网络出版时间:2026-03-13 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.09.004

武夷山国家公园垂直植被带谱变化及对气候因子的响应

贾晶晶[1],刘艳清[1],徐丹丹[1,2],郑士超[3],朱建琴[3],赵春江[4,5]

(1 南京林业大学 生态与环境学院,江苏 南京 210037;2 福建武夷山森林生态系统国家定位观测研究站,福建 武夷山 354300;
3 武夷山国家公园福建科研监测中心,福建 武夷山 354300;4 北京市农林科学院 信息技术研究中心,北京 100097;
5 国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097)

[摘 要] 【目的】分析武夷山垂直植被带谱上不同植被类型生长的年际变化规律及其对气候因子的响应机制和时滞效应,为揭示亚热带山地植被对气候变化的响应提供科学依据。【方法】以武夷山国家公园为研究对象,基于2001—2024年中分辨率成像光谱仪(MODIS)MOD13Q1产品的归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)数据,采用卡尔曼滤波算法重构缺失数据,通过决定系数(R^2)和均方根误差(root mean square error,RMSE)验证重构精度;运用STL(seasonal and trend decomposition using loess)时间序列分解方法提取去季节性NDVI数据集;结合同期降水、气温数据,系统分析武夷山垂直带谱上5种典型植被类型(常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、矮林、草甸)生长的年际变化趋势及其对气候因子的响应机制和滞后时间。【结果】基于卡尔曼滤波重构的缺失和异常NDVI数据的精度均较高($R^2>0.90$)。常绿阔叶林和针阔混交林均呈现三阶段变化模式,分别于2017和2019年由增长转为下降;针叶林在2011年后进入持续下降;矮林于2019年由增转降;草甸则在2010年由降转升,增长最为显著。5种植被类型的生长状况均与年均温存在显著正相关关系($P\leqslant0.05$),而与降水无显著相关性,温度是影响武夷山垂直带谱植被生长的主要气候因子。生长季节内,不同植被类型NDVI对气候因子的滞后响应呈分异特征,常绿阔叶林对温度滞后1个月,针阔混交林和针叶林对温度滞后2个月,矮林和草甸对温度即时响应但对降水滞后3个月。【结论】年均温度是驱动武夷山垂直带谱植被生长年际变化的主导气候因子,降水主要通过时滞效应间接影响植被生长,不同植被类型对气候因子的响应存在显著时空异质性。

[关键词] 山地植被;垂直植被带谱;气候因子;归一化植被指数;时间序列分析;卡尔曼滤波;武夷山国家公园

[中图分类号] S718.51+2;TP79;S127 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)09-0038-11

Variations of the vertical vegetation zonation and its response to climate factors in Wuyishan National Park

JIA Jingjing[1],LIU Yanqing[1],XU Dandan[1,2],ZHENG Shichao[3],
ZHU Jianqin[3],ZHAO Chunjiang[4,5]

(1 *College of Ecology and Environment,Nanjing Forestry University,Nanjing,Jiangsu* 210037,*China*;
2 *National Observation and Research Station of Fujian Wuyishan Forest Ecosystem,Wuyishan,Fujian* 354300,*China*;
3 *Wuyishan National Park Fujian Research and Monitoring Center,Wuyishan,Fujian* 354300,*China*;
4 *Information Technology Research Center,Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences,Beijing* 100097,*China*;
5 *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture,Beijing* 100097,*China*)

Abstract:【Objective】This research aims to analyze the interannual variation of different vegetation types

[收稿日期] 2025-08-18 [修回日期] 2025-12-10
[基金项目] 福建省林业科技项目(2024FKJ13);国家自然科学基金项目(41901361);自然资源部地理国情监测重点实验室项目(2023NGCM04)
[作者简介] 贾晶晶(2000—),女,安徽阜阳人,硕士,主要从事林业遥感研究。E-mail:jiajingjing@njfu.edu.cn
[通信作者] 徐丹丹(1987—),女,江苏南通人,副教授,博士,主要从事生态遥感研究。E-mail:dandan.xu@njfu.edu.cn

along the vertical zonation of Wuyi Mountain and their response mechanisms and time-lag effects to climate factors, to provide scientific basis for understanding how subtropical montane vegetation responds to climate change.【Method】The normalized difference vegetation index (NDVI) data derived from MODIS MOD13Q1 from 2001 to 2024 was collected. The missing data was reconstructed by using a Kalman filter, and the reconstruction accuracy was assessed by using R^2 and root mean square error (RMSE). Seasonal and trend decomposition using loess (STL) was then applied to obtain deseasonalized NDVI series. Combined with concurrent temperature and precipitation data, interannual growth trends of five representative vegetation types (evergreen broad-leaved forest, coniferous and broad-leaved mixed forest, coniferous forest, dwarf forest, and meadow) and their response and time-lag to climate factors were assessed.【Result】The data reconstruction using the Kalman filter achieved high accuracy ($R^2>0.90$). Evergreen broad-leaved forest and mixed forest showed three-phase change, shifting from an increasing to a decreasing trend in 2017 and 2019. Coniferous forest showed a persistent decline after 2011. Shift from an increasing to a decreasing trend was observed in dwarf forest in 2019, while shift from a decreasing to an increasing trend was observed in meadow in 2010, which exhibited the most pronounced increase. The growth conditions of all the vegetation types were significantly and positively correlated with annual mean temperature ($P\leqslant0.05$), whereas no significant correlation with precipitation was detected. Temperature, therefore, emerged as the dominant climatic factor. During the growing season, time-lag effects varied among vegetation types: evergreen broad-leaved forest responded to temperature change with a 1-month lag, mixed forest and coniferous forest with a 2-month lag, whereas dwarf forest and meadow responded with no time lag to temperature but responded with a 3-month lag to precipitation.【Conclusion】Annual mean temperature is the primary climatic factor driving interannual vegetation dynamics along the vertical zonation of Wuyi Mountain, while precipitation affects vegetation mainly through time-lag effect. Vegetation types exhibit significant spatiotemporal heterogeneity in their responses to climatic factors.

