

# 基于长时序卫星观测的全球陆表植被多时间尺度动态特征分析

崔祎霖<sup>1,2</sup>, 周杰<sup>1,2,3</sup>, 蒋奕秋<sup>1,2</sup>, 郭栋梁<sup>1,2</sup>, 邹丽<sup>1,2</sup>

- 华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079;
- 华中师范大学 城市与环境科学学院, 武汉 430079;
- 代尔夫特理工大学 土木工程与地球科学学院, 荷兰 代尔夫特 2628 CD

**摘要:** 植被作为陆地生态系统的重要组成部分, 对全球气候的变化具有深远影响。准确刻画植被动态特征对于把握和预测全球变暖背景下生态系统结构和功能的演变途径至关重要。本研究基于现有的长时序多源植被遥感产品, 利用频谱分析方法实现对全球陆表植被时间尺度空间格局的表征, 并在多时间尺度视角下分析植被动态趋势特征。结果表明: (1) 全球陆地表面大部分区域 (78.4%) 的植被生长动态主要受年尺度主导。年内尺度主导的区域占 16.1%, 主要分布于热带地区。而年际尺度主导的区域占比最小 (5.5%), 主要位于半干旱灌木丛区。(2) 植被年尺度振幅值和植被生长峰值存在显著相关关系的区域, 主要分布在植被季节性生长变化特征较为显著的区域。年尺度相位值与时间域上遥感物候参数仅在全球 28.19% 的植被覆盖区域呈现显著正相关性 ( $P < 0.1$ ), 其中植被峰值期与年尺度相位值相关性最好。(3) 植被指数多个时间尺度 (年际尺度、年尺度、年内尺度) 上的振幅时间趋势呈现出大范围的增长趋势, 与广泛关注的“全球植被绿化”现象 (植被指数年均值呈现增长趋势) 总体保持一致。但各个时间尺度上的趋势特征呈现出较大的空间差异性, 3 个时间尺度上的振幅时间动态仅解释了年均值动态特征的 66%, 凸显出“全球植被绿化现象”的时间尺度依赖性。总之, 本文利用频谱分析方法实现对全球陆表植被动态特征的多时间尺度分析, 可为全球陆表植被动态研究提供新的视角, 对深化全球陆表植被绿化现象及其生态系统功能响应机制的科学认识具有重要意义。

**关键词:** 陆表植被, 时间尺度, 频谱分析, 气候变化, 植被物候

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 崔祎霖, 周杰, 蒋奕秋, 郭栋梁, 邹丽. 2026. 基于长时序卫星观测的全球陆表植被多时间尺度动态特征分析. 遥感学报, 30(5): 1357-1373

Cui Y L, Zhou J, Jiang Y Q, Guo D L and Zou L. 2026. Revealing global terrestrial vegetation dynamic across timescales based on long time series satellite observations. National Remote Sensing Bulletin, 30(5): 1357-1373 [DOI:10.11834/jrs.20265001]

## 1 引言

陆地表面植被动态在陆地和大气之间的碳、水、动量和能量交换过程中扮演着重要角色, 是表征全球气候变化和人类活动的自然响应和反馈的重要指标 (Fu 等, 2017; Forzieri 等, 2017)。在全球环境变化的背景下, 植被动态特征和驱动机制日益受到关注 (De Jong 等, 2013)。受气候变化和人类活动的共同作用, 陆表植被在过去的数 10 年呈现出巨大的变化, 主要包括年际尺度的绿化趋

势, 北半球物候开始期的提前以及整个植被生长季的延长等 (Zhu 等, 2016)。这些植被动态特征的变化反过来会影响陆表生态系统乃至气候系统的稳定性 (Zhu 等, 2022)。由于考察指标、研究时期和趋势定义的多样性, 使得目前对数 10 年来全球植被生长动态特征的认知存在较大的不确定性 (Piao 等, 2015)。全球陆表近一半的植被覆盖区在绿度、覆盖率和生产力方面呈现出不一致的趋势 (Ding 等, 2020)。面对全球陆表植被动态呈

收稿日期: 2025-01-09; 预印本: 2026-02-01

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2023YFF1303702); 国家自然科学基金 (编号: 42171371)

第一作者简介: 崔祎霖, 研究方向为生态水文遥感研究。E-mail: cuiyi28@mails.ccnu.edu.cn

通信作者简介: 周杰, 研究方向为生态水文遥感研究。E-mail: zhou.j@ccnu.edu.cn

现的差异性,为了全面、综合地理解全球植被生长动态,需要有效地定量描述和分析植被的动态变化过程,从而加强对植被—气候相互作用的理解(Guan等,2014)。

然而,观测得到的植被动态信息是不同时间尺度驱动过程的综合作用结果。不同时间尺度下植被的生长特征也会存在差异,短期或长期的植被动态过程可能被占主导地位的年时间尺度信号过程掩盖(Pan等,2018;Mahecha等,2010)。为了研究不同时间尺度植被动态特征,一般需要利用时间序列分解方法从观测到的植被信号中提取不同的频率,例如月度、季节、年度以及多年尺度上的动态特征(Linschei等,2020)。频谱分析方法是应用最为广泛的时间序列分解方法之一(Platt和Denman,1975),常用于检测、识别、评估和建模时间序列周期特征,能够有效表征多种地理生态过程要素的多时间尺度动态特征(Walden等,1998)。常见的频谱分析方法包括傅里叶变换、小波变换、谐波分析等。Menenti等(1993)最早将傅里叶分析方法应用于长时序植被遥感数据,证明多时间尺度特征展示了比原始时间序列更加丰富的植被动态信息。目前,基于频谱分析方法提取的多时间尺度植被动态特征已经在生态系统分类、作物制图、植被扰动精细化监测等领域得到了广泛的应用(Canisius等,2007;Huesca等,2009)。例如,Zhang等(2006)通过采用傅里叶分析方法提取年尺度和半年尺度频谱参数从而实现了作物类型的分类,进一步研究了中国北方平原的作物种植时间尺度模式。Recuero等(2019)基于归一化植被指数(NDVI)时间序列频谱分析的定量方法描述了植被振荡,制定了一套新的全球周期性指标,识别出植被有关年内周期的不同季节性模式(数量、幅度和稳定性)。然而以往这些应用研究多集中在特定的几个时间尺度(如年尺度、半年尺度),并且大多数侧重于确定年内周期的数量,对长时序植被信号的多时间尺度频谱特征关注不够,无法全面反映植被动态变化(Linscheid等,2021)。

其次,由于年尺度或者半年尺度傅里叶组分在数学形态上同单季或者双季植被的生长曲线有较弱的相似性,前期众多学者利用傅里叶组分的振幅值来表示植被生长期的光合作用强度,用相位值来表示植被的物候期特征。如Malamiri和Khormizi(2020)使用NDVI开展伊朗的植被变化研究,发

现将植物生长信号分解为振幅和相位进而分析植物生长阶段的变化,特别是对于具有年度波动周期的植物而言,可以有效地识别与气候变化相关的植物生长和物候过程的变化。Khormizi等(2023)用年尺度相位表征植被生长季的出现时间,分析了相位的时间趋势特征,结果表明全球陆表植被年尺度相位从1982年—2018年减少了 $9^\circ$ ,相当于生长季节提前了9天。Wagenseil和Samimi(2006)认为基于NDVI傅里叶变换得到的参数均值、年尺度振幅值和相位在空间和时间上仅限于区分植被类型,因为它们只量化了植物物候学的某些方面(如绿度峰值)。然而,植被不同时间尺度的振幅值、相位值与传统遥感物候期具体的相关关系,并没有得到系统的研究(Olsson和Eklundh,1994),频域组分参数同时间域提取的植被物候期参数之间的一致性也缺乏定量化评估。这对从多时间尺度视角系统性认识和理解陆表植被动态特征和机制都形成了制约。

此外,近年来的研究均发现全球植被绿化趋势,这种长期趋势变化对应的是时间域整体年均尺度上变化。如Zhu等(2016)利用LAI数据研究了植被的趋势变化,结果表明北半球中高纬度地区植被绿化普遍存在。Du等(2020)发现中国也存在显著绿化趋势,在生长季节和春季的所有时期都观察到显著增长。同时在欧洲和北美的植被绿化程度也存在不同程度的增加(DeJong等,2011;Liu等,2015)。在全球在干旱和半干旱地区,植被呈现出明显的增长趋势(Fensholt等,2012),例如Brandt等(2015)研究表明非洲萨赫勒地区热带稀树草原地区植被的绿化趋势和Donohue等(2009)发现1981年—2006年澳大利亚植被覆盖率增加了8%。而植被物候的趋势变化对应的是时间域年尺度上的变化,植被物候的趋势和年际变化影响植被和大气之间的碳、水和能量交换(Geerken,2009)。中高纬度地区春季物候开始期普遍提前,生长季节延长。如Liu等(2019)利用物候和温度观测站进行的一系列研究表明,北半球植被春季萌发得更早,生长季节更长的普遍趋势。Zhang等(2014)对全球地表物候年际变化及趋势进行分析,结果表明1982年—2010年全球植被生长开始期和植被生长季长度差异很大,北美和亚洲大部分气候区的植被生长季节长度延长,但植被生长开始期在非洲南半球有延迟趋势。正确描述植被变化特征是

理解气候变化对陆地生态系统影响的基础。然而，大多数以往植被指数时间序列的分析研究只考虑了年尺度特征的趋势变化，从而得到了全球陆表植被总体上呈现绿化和物候期提前的结论。然而，这种年度平均态下的趋势特征，是否也代表了其他时间尺度的动态趋势特征，目前尚不明确。

综上，单一时间尺度分析无法全面揭示植被动态对气候变化的响应，可能忽略其他时间尺度上的一些重要信息，有必要对植被从多时间尺度考虑植被的动态特征。因此，本文将前期基于区域的多时间尺度频谱分析方法的研究推向了全球尺度，关注基于长时序遥感观测植被信号的陆表植被多时间尺度的特征表征，同时从多时间尺度视角下分析植被动态趋势，重新解构全球植被变绿这一研究热点，以期深化对植被绿化现象及其生态系统功能响应机制的科学认识提供新的视角。

## 2 研究方法 with 数据源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 傅里叶频谱分析法

傅里叶变换可将任意包含  $N$  个样本的时间序列（如植被指数序列） $x(n) = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  通过式（1）将时间域信息转化到频率域，从而提取出不同时间尺度（月、季度、年和多年等）的信号能量分布特征。

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (1)$$

式中， $X(k)$  为频率域的复数信号，用于反映连续时间信号对应频率的信号特征； $k$  为频率索引， $k = 0, 1, \dots, (N/2 - 1)$ ； $k/N$  表示了频域信号对应的不同频率。

