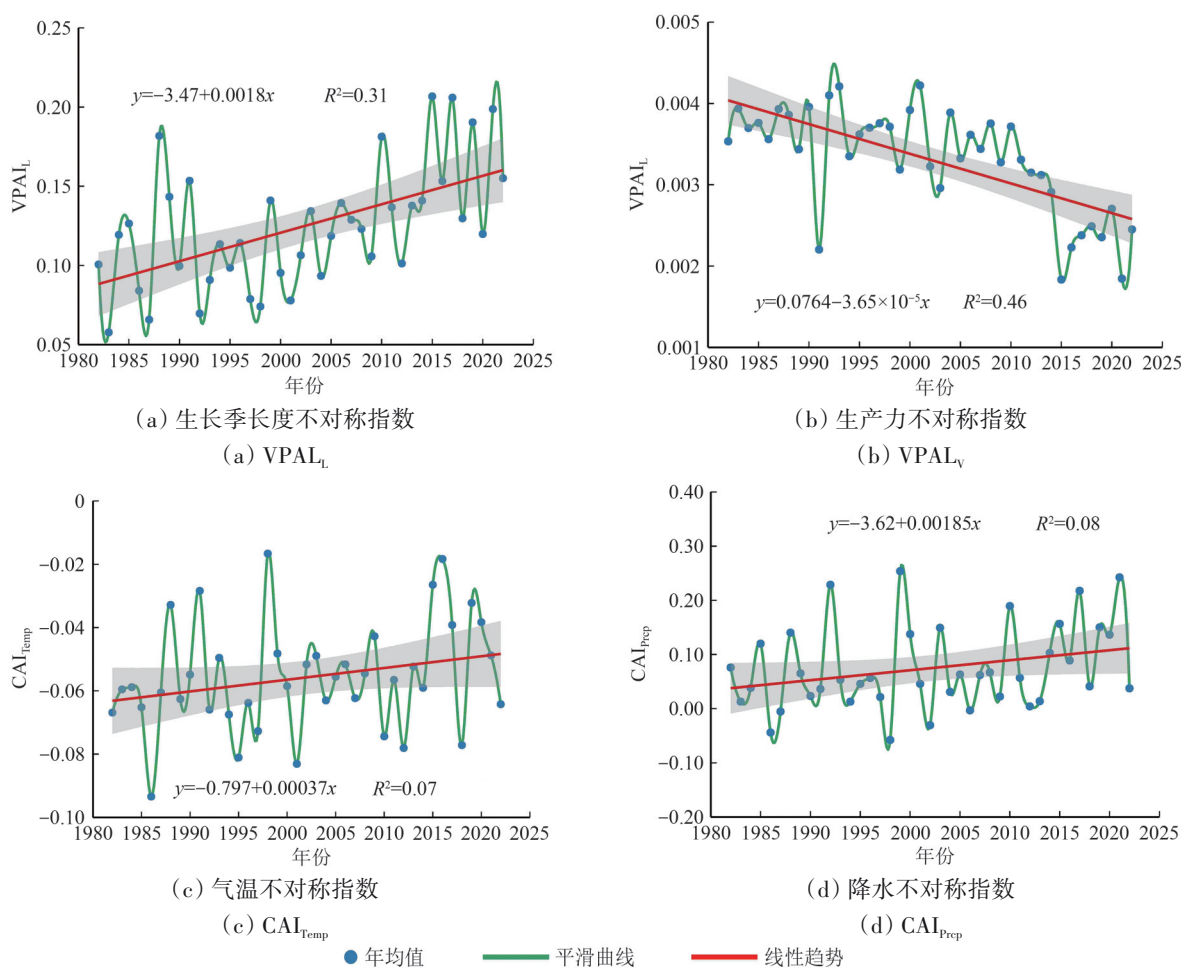


图 11 1982 年—2022 年 4 种不对称指数年际变化情况

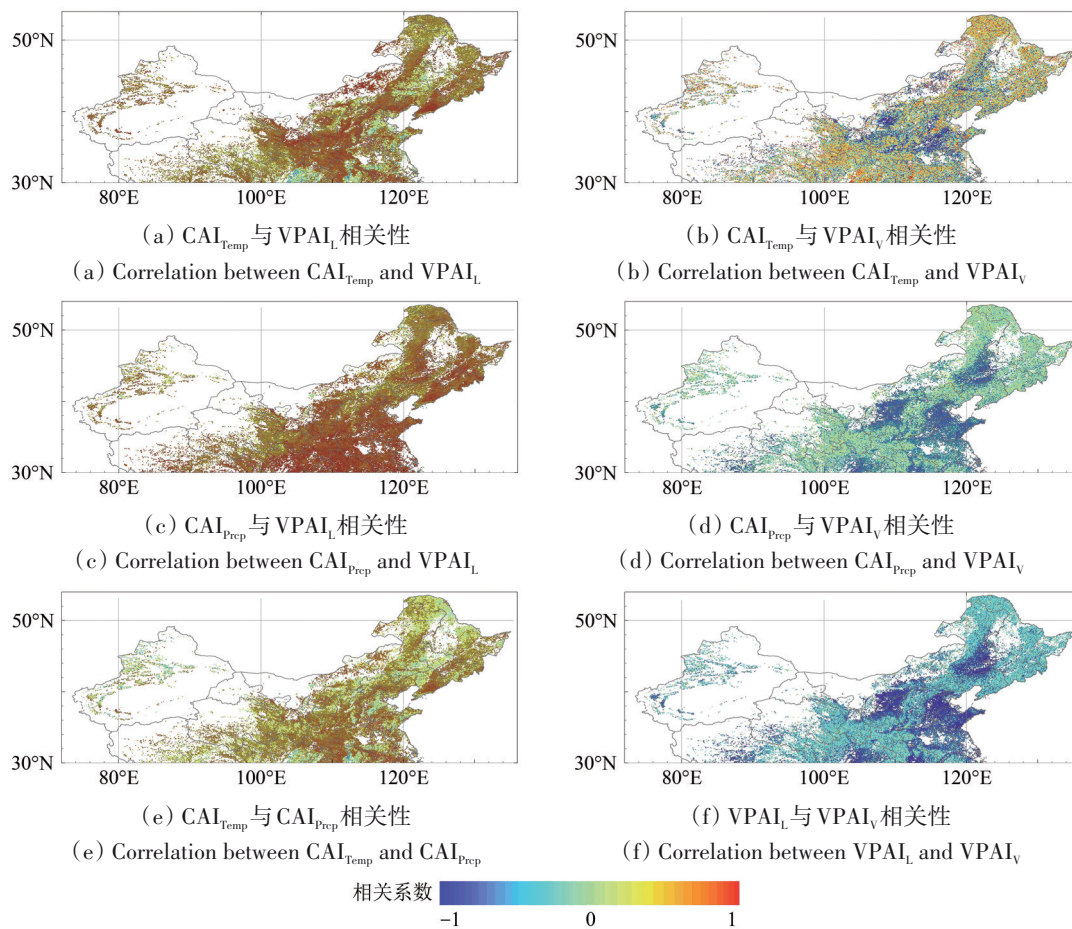
Fig. 11 Interannual variation of four asymmetry indices from 1982 to 2022

4.4 植被物候对气候因子的响应

4.4.1 相关性分析

基于全国温带地区 1982 年—2022 年地表植被与同期气候数据, 分别计算了植被返青期与衰落期在时长 ($VPAI_L$) 和生产力水平 ($VPAI_V$) 两个维度的物候不对称指数, 与两个时期内平均气温 (CAI_{Temp}) 和总降水量 ($CAI_{P_{rep}}$) 的气候不对称指数之间的逐像元 Spearman 相关系数 (图 12)。研究结果表明: (1) CAI_{Temp} 与 $VPAI_L$ 在研究区范围内 78.04% 区域呈显著正相关 (图 12 (a)), 表明返青期与衰落期时长差异越大时, 气温在两期分布不对称性越强。在东北平原局部地区、四川省东部、湖北省中部地区二者相关性不显著。(2) $CAI_{P_{rep}}$ 与 $VPAI_L$ 在中国温带 90.62% 区域呈现中等到强正相关 (图 12 (c), R 值 0.5—1.0), 表明降水在返青与衰落期的分配差异与时长差异存在同步性。(3) CAI_{Temp} 与 $VPAI_V$ 在研究区范围内大部分地区不存在显著相

关性 (图 12 (b), 显著区域占比仅为 17.47%), 存在显著相关性的地区零散分布在研究区范围内, 在陕西内蒙古交界地区、山东河南交界地区存在少量聚集区, 且二者存在显著负相关。(4) $CAI_{P_{rep}}$ 与 $VPAI_V$ 在研究区范围内 35.7% 地区存在显著的负相关 (图 12 (d)), 如华北平原、东北平原、陕西内蒙古交界等地区, 其余地区不存在显著相关性。