Key words: montane vegetation; vertical vegetation zonation; climate factors; NDVI; time series analysis; Kalman filter; Wuyishan National Park

21世纪以来，全球气候变化已经成为国际社会广泛关注的问题。据IPCC第6次评估报告，过去10年地球表面温度上升约1.1 ℃，未来20年全球温升预计达到或超过1.5 ℃[1]。植被作为陆地生态系统的重要组成部分，对气候变化具有高度敏感性，是指示全球气候变化的重要生物指标[2]。山地植被垂直带谱融合了海拔梯度和纬度梯度的植被分布特征，其中海拔梯度上的植被生态环境变化较纬度梯度更为剧烈，使得山地植被对外界气候变化表现出更高的敏感性[3]，因此成为植被-气候响应机制的理想研究区。

近年来，山地植被气候响应机制研究取得了重要进展。在空间尺度上，植被对气候因子的响应呈现出显著的地理分异特征，北方干旱和半干旱地区植被生长主要受降水控制，而湿润的南方地区则以气温为主导因素[4-5]；从海拔分布看，低海拔平原区温度是主要影响因子，高海拔高原区降水作用更为突出[5-6]。其次，在植被类型层面，不同植被类型因物种组成、群落结构等差异而表现出不同的气候响应特征，如青藏高原高寒草甸对气温的敏感性显著高于林地和灌丛[7]，新疆温带荒漠植被受降水影响的程度总体大于气温[8]。这些研究为理解山地植被-气候关系奠定了重要基础。然而，现有研究多集中于中高纬度干旱、半干旱地区，对于亚热带山地垂直带谱上不同植被类型的气候响应机制则缺乏系统研究。这一研究空白的形成主要源于两方面原因：一是热带或亚热带地区人类活动的干扰较大，较难厘清植被垂直带谱对气候变化的响应[9]；二是亚热带地区降雨丰沛、云雾频繁，遥感影像获取困难，垂直带谱植被生长的季节性差异显著，数据缺失和季节性干扰成为突出问题[10]。

研究垂直带谱植被对气候变化的长期响应需要长时间序列的数据支撑。归一化植被指数(normalized difference vegetation Index，NDVI)被广泛认为是反映植被生长和覆盖状况的最佳指标[11]，但在亚热带山地垂直带谱应用时，云层遮挡导致的数据缺失以及不同植被类型生长季节的显著差异，使得传统的单一数据处理方法难以满足研究需求。近

年来,时间序列分解技术能够稳健地分离趋势、季节性和随机波动成分,卡尔曼滤波技术基于状态空间模型能够在数据缺失情况下提供最优估计,两者在植被动态监测中得到了广泛应用[12-13]。然而,这些单一方法难以协同处理数据缺失补偿、季节性分离和趋势提取,尤其是在垂直带谱上不同植被类型物候特征差异显著的情况下。因此,构建协同处理数据缺失补偿、季节性分离和趋势提取的集成化数据处理框架,是当前亚热带山地植被气候响应研究亟需突破的技术瓶颈。

本研究以武夷山国家公园植被垂直带谱为研究区,采用卫星遥感影像、卡尔曼滤波数据重构、STL(seasonal and trend decomposition using loess)季节性分离-趋势提取相结合的方法,研究2001—2024年该区5种典型植被类型(常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、矮林和草甸)NDVI的年际变化趋势,探讨不同植被类型对气候因子(降水、气温)的即时性和滞后性响应,以期厘清亚热带山地垂直带谱上各植被类型对气候变化响应的机制差异,进而为区域生态环境保护和气候变化适应策略制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

武夷山国家公园位于我国福建省和江西省交界处(27°33′—27°54′ N,117°27′—117°51′ E),区内高差约1 800 m,平均海拔1 200 m,地形起伏较大(图1)。该地气候为典型的湿润亚热带季风气候,水热条件良好,年平均气温为8.5~18.0 ℃,年平均降水量为1 486~2 150 mm。该区域拥有当今世上留存最大的亚热带常绿阔叶林,区域内植被物种丰富,垂直植被带谱界线分明。

研究区选择武夷山国家公园内人为影响较小的武夷山国家自然保护区(图1),沿海拔梯度从低到高有5种典型植被,分别为常绿阔叶林(300~1 500 m)、针阔混交林(1 100~1 600 m)、温性针叶林(1 500~1 800 m)、中山苔藓矮曲林(1 700~1 900 m)、中山草甸(1 800~2 158 m)[14],构成常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、矮林、草甸5种典型植被类型,呈完整的垂直带谱分布。

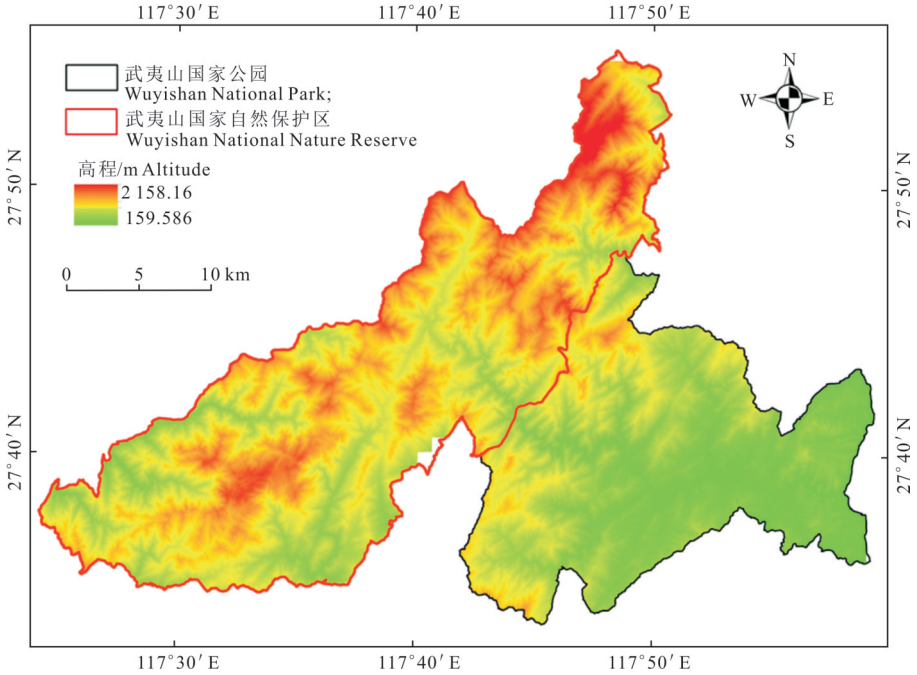


图1 武夷山国家公园及武夷山国家自然保护区的位置与高程

Fig. 1 Location and elevation of Wuyishan National Park and Wuyishan National Nature Reserve

1.2 数据来源及预处理

遥感数据采用中分辨率成像光谱仪(MODIS)的MOD13Q1植被指数产品,来源于美国国家航空航天局(NASA)陆地过程分布式主动存档中心(LP DAAC,https://lpdaac.usgs.gov),时间跨度2001—2024年,空间分辨率250 m,时间分辨率16 d,采用正弦投影。研究区覆盖h27v06和h28v06共2个瓦片,NDVI数值范围为-2 000~1 0000,比例因子为0.000 1。该产品已经过几何校正、辐射校正和大气校正。

植被分类数据来源于武夷山国家公园科研监

测中心，包括2000－2018年不同时期的植被分类成果，空间分辨率为30 m×30 m，该数据基于Landsat TM/OLI遥感影像，采用监督分类方法结合野外样地调查验证获得，总体分类精度达85%以上，每个像元对应一种植被类型（如常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、矮林、草甸）。

气象数据来源于美国NOAA气象监测数据（https://www.ncei.noaa.gov/maps/daily/），从中获取武夷山市气象站点数据（站点编号58730，地理坐标 27.77° N、118.03° E，海拔221 m）。数据集时间跨度为2000－2024年，涵盖逐日降水量和平均气温观测数据，经剔除异常值后计算逐月均值，最终以2000－2024年武夷山市逐月降水量、逐月平均气温数据用于后续分析。