在数学上，可将该变换得到的复数信号的实分量和虚分量转换为给定复数值的振幅和相位。具体计算公式如下：

$$a = \sqrt{X_r^2 + X_i^2} \quad (2)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{X_i}{X_r}\right) \quad (3)$$

式中， $a$  为振幅（Amplitude）、 $\varphi$  为相位（Phase）， $X_r$  和  $X_i$  分别为复数  $X(k)$  的实、虚部。

时域和频域的表达可以互相变换，并且变换过程中不会产生或丢失任何信息，因此可以利用

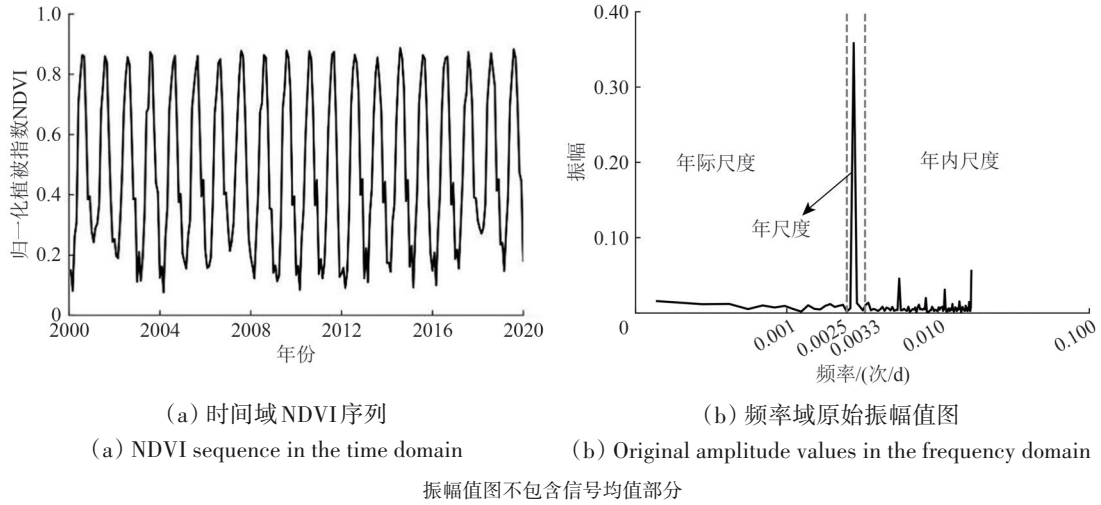
傅里叶逆变换通过式（4）进而将原始时间数据  $x(n)$  表示为一系列不同频率余弦波的组合。在该式中  $a_0$  表征了信号的均值， $a_k$  和  $\varphi_k$  分别表征了第  $k$  个频率组分信号的振幅和相位。将傅里叶方法应用于陆表参数时间序列分析时，这些参数可对应于不同时间尺度上的地理过程特征。例如在分析年植被指数（NDVI）序列时， $a_0$  表示了年均NDVI值， $a_1$  则表征了年尺度上NDVI的变化幅度， $\varphi_k$  则同植被物候密切相关。

$$x(n) = a_0 + \sum_{k=1}^{(N/2)-1} a_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N} + \varphi_k\right) \quad (4)$$

根据傅里叶分析计算的频率范围划分植被的不同时间尺度特征。以月度的MODIS NDVI产品为例，在2001年—2020年，每个像素有240个30 d的NDVI观测值，最低可观测频率为每天  $1/(30 \times 240)$  个周期（ $\approx 1.6$  纳赫兹）（Zhou等，2021）。因此可观测频率范围（1.6~195 纳赫兹）。将频率进行转换，表示为每个周期频率包含的天数的倒数。尽管植被动态的多时间尺度特征具备显著的生态学内涵（Mahecha等，2010），并且频谱分析方法已经被广泛用于刻画植被动态的多时间尺度动态特征，然而同类研究对植被时间序列的多尺度频率划分并不完全一致（Linschei等，2020；Menenti等，1993；Recuero等，2019）。这些研究基本都是以植被生长周期变化特征为基准，如Zhou等（2021）定义年际尺度为600—11520 d，年尺度为240—600 d；Linscheid等（2020）定义年际尺度为 >400 d，季节性尺度为328—402 d，再加上半年和4个月这2个谐波，而年内尺度定义为 <328 d，并且不包含2个季节性谐波。参考以往研究的划分依据，结合本研究采用的NDVI时序数据特点，将单像元的NDVI时间序列所刻画的植被动态特征转化为频谱域的3个时间尺度特征：周期为60—300 d的频谱范围为年内尺度，对应频率约为0.0033—0.01667次/每天，属于高频范围；周期为300—400 d的频谱范围为年尺度，对应频率约为0.0025—0.0033次/每天，属于中等频率范围；周期长于400 d的频谱范围为年际尺度，对应频率 < 0.0025次/d，属于低频范围（图1）。此外，傅里叶分解中的常数项（式（4））实际上也对应了零频率下的振幅。不同时间尺度显著特征通常在特定的频率下，基于已有的研究结果，结合本研究的实验测试发现划分阈值的小范围变动并不会对不同尺度能量分布

格局结果产生大的影响, 因此本文对周期划分范围进行取整, 以便应用时快速识别时间尺度, 更

好的对比不同时间尺度特征。



(a) 时间域 NDVI 序列  
(a) NDVI sequence in the time domain  
(b) 频率域原始振幅值图  
(b) Original amplitude values in the frequency domain  
振幅值图不包含信号均值部分

图1 NDVI时间序列和频率域特征示意图

Fig. 1 Illustration for NDVI time series and frequency-domain features

功率谱是功率谱密度 PSD (Power Spectral Density) 的简称, 指单位频带内的信号功率, 计算公式为式 (5)。它表示了信号功率随着频率的变化关系, 即信号功率在频域的分布状况, 第  $k$  个频率组分信号的功率谱记为  $PSD_k$ 。本文采用 python 中的 “mtspec” 包完成功率谱密度的计算, 其结果是根据多锥度频谱估计的 (Prieto 等, 2009)。为了量化不同时间尺度对植被动态的贡献程度, 本研究对得到的信号整体功率谱密度进行数据归一化, 再计算每个时间尺度的功率谱密度之和与信号总体方差的比例, 也即 3 个时间尺度范围内每个频率下的功率谱密度计算的比例总和。本研究将这一比例称为时间尺度能量占比  $P_k$ , 简称能量占比, 可由式 (6) 计算的得到:

$$PSD_k = \frac{1}{N} / a_k / f^2 \quad (5)$$

$$P_k = \frac{PSD_k}{\sum_{k=1}^N PSD_k} \quad (6)$$

### 2.1.2 Theil-Sen 斜率估计及 Mann-Kendall 趋势分析

本文通过 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 非参数检验法 (简称 M-K 检验法) 分析不同时间尺度植被动态的变化特征。Theil-Sen 斜率估计是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法, 可以减少数据异常值的影响, 常用于长时间序列数据的

趋势分析 (Sen, 1968)。本文通过 Sen 斜率估计值判断 20 年 NDVI 时间序列数据在 5 年分析窗口逐年滑动下多个时间尺度振幅值的变化趋势。其计算公式为

$$\beta = \text{Mean} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (7)$$

式中,  $1 \leq i < j \leq n$ ,  $x_j$  和  $x_i$  为振幅值时间序列数据, 当  $\beta$  值为正时表示时间序列呈上升趋势, 当  $\beta$  值为负时表示时间序列呈下降趋势。

M-K 检验法是一种非参数统计检验方法, 其样本数据不需要具有正态分布特征, 结果不受少数异常值的干扰 (Kendall, 1975)。对于长度为  $n$  的时间序列  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 其变化由标准正态分布统计量  $Z_c$  判断。构造检验统计量  $Z_c$  具体计算公式如下:

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

式中,

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (9)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^m t_k(t_k-1)(2t_k+5)}{18} \quad (11)$$

式中,  $x_i$  和  $x_j$  为第  $i$  年和第  $j$  年不同时间尺度下 5 年分析窗口下的像元振幅值,  $n$  表示年份长度,  $\text{sgn}$  为符号长度。本文在显著性水平  $\alpha = 0.05$  上判断不同时间尺度下振幅值变化趋势的显著性。统计量  $Z_c$  若为正值, 则表明该序列呈现上升趋势; 统计量  $Z_c$  若为负值, 则表明该序列呈现下降趋势。

## 2.2 数据概况

### 2.2.1 遥感植被结构参数产品

本研究所使用的归一化植被指数 NDVI 数据来自中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 传感器的植被指数产品 MOD13A1.061。MODIS 搭载在美国地球观测系统 Terra 和 Aqua 卫星上 (Huete 等, 2002)。MODIS 数据在光谱和时空分辨率等方面都相比 AVHRR 数据有较大改进, 这使得 MODIS 数据产品在植被动态监测、植被分类以及草地估产等多个研究领域得到了广泛。MOD13A1.061 是陆地三级标准产品, 其包括归一化植被指数 (NDVI) 和增强型植被指数 (EVI) 两个数据层 (Myneni 等, 1997), 时间分辨率为 16 d, 空间分辨率为 500 m。本文使用谷歌地球引擎 GEE (Google Earth Engine) 平台获取上述 MOD13A1.061 产品的 NDVI 数据层, 对数据的空间分辨率统一重采样为 25 km, 并且利用最大值合成法将 MODIS NDVI 合成为月尺度数据, 消除由大气条件引起的偏差 (张韵婕等, 2016; 杨钰杰等, 2020)。本文在提取不同时间尺度特征之前, 对时间序列数据进行了线性去趋势处理。

### 2.2.2 遥感植被物候数据产品

本文使用的植被物候数据是 MCD12Q2 产品, 其以 MODIS EVI 为数据源判断植被的生长周期过程, 并确定了绿化的开始、绿化持续增加的中点、成熟期、绿化的峰值、衰老、绿化持续降低的中点、休眠、EVI2 的最小值、EVI2 的振幅、一个植被周期的综合 EVI2, 以及整体和物候学指标的具体质量信息。一年当中最多记录 2 个生长周期。本文使用 2001 年—2020 年 MCD12Q2 V6 植被物候数据产品, 选取 Greenup\_1、Peak\_1、Dormancy\_1 图层, 分别为每年植被生长的生长季开始期 SOS (Start of

Growing Season)、生长季峰值期 (PEAK)、生长季结束期 EOS (End of Growth Season), 在 GEE 平台将数据重采样至 25 km。