表明降水在植被在枯黄期的降水高于返青期时, 返青期的 NDVI 均值越高于枯黄期的 NDVI 均值。(5) $CAI_{P_{rep}}$ 与 CAI_{Temp} 之间大部分区域呈现正相关 (图 12 (e)), 说明当 $CAI_{P_{rep}}$ 增大 (枯黄期降水越高于返青期) 时, CAI_{Temp} 也会随之增大 (CAI_{Temp} 为负值趋于 0), 即枯黄期返青期气温差异缩小。(6) $VPAI_L$ 与 $VPAI_V$ 在山东、河北南部、东北平原地区呈现显著的负相关 (图 12 (f)), 说明该地区植被枯黄期的时间越长于返青期, $VPAI_L$ 愈大, $VPAI_V$ 愈小, 即枯黄期与返青期的植被 NDVI 均值差异会缩小。



审图号:GS京(2026)0777号

图 12 4 个不对称性指数之间的相关性分布图($VPAI_L$ 表示植被物候生长时长不对称指数; $VPAI_V$ 表示植被物候生产力不对称指数; CAI_{Temp} 表示气温不对称指数; CAI_{Precp} 表示降水不对称指数。黑点所在像元表示通过显著性检验($P < 0.05$))

Fig. 12 Spatial distribution of correlations among four asymmetry indices ($VPAI_L$ stands for Vegetation Phenology Asymmetry Index of Length; $VPAI_V$ stands for Vegetation Phenology Asymmetry Index of Productivity; CAI_{Temp} stands for Climate Asymmetry Index of Temperature; and CAI_{Precp} stands for Climate Asymmetry Index of Precipitation. Pixels with black dots denote statistical significance ($P < 0.05$))