数据预处理采用以下流程：首先，针对上述MODIS MOD13Q1产品，使用MRT（MODIS Reprojection Tool）软件对HDF格式的MODIS数据进行批量格式转换（HDF转GeoTIFF）、投影转换（正弦投影转WGS 1984地理坐标系）和波段提取，同时提取NDVI波段和Pixel Reliability质量控制波段。其次，基于Pixel Reliability波段进行质量控制，保留高质量数据，将云、雪/冰覆盖及其他低质量像元赋值为NoData。为保证MODIS NDVI产品（空间分辨率250 m）与植被分类数据（空间分辨率30 m）的空间一致性，将两类数据统一至WGS 1984地理坐标系后，对MODIS NDVI产品进行重采样，由250 m分辨率提升至30 m分辨率，采用双线性插值（bilinear interpolation）方法以保持NDVI数据的连续性。随后，使用ArcMap 10.8软件对影像进行镶嵌和裁剪，提取研究区范围内5种植被类型的NDVI值，并计算各植被类型所对应像元的NDVI均值。由于质量控制导致部分时相存在数据缺失，需进一步采用卡尔曼滤波进行数据重构。

1.3　研究方法

1.3.1　基于卡尔曼滤波的数据重构　武夷山夏季降水多、雾气大，导致NDVI数据存在异常值或缺失值，而卡尔曼滤波已被证明可有效填补具有周期性变化的数据集缺失值[12]。卡尔曼滤波是一种基于贝叶斯推理的递推最优估计算法，通过状态空间模型描述系统动态过程，在线性高斯假设下能够提供统计意义上的最优无偏估计。为此，本研究采用卡尔曼滤波通过“预测-更新”递推机制实现NDVI最优估计。其有关计算公式[15]如下：

$$x_k = F_k x_{k-1} + \omega_k, \tag{1}$$

$$z_k = H_k x_k + v_k, \tag{2}$$

$$\hat{x}_{(k|k-1)} = F_k \hat{x}_{(k-1|k-1)}, \tag{3}$$

$$P_{(k|k-1)} = F_k P_{(k-1|k-1)} F_k^{\mathrm{T}} + Q_k, \tag{4}$$

$$K_k = P_{(k|k-1)} H_k^{\mathrm{T}} \left(H_k P_{(k|k-1)} H_k^{\mathrm{T}} + R_k \right)^{-1}, \tag{5}$$

$$\hat{x}_{(k|k)} = \hat{x}_{(k|k-1)} + K_k \left(z_k - H_k \hat{x}_{(k|k-1)} \right), \tag{6}$$

$$P_{(k|k)} = (I - K_k H_k) P_{(k|k-1)}。 \tag{7}$$

式中：x_k为k时刻的真实NDVI状态向量；F_k为状态转移矩阵，描述系统动态特性；x_{k-1}为$(k-1)$时刻的状态向量；w_k为过程噪声，服从零均值高斯分布$\mathrm{N}(0, Q_k)$；z_k为k时刻的NDVI观测值向量；H_k为观测矩阵，用于建立状态向量与观测值的映射关系；v_k为观测噪声向量，服从零均值高斯分布$\mathrm{N}(0, R_k)$。$\hat{x}_{(k|k-1)}$为基于$(k-1)$时刻信息对k时刻状态的先验估计值；$\hat{x}_{(k-1|k-1)}$为$(k-1)$时刻状态的后验估计值；$P_{(k|k-1)}$为k时刻的先验估计误差协方差矩阵；$P_{(k-1|k-1)}$为$(k-1)$时刻的后验估计误差协方差矩阵；T表示矩阵转置；Q_k为过程噪声协方差矩阵；R_k为观测噪声协方差矩阵，反映NDVI观测值的不确定程度，其值越大，表示观测数据的噪声越大，可信度越低；K_k为卡尔曼增益；$P_{(k|k)}$为k时刻的后验估计误差协方差矩阵；I为单位矩阵。

1.3.2　NDVI数据平滑处理　本研究使用R语言“zoo”包的“na.StructTS()函数”实现卡尔曼滤波，该函数基于结构化时间序列模型（structural time series model），将时间序列分解为趋势、季节和不规则成分，通过最大似然估计自动优化参数，实现缺失值的最优估计。有效补全了原始NDVI数据因云、雨、雾等干扰产生的缺失，构建了时空连续数据集。但插值未消除原始观测中大气干扰、传感器误差等残留的高频噪声，可能会影响后续分析的可靠性。因此，进一步采用Savitzky-Golay（S-G）滤波器进行平滑处理[16]，以消除非植被生理过程的异常波动，确保重构数据既完整覆盖研究时段，又真实反映植被生长的连续特征。平滑处理表达式为：

$$Y_j = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} P_i y_{j+i}}{N}。 \tag{8}$$

式中：Y_j为平滑后的数据集；P_i为平滑窗口第i个时间序列滤波时的系数；y_{j+i}为原始时间序列数据集；N为滤波长度；m为滤波窗口大小。

1.3.3　时间序列分析法（STL）　时间序列也称为动态序列，是指将某种现象的指标数值按照时间顺序排列而成的数值序列。通过对时间序列的分析，可以反映研究对象的发展变化趋势和规律[13]。由

于武夷山自然保护区内植被生长状态呈季节变化，所以本研究利用R语言“rts”包中的“stl()函数”，将每种植被类型的时间序列对象分解成水平、趋势、季节性和随机噪声4个部分。通过时间序列分解，剔除NDVI季节性波动的影响，获得2001－2024年去季节性的NDVI时间序列数据，以保证长时间序列分析的时间一致性。

1.3.4 *精度评价* 为验证卡尔曼滤波(插值＋平滑)重建NDVI数据的可靠性，采用数据保真度验证策略，选取原始数据中所有有效观测点(非缺失且NDVI＞0)作为核心验证基准，此类观测点无数据缺失、且能反映真实植被生长状态，是判断重建数据是否保留原始信息的关键参照。通过将原始观测值与卡尔曼滤波后的对应值进行对比，量化评估处理过程(补全缺失＋去除噪声)在优化数据完整性的同时是否扭曲原始有效信息；最终采用反映拟合优度的决定系数(R^2)、反映整体误差幅度的均方根误差(RMSE，数值越小表示滤波过程对原始数据的改变越小)[17]和显著性水平(P值)衡量保真程度。其具体计算公式如下：

$$R^2=1-\frac{\sum\left(y_i-\hat{y}_i\right)^2}{\sum\left(y_i-\bar{y}\right)^2}, \tag{9}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum\left(y_i-\hat{y}_i\right)^2\right)}。 \tag{10}$$