### 2.2.3 土地覆盖类型数据产品

本研究使用的土地覆盖类型数据产品为 2020 年 0.05° 分辨率的 MODIS 全球土地覆盖数据集 MCD12Q1, 选择 IGBP 土地覆盖分类方案, 其包含有 17 种土地覆盖类型: 11 个自然植被类、3 个人为改变类和 3 个非植被地类。通过 GEE 平台获取数据并重采样空间分辨率 25 km, 将植被合并后分类, 主要分为以下 11 种类型: 混交林 MF (Mixed forest), 常绿阔叶林 EBF (Evergreen Broadleaf Forest), 常绿针叶林 ENF (Evergreen Needle-leaf Forest), 落叶针叶林 DNF (Deciduous Needle-leaf Forest), 落叶阔叶林 DBF (Deciduous Broadleaf Forest), 封闭灌丛 CS (Closed Shrublands), 开阔灌丛 OS (Open Shrublands), 木质稀树草原 (Woody savannas), 草地 (Grassland), 稀树草原 (Savanna), 农田 (Cropland)。

综上, 本文通过利用傅里叶分析方法将遥感植被结构参数产品从时域转换成频域, 提取出不同时间尺度上的频谱参数, 利用振幅值表征多时间尺度植被动态特征, 并对年尺度相位值与传统遥感物候期指标 (SOS、PEAK、EOS) 耦合关系、以及振幅值与植被生长峰值之间的耦合关系进行分析。本文利用 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 趋势分析方法评估 20 年间全球植被不同时间尺度植被的动态变化趋势, 并分析植被时间尺度趋势特征与整体年均趋势变化的关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 全球多时间尺度植被动态空间格局

基于 2001 年—2020 年 MODIS NDVI 产品提取出全球陆表植被在年际、年度以及年内 3 个时间尺度的振幅值均值来表征植被动态在不同时间尺度的强度特征, 以及利用能量占比评估每个时间尺度信号能量对信号总能量的贡献程度。

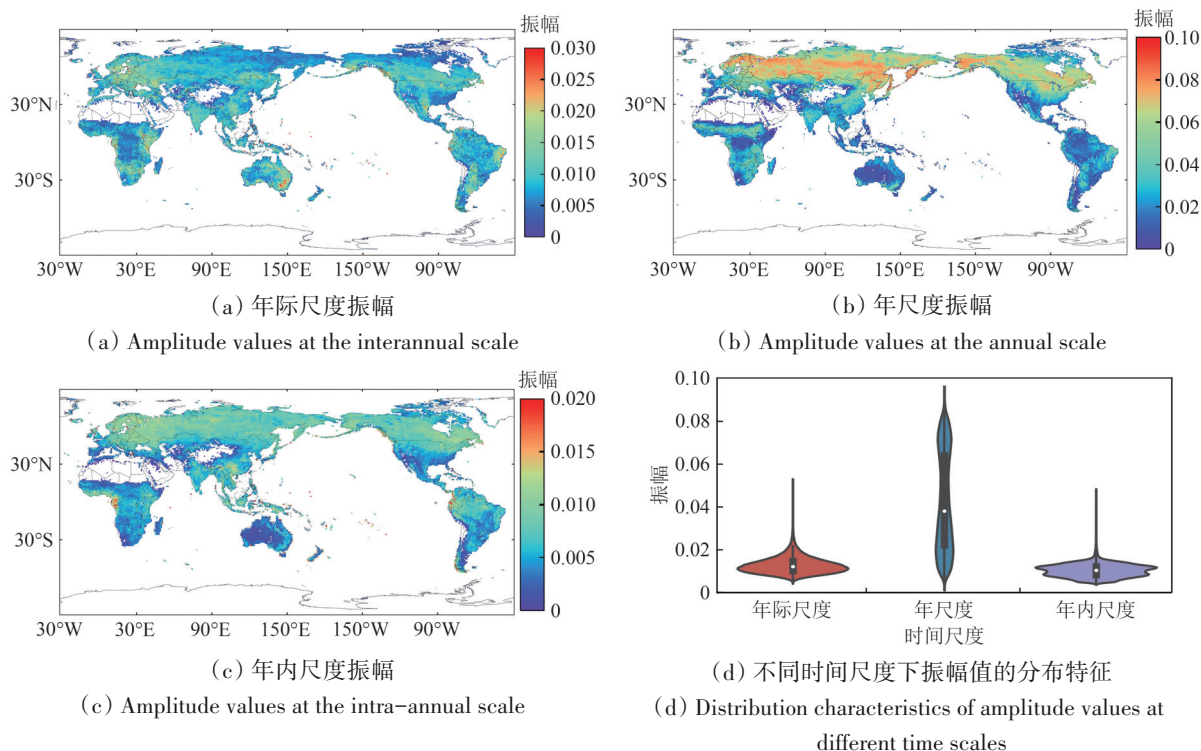
#### 3.1.1 全球不同时间尺度振幅值空间特征

图 2 展示了全球陆表植被在不同时间尺度下的振幅值均值空间分布特征。可见: 在年尺度和年内尺度上呈现明显的南北半球空间差异特征, 但在

年际尺度上南北半球的差异并不明显；年尺度的振幅值均值为0.038，而年际和年内尺度的均值仅为0.009和0.006。本文所关注的是振幅值均值，即在划分的3个时间尺度内不同频率下振幅值的平均表现，因此计算得到的数值大小主要集中在0—0.1。

在全球范围内植被的年际尺度振幅差异不大(图2(a))，其中最大值为0.048，植被动态特征在年际尺度上较强的地区主要包括澳大利亚东部、美国西部、巴西东部以及非洲南部等。这些区域多为干旱半干旱气候，导致植被生长有显著的年际波动特征。因此，这些地区的植被年际尺度振幅值也相对较高。在年尺度上，北半球中高纬度地区振幅值要高于全球其他地区(图2(b))，其中部分亚洲地区在年尺度振幅偏大，最大振幅值可达到了0.094。而在热带和亚热带湿润阔叶林地区年振幅值较低的特征，即年尺度上植被动态范围

较小。这主要是因为大部分区域的气候季节性变化显著，使得植被生长呈现出强烈的季节性特征，因此年尺度上的振幅值较大。相对的，在热带和亚热带湿润阔叶林地区，由于生长着常绿植物，植被的年尺度变化较为平稳，呈现出年振幅值较低的特征，即年尺度上植被动态范围较小。年内尺度的振幅值均值最大为0.04，在60°N附近(图2-c)。其次，年内尺度植被动态特征较强的区域还包括热带地区以及农业地区，这些区域植被展现出双季甚至多季的特征。例如中国华北平原以及南部地区、印度北部地区的种植着双季节作物，而热带雨林地区由于旱季和雨季交替出现导致植被年内活动变化显著也具有多个生长周期。在干旱半干旱地区，如澳大利亚，植被动态特征较弱则是由于全年的NDVI值较低造成的(Recuero等, 2019)。



审图号: GS京(2026)0070号

图2 基于MODIS NDVI的陆表植被多时间尺度振幅值空间分布图以及振幅值数据分布图

Fig. 2 Spatial and data distribution of multi-time-scale amplitude of vegetation based on MODIS NDVI

### 3.1.2 全球不同时间尺度植被动态能量占比空间特征

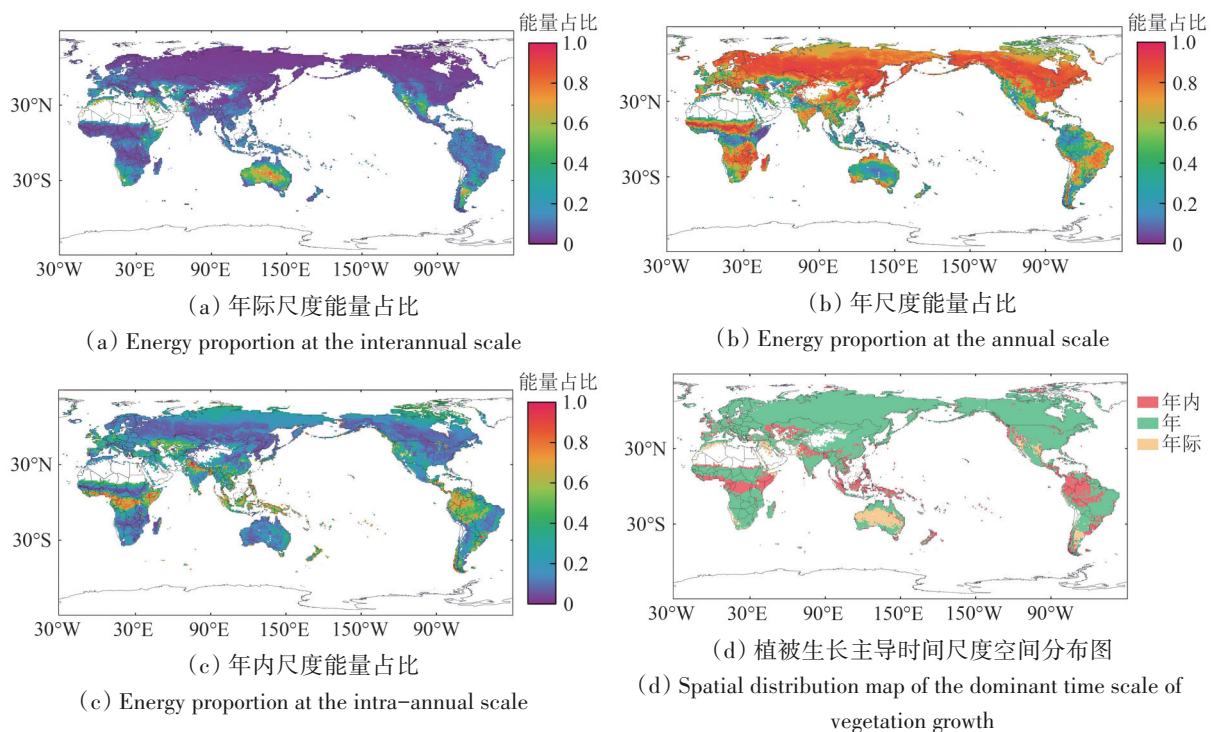
图3展示了全球陆表植被在不同时间尺度下的能量占比值空间分布特征。图4展示了植被在不同空间范围和地物类型下的特征。可见：全球大部

分区域的陆表植被的生长周期由年尺度主导，占全球植被像元的78.4%；其次是由年内尺度主导(16.1%)，而仅有5.5%的区域植被表现出更强的年际尺度特征(图4(a))。陆表植被在年际尺度能量占比值普遍偏低，比值均值为0.104，年际尺