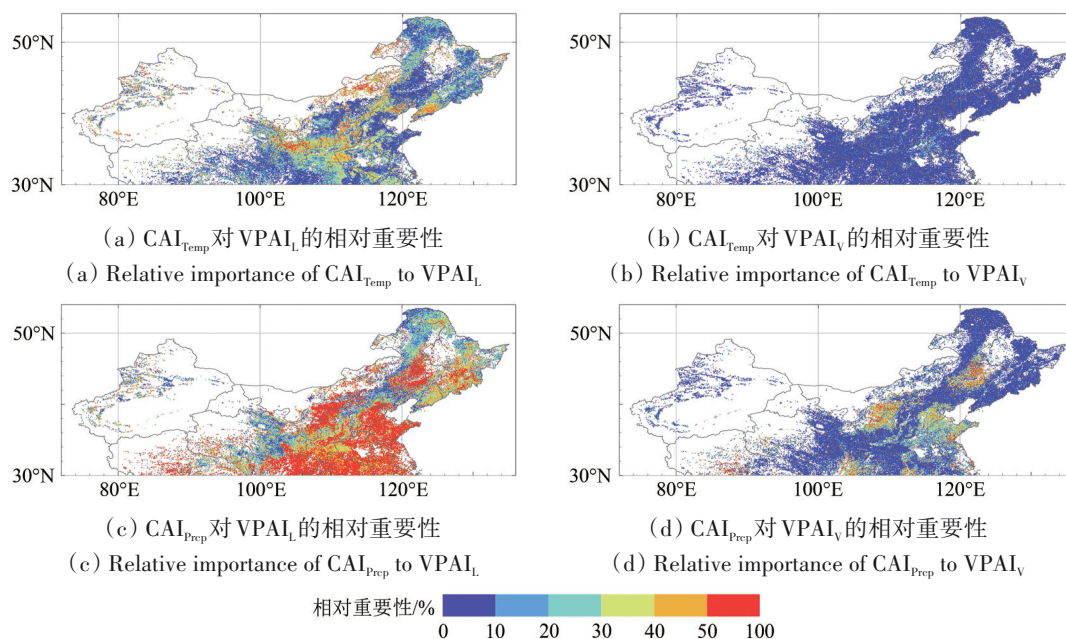
通过计算 1982 年—2022 年 41 年 4 个物候不对称指数的均值, 然后对每两个栅格之间进行 Spearman 相关性分析, 得到 4 个不对称指数之间的相关系数。结果表明: (1) $VPAI_L$ 与 CAI_{Precp} 、 CAI_{Temp} 三者相互之间均为正相关 ($VPAI_L$ 与 CAI_{Precp} 之间相关性最强, $R=0.91$; CAI_{Temp} 与 $VPAI_L$ 以及 CAI_{Precp} 之间相关系数分别为 0.47 和 0.62)。当降水偏向返青期 ($CAI_{Precp} < 0$) 时, 早春土壤墒情改善, 促使植被更早展叶、延长生长起始阶段; 如果降水偏向衰落期 ($CAI_{Precp} > 0$), 则晚。季水分补给延迟落叶, 延长衰落期。同理, 若温度在返青期更高 ($CAI_{Temp} < 0$), 早春融雪加快、地温回升迅速, SOS 提前; 若温度在衰落期更高 ($CAI_{Temp} > 0$), 则延缓叶片生理衰退、EOS 推后。植被生长季时长 $VPAI_L$

与 CAI 正相关且受气温和降水双重调控: 早春高温高降水同步出现时, 生长窗口被进一步拉长; 相反, 若后期气候条件更优, 则衰落期会延长。(2) $VPAI_V$ 与 CAI_{Precp} 、 CAI_{Temp} 、 $VPAI_L$ 这 3 个参数之间均为负相关 (相关系数分别为 -0.58、-0.39、-0.64)。当返青期降水或温度愈高 ($CAI < 0$) 时, 返青期长度增加, CAI_{Precp} 、 CAI_{Temp} 、 $VPAI_L$ 3 个指数 < 0 且呈下降趋势, 导致 $VPAI_V$ 呈上升趋势。相较于气温, 降水不对称性是驱动我国植被物候生长期长度不对称的首要气候因子。温度场不对称也对物候时长和生产力产生明显调节, 但影像程度弱于降水; 4 个不对称维度内部存在耦合与相互制约关系, 表明植被生长策略在不同气候条件下会做出动态调整。

4.4.2 相对重要性分析

为量化气候因子对植被物候季节性差异的影响,本研究利用相对重要性分析评估了温度不对称性和降水不对称性对植被生长过程的贡献水平。分析结果表明,温度与降水不对称性对植被生产力和生长长度的不对称性影响程度具有显著差异。在陕西南部,辽东半岛等局部地区,气温对 $VPAL_L$ 的相对重要性高于20%,其余绝大部分地区低于10%(图13(a)),而在秦岭淮河以南绝大部分区域以及包括东北平原等地区,降水对 $VPAL_L$ 的相对重要性程度均超过50%(图13(c))。气温对 $VPAL_V$ 的影响研究区域内相对重要性均<10%(图13(b)),降水对 $VPAL_V$ 的影响除山东半岛,陕西北部以及东北平原等地区超过20%外,其余地区也均<10%(图13(d))。对于生长季长度调控,温度不对称性解释20.6%的变化,降水不对称性贡献率提升至