式中：y_i为原始有效观测值，$\hat{y}_i$为滤波后对应值，$\bar{y}$为观测值的均值，n为有效观测点数。

1.3.5 *分段线性回归分析与滞后相关分析* 采用分段线性回归法，分析2001－2024年不同植被类型NDVI的年际变化趋势和强度。在回归分析模型中，k_n(n=1，2，3)表示NDVI在不同时段内的年际变化斜率。k_n为正值则NDVI上升，反之则下降。其绝对值越大，表明变化越显著。用P值检验统计学显著性，P＜0.05即具统计学意义。同时运用Pearson相关分析探讨年际NDVI与年均温度、年总降水量的相关关系。考虑到植被对气候变化响应存在滞后性，为准确量化气候因子对不同植被类型的影响程度，基于滞后相关分析法，将5种植被类型生长季(5－10月)NDVI值分别与前0～5个月的月均温和月降水量进行Pearson相关分析，通过相关系数(r)表征植被生长状况与气候因子的相关程度，识别植被NDVI对降水和温度的滞后响应时间。以上计算及统计均使用R语言(https://www.r-project.org/)完成，并运用Origin 2024制图分析。

2 结果与分析

2.1 卡尔曼滤波插值与平滑处理后NDVI数据的保真度评估

经卡尔曼滤波对NDVI数据重构和平滑处理之后，5种植被类型重构数据的拟合优度(R^2)、均方根误差(RMSE)与显著性(P)如表1所示。表1表明，5种植被类型重构数据的保真度均达到较高水平(R^2＞0.90，P≤0.001)。其中矮林和草甸的保真度最高，R^2分别为0.998 3和0.998 2，RMSE分别为0.018 3和0.018 2，显示经卡尔曼滤波处理后数据重建质量极佳。针叶林和针阔混交林的保真效果次之，R^2分别为0.930 2和0.919 9，RMSE为0.000 2和0.010 1；常绿阔叶林的保真度较低，但仍保持在较高水平(R^2＝0.917 6，RMSE＝0.007 6)，总体而言，重构与平滑处理后的数据均可用于后续分析。

表1 不同植被类型NDVI数据重构和平滑处理的拟合优度(R^2)、均方根误差(RMSE)与显著性(P)

Table 1 Goodness of fit (R^2), root mean square error (RMSE), and significance (P) of NDVI data reconstruction and smoothing for different vegetation types

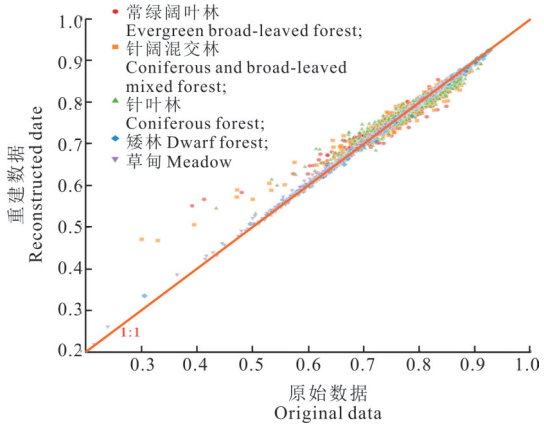
植被类型 Vegetation types	R^2	RMSE	P	植被类型 Vegetation types	R^2	RMSE	P
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	0.917 6	0.007 6	＜0.001	矮林 Dwarf forest	0.998 3	0.018 3	＜0.001
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	0.919 9	0.010 1	＜0.001	草甸 Meadow	0.998 2	0.018 2	＜0.001
针叶林 Coniferous forest	0.930 2	0.000 2	＜0.001				

重建NDVI与原始观测NDVI的散点关系如图2所示。由图2可以看出，数据点整体在贴近1∶1参考线旁紧密分布，表明重建值与观测值高度一致。

2.2 不同植被类型NDVI的年际间变化趋势

2001－2024年武夷山国家公园不同植被类型年际间变化趋势的分段线性回归分析结果见图3。图3表明，2001－2024年研究区不同植被类型NDVI呈现显著的阶段性变化特征，但突变点和变化趋势存在明显差异。图3-A、B显示，常绿阔叶林与针阔混交林均呈现明显的三阶段变化模式，2类

植被在前期均表现为下降，中期均进入显著增长阶段，并分别在2017年（常绿阔叶林）和2019年（针阔混交林）出现显著下降趋势，其中常绿阔叶林NDVI总变化幅度达0.06，针阔混交林后期下降速率约为其前期增速的3.1倍。图3-C表明，针叶林在2011和2019年出现2次转折，其中2001－2011年NDVI微弱下降（k_1＝－0.000 3，P＜0.001），2011－2019年转为显著上升（k_2＝0.004 0，P＜0.001），2019年后呈下降趋势但速率较缓（k_3＝－0.001 7，P＜0.001）。图3-D、E显示，矮林和草甸均呈现由单一突变点主导的阶段性变化特征，但二者变化趋势相反，矮林于2019年出现突变点，研究前期呈持续增长趋势（k_1＝0.001 0，P＜0.001），2019年后转为显著下降（k_2＝－0.003 4，P＜0.001），下降速率约为此前趋势的3.4倍；草甸则在2010年发生趋势反转，由2001－2010年的持续下降（k_1＝－0.001 0，P＜0.001）转为2010年后的显著增长（k_2＝0.004 8，P＜0.01），其后期增长速率为前期下降速率的4.8倍，NDVI增幅达0.07，在所有植被类型中增长最为显著。



红色实线为1∶1参考线。
The solid red line represents the 1∶1 reference line.

图2　重建NDVI与原始观测NDVI的散点对比
Fig. 2　Scatter plot of reconstructed versus original observed NDVI