度能量占比值较大的区域集中在澳大利亚、墨西哥北部、阿根廷南部、南非、美国西南部、中亚地区、及地中海沿岸等。这些地区多为干旱或半干旱地带，植被类型多为灌丛区，植被的生长过程受水分条件的影响明显（图3（a））。同时，这些区域降水受厄尔尼诺—拉尼娜事件的影响显著，年际变化较为剧烈，从而导致植被的年际动态变化尤为显著（Holmgren等，2001）。年尺度几乎在全球大部分地区（除无植被生长的沙漠地区之外）都呈现出较大的占比特征，全球均值高达0.639，由于北半球拥有大片的森林覆盖区域，例如在加拿大、俄罗斯、美国、中国和北欧等地，特别是在北回归线（ $23.5^{\circ}\text{N}$ ）以上森林覆盖面积较大，植被年尺度能量占比均值高达0.722，植被动态呈现显著的年尺度特征（图3（b））。至于年内尺度（图3（c）），其全球植被时间尺度动态特征能量占比均值为0.249。赤道附近（ $23.5^{\circ}\text{N}$ — $23.5^{\circ}\text{S}$ ）的年内尺度能量

占比均值最大，达到0.348，并且该部分有35.5%的区域是由年内尺度主导。这些区域主要为热带和农业区，植被的年内活动变化显著。如赤道周边的刚果热带雨林及东非地区受到热带辐合带作用影响较强，旱季和雨季交替出现导致植被年内活动变化显著，从而具有多个生长周期的特征，也使得植被信号的年内尺度变异处于主导地位（Luo等，2014）。此外，由于部分热带雨林地区（如亚马逊中西部地区、东南亚地区）常年湿润，无显著旱雨季，植被1年中的变异极小，使得植被年尺度特征非常微弱，相比之下，年内变异处于主导地位。

全球植被在不同土地覆盖类型之间的能量占比差异相对较大（图4（b）），并且年尺度比值也基本呈现出大于其他时间尺度的特征（除常绿阔叶林之外）。常绿阔叶林年内尺度占比均值高达0.529，而年尺度占比仅为0.35。



审图号：GS京(2026)0070号

图3 基于2001—2020年MODIS NDVI的植被多时间尺度能量占比值空间分布图及主导时间尺度空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of multi-time scale energy proportion of vegetation and dominant time scale spatial distribution map based on MODIS NDVI from 2001 to 2020

## 3.2 频谱参数与全球陆表植被物候耦合关系分析

### 3.2.1 年尺度振幅值与植被生长峰值之间的关系

陆表植被大都具备显著的周期性生长季特征，

且以每年1个生长季为主。植被生长峰值是指植被在1个生长季中光合作用潜力达到最大值时的状态值，是表征生态系统生产力及碳交换能力的关键指标（Liu等，2021）。本研究中用年度NDVI最大值

来表征植被生长峰值。频率域年尺度傅里叶组分的振幅值则在一定程度上表征了植被的年度变异范围（即最大值同最小值之差）。非生长季植被光合

作用停滞，NDVI接近于0（常绿植被区域除外），因此也一定程度上反映了植被的年度动态变异范围，从而与年尺度振幅具备相似的生态学内涵。

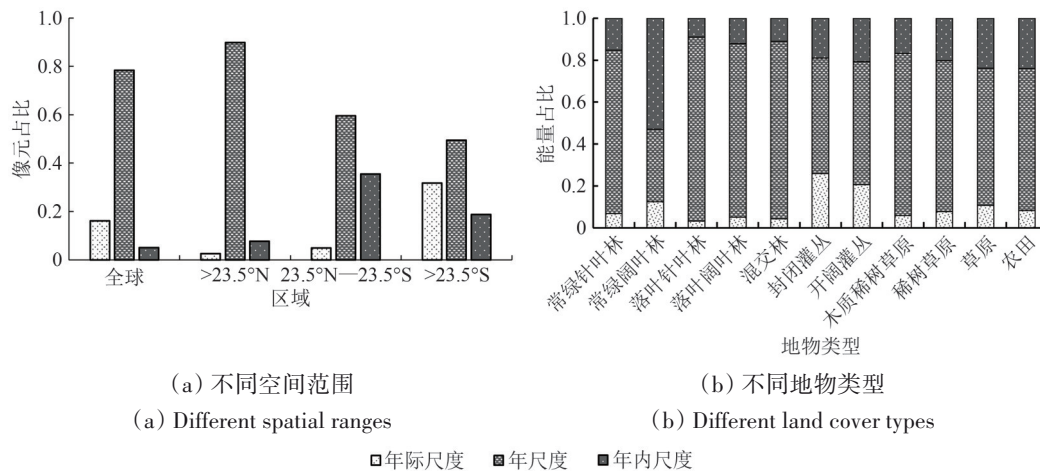


图4 不同时间尺度下植被在不同空间范围和地物类型下的特征分析

Fig. 4 Analysis of vegetation characteristics in different spatial ranges and different types of land cover type

图5展示了20年间全球陆表植被在年尺度振幅值与年度植被生长峰值相关关系的空间分布特征。全球植被的年尺度振幅值与生长季峰值呈现显著正相关的区域多于显著负相关的区域。两者全球平均相关系数均值为0.425，呈现显著相关性区域的平均值为0.394。对于通过显著性检验 ( $P < 0.05$ ) 区域，在北半球年尺度振幅与生长季峰值耦合关系相比于南半球更为紧密，其平均相关系数为0.407，而南半球为0.346。全球有78.96%的植被覆盖区域年尺度振幅值与生长季峰值呈现正相关关系（表1），其中有55.24%区域通过显著性检验呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，主要分布在北半球高纬度地区和美国中部、墨西哥西部、萨赫勒部分地区、非洲南部、澳大利亚等干旱半干旱地区。这些区域大部分为干旱区或者植被类型以灌丛类和草原类为主，植被活动具有明确的年尺度生长变化特征，NDVI的最小值非常接近于0，因而两个指标基本等同，也呈现显著正相关 (Malamiri 和 Khormizi, 2020; Liu 等, 2021; 孙莉昕等, 2023)。而部分区域，由于常绿植被的存在，NDVI的全年最小值可能远大于0，年尺度振幅的变化就不再单一依赖于生长季峰值的变化，这时候两者就不再高度正相关。另一方面，全球21.03%的区域年尺度振幅值与生长季峰值呈负相关关系，其中6.49%的植被覆盖区域呈现显著负相关 ( $P < 0.05$ )，主要分布在赤道附近、中国南

部，美国东部和西部沿海地区。这些区域植被生长的年尺度特征相对较弱，年内尺度动态特征显著，植被年度生长季峰值增大的同时，NDVI最小值增幅更为明显，从而导致了年度动态范围的减小，使得2个指标之间出现显著负相关。这些观测证据表明植被生长峰值和年尺度振幅尽管在大部分区域呈现出一致的变异特征，但实质上表征了不同的植被物候信息。

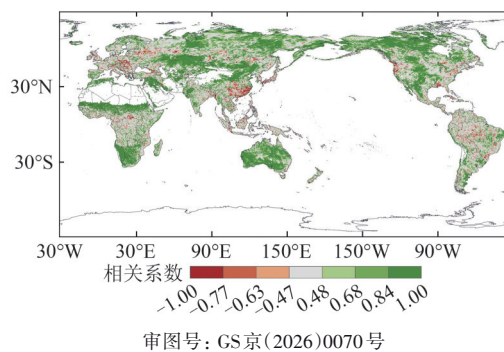


图5 基于2001年—2020年MODIS NDVI计算所得的全球植被年尺度振幅值与植被生长峰值的相关系数空间分布图  
Fig 5 Spatial distribution of correlation coefficients between global vegetation annual scale amplitude values and peak vegetation growth values calculated based on MODIS NDVI from 2001 to 2020

### 3.2.2 年尺度相位特征基本特征

除了振幅特征，不同时间尺度的相位特征同植被物候的动态过程可能存在密切的关联。本研

究主要关注年尺度的相位特征。具体地，以360 d周期对应频率为0.002778次/d处的相位值表征年尺度相位。其中相位计算可能存在负值，将负值相位加上周期的长度(360°)转换成正值。受地球公转引起的地表辐射强度分布格局变化的影响，全球陆表植被在年尺度的相位呈现出明显的南北半球分布差异(图6)。北半球的生长季峰值多出现在夏季，年尺度的相位主要出现在年中，其中北纬50°以北的区域相位值较为稳定，平均相位值约178°，对应1年中的第178天，即每年的6月底。南半球陆表植被的年尺度相位则主要出现在300°左右，即每年的10—11月份。这种南北半球的空间分布同植被物候表征出的空间分布格局是一致的。然而年尺度相位也呈现出与时间域提取的遥感植被物候参数不一致的空间特征。例如受温度的纬度梯度变化控制，遥感提取的植被物候在北

半球中高纬地区往往呈现出随着纬度升高而物候开始期推迟的现象，而图7中的年尺度相位并没有表征出这种特征(Zhang等, 2012)，这也表明年尺度相位在北半球中高纬地区并不能很好的指示植被生长季开始期。类似的，在主要受降水控制的萨赫勒地区，植被物候开始期也呈现出一致的纬度梯度特征(Shi等, 2023)，该地区的年尺度相位值在整个区域则基本都出现在4—5月份。这些证据进一步表明年尺度相位同基于植被指数时间序列时间域特征定义的物候开始期、峰值期或结束期参数存在一定关联，但并不能完全等同(Loyarte等, 2008; Moody和Johnson, 2001)。因此为了更进一步理解年尺度相位的生物物理意义，有必要进一步定量分析其与时间域定义的植被物候参数之间的关系。

表1 全球不同范围内年尺度振幅与植被生长峰值不同相关关系区域占比

Table 1 Regional proportion of different correlations between annual scale amplitude and vegetation growth peak in different ranges of the world

研究对象	区域	显著正相关区域占比/% ( $P<0.05, r>0$ )	不显著正相关区域占比/% ( $P>0.05, r>0$ )	显著负相关区域占比/% ( $P<0.05, r<0$ )	不显著负相关区域占比/% ( $P>0.05, r<0$ )
AmplitudeM—PEAK	全球	55.24	23.73	6.49	14.54
AmplitudeM—PEAK	北半球	56.68	23.26	6.26	13.80
AmplitudeM—PEAK	南半球	50.27	25.35	7.32	17.15