41.4%,气候因子的综合解释力达到62.0%,凸显降水季节分配对物候持续性的关键控制作用。在植被生产力方面,温度不对称性独立解释5.1%的变化,而降水不对称性贡献率达12.9%,二者协同作用形成的气候驱动因子总解释力为18.0%,其中降水贡献占据主导地位。两类植被指标均未检测到显著的气温和降水交互作用,表明气候因子间存在相对独立的驱动机制。整体而言,降水不对称性对植被生长季长度(41.4%)和生产力(12.9%)的贡献水平均达到温度因子的两倍以上,印证了东亚季风区水分在生态系统中的重要作用。气候因素对生长季长度的贡献水平(62.0%)显著高于对生产力的贡献(18.0%),揭示出水分条件在物候持续期调控中的关键效应,这一发现对理解季风区植被响应气候变化的分异机制具有重要指示意义。



审图号:GS京(2026)0777号

图13 CAI_{Temp} 、 CAI_{Precip} 对 $VPAL_L$ 、 $VPAL_V$ 的相对重要性空间分布图($VPAL_L$ 表示植被物候生长时长不对称指数; $VPAL_V$ 表示植被物候生产力不对称指数; CAI_{Temp} 表示气温不对称指数; CAI_{Precip} 表示降水不对称指数)

Fig. 13 Spatial distribution of the relative importance of CAI_{Temp} and CAI_{Precip} to $VPAL_L$ and $VPAL_V$ ($VPAL_L$ stands for Vegetation Phenology Asymmetry Index of Length; $VPAL_V$ stands for Vegetation Phenology Asymmetry Index of Productivity; CAI_{Temp} stands for Climate Asymmetry Index of Temperature; and CAI_{Precip} stands for Climate Asymmetry Index of Precipitation)

4.5 SOM分类结果分析

实验中主要使用R语言中Kohonen包中的SOM函数对数据进行分析,利用 $VPAL_L$ 、 $VPAL_V$ 、SOS、EOS、LOS共5个参数进行经过SOM分类。所得结果(图14)显示,圆中的各扇面代表5个参数。根据SOM分类初步分析:16号分类最特殊,对应

K均值聚类后的类别4,其中SOS和 $VPAL_L$ 数据占主导;7、8、11、12、15号分类均对应聚类后的类别1,其中EOS和 $VPAL_L$ 数据占主导,该类占比最大;2、3、4号分类对应类别3;1、5、6号分类对应聚类后的类别5,该类数据EOS占主导;9、10、13、14号分类对应聚类后的类别2,其中EOS和

LOS占主导。根据聚类结果分析可得，不同分类中起主导作用的物候参数存在较大的差异，能够依据物候特征划分出明显的类别差异。将SOM分类结果进行K-means聚类之后，将全国的植被划分为5种类型（图15），类型1主要集中在青藏高原地区，类型2主要集中在河北省南部地区、山东省以及陕西内蒙古接壤地区，类型5集中在秦岭—淮河以南地区，研究区范围内空间异质性明显。利用MODIS植被数据对聚类分析的结果进行分区统计（图16），结果表明常绿阔叶林和常绿针叶林范围内，类型5占比均超过50%；落叶针叶林、落叶阔叶林、灌木范围内类型3占比超过60%；草地范围内类型1占比超过50%。表明聚类分析的结果能够一定程度上识别出落叶林、常绿林、草地，但对于具体的细分植被类型识别度较差，而栽培植被区域由于种植不同的农作物类型，其范围内聚类结果分布较为复杂，识别效果不明显。

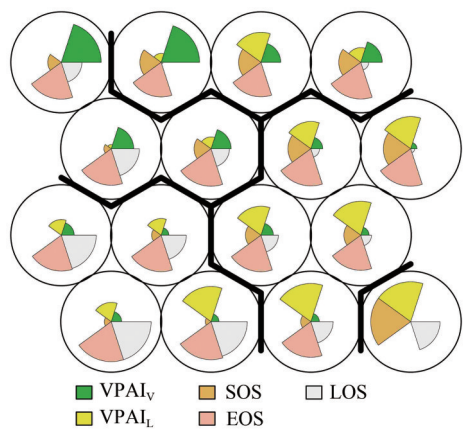


图14 聚类节点的特征向量拓扑图(图中16个圆圈代表网络训练生成的16个拓扑节点,每个节点内部的扇形面积反映了不同输入变量(不对称物候指数 $VPAI_L$ 和 $VPAI_V$,以及传统物候参数SOS、EOS、LOS)在该节点中的相对权重或特征向量大小。节点之间的粗黑线代表了这16个细分节点被进一步归并为5个大类(对应图14和图15中的1—5类)的拓扑边界)