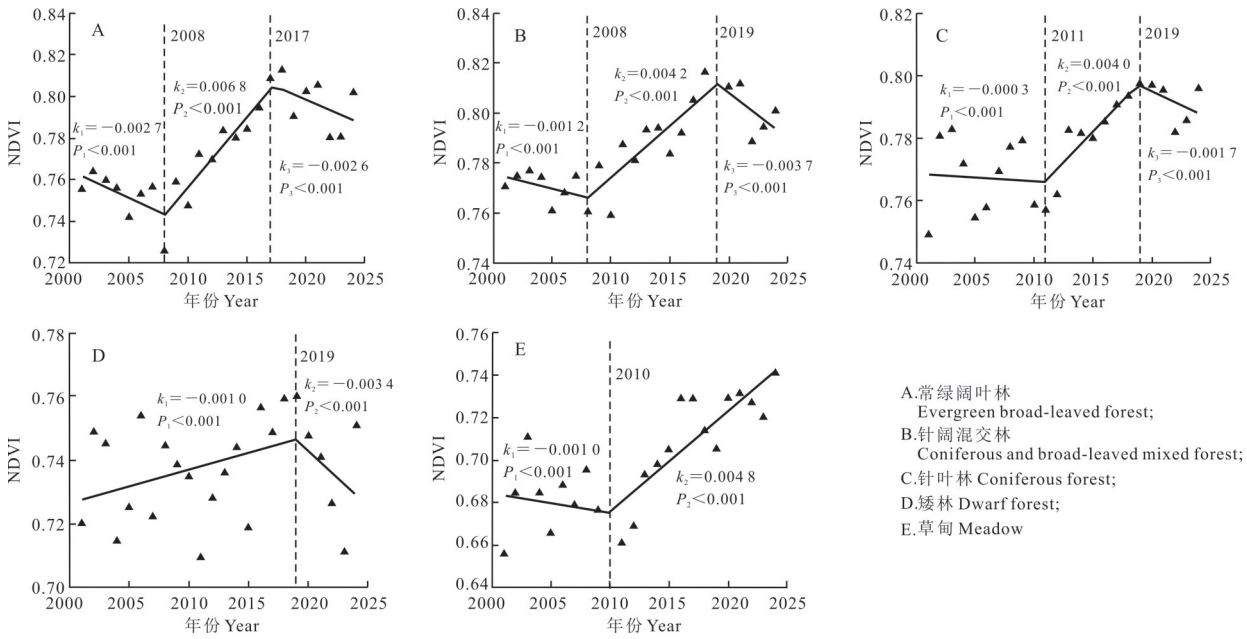
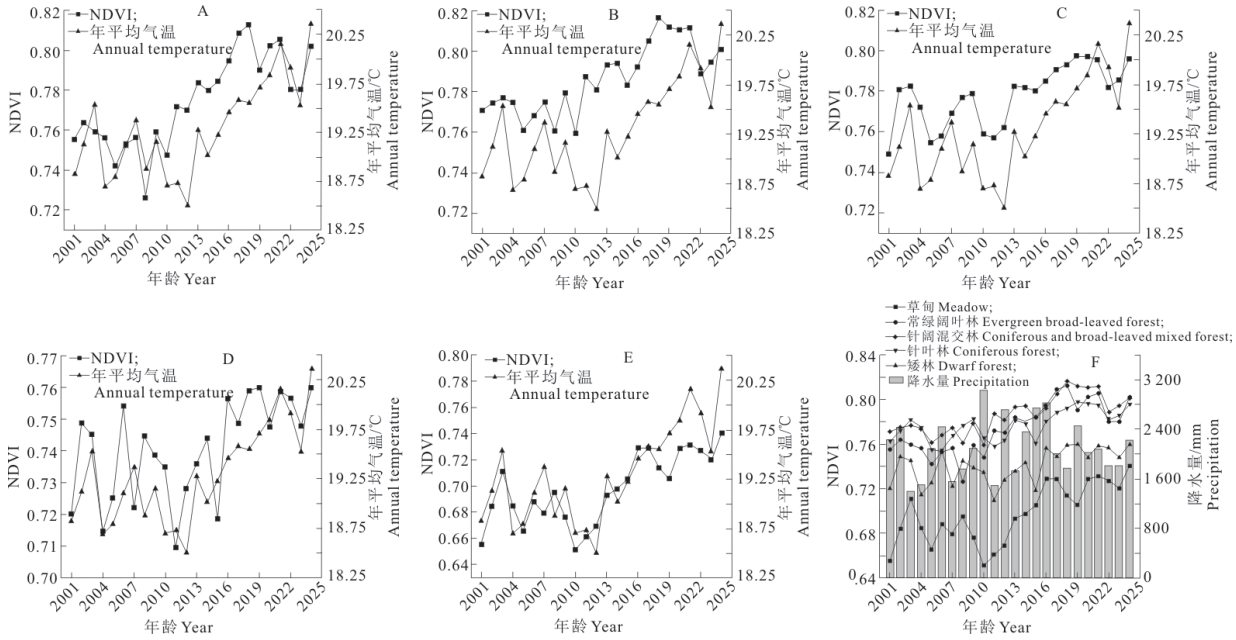


图3　2001－2024年武夷山国家公园不同植被类型NDVI的年际间变化趋势
Fig. 3　Interannual variation trend of NDVI among different vegetation types in Wuyishan National Park from 2001 to 2024

2.3　不同植被类型NDVI对于气候因子的年际间响应

由图4可见，2001－2024年，武夷山年均温度呈现波动上升趋势，其中2001－2012年总体以波动下降为主，2013－2024年则明显升高。年均温度最高值（约19.837 ℃）出现在2020年，最低值（约18.505 ℃）出现在2012年，两者相差1.332 ℃。研究区降水总体丰沛，但年际间波动显著，2010年降水量最高（达3 037.6 mm），2003年最低（仅为1 400.1 mm），两者相差1 637.5 mm。2001－2024年武夷山国家公园垂直带谱上5种植被类型的NDVI整体上与年均温度变化表现出较强的一致性图（4-A～E）。相比之下，各植被类型NDVI的年际变化与降水量在部分年份呈现一定的一致性，但整体上并未表现出稳定或一致的响应模式，这与相关性分析中“NDVI与降水量无显著相关”的结论相一

致(图4-F)。



A. 常绿阔叶林;B. 针阔混交林;C. 针叶林;D. 矮林;E. 草甸;F. 不同植被类型NDVI与年降水量的关系。

A. Evergreen broad-leaved forest; B. Coniferous and broad-leaved mixed forest; C. Coniferous forest; D. Dwarf forest; E. Meadow; F. Relationship graph between NDVI of different vegetation types and annual precipitation.

图4 武夷山国家公园垂直带谱上不同植被类型NDVI随温度(A—E)与降水(F)的变化

Fig. 4 Variation trends of NDVI of different vegetation types along the vertical vegetation zonation of Wuyishan National Park with temperature (A—E) and precipitation (F)

图4还表明,常绿阔叶林2005—2017年NDVI值的变化趋势与年平均气温基本一致,尤其在2004和2008年温度偏低时,NDVI值亦显著下降(图4-A)。针阔混交林NDVI与年平均气温变化趋势总体同步,2001—2004年及2005—2018年的同步性尤为明显,且年际波动幅度相对较小(图4-B)。针叶林NDVI整体随温度升高而上升,仅在2007—2008年和2014—2015年与年平均气温变化方向不一致(图4-C)。矮林的NDVI在2010年前与年平均气温的变化趋势较为一致,2011年后波动加剧,NDVI的升降速率均高于年平均气温的变化速率(图4-D)。草甸的NDVI除2007—2009年、2012—2014年与年平均气温变化趋势相反外,其余年份均与年平均气温保持较好的一致性(图4-E)。相比之下,5种植被类型NDVI与年降水量之间未表现出明显的同步趋势,特别是2010年降水量大幅增加时,大多数植被类型的NDVI反而出现下降;而2011年降水偏低时,NDVI值亦同样下降,表明降水对NDVI变化的影响机制较为复杂(图4-F)。

武夷山垂直带谱上不同植被类型NDVI和气候因子的相关性分析结果见表2。

表2 2001—2024年武夷山垂直带谱上不同植被类型NDVI和气候因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between NDVI of different vegetation types in the vertical vegetation zonation of Wuyishan National Park and climate factors during 2001 to 2024

植被类型 Vegetation types	平均气温 Mean temperature	降水量 Precipitation	植被类型 Vegetation types	平均气温 Mean temperature	降水量 Precipitation
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	0.705 0***	0.060	矮林 Dwarf forest	0.502 1*	0.137
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	0.710 4***	−0.093	草甸 Meadow	0.872 7***	−0.115
针叶林 Coniferous forest	0.809 0***	−0.105			