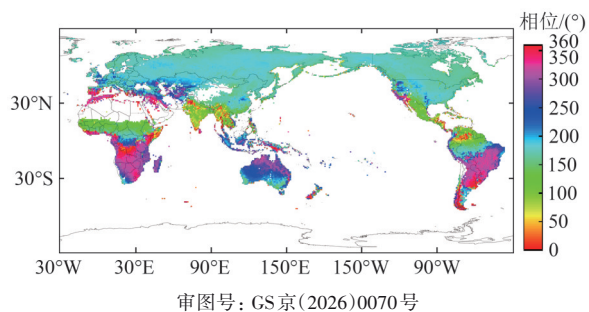


图6 基于2001—2020年MODIS NDVI的植被年尺度相位值空间分布格局

Fig. 6 Global annual scale phase based on MODIS NDVI from 2001 to 2020

### 3.2.3 年尺度相位与时间域植被物候参数的耦合关系

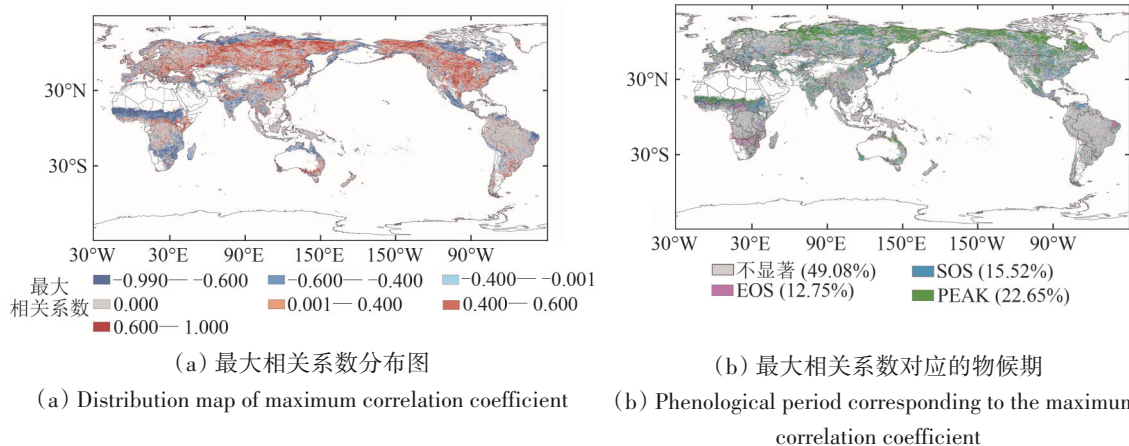
为了进一步量化不同区域年尺度相位同时间域植被物候参数的对应关系，我们提取了从2001年—2020年逐年的年尺度物候，并将其与MODIS官方物候产品MOD12Q2中提供的生长季开始期(SOS)、生长季峰值期(PEAK)和生长季结束期(EOS)3个

时间域植被关键物候参数年度值进行相关性分析(图7)。结果表明，年尺度相位值与植被关键物候期在50.08%的陆表植被覆盖区存在显著的相关性( $P<0.1$ )。其中显著正相关的区域占28.19%，主要分布在北半球30°—60°N，最大值可达到0.9。显著负相关的区域占22.73%，主要分布在萨赫勒、非洲南部、澳大利亚、印度及部分北极地区(图7(a))。大面积的负相关关系表明年尺度相位在这些区域表征了同时间域物候期截然相反的植被季节性变异特征。

通过对比与3种物候期相关系数的绝对值发现，占全球陆表植被区域22.65%的区域植被物候峰值期与年尺度相位有较好的相关关系，主要分布在北半球中高纬度地区、美国中部、印度、萨赫勒北部以及澳大利亚东部(图7(b))。15.52%的区域植被生长开始期与年尺度相位相关性关系较好，主要分布在西伯利亚东部、地中海、美国西部、萨赫勒地区东部，以及零星分布在中高纬度地区。非洲南部、萨赫勒地区中部和巴西东部

沿海地区植被的年尺度相位主要与植被物候结束期相关性较强, 占全球区域的 12.75%。气候较为湿润的区域如热带湿润区、欧洲中西部和北美东部地区等, 这些地区植被本身单一生长季特征较弱, 且生长季持续时间较长, 导致年尺度相位同时间域的物候期参数在时间上不存在显著的相关性。总之, 这些结果表明年尺度相位在特定的区

域同时间域物候参数存在时间变异上的关联性甚至一致性, 但在约占全球陆表植被覆盖区一半面积的区域 (主要是湿润地区) 两者之间不存在显著的相关性, 因此不加约束的将年尺度相位同时间域的植被物候参数作为等同的物候期指示器理解是不合理的 (Loyarte 等, 2008; Moody 和 Johnson, 2001)。



审图号: GS京(2026)0070号

图7 年尺度相位与时间域植被物候参数(SOS、PEAK、EOS)的耦合关系

Fig. 7 Coupling relationship between annual scale phase and vegetation phenological parameters in time domain (SOS、PEAK、EOS)

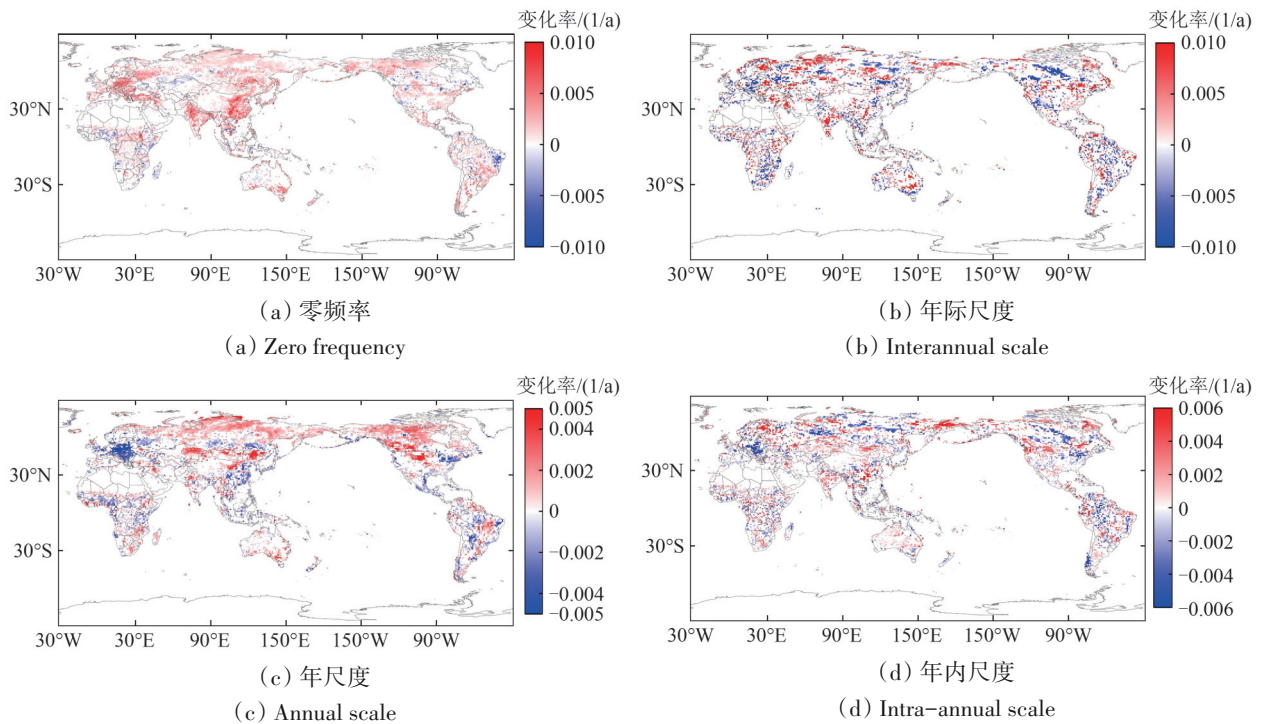
### 3.3 全球陆表植被多时间尺度动态的时间变化特征

#### 3.3.1 植被多时间尺度振幅时间趋势特征

为了进一步分析全球绿化背景下, 不同时间尺度植被动态的变化特征, 本研究基于 2001 年—2020 年间的 MODIS NDVI 数据集, 以 5 年为 1 个分析窗口, 并采取逐年滑动的方式, 分别提取了每个 5 年窗口内的零频率尺度 (即均值)、年际尺度、年尺度和年内尺度的 NDVI 振幅值, 进而使用 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 趋势分析方法提取了不同时间尺度植被变化的时间趋势特征 (图 8)。在零频率下 (图 8 (a)), 全球大部分地区都呈现了显著变绿的特征 ( $P < 0.05$ ), 平均变化率为每年 0.00076。占有 42.7% 的陆表植被覆盖区有显著绿化趋势, 主要包括印度次大陆、中国南部、北半球高纬度地区和萨赫勒中部地区等。仅有 9.85% 的区域为显著褐变趋势, 零星分布在阿根廷、北美洲北部、非洲南部和西伯利亚北部的部分地区。这种趋势的空间格局同前期大量的全球植被长期趋势变化分析结果是一致的 (Chen 等,

2019)。

在年际尺度上 (图 8 (b)), 振幅变化趋势均值为每年 0.00004, 显著增长和显著下降的区域较为分散。其中显著增长的区域 ( $P < 0.05$ ) 占 16.46% (表 2), 主要分布在美国中部和西部、澳大利亚东部、蒙古、部分西伯利亚区域等地区, 显著下降的区域约占 13.86%, 主要包括非洲东南部、南美洲中部、美国西部和加拿大北部等地区。在年度尺度上 (图 8 (c)), 全球平均变化趋势为每年 0.00039, 其中 29.9% 的陆表植被覆盖区呈现显著增长趋势, 集中分布在北半球中高纬度地区、亚洲中部、加拿大、中国东北部等。有 15.63% 的植被覆盖区呈现显著下降趋势, 集中在中国南部、欧洲中部, 美国东部、巴西东部沿海区域和阿根廷北部。植被在年内尺度的变化趋势在全球范围内变化趋势较小 (图 8 (d)), 全球平均变化趋势仅为每年 0.000001, 有 20.54% 的植被覆盖区域呈现显著上升趋势, 主要分布在印度、中国南部、北半球 50°N 纬度带附近和极地附近, 仅有 15.54% 的区域呈现显著下降趋势。



审图号：GS京(2026)0070号

图8 全球陆表植被在不同时间尺度下振幅趋势变化特征空间分布图

Fig 8 Spatial distribution of amplitude trend changes of global continental surface vegetation at different time scales

表2 全球陆表植被在不同时间尺度下趋势变化特征的区域占比

Table 2 Regional proportion of trend change characteristics of global continental surface vegetation at different time scales

时间尺度	/%		
	显著增长区域占比 ( $P < 0.05$ )	不显著 ( $P > 0.05$ )	显著下降区域占比 ( $P < 0.05$ )
零频率	42.72	47.42	9.85
年际尺度	16.46	69.68	13.86
年尺度	29.90	54.47	15.63
年内尺度	20.54	63.92	15.54

### 3.3.2 植被在不同时间尺度下振幅对年均值变化的解释能力分析

由于前期的长期植被变化分析主要是基于年度平均或者年累计植被参量开展的，这种平均和累计信号综合了不同时间尺度的变异特征。为了进一步明晰不同尺度特征的变化对平均信号变化的贡献度，本研究进一步开展了全球年际、年度和年内3个尺度下的振幅值分别与均值（零频率下的振幅）的线性回归分析。回归分析的决定系数 ( $R^2$ ) 表征了不同时间尺度振幅变异对均值变异的