Fig. 14 Topological map of characteristic vectors for clustering nodes (The 16 circles represent the 16 topological nodes generated by network training. The sector area within each node reflects the relative weight or feature vector magnitude of different input variables (asymmetric phenological indices $VPAI_L$ and $VPAI_V$, as well as traditional phenological parameters SOS, EOS, and LOS) in that node. The thick black lines between nodes indicate the topological boundaries where these 16 sub-nodes are further clustered into 5 main categories (corresponding to categories 1—5 in Fig. 14 and Fig. 15))

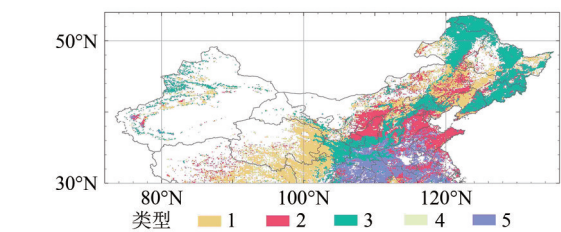


图15 聚类类型空间分布(5种类型代表了图14中的16个细分节点被进一步归并为5个大类)

Fig. 15 Spatial distribution of clustering types (The 5 types represent the 5 main categories into which the 16 sub-nodes from Fig. 14 are further clustered)

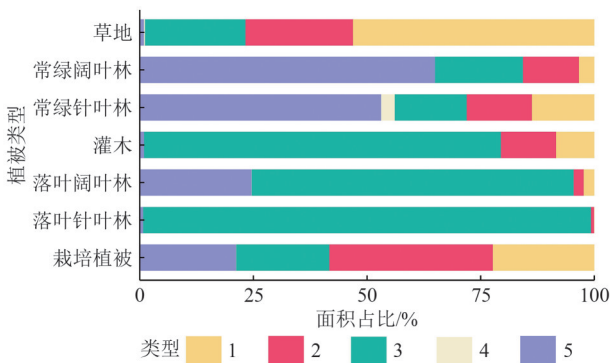


图16 不同植被类型中各聚类类型的面积占比(5种类型代表了图14中的16个细分节点被进一步归并为5个大类)

Fig. 16 Area percentage of clustering types within different vegetation types (The 5 types represent the 5 main categories into which the 16 sub-nodes from Fig. 14 are further clustered)

5 讨论

5.1 植被物候的变化趋势及驱动因素

中国温带地区植被物候变化呈现显著的时空分异特征。(1) SOS总体显著提前，但空间异质性明显。华北平原、长江中下游等地区提前幅度最大，而黄土高原、东北平原和青藏高原部分区域呈现延迟趋势。这种分异反映了水热条件对物候启动的梯度控制，即温度主导的东部季风区春季增温显著驱动SOS提前，而西部干旱高寒区受水分限制与春季温度波动影响，响应相对滞后。(2) EOS整体呈延迟趋势。东北平原与黄土高原EOS显著推迟，与秋季降水增加及初霜推迟相关；而秦岭—淮河以南部分区域出现EOS提前趋势，可能受光周期限制与后期水分亏缺共同作用。SOS提前与EOS推迟共同导致全国大部分地区LOS延长。

Zhang等(2022)认为中国温带地区1982年—2014年植被EOS延迟,丛楠和沈妙根(2016)认为北半球大部分植被的春季萌发期显著提前,均与本文研究结果一致。

物候不对称性(VPAI)的年际变化特征明显:(1) $VPAI_L$ 以0.0018/a的速率显著上升,表明植被返青期与衰落期的时间分配差异扩大,中部平原、长江中下游地区增长显著。这种生长季时长不对称性的时空演变,可能与春季气温回暖提前、秋季受冷空气频繁影响的区域性气候变化密切相关。(2) $VPAI_V$ 以-0.0000365/a的速率下降,反映植被生产力的季节差异缩小。 $VPAI_V$ 下降则集中在中部农业区、东北平原地区,因作物轮作(如华北冬小麦和玉米)形成的“双峰曲线”提高衰落期NDVI均值,削弱季节差异。

本研究揭示降水季节分配是物候时长不对称性的核心驱动因子。当降水偏向衰落期($CAI_{Prep}>0$),可延缓叶片衰老并延长衰落期(如秦岭地区);若降水集中于返青期($CAI_{Prep}<0$),则促进早春萌发并延长返青期(如黄土高原)。这种强关联性源于水分在植物物候进程中的双重功能:春季解冻期土壤墒情控制分生组织活化,秋季水分状况调节激素介导的衰老信号。气温不对称性(CAI_{Temp})对 $VPAI_L$ 的正向作用表现为辅助调节,返青期温度升高加速展叶进程,而衰落期高温抑制霜冻胁迫,从而扩大两阶段时长差。

不同植被类型对气候不对称性的响应存在显著分异,本质上源于植被功能型对水热资源分配的差异化适应策略:落叶针叶林的极高 $VPAI_L$ 由其光周期敏感性决定,秋季日长逐渐缩短植被尽可能多地进行养分回收进入休眠以抵御寒冬,导致衰落期延长。在返青期,常绿阔叶林需要春季积温和降水协同作用,而常绿针叶林主要受温度主导;在衰落期常绿林主要受光周期缩短和秋季干旱双重抑制。草地和栽培植被的物候特征受水分影响显著,反映其对气候的特殊适应策略:草地生长过程若春季水充足提前返青,而秋季降水缺乏植被快速枯黄,则可能形成“生长季前短后长”的模式。栽培植被的高 $VPAI_V$ 凸显人为干预特征:灌溉打破自然水分限制,冬小麦返青期NDVI饱和后,玉米生长期(7—9月)形成衰落期NDVI次高峰,促使衰落期植被生产力明显高于返青期。