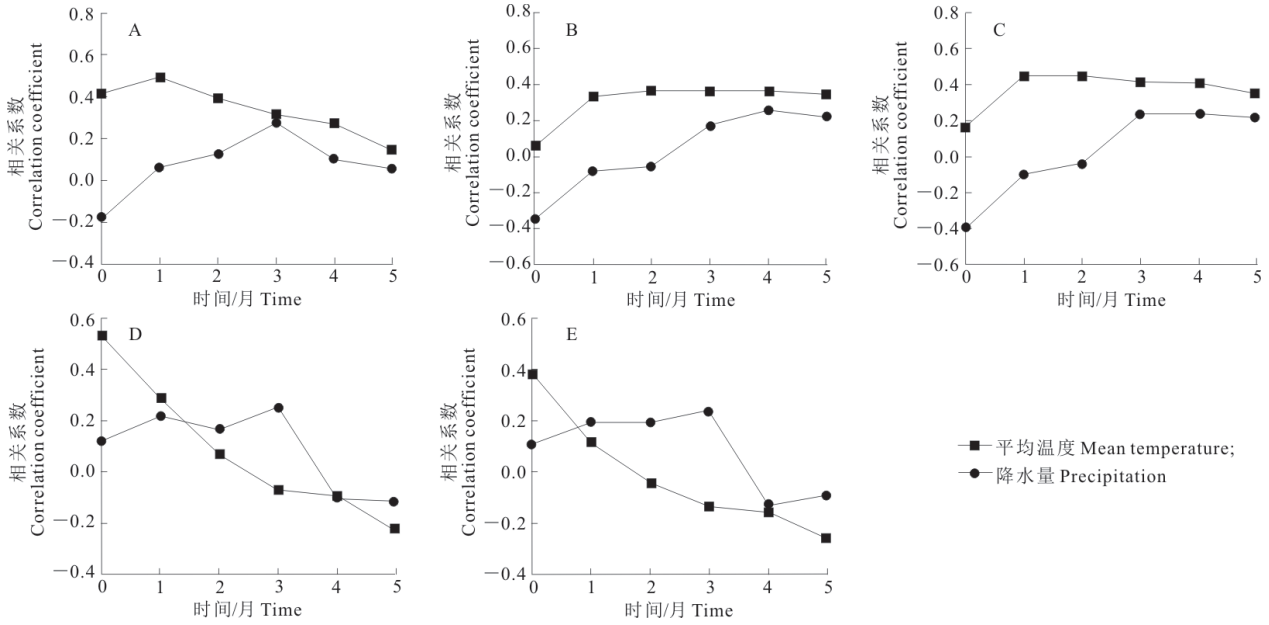
注(Note):*. $P<0.05$;**. $P<0.01$;***. $P<0.001$。

表2表明,5种植被类型NDVI年际间变化均与年平均气温存在显著或极显著正相关关系,其中草

甸、针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林的NDVI与年均气温的相关性均达到极显著水平（$P<0.001$），矮林的NDVI与年平均气温亦呈显著相关（$P<0.05$）；不同植被类型和年平均气温的相关系数依次表现为草甸＞针叶林＞针阔混交林＞常绿阔叶林＞矮林；5种植被类型NDVI值的变化和年降水量无显著相关关系，降水量与常绿阔叶林及矮林NDVI值呈不显著正相关，与针阔混交林、针叶林、草甸呈不显著负相关关系。

2.4　垂直带谱上不同植被类型生长季NDVI对气候因子的滞后性响应

武夷山垂直带谱上不同植被类型生长季NDVI（5－10月）与前0～5个月（即前一年12月到本年4月）气候因子的相关性分析结果见图5。



A. 常绿阔叶林；B. 针阔混交林；C. 针叶林；D. 矮林；E. 草甸。

A. Evergreen broad-leaved forest; B. Coniferous and broad-leaved mixed forest; C. Coniferous forest; D. Dwarf forest; E. Meadow.

图5　武夷山垂直带谱上不同植被类型生长季NDVI与前0～5个月气候因子相关系数的变化

Fig. 5　Changes of the correlation coefficients between NDVI obtained in the growing season of different vegetation types along the vertical zonation of Wuyi Mountains and climatic factors at 0－5 month lags

由图5可见，武夷山国家公园垂直带谱上不同植被类型生长季NDVI对气候因子的滞后性响应呈现明显的差异特征。2001－2024年常绿阔叶林月均NDVI和前第1个月平均温度的相关性最高（$r=0.493$，$P<0.001$），后随着月份推前，NDVI与前面月份平均温度的相关性逐渐降低但均达显著水平；生长季常绿阔叶林的月均NDVI和当月降水量呈负相关关系（$r=-0.181$，$P<0.05$），和前第3个月降水量的相关系数最高（$r=0.277$，$P<0.001$）（图5-A）。针阔混交林月均NDVI和前第1和2个月平均温度的相关性较高，分别为0.457和0.448（$P<0.001$），与当月温度相关性相对较低（$r=0.164$，$P<0.05$）；其NDVI值和当月降水量呈强负相关（$r=-0.394$，$P<0.001$），与前第3，4和5个月降水量的相关系数较高（0.236，0.240和0.216，$P<0.01$）（图5-B）。针叶林NDVI与前第2个月平均温度的相关性最高（$r=0.370$，$P<0.001$），与当月温度相关性不显著（$r=0.059$，$P>0.05$）；其NDVI值和当月降水量呈负相关关系（$r=-0.347$，$P<0.01$），和前第4个月降水量的相关性最高（$r=0.259$，$P<0.05$）（图5-C）。矮林和草甸NDVI均与当月平均温度相关性最高，分别为0.390和0.536（均$P<0.001$），随着月份推前，相关性显著递减甚至转为负相关；矮林和草甸的NDVI值与月降水量的相关系数均以前第3个月最高，分别为0.240和0.255（$P<0.01$）（图5-D，E）。

综上，在武夷山国家公园5种典型植被的生长季内，常绿阔叶林NDVI与平均温度的最大相关系数出现在前第1个月且相关极显著（$r=0.493$，$P<0.001$），针阔混交林和针叶林NDVI与平均温度的最大相关性出现在前第2个月（$P<0.001$），而矮林和草甸NDVI均与当月平均温度的相关性最强（$P<0.001$）。上述结果表明，常绿阔叶林NDVI对平均温度响应的滞后时间为1个月，针阔混交林和

针叶林NDVI对平均温度响应的滞后时间为2个月,矮林和草甸NDVI对平均温度呈即时响应;常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林NDVI均对降水量无明显滞后效应,矮林和草甸NDVI对降水量的滞后响应时间均为3个月。