解释度。每个像元上决定系数最大值对应的的时间尺度标记为对应像元的主导时间尺度。最大值决定系数的空间分布情况如图9 (a)，结果表明  $R^2$  值较大的区域分布在北半球极地区域、欧洲中部、美国东部、萨赫勒地区、非洲南部、澳大利亚西部等地区。不同时间尺度振幅对零频率下振幅的最大决定系数的范围在0.247—0.99之间，平均值为0.66。最大决定系数所对应的的时间尺度空间分布结果为图9 (b)，结果表明最大决定系数  $R^2$  所对应的的时间尺度为年尺度的区域最多，分布较集中，而其余地区基本呈现年际尺度、年尺度和年内尺度混合分布特征。其中，年尺度对年均趋势解释程度较大的区域集中分布在北半球高纬度地区、欧洲、北美洲西部沿海地区、萨赫勒、非洲南部、澳大利亚地区。而年内尺度对零频率解释程度最大的区域占19.7%，年际尺度仅占有15.8%

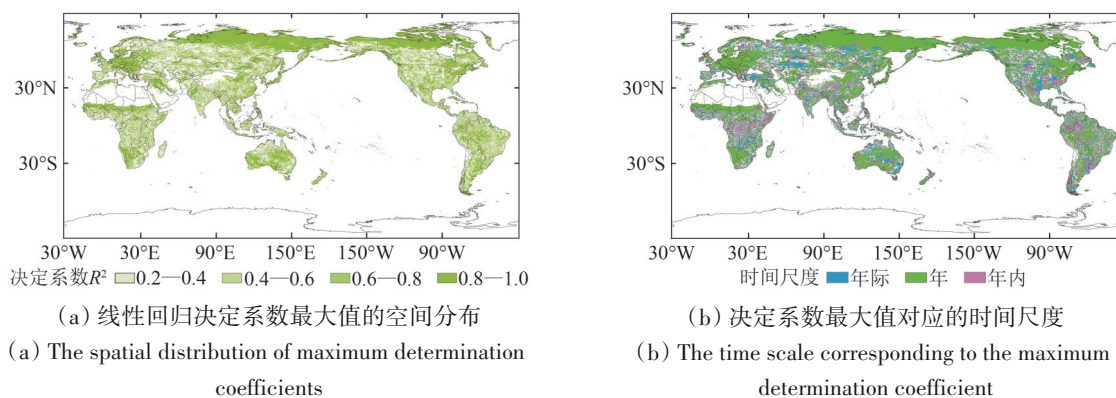
## 4 讨论

### 4.1 不同时间尺度植被动态的空间格局

基于长时序遥感植被参数产品，利用频谱分析方法提取不同时间尺度下的振幅值均值和时间尺度能量占比值表征植被多时间尺度动态特征的

空间格局, 结果表明全球陆表植被的多时间尺度动态特征呈现显著差异。以往大多研究主要关注基于频谱分析得到的植被动态年尺度振幅值的特征, 从而刻画植被动态的年尺度空间格局。如 Khormizi 等 (2023) 结果表明在无植被地区 (澳大利亚中部) 和常绿植物物种的生物群落 (如热带和亚热带湿润阔叶林生物群落) 中年尺度振幅值较低, 在北美、欧洲和亚洲落叶林的年尺度振幅值要高。Recuero 等 (2019) 研究结果也表明年尺度振幅值高值主要位于  $50^{\circ}\text{N}$  以北, 在  $50^{\circ}\text{N}$  以南振

幅值下降, 振幅值可能会根据气候和地形而出现一些波动。而本研究在年尺度振幅值上得到了相似的植被动态空间格局, 即年尺度振幅值高值出现在北半球高纬度地区, 主要为落叶针叶林, 而在干旱地区达到最低值 (极低振幅值是由于全年的 NDVI 值较低导致的), 其次是热带地区 (主要为常绿植物其年尺度变化较为平稳)。同时得出全球植被振幅值在年尺度上的振幅值较其他 2 个尺度要大的特征。



审图号: GS京(2026)0070号

图9 全球各时间尺度振幅时间趋势与年均值趋势特征的线性回归分析

Fig. 9 Linear regression between trend of amplitude specific time scale and trend of annual average NDVI

其次, 本研究结果表明全球大部分区域陆表植被的生长时间特征是由年尺度主导的 (78.4%), 这些区域植被基本具有季节性特征较强的特点。而在部分干旱和半干旱区域植被生长主要由年际尺度主导 (16.1%)。植被生长由年内尺度主导的区域 (5%), 基本与具有 2 个或者多个生长季的植被空间分布一致, 这些区域主要集中在热带地区以及农作物种植区, 并且与一些作者发现由于存在多个生长季节而难以识别物候事件的区域相吻合 (Julien 和 Sobrino, 2009)。年内尺度占比较大的常绿阔叶林大部分位于赤道地区, 如非洲的刚果盆地雨林、亚洲的东南亚地区、南美洲的亚马逊雨林地区等, 这些区域一般没有明显的季节性生长周期, 而是在整年都保持一定的生长活动, 因此呈现出常绿阔叶林在年内尺度时间尺度能量占比要大于其他时间尺度的特征。Linscheid 等 (2020) 指出对于 NDVI 而言, 大部分时间尺度特征由年周期捕获 (71%), 特别是在北回归线 ( $23.5^{\circ}\text{N}$ ) 处。短期振荡主要分布在热带美洲和东南亚的部分地

区, 而长期振荡主要分布在澳大利亚、南非等地区。这与本文得到的不同尺度能量占比空间分布格局基本保持一致。

#### 4.2 频域参数与植被物候的关联性

以往学者直接利用傅里叶组分的振幅值来表示植被生长期的光合作用强度, 用相位值来表示植被的物候期特征, 并根据不同植被生长具有不同的振幅值和相位值的特征进行地物分类和生长周期的确定 (Malamiri 和 Khormizi, 2020; Azzali 和 Menenti, 2000; Lee 等, 2020)。本文进一步量化评估年尺度相位和振幅同植被物候参数之间的关系, 结果表明植被年尺度振幅值和植被生长季峰值主要在北半球高纬度地区和干旱半干旱地区存在显著的耦合关系。其次, 在频率域内的年尺度相位值与时间域上传统物候期参数在时间上的变化仅在全球一半植被覆盖区是显著耦合的, 其中植被峰值期 (PEAK) 与年尺度相位值耦合度相对较好。这表明频率域的年尺度振幅和相位值同时间域定义的物候参数只能在特定的条件下才能表

征一致的物候特征，而大部分情形下这些频域参数提供了全新的物候特征信息。

### 4.3 多时间尺度视角下的全球植被变化趋势

全球陆表植被自上世纪80年代以来呈现出整体的变绿现象已得到广泛的印证，如Chen等（2019）使用叶面积指数（LAI）确定世界上超过三分之一的土地面积正在绿化，不到5%的土地正在褐变。然而，考虑到植被动态在不同时间尺度上表现出的差异性，这种整体上的植被绿化（以植被参数的年均值或者生长季累计值表征）并不能代表植被在所有时间尺度都发生了一致的显著增长特征。本研究结果也印证了这一猜想：年际、年度和年内尺度上呈现显著增长的陆表植被覆盖区域（ $P<0.05$ ）分别占16.46%、29.9%、20.54%，而年均值有42.7%的区域显著增长，即不同时间尺度上的植被动态变化趋势并不能完全与时间尺度上的整体年均变化趋势对等。

对于全球植被年均变化趋势显著的区域，有64.5%的区域可由年尺度变化趋势解释，19.7%的区域可由年内尺度解释，而仅占有15.8%的区域年际尺度解释。全球范围内部分干旱和半干旱区植被在年际尺度上呈现显著的增长趋势，如美国中部和西部，这些区域植被的生长具有年际尺度特征较强的特点。而干旱和半干旱区植被在时间域的整体年均尺度也已明显显示出植被增长趋势，这一趋势与频率域年际尺度趋势变化特征一致。如Fensholt等（2012）基于NDVI数据研究表明在全球半干旱地区中，植被生长限制因素主要是降水和以气温为主的部分区域，绿度都有增加（占全球干旱区的66%）。

其次，过去的研究已经明确指出了在地球的高纬度地区（ $>50^{\circ}\text{N}$ ），基于AVHRR和Landsat的卫星观测数据的分析显示，气温升高冰雪融化延长了植物光合作用活动的时间，植被的绿度显著上升（Ju和Masek，2016）。以及在北温带地区（ $25^{\circ}\text{N}$ — $50^{\circ}\text{N}$ ），自2000年以来，约1400万平方公里的温带区域出现绿化现象（ $P<0.10$ ），这一绿化趋势贡献了这一时期全球净叶面积增加的一半（Chen等，2019）。本研究在北半球中高纬度地区，亚洲中部、加拿大等地区年尺度上同样发现了一致的显著增长的特征，这些区域生物群落以北方森林/针叶林、温带阔叶林和混交林类型为主，植被具有

明显的季节性生长周期特征，年尺度振幅相较于其他2个尺度显著增加。同时由于温度是高纬度地区控制植物生长过程的最重要因素之一，全球变暖导致的植被生产力增加在这些区域最为显著（Li等，2022），从而也体现在年尺度振幅相较于其他尺度显著增加，植被的年尺度动态特征增强。

在对全球变绿起主导作用的中国和印度地区（Chen等，2019），主要在年内尺度上也发现了较强的显著增长趋势，表明其植被的绿化可能主要受年内尺度动态增强影响。总之，尽管随着全球气候变化和人类活动影响的不断加剧，陆表植被数10年来总体绿化的特征得到了越来越多的实证支持，但从多时间尺度视角仍发现这种绿化的特征仍表现出不均一性。这也进一步说明，在全球植被动态及其对气候的响应与反馈机制研究中，有必要考虑不同时间尺度动态特征作用差异性。

### 4.4 研究不足与未来展望

时域和频域是从2种视角解析植被动态特征，本文利用频域从多个尺度分解植被生长特征，并与以往时域研究结果对比，通过2个视角结合可以更好地分析植被特征。尽管较为系统的分析了全球陆表植被的多时间尺度动态特征，但本文仍存在一些不足之处，首先，本文通过利用不同时间尺度下的能量占比值的差值作为评价指标，可以从植被时间尺度主导强度上进行差异分析，但对于多个对象没有统一的评价标准，很难进行差异量化。因此，在后续期望可以确定合适的评价指标，更加细致地量化差异分析其产生差异的原因。其次，本文没有对原始观测序列进行去噪处理，主要考虑到一方面去噪处理本身可能造成提取傅里叶组分误差，另一方面MODIS月度植被指数产品是基于日尺度观测聚合而来，大部分区域的高频噪声已经很少了，对结果的影响也极为有限。不同噪声观测条件对不同时间尺度特征的影响未来有待进一步探究。第三，本文利用Theil-Sen方法计算不同时间尺度植被生长的线性变化，主要目的是观察植被生长在频率域的趋势变化特征，并同当前已有植被物候变化以及全球变绿的线性趋势相关研究进行讨论。但不可否认不同时间尺度的趋势可能具有非线性变化。因此，在未来的相关研究中需要进一步考虑植被的非趋势变化特征，以更精准地刻画植被生长的非平稳性特征。最后，本文主