5.2 不确定性分析

本文虽然揭示了植被物候变化与气候因子之间的密切关系,但主要集中探讨了气温和降水对植被物候的影响,然而人类活动(袁焕欢等,2023)、光周期(Adole等,2019)、海拔(Qiu等,2013)等非气候因素同样对植被物候具有重要影响。为了提高当前和未来气候变化背景下植被物候研究的准确性和预测精度,应将环境因素和人类活动因素共同纳入植被物候模型中,将有助于更加全面地理解植被物候变化的规律和机制。在提取物候过程中,采用不同的NDVI时间序列拟合方法和物候参数计算方法,对所得结果影响较大(周玉科,2018),未来在开发植被物候监测产品时,针对不同土地覆盖类型,建立起统一植被物候期定义体系与提取方法尤为重要。本研究中物候参数提取采用双逻辑斯蒂函数分段拟合NDVI曲线,并结合动态阈值法提取物候参数,适合北半球中高纬度的植被物候特征提取,目前该方法广泛应用于植被物候学研究领域,具有可信性。在遥感数据精度方面,本文采取的GIMMS NDVI 3G数据集质量较高,在大尺度、长时间序列的植被物候提取研究中已得到成熟应用,但数据集空间分辨率为8 km,部分像元为多种植被类型的混合像元,因此无论是在提取物候参数或者是利用物候信息识别植被类型方面均包含一定的不确定性,当前高分辨率遥感数据种类繁多,未来可利用更多高精度遥感数据进行进一步分析,获取更为精细的植被类型物候信息。

6 结 论

本文利用1982年—2022年GIMMS NDVI 3G的NDVI数据集,采用双逻辑斯蒂函数方法和动态阈值法拟合植被生长曲线并提取物候参数,通过构建植被物候不对称指数与气候不对称指数,从生长季长度、生产力、气温、降水共4个维度量化了中国温带地区不同植被返青期与衰落期的差异,并对其时空变化特征及气候变化的响应机制进行了分析。主要结论如下:

(1) 植被生长期整体显著延长且空间分异明显。受区域气候变暖驱动,中国温带植被普遍呈现返青提前和衰落推迟的演变特征,但在中西部干旱及高寒地区,受水分和地形限制,其响应明

显滞后于热量主导的东部季风区。

(2) 植被生长季的时间分配与生产力呈现不对称演变。为适应气候变化并最大化利用水热资源，植被生理节律发生动态调整，表现为衰落期时长逐渐长于返青期导致时间不对称性加剧，而这两个阶段的生产力差距则在逐渐缩小。

(3) 降水季节性分配是驱动物候不对称性的首要因子。降水差异对生长季长度不对称的调控作用显著强于气温，且不同植被因生存适应策略不同表现出明显的生态分异规律，这为精准评估全球变暖背景下生态系统功能稳定性提供了科学依据。

参考文献 (References)