3 讨 论

针对武夷山国家公园垂直带谱植被NDVI时间序列重构中"山地植被异质性强、云雾导致数据缺失频发"的核心难题,本研究构建的集成化数据处理方法展现出显著有效性,整体保真度(所有植被类型的R^2>0.90,P<0.001,RMSE<0.02)完全满足山地生态遥感研究的需求。垂直带谱上5种典型植被类型中,矮林与草甸表现最为突出(R^2分别为0.998 2和0.998 3;RMSE分别为0.018 2和0.018 3),常绿阔叶林虽在5类植被类型中保真度最低,但仍保持优异水平(R^2=0.917 6,RMSE=0.007 6)。散点图分析进一步证实,重建值与原始观测值高度贴合1∶1参考线。与同类方法相比,本研究方法在精度和稳定性方面均表现出明显优势。在精度方面,本研究所有植被类型的RMSE均控制在0.02以下(R^2>0.90),而时空最优加权组合估计模型(SOW-CEM)的平均RMSE达0.040 3(R^2=0.908 2)[18]。在稳定性方面,传统卡尔曼滤波类方法的归一化残差常达0.1~0.2[15],对数据缺失场景适应性差;线性内插-扩展卡尔曼滤波(EKF)集成方法虽然可将相对误差控制在-1.91%~0.93%,但单独EKF误差显著,中值滤波易偏离原始值,传统线性插值在高缺失下会丢失周期信息[13]。本研究不仅将误差控制在更低水平,还同步规避了上述缺陷,兼顾了数据完整性与准确性;而且该集成方法成功分离了植被生长的时间趋势与季节性波动,消除了季节性干扰对NDVI年际变化分析的影响[14],显著提升了时序数据一致性,准确识别出草甸NDVI呈现"前期平缓、后期提速"的鲜明特征,是后期NDVI上升速率最快的植被类型;同时其他植被NDVI趋势分化明显,常绿阔叶林前期下降后期回升,矮林、针阔混交林则前期增后转降,体现了植被对环境时空响应的异质性。

在植被生长的年际变化趋势方面,武夷山国家公园内5种植被类型的NDVI呈现出明显的阶段性变化特征,但整体上仍以改善趋势为主,这与李丽纯等[19]、杨绘婷等[20]的研究结果一致,表明亚热带山地生态系统的整体向好态势,这一趋势的核心驱动因素与区域气候演变密切相关。研究区年均温呈波动上升趋势,2001-2012年波动下降,2013-2024年显著升高,适宜范围内的温度升高可通过延长植被生长季,提升光合效率促进植被生长。但气候异常事件会产生阶段性制约,如2010年研究区降水量为研究期最高值,达到3 037.6 mm,过量降水导致土壤通气性下降,根系呼吸受限,反而抑制了植被生长,使得多数植被类型的NDVI显著下降,表明在降水丰沛的亚热带地区,过量降水仍可能成为限制因子。2012年后,随着年均温稳步回升且降水保持相对稳定,5种植被类型的生长状况均得到改善,这一绿化趋势与PIAO等[21]提出的"亚热带地区植被绿化趋势显著强于热带地区"的结论相符合,主要归因于温度升高的促进作用。已有研究表明,在湿润的亚热带地区,充足的降水使水分不再成为植被生长的限制因子,而温度则成为主导气候因子[22]。这一规律在武夷山国家公园同样适用,公园内5种植被类型的NDVI与年均温、降水量的相关性分析结果显示,温度对植被生长的影响高于降水,且由于该区域降水资源充足,温度进一步成为限制植被生长的主要气候因子,这一结论与相似或相同区域的研究结果[21-23]相符。

武夷山国家公园内不同植被类型与年平均气温的相关性呈现出显著的梯度变化特征,即草甸>针叶林>针阔混交林>常绿阔叶林>矮林。海拔升高导致气温降低,从而缩短植被生长季,并增强了植被对气候因子的敏感性。高海拔地区温度限制更加显著,且由于风速、太阳辐射及土壤条件的变化,植被响应进一步放大。GOTTFRIED等[24]的研究表明,持续增温导致高海拔冷适应物种衰退、暖适应物种上升的"热化"过程,支持了温度变化对高海拔生态系统的显著影响。然而,矮林对年均温的响应较弱,主要由于其特殊的生境特征——强风、低温、贫瘠土壤及云雾线的共同影响作用[25],限制了其对单一气候因子的响应。

武夷山针阔混交林、针叶林NDVI对温度的滞后时间为2个月,显著长于常绿阔叶林的滞后1个月,这一发现与区域尺度研究结果[26-27]相吻合。张晓龙等[26]对黄河源区的研究表明,植被NDVI对温度、降水的滞后响应约1个月;而张景华等[27]发现,澜沧江流域植被对温度的滞后期为0~3个月。由此可见,山地植被对温度的滞后响应存在明显时空

分异，这一特征主要受植被类型、海拔梯度和区域气候条件的综合调控。高海拔矮林和草甸对温度呈即时响应，对降水存在3个月滞后。降水滞后可能与草本茂盛、土壤蓄水能力强有关[28]，这与安德帅等[23]的研究成果一致，也与WU等[29]报道的全球植被时滞范围为0～3个月相符。

4　结　论

利用2001－2024年MODIS NDVI数据、武夷山植被分类数据及气象数据，采用卡尔曼滤波数据重构和STL时间序列分解相结合的方法，系统分析了武夷山国家公园垂直带谱上5种植被类型的年际变化趋势及其对气候因子的响应机制和时滞效应，结果表明：

1）卡尔曼滤波结合STL时间序列分解，能够有效重构亚热带山地不同植被类型的长时序NDVI数据，武夷山5种典型植被类型NDVI的重构精度R^2均大于0.90，其中矮林和草甸的重构质量最优（R^2＞0.99，RMSE＜0.02），为准确识别垂直带谱植被年际变化趋势提供了技术上的支持。

2）常绿阔叶林和针阔混交林NDVI年际变化趋势均呈三阶段变化模式，分别在2008和2017年、2008和2019年出现转折点；针叶林在2011和2019年出现2次转折，经历了微弱下降－显著增长－较缓下降的过程；矮林在2019年由持续增长转为显著下降，下降速率约为此前增速的3.4倍；草甸在2010年发生趋势反转，由前期下降转为后期显著增长，NDVI增幅达0.07，在5种植被类型增长最为显著。

3）年平均气温是影响武夷山垂直带谱植被生长的主要气候因子，5种典型植被类型对温度的敏感性由强到弱依次为草甸＞针叶林＞针阔混交林＞常绿阔叶林＞矮林。

4）武夷山国家公园垂直带谱不同植被类型NDVI对气候因子的滞后响应呈现出海拔分异特征。常绿阔叶林对温度变化的响应滞后期为1个月，针阔混交林和针叶林对平均温度变化的响应滞后期为2个月，矮林和草甸对平均温度变化的响应无滞后效应，但对降水的响应滞后期为3个月，揭示了垂直带谱上植被-气候响应策略的差异性。

[参考文献]

[1] 梁媚聪，秦圆圆，樊星，等. IPCC第六次评估报告第三工作组报告主要结论解读及对策建议[J]. 环境保护，2022，50(13)：72-76.
LIANG M C，QIN Y Y，FAN X，et al. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 working group Ⅲ report[J]. Environmental Protection，2022，50(13)：72-76.

[2] LI S Q，ZHANG X，LU Z Y，et al. Progress of vegetation modelling and future research prospects[J]. Science China Earth Sciences，2024，67(9)：2718-2738.

[3] WANG B X，CHENG W M，XU H，et al. Vegetation differentiation characteristics and control mechanisms in the Altay region based on topographic gradients[J]. Ecological Indicators，2024，160：111838.