要基于NDVI时间序列表征了植被动态特征,但不同的植被结构和功能参数所表征的植被动态本身存在一定差异(刘轩等, 2024; 谢志英等, 2024),因此不同植被遥感产品得到的多时间尺度动态特征也会存在差异,这有待进一步的量化分析。

## 5 结 论

本文针对如何准确表征全球陆表植被动态的多时间尺度空间格局特征的问题,使用多源长时序植被遥感产品对全球植被的多时间尺度频谱特征进行分析,并探讨全球陆表植被动态频谱特征的一致性。主要得出以下结论:

(1) 全球陆表植被的多时间尺度动态特征呈现显著差异。全球大部分陆地表面植被的生长时间动态特征由年尺度主导(占78.4%),且其年尺度振幅值最大。年内尺度变化主导的区域主要分布于赤道周边的热带雨林及东非地区。年际尺度变化主导的区域占比最小(5.5%),主要集中在干旱半干旱区。

(2) 频域组分参数(年尺度振幅值和相位值)同时间域提取的植被物候期参数只在特定的条件下表征了一致的物候动态特征。植被年尺度振幅值和植被生长峰值在显著耦合关系的区域,主要与植被生长具有明确的年尺度生长变化特征的区域吻合。年尺度相位值与时间域上传统物候值仅占有全球面积的28.19%区域呈现显著正相关性( $P < 0.1$ ),其中植被峰值期与年尺度相位值耦合度相对较好。

(3) 全球陆表植被指数在过去2001年—2002年间在各个时间尺度上的振幅均呈现出大范围(30%以上)显著的趋势变化特征,且各个尺度上的趋势特征均以增长为主,这同广泛关注的全球植被变绿现象(即年均值增长趋势)是一致的。然而不同时间尺度上振幅的时间趋势特征同年均值的趋势特征呈现出较大的空间不一致性,且年际、年度和年内3个尺度的动态特征仅能解释年均值66%的时间动态特征。这充分凸显出前期基于年均值时间趋势呈现的“全球绿化”现象并不代表植被在各个时间尺度上均能呈现出一致的绿化特征。

陆表植被动态在生态系统碳循环和水循环中扮演着重要角色(Friedlingstein等, 2025)。过去数十年出现的大范围“全球植被绿化”现象更

凸显出陆表生态系统已经在气候变化和人类活动的共同作用下发生了巨大的变化,并且这种变化将对地球系统的生物物理过程和生物化学过程产生深刻的影响(Piao等, 2019)。但同时我们也应该认识到“全球植被绿化”现象本身是非常复杂的(Pan等, 2018),本文的研究结果强调了时间尺度可能导致的差异性的全球植被绿化格局,从而进一步深化了我们对这一热点现象的理解。

## 参考文献(References)

- Azzali S and Menenti M. 2000. Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(5): 973-996 [DOI: 10.1080/014311600210380]
- Brandt M, Mbow C, Diouf A A, Verger A, Samimi C and Fensholt R. 2015. Ground- and satellite-based evidence of the biophysical mechanisms behind the greening Sahel. *Global Change Biology*, 21(4): 1610-1620 [DOI: 10.1111/gcb.12807]
- Canisius F, Turrall H and Molden D. 2007. Fourier analysis of historical NOAA time series data to estimate bimodal agriculture. *International Journal of Remote Sensing*, 28(24): 5503-5522 [DOI: 10.1080/01431160601086043]
- Chen C, Park T, Wang X H, Piao S, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R and Myneni R B. 2019. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2(2): 122-129 [DOI: 10.1038/s41893-019-0220-7]
- De Jong R, de Bruin S, de Wit A, Schaepman M E and Dent D L. 2011. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 692-702 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.011]
- De Jong R, Verbesselt J, Zeileis A and Schaepman M E. 2013. Shifts in global vegetation activity trends. *Remote Sensing*, 5(3): 1117-1133 [DOI: 10.3390/rs5031117]
- Ding Z H, Peng J, Qiu S J and Zhao Y. 2020. Nearly half of global vegetated area experienced inconsistent vegetation growth in terms of greenness, cover, and productivity. *Earth's Future*, 8(10): e2020EF001618 [DOI: 10.1029/2020EF001618]
- Donohue R J, McVICAR T R and Roderick M L. 2009. Climate-related trends in Australian vegetation cover as inferred from satellite observations, 1981-2006. *Global Change Biology*, 15(4): 1025-1039 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01746.x]
- Du J Q, Quan Z J, Fang S F, Liu C C, Wu J H and Fu Q. 2020. Spatio-temporal changes in vegetation coverage and its causes in China since the Chinese economic reform. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1): 1144-1159 [DOI: 10.1007/s11356-019-06609-6]
- Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, Reenberg A, Prince S D, Tucker C, Scholes R J, Le Q B, Bondeau A, Eastman R, Epstein H, Gaughan A E, Hellden U, Mbow C, Olsson L, Paruelo J, Sch-

- weitzer C, Seaquist J and Wessels K. 2012. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981-2007 — an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 121: 144-158 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.017]
- Forzieri G, Alkama R, Miralles D G and Cescatti A. 2017. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth. *Science*, 356(6343): 1180-1184 [DOI: 10.1126/science.aal1727]
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Hauck J, Landschützer P, Le Quéré C, Li H M, Luijkx I T, Olsen A, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Schwingshackl C, Sitch S, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Alin S R, Arneeth A, Arora V, Bates N R, Becker M, Bellouin N, Berghoff C F, Bittig H C, Bopp L, Cadule P, Campbell K, Chamberlain M A, Chandra N, Chevallier F, Chini L P, Colligan T, Decayeux J, Djeutchouang L M, Dou X Y, Rojas C D, Enyo K, Evans W, Fay A R, Feely R A, Ford D J, Foster A, Gasser T, Gehlen M, Gkritzalis T, Grassi G, Gregor L, Gruber N, Gürses Ö, Harris I, Hefner M, Heinke J, Hurtt G C, Iida Y, Ilyina T, Jacobson A R, Jain A K, Jarníková T, Jersild A, Jiang F, Jin Z, Kato E, Keeling R F, Goldewijk K K, Knauer J, Korsbakken J I, Lan X, Lauvset S K, Lefèvre N, Liu Z, Liu J J, Ma L, Maksyutov S, Marland G, Mayot N, McGuire P C, Metzl N, Monacci N M, Morgan E J, Nakaoka S I, Neill C, Niwa Y, Nützel T, Olivier L, Ono T, Palmer P I, Pierrot D, Qin Z C, Resplandy L, Roobaert A, Rosan T M, Rödenbeck C, Schwinger J, Smallman T L, Smith S M, Sospedra-Alfonso R, Steinhoff T, Sun Q, Sutton A J, Séférian R, Takao S, Tatebe H, Tian H Q, Tilbrook B, Torres O, Tourigny E, Tsujino H, Tubiello F, van der Werf G, Wanninkhof R, Wang X H, Yang D X, Yang X J, Yu Z, Yuan W P, Yue X, Zaehle S, Zeng N and Zeng J Y. 2025. Global carbon budget 2024. *Earth System Science Data*, 17(3): 965-1039 [DOI: 10.5194/essd-17-965-2025]
- Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W and Miao C Y. 2017. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45(1): 223-243 [DOI: 10.1146/annurev-earth-063016-020552]
- Geerken R A. 2009. An algorithm to classify and monitor seasonal variations in vegetation phenologies and their inter-annual change. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4): 422-431 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.001]
- Guan K Y, Medvigy D, Wood E F, Caylor K K, Li S and Jeong S J. 2014. Deriving vegetation phenological time and trajectory information over Africa using SEVIRI Daily LAI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2): 1113-1130 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2247611]
- Holmgren M, Scheffer M, Ezcurra E, Gutiérrez J R and Mohren G M J. 2001. El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 16(2): 89-94 [DOI: 10.1016/S0169-5347(00)02052-8]
- Huesca M, Litago J, Palacios-Orueta A, Montes F, Sebastián-López A and Escribano P. 2009. Assessment of forest fire seasonality using MODIS fire potential: a time series approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11): 1946-1955 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.06.022]
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X and Ferreira L G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 195-213 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2]
- Ju J C and Masek J G. 2016. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984-2012 Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 176: 1-16 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.001]
- Julien Y and Sobrino J A. 2009. Global land surface phenology trends from GIMMS database. *International Journal of Remote Sensing*, 30(13): 3495-3513 [DOI: 10.1080/01431160802562255]
- Kendall M G. 1975. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin
- Khormizi H Z, Ghafarian Malamiri H R, Alian S, Stein A, Kalantari Z and Ferreira C S S. 2023. Proof of evidence of changes in global terrestrial biomes using historic and recent NDVI time series. *Heliyon*, 9(8): e18686 [DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18686]
- Lee S, Kim S and Yoon H. 2020. Analysis of differences in vegetation phenology cycle of abandoned farmland, using harmonic analysis of time-series vegetation indices data: the case of Gwangyang City, South Korea. *GIScience and Remote Sensing*, 57(3): 338-351 [DOI: 10.1080/15481603.2019.1698490]
- Li J, Bevacqua E, Chen C, Wang Z L, Chen X H, Myneni R B, Wu X S, Xu C Y, Zhang Z X and Zscheischler J. 2022. Regional asymmetry in the response of global vegetation growth to springtime compound climate events. *Communications Earth and Environment*, 3(1): 123 [DOI: 10.1038/s43247-022-00455-0]
- Linscheid N, Estupinan-Suarez L M, Brenning A, Carvalhais N, Cremer F, Gans F, Rammig A, Reichstein M, Sierra C A and Mahecha M D. 2020. Towards a global understanding of vegetation - climate dynamics at multiple timescales. *Biogeosciences*, 17(4): 945-962 [DOI: 10.5194/bg-17-945-2020]
- Linscheid N, Mahecha M D, Rammig A, Carvalhais N, Gans F, Nelson J A, Walther S, Weber U and Reichstein M. 2021. Time-scale dependent relations between earth observation based proxies of vegetation productivity. *Geophysical Research Letters*, 48(24): e2021GL093285 [DOI: 10.1029/2021GL093285]
- Liu Q, Piao S, Fu Y H, Gao M D, Peñuelas J and Janssens I A. 2019. Climatic warming increases spatial synchrony in spring vegetation phenology across the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 46(3): 1641-1650 [DOI: 10.1029/2018GL081370]
- Liu X, Zhou J, Lu J, Jia L, Xiong X Q and Cui Y L. 2024. Analyzing the uncertainty of the multisource remote sensing-based vegetation products for drought monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(9): 2383-2404 (刘轩, 周杰, 卢静, 贾立, 熊旭倩, 崔祎霖. 2024. 多源植被遥感产品应用于干旱监测的不确定性分析. *遥感学报*, 28(9): 2383-2404) [DOI: 10.11834/jrs.20232388]
- Liu Y, Li Y, Li S C and Motesharrei S. 2015. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human factors. *Remote Sensing*, 7(10): 13233-13250 [DOI: 10.3390/rs71013233]
- Liu Y, Wu C Y, Wang X Y, Jassal R S and Gonsamo A. 2021. Impacts