- Adole T, Dash J, Rodriguez-Galiano V and Atkinson P M. 2019. Photoperiod controls vegetation phenology across Africa. *Communications Biology*, 2(1): 391 [DOI: 10.1038/s42003-019-0636-7]
- Cong N and Shen M G. 2016. Variation of satellite-based spring vegetation phenology and the relationship with climate in the Northern Hemisphere over 1982 to 2009. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(9): 2737-2746 (丛楠, 沈妙根. 2016. 1982—2009年基于卫星数据的北半球中高纬地区植被春季物候动态及其与气候的关系. *应用生态学报*, 27(9): 2737-2746) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.201609.028]
- Cong N, Shen M G and Piao S L. 2017. Spatial variations in responses of vegetation autumn phenology to climate change on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology*, 10(5): 744-752 [DOI: 10.1093/jpe/rtw084]
- Cong N, Wang T, Nan H J, Ma Y C, Wang X H, Myneni R B and Piao S L. 2013. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: a multithreshold analysis. *Global Change Biology*, 19(3): 881-891 [DOI: 10.1111/gcb.12077]
- Elmore A J, Guinn S M, Minsley B J and Richardson A D. 2012. Landscape controls on the timing of spring, autumn, and growing season length in mid-atlantic forests. *Global Change Biology*, 18(2): 656-674 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02521.x]
- Fu Y S, Zhang J, Wu Z F and Chen S Z. 2022. Vegetation phenology response to climate change in China. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 58(3): 424-433 (付永硕, 张晶, 吴兆飞, 陈首志. 2022. 中国植被物候研究进展及展望. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 58(3): 424-433) [DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022170]
- Kohonen T. 1990. The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, 78(9): 1464-1480 [DOI: 10.1109/5.58325]
- Li Z Z, Wu Y P, Wang R H, Liu B, Qian Z H and Li C. 2023. Assessment of climatic impact on vegetation spring phenology in northern China. *Atmosphere*, 14(1): 117 [DOI: 10.3390/atmos14010117]
- Liu Q, Fu Y H, Zeng Z Z, Huang M T, Li X R and Piao S L. 2016. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 22(2): 644-655 [DOI: 10.1111/gcb.13081]
- Ma X F, Chen S Y, Deng J, Feng Q S and Huang X D. 2016. Vegetation phenology dynamics and its response to climate change on the Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 25(1): 13-21 (马晓芳, 陈思宇, 邓婕, 冯琦胜, 黄晓东. 2016. 青藏高原植被物候监测及其对气候变化的响应. *草业学报*, 25(1): 13-21) [DOI: 10.11686/cyxb2015089]
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R and Zhou B. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press
- Pinzon J E, Pak E W, Tucker C J, Bhatt U S, Frost G V and Macander M J. 2023. Global vegetation greenness (NDVI) from AVHRR GIMMS-3G+, 1981-2022[EB/OL]. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/ornl-cloud-global-veg-greenness-gimms-3g-2187-1> [DOI: 10.3334/ORNLDAAAC/2187]
- Qiu B W, Zhong M, Tang Z H and Chen C C. 2013. Spatiotemporal variability of vegetation phenology with reference to altitude and climate in the subtropical mountain and hill region, China. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2883-2892 [DOI: 10.1007/s11434-013-5847-6]
- Ren C, Zhang L J and Fu B. 2023. Unraveling effect of snow cover on spring vegetation phenology across different vegetation types in northeast China. *Remote Sensing*, 15(19): 4783 [DOI: 10.3390/rs15194783]
- Ren Q, He C Y, Huang Q X and Zhou Y Y. 2018. Urbanization impacts on vegetation phenology in China. *Remote Sensing*, 10(12): 1905 [DOI: 10.3390/rs10121905]
- Tan X Y, Jia Y W, Niu C W, Yang D W, Lu W and Hao C F. 2023. Response of water-use efficiency to phenology in the natural forest and grassland of the Loess Plateau in China. *Science China Earth Sciences*, 66(9): 2081-2096 (谈幸燕, 贾仰文, 牛存稳, 杨大文, 陆文, 郝春洋. 2023. 中国黄土高原天然林地和草地水分利用效率对物候的响应. *中国科学: 地球科学*, 53(9): 2110-2126) [DOI: 10.1007/s11430-022-1124-0]
- Wan X R, Cheng C Y, Bai D F and Zhang Z B. 2023. Ecological impacts of climate change and adaption strategies. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38(3): 518-527 (万辛如, 程超源, 白德凤, 张知彬. 2023. 气候变化的生态影响及适应对策. *中国科学院院刊*, 38(3): 518-527) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220815002]
- Wang M Y, Luo Y, Zhang Z Y, Xie Q Y, Wu X D and Ma X L. 2022. Recent advances in remote sensing of vegetation phenology: retrieval algorithm and validation strategy. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(3): 431-455 (王敏钰, 罗毅, 张正阳, 谢巧云, 吴小丹, 马轩龙. 2022. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展. *遥感学报*, 26(3): 431-455) [DOI: 10.11834/jrs.20211601]

- Wang X Y, Zhou Y K, Wen R H, Zhou C H, Xu L L and Xi X. 2020. Mapping spatiotemporal changes in vegetation growth peak and the response to climate and spring phenology over northeast China. *Remote Sensing*, 12(23): 3977 [DOI: 10.3390/rs12233977]
- Wang Y F, Shen Y J, Sun F B and Chen Y N. 2014. Evaluating the vegetation growing season changes in the arid region of northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 118(3): 569-579 [DOI: 10.1007/s00704-013-1078-7]
- Xie Z A, Zhang C, Feng S Y, Zhang F C, Cai H J, Tang M and Kong J Y. 2023. Reviews of methods for vegetation phenology monitoring from remote sensing data. *Remote Sensing Technology and Application*, 38(1): 1-14 (协子昂, 张超, 冯绍元, 张富仓, 蔡焕杰, 唐敏, 孔纪迎. 2023. 植被物候遥感监测研究进展. 遥感技术与应用, 38(1): 1-14) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.1.0001]
- Yu H Y, Luedeling E and Xu J C. 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(51): 22151-22156 [DOI: 10.1073/pnas.1012490107]
- Yuan H H, Yan J B, Zhang J L, Wang Z, Xu W G and Zhang H N. 2023. Influences of climate change and human activities on vegetation phenology of Shanghai. *Acta Ecologica Sinica*, 43(21): 8803-8815 (袁焕欢, 严家宝, 张建亮, 王智, 徐网谷, 张昊楠. 2023. 上海市气候变化和人类活动对植被物候的影响. 生态学报, 43(21): 8803-8815) [DOI: 10.20103/j.stxb.202209192675]
- Zeng Z Q, Wu W X, Ge Q S, Li Z L, Wang X Y, Zhou Y, Zhang Z T, Li Y M, Huang H, Liu G X and Peñuelas J. 2021. Legacy effects of spring phenology on vegetation growth under preseason meteorological drought in the Northern Hemisphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 310: 108630 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108630]
- Zhang J, Hao F H, Wu Z F, Li M W, Zhang X and Fu Y S. 2023. Response of vegetation phenology to extreme climate and its mechanism. *Acta Geographica Sinica*, 78(9): 2241-2255 (张晶, 郝芳华, 吴兆飞, 李明蔚, 张璇, 付永硕. 2023. 植被物候对极端气候响应及机制. 地理学报, 78(9): 2241-2255) [DOI: 10.11821/dlxb202309008]
- Zhang R R, Qi J Y, Leng S and Wang Q F. 2022. Long-term vegetation phenology changes and responses to preseason temperature and precipitation in northern China. *Remote Sensing*, 14(6): 1396 [DOI: 10.3390/rs14061396]
- Zheng W R, Liu Y Q, Yang X G and Fan W Y. 2022. Spatiotemporal variations of forest vegetation phenology and its response to climate change in northeast China. *Remote Sensing*, 14(12): 2909 [DOI: 10.3390/rs14122909]
- Zhou Y K. 2018. Comparative study of vegetation phenology extraction methods based on digital images. *Progress in Geography*, 37(8): 1031-1044 (周玉科. 2018. 基于数码照片的植被物候提取多方法比较研究. 地理科学进展, 37(8): 1031-1044) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.08.003]
- Zhou Y K. 2019. Asymmetric behavior of vegetation seasonal growth and the climatic cause: evidence from long-term NDVI dataset in northeast China. *Remote Sensing*, 11(18): 2107 [DOI: 10.3390/rs11182107]
- Zu J X and Yang J. 2016. Temporal variation of vegetation phenology in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 36(7): 2015-2023 (俎佳星, 杨健. 2016. 东北地区植被物候时序变化. 生态学报, 36(7): 2015-2023) [DOI: 10.5846/stxb201409231884]