[4] 曹红华，陈友平，张合理，等. 西南地区干旱时空变化及对植被NPP的影响[J/OL]. 沙漠与绿洲气象，2025：1-10. [2025-08-18]. https://link.cnki.net/urlid/65.1265.P.20250805.1019.006.
CAO H H，CHEN Y P，ZHANG H L，et al. Spatio-temporal variations of drought and its impact on vegetation NPP in southwest China[J/OL]. Desert and Oasis Meteorology，2025：1-10. [2025-08-18]. https://link.cnki.net/urlid/65.1265.P.20250805.1019.006.

[5] 刘恒，汤弟伟，孙毅，等. 武陵山区植被生长季NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究，2021，28(5)：245-253.
LIU H，TANG D W，SUN Y，et al. Spatiotemporal variation of NDVI in the vegetation growing season of Wuling mountainous area and its response to climate change during 2000-2019[J]. Research of Soil and Water Conservation，2021，28(5)：245-253.

[6] 齐贵增，白红英，赵婷，等. 秦岭陕西段南北坡植被对干湿变化响应敏感性及空间差异[J]. 地理学报，2021，76(1)：44-56.
QI G Z，BAI H Y，ZHAO T，et al. Sensitivity and areal differentiation of vegetation responses to hydrothermal dynamics on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains in Shaanxi province[J]. Acta Geographica Sinica，2021，76(1)：44-56.

[7] 李辉霞，刘国华，傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报，2011，31(19)：5495-5504.
LI H X，LIU G H，FU B J. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region[J]. Acta Ecologica Sinica，2011，31(19)：5495-5504.

[8] 周梦甜，李军，朱康文. 近15 a新疆不同类型植被NDVI时空动态变化及对气候变化的响应[J]. 干旱区地理，2015，38(4)：779-787.
ZHOU M T，LI J，ZHU K W. Spatial-temporal dynamics of different types of vegetation NDVI and its response to climate change in Xinjiang during 1998－2012[J]. Arid Land Geography，2015，38(4)：779-787.

[9] VAN DER PLAS G W，RUCINA S M，HEMP A，et al. Climate-human-landscape interaction in the eastern foothills of Mt. Kilimanjaro (equatorial East Africa) during the last two millennia[J]. The Holocene，2021，31(4)：556-569.

[10] 杨绘婷，徐涵秋，施婷婷，等. 基于植被信息季节变换的植被覆盖度变化：以福建省连江县为例[J]. 应用生态学报，2019，

30(1):285-291.
YANG H T, XU H Q, SHI T T, et al. Fractional vegetation cover change based on vegetation seasonal variation correction: a casein Lianjiang County, Fujian Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1):285-291.

[11] 宋朝阳,史尚渝,王飞,等. 基于Google Earth Engine和Sentinel-2数据的耕地分类研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(11):132-141,154.
SONG C Y, SHI S Y, WANG F, et al. Farmland classification based on Google Earth Engine and Sentinel-2 data[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2024, 52(11):132-141,154.

[12] XU D D, HARDER J K, XU W X, et al. Evaluating the impact of grazing cessation and reintroduction in mixed prairie using raster time series analysis of landsat data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(17):3397.

[13] 李伟光,侯美亭. 植被遥感时间序列数据重建方法简述及示例分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(1):1-9.
LI W G, HOU M T. A review of reconstruction methods for remote-sensing-based time series data of vegetation and some examples[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1):1-9.

[14] LI Q, CHENG X L, LUO Y Q, et al. Consistent temperature sensitivity of labile soil organic carbon mineralization along an elevation gradient in the Wuyi Mountains, China[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 117:32-37.

[15] SEDANO F, KEMPENEERS P, HURTT G. A Kalman filter-based method to generate continuous time series of medium-resolution NDVI images[J]. Remote Sensing, 2014, 6(12):12381-12408.

[16] CHEN J, JÖNSSON P, TAMURA M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3/4):332-344.

[17] HODSON T O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not[J]. Geoscientific Model Development Discussions, 2022, 2022:1-10.

[18] 蒋雪冰,胡月明,刘振华,等. 基于线性内插的扩展卡尔曼滤波法的NDVI时间序列重构研究[J]. 科技通报,2017,33(2):137-142.
JIANG X B, HU Y M, LIU Z H, et al. Reconstructing NDVI time-series data using a linear-interpolation with extended Kalman filter[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(2):137-142.

[19] 李丽纯,周广胜. 武夷山国家公园森林植被对景区活动的响应[J]. 生态学报,2020,40(20):7267-7276.
LI L C, ZHOU G S. Response of forest vegetation to scenic activities in Wuyishan National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20):7267-7276.

[20] 杨绘婷,徐涵秋. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J]. 应用生态学报,2020,31(2):533-542.
YANG H T, XU H Q. Assessing fractional vegetation cover changes and ecological quality of the Wuyi Mountain National Nature Reserve based on remote sensing spatial information [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2):533-542.

[21] PIAO S L, WANG X H, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2019, 1(1):14-27.

[22] REN H Y, WEN Z M, LIU Y Y, et al. Vegetation response to changes in climate across different climate zones in China[J]. Ecological Indicators, 2023, 155:110932.

[23] 安德帅,徐丹丹,濮毅涵,等. 2000—2019年武夷山亚高山草甸对气候因子的响应及其时滞效应[J]. 应用生态学报,2021,32(12):4195-4202.
AN D S, XU D D, PU Y H, et al. Responses of subalpine meadow to climatic factors and the time lag effects in Wuyi Mountains from 2000 to 2019[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12):4195-4202.

[24] GOTTFRIED M, PAULI H, FUTSCHIK A, et al. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(2):111-115.

[25] 姚永慧,张百平,赵超. 中国矮曲林的分布特征及生态意义[J]. 地理科学进展,2017,36(4):491-499.
YAO Y H, ZHANG B P, ZHAO C. Geographical distribution of cripple tree forest and its importance for forest line in China [J]. Progress in Geography, 2017, 36(4):491-499.

[26] 张晓龙,黄领梅,权全,等. 基于ITPCAS驱动数据集的黄河源区植被变化及其与气候因子相关分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(9):55-68.
ZHANG X L, HUANG L M, QUAN Q, et al. Relationship of vegetation cover change with climate factors in the Source Region of the Yellow River based on ITPCAS forcing data[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(9):55-68.

[27] 张景华,封志明,姜鲁光,等. 澜沧江流域植被NDVI与气候因子的相关性分析[J]. 自然资源学报,2015,30(9):1425-1435.
ZHANG J H, FENG Z M, JIANG L G, et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9):1425-1435.

[28] 卢乔倩,江涛,柳丹丽,等. 中国不同植被覆盖类型NDVI对气温和降水的响应特征[J]. 生态环境学报,2020,29(1):23-34.
LU Q Q, JIANG T, LIU D L, et al. The response characteristics of NDVI with different vegetation cover types to temperature and precipitation in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(1):23-34.

[29] WU D H, ZHAO X, LIANG S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change[J]. Global Change Biology, 2015, 21(9):3520-3531.

(责任编辑:温晓平)