- of global change on peak vegetation growth and its timing in terrestrial ecosystems of the continental US. *Global and Planetary Change*, 207: 103657 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2021.103657]
- Loyarte M M G, Menenti M and Diblasi A M. 2008. Modelling bioclimate by means of Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI time series in Western Argentina. *International Journal of Climatology*, 28(9): 1175-1188 [DOI: 10.1002/joc.1610]
- Mahecha M D, Reichstein M, Jung M, Seneviratne S I, Zaehle S, Beer C, Braakhekke M C, Carvalhais N, Lange H, Le Maire G and Moors E. 2010. Comparing observations and process-based simulations of biosphere-atmosphere exchanges on multiple timescales. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G2): G02003 [DOI: 10.1029/2009JG001016]
- Malamiri H R G and Khormizi H Z. 2020. Investigating vegetation changes in Iran using NDVI time series of NOAA-AVHRR sensor and Harmonic Analysis of Time Series (HANTS). *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(113): 141-158 [DOI: 10.22131/sepehr.2020.40476]
- Menenti M, Azzali S, Verhoef W and Van Swol R. 1993. Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Advances in Space Research*, 13(5): 233-237 [DOI: 10.1016/0273-1177(93)90550-U]
- Moody A and Johnson D M. 2001. Land-surface phenologies from AVHRR using the discrete Fourier transform. *Remote Sensing of Environment*, 75(3): 305-323 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00175-9]
- Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G and Nemani R R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386(6626): 698-702 [DOI: 10.1038/386698a0]
- Olsson L and Eklundh L. 1994. Fourier series for analysis of temporal sequences of satellite sensor imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 15(18): 3735-3741 [DOI: 10.1080/01431169408954355]
- Pan N Q, Feng X M, Fu B J, Wang S, Ji F and Pan S F. 2018. Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: insights from time-varying trends. *Remote Sensing of Environment*, 214: 59-72 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.018]
- Piao S, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, and Myneni R B. 2019. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(1): 14-27 [DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x]
- Piao S, Yin G D, Tan J G, Cheng L, Huang M T, Li Y, Liu R G, Mao J F, Myneni R B, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Xiao Z Q, Zeng N, Zeng Z Z and Wang Y P. 2015. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 21(4): 1601-1609 [DOI: 10.1111/gcb.12795]
- Platt T and Denman K L. 1975. Spectral analysis in ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 6(1): 189-210 [DOI: 10.1146/annurev.es.06.110175.001201]
- Prieto G A, Parker R L and Vernon F L III. 2009. A Fortran 90 library for multitaper spectrum analysis. *Computers and Geosciences*, 35(8): 1701-1710 [DOI: 10.1016/j.cageo.2008.06.007]
- Recuero L, Litago J, Pinzón J E, Huesca M, Moyano M C and Palacios-Orueta A. 2019. Mapping periodic patterns of global vegetation based on spectral analysis of NDVI time series. *Remote Sensing*, 11(21): 2497 [DOI: 10.3390/rs11212497]
- Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379-1389 [DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934]
- Shi S Q, Yang P Q and van der Tol C. 2023. Spatial-temporal dynamics of land surface phenology over Africa for the period of 1982-2015. *Heliyon*, 9(6): e16413 [DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16413]
- Sun L X, Zhu W Q, Xie Z Y, Zhan P and Li X Y. 2023. Multi-dimension evaluation of remote sensing indices for land surface phenology monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(11): 2653-2669 (孙莉昕, 朱文泉, 谢志英, 詹培, 李雪莹. 2023. 陆表物候监测的遥感指数多维度评估. *遥感学报*, 27(11): 2653-2669) [DOI: 10.11834/jrs.20221135]
- Wagenseil H and Samimi C. 2006. Assessing spatio-temporal variations in plant phenology using Fourier analysis on NDVI time series: results from a dry savannah environment in Namibia. *International Journal of Remote Sensing*, 27(16): 3455-3471 [DOI: 10.1080/01431160600639743]
- Walden A T, Percival D B and McCoy E J. 1998. Spectrum estimation by wavelet thresholding of multitaper estimators. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 46(12): 3153-3165 [DOI: 10.1109/78.735293]
- Xie Z Y, Zhu W Q and Fu Y S. 2024. Key issues of remote sensing-based vegetation phenology monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(9): 2131-2143 (谢志英, 朱文泉, 付永硕. 2024. 植被物候遥感监测关键问题. *遥感学报*, 28(9): 2131-2143) [DOI: 10.11834/jrs.20233088]
- Yang Y J, Bai X Y, Tan Q, Luo G J and Tian S Q. 2020. Analysis of the spatiotemporal evolution of NDVI and its influencing factors in the "Belt and Road" region from 1982 to 2015. *Mountain Research*, 38(2): 252-264 (杨钰杰, 白晓永, 谭秋, 罗光杰, 田诗琪. 2020. 1982-2015年“一带一路”地区NDVI时空演变规律及其影响因素. *山地学报*, 38(2): 252-264) [DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000507]
- Zhang X Y, Friedl M A and Schaaf C B. 2006. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G4): G04017 [DOI: 10.1029/2006JG000217]
- Zhang X Y, Friedl M A, Tan B, Goldberg M D and Yu Y Y. 2012. Long-term detection of global vegetation phenology from satellite instruments//Zhang X Y, ed. *Phenology and Climate Change*. Rijeka and Shanghai: InTech: 297-320 [DOI: 10.5772/39197]
- Zhang X Y, Tan B and Yu Y Y. 2014. Interannual variations and trends in global land surface phenology derived from enhanced vegetation index during 1982-2010. *International Journal of Biometeorology*, 58(4): 547-564 [DOI: 10.1007/s00484-014-0802-z]
- Zhang Y J, Gui Z, Liu Q S and Liu G H. 2016. The analysis of the vegetation dynamic changes from 1982 to 2013 in the Mongolian Plateau based on satellite imageries and meteorological data. *Remote*

- Sensing Technology and Application, 31(5): 1022-1030 (张韵婕, 桂朝, 刘庆生, 刘高焕. 2016. 基于遥感和气象数据的蒙古高原1982~2013年植被动态变化分析. 遥感技术与应用, 31(5): 1022-1030) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.5.1022]
- Zhou J, Jia L, Menenti M, van Hoek M, Lu J, Zheng C L, Wu H and Yuan X T. 2021. Characterizing vegetation response to rainfall at multiple temporal scales in the Sahel-Sudano-Guinean region using transfer function analysis. Remote Sensing of Environment, 252: 112108 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112108]
- Zhu G L, Zhao C Z, Tong S Z and Zhu W H. 2022. Response of vegetation dynamic change to multi-scale drought stress in the high-latitude Nenjiang River basin in China. Frontiers in Ecology and Evolution, 10: 1074199 [DOI: 10.3389/fevo.2022.1074199]
- Zhu Z C, Piao S, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S and Zeng N. 2016. Greening of the Earth and its drivers. Nature Climate Change, 6(8): 791-795 [DOI: 10.1038/nclimate3004]

## Revealing global terrestrial vegetation dynamic across timescales based on long time series satellite observations

CUI Yilin<sup>1,2</sup>, ZHOU Jie<sup>1,2,3</sup>, JIANG Yiqiu<sup>1,2</sup>, GUO Dongliang<sup>1,2</sup>, ZOU Li<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

2. College of Urban and Environmental Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

3. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft 2628 CD, The Netherlands

**Abstract:** As an important part of the terrestrial ecosystem, vegetation exerts a profound influence on global climate variation. Accurately characterizing vegetation dynamics is crucial for capturing and predicting changes in ecosystem structure and function in the context of global warming. On the basis of existing long-time series and multisource vegetation remote sensing products, this study uses the spectrum analysis method to characterize the spatial pattern of global continental surface vegetation on timescales and analyzes the dynamic trend characteristics of vegetation from the perspective of multiple timescales.

Using long-term, multi-source remote sensing vegetation products, this study decomposes vegetation dynamics into three key timescales: interannual, annual, and intra-annual through by using spectral analysis. The amplitude obtained from Fourier analysis is used to characterize the spatial pattern of vegetation dynamics, and the phase value is used to evaluate the coupling relationship with phenological parameters. In addition, the temporal trend of vegetation indices is evaluated to explore its relationship with the observed “global greening” phenomenon.

(1) Vegetation growth dynamics in most areas of the global land surface (78.4%) are largely dominated by the annual scale. The areas dominated by the intra-annual scale account for 16.1% and are mostly distributed in tropical areas. Areas dominated by the interannual scale constitute the smallest proportion (5.5%) and are mostly located in semiarid shrublands. (2) A significant correlation exists between the annual scale amplitude of vegetation and the peak value of vegetation growth. This correlation is mostly distributed in regions with more significant characteristics of vegetation seasonal growth. Only 28.19% of the global vegetation cover areas exhibited a significant positive correlation between the phase values at the annual scale and the phenological parameters in the time domain ( $P < 0.1$ ). Among these, the correlation between the peak vegetation period and annual-scale phase values is the strongest. (3) The amplitude temporal trend of the vegetation index on multiple timescales (Low frequency, Middle frequency, High frequency) exhibits a large-scale growth trend, which is generally consistent with the phenomenon of “global vegetation greening” (i.e., increasing annual mean vegetation index values). However, the trend characteristics exhibit considerable spatial heterogeneity across scales. Notably, amplitude dynamics at the three scales explain only 66% of the annual mean dynamic characteristics, highlighting the temporal scale dependence of the “global vegetation greening” phenomenon.

This study employs spectral analysis to conduct a multi-temporal scale analysis of global vegetation dynamics, offering a novel perspective for related research. The findings contribute significantly to a deeper scientific understanding of global vegetation greening and its response mechanisms within broader ecosystem functions.

**Key words:** terrestrial vegetation, timescales, spectrum analysis, climate change, vegetation phenology

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFF1303702); National Natural Science Foundation of China (No. 42171371)