Asymmetric characteristics of vegetation phenology and their responses to climate change in temperate regions of China

LIU Shipeng^{1,2}, ZHOU Yuke¹

1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Vegetation phenology serves as a critical indicator for assessing the ecological impacts of climate change. While most previous studies have concentrated on the interannual variations of specific phenological events, the intraseasonal asymmetry within the growing season remains poorly understood. This study aims to fill this knowledge gap by quantifying the asymmetry between the green-up phase and the senescence phase from the dual perspectives of temporal duration and productivity levels, represented by mean NDVI. Focusing on the temperate regions of China, this research seeks to reveal the spatial-temporal patterns of phenological asymmetry and clarify the underlying climatic regulation mechanisms driven by temperature and precipitation imbalances. By examining these dynamics over 41 years, this study provides a nuanced understanding of how ecosystems reorganize their seasonal cycles in response to global warming. For this assessment, long-term GIMMS NDVI 3G+ data covering the period from 1982 to 2022 and NOAA climate records were utilized. This study constructed two primary indices: the vegetation phenology asymmetry index (VPAI), which includes length-based asymmetry (VPAI_L) and NDVI-based asymmetry (VPAI_v), and the Climate Asymmetry Index (CAI), accounting for temperature (CAI_{temp}) and precipitation (CAI_{prec}). The growing season dynamics were analyzed north of 30° N to detect trends in the start of growing season (SOS), end of growing season (EOS), and length of growing season (LOS). Furthermore, a self-organizing map (SOM) classification was implemented to examine the spatial consistency between phenological parameter distributions and vegetation types, evaluating the potential of these metrics for large-scale

vegetation mapping and identifying the distinct signatures of croplands in comparison with natural ecosystems. The results indicated a significant advancement in the SOS at a rate of -0.077 d/a, a slight delay in the EOS by $+0.06$ d/a, and a general extension in the LOS by $+0.101$ d/a across the study area. These shifts led to a persistent increase in $VPAI_L$ and a decreasing trend in $VPAI_V$. Spatially, 72.9% of the temperate regions of China exhibited longer senescence periods than green-up phases ($VPAI_L > 0$), and 97.1% showed higher productivity during the senescence period ($VPAI_V > 0$). Notably, croplands exhibited significantly higher $VPAI_V$ and lower $VPAI_L$ than surrounding regions due to a secondary NDVI peak during senescence. Climate driver analysis identified precipitation asymmetry (CAI_{Prep}) as the dominant control on growing season length asymmetry, with a correlation of $R=0.91$, explaining 41.4% of its variance. Temperature asymmetry (CAI_{Temp}) showed a secondary influence on length asymmetry ($R=0.47$) but lacked a significant impact on NDVI-based asymmetry ($R=-0.39$), which was negatively regulated by precipitation. This study provides a comprehensive quantitative characterization of vegetation asymmetry in duration and productivity dimensions over a large spatial scale. With precipitation asymmetry identified as the primary regulator of phenological imbalances in the temperate regions of China, the findings extend the conceptual framework of phenological research beyond simple event-based shifts. The strong spatial consistency revealed by SOM classification underscores the effectiveness of phenological metrics for vegetation type mapping. These insights offer valuable guidance for ecological modeling, carbon cycle estimation, and the development of climate-adaptive ecosystem strategies, including crop management and water regulation. This research emphasizes that understanding intraseasonal dynamics is essential for accurately predicting ecosystem responses to an increasingly asymmetric climate and provides a scientific basis for seasonal resource allocation in environmental management.

Key words: vegetation phenology, asymmetry index, climate change, vegetation productivity, remote sensing, NDVI

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021xjkk0303)