

沙颍河流域植被时空变化及对气象因子的响应

高歌, 闫慧, 李京忠, 张鹏飞, 许淑娜

(许昌学院 地理与空间信息学院, 河南 许昌 461000)

摘要:【目的】分析沙颍河流域植被变化及对气象因子的响应, 探究区域植被与水热条件耦合的空间分异规律, 为流域植被修复和保护、农业科学管理等提供理论依据。【方法】基于卫星遥感 NDVI 产品、气象和土地利用栅格数据, 采用谐波回归和相关性分析方法, 分析了 2000—2024 年沙颍河流域植被在不同尺度下的时空变化特征, 研究了生长季流域植被对气象因子多尺度响应的差异及时滞效应。【结果】①沙颍河流域以农作物植被为主, 以浅山丘陵和山地植被为辅, 在空间分布上呈现西南和中东部高、西北低的格局; ②与一元线性回归方法相比, 谐波回归方法能够有效提升趋势估计显著性检验的通过率; ③流域植被与气温之间的相关性以短期行为为主, 长期趋势为辅, 而与降水的相关性仅由短期行为主导; ④流域植被对气象因子响应的时滞性存在明显的空间分异性, 气温在全域上的时滞期为 0~1 个月, 流域东部平原降水的时滞期为 0 个月, 中部平原降水的时滞期为 0~1 个月, 西部山地和浅山丘陵区降水的时滞期为 0~2 个月, 降水时滞性的空间分异同流域地形高度吻合。【结论】在沙颍河流域, 农业和林业用地植被覆盖度显著上升, 且增长趋势与气温升高一致, 而植被对气象因子的实时和滞后响应与流域地形地貌、农业管理措施及植被类型构成等因素紧密相关。未来将进一步结合实地观测与多源遥感数据, 深入探究不同植被类型对气象因子响应的内在机制, 为流域生态系统的精准修复、农业可持续发展以及应对气候变化提供更科学的决策依据。

关键词:谐波回归; 植被; 沙颍河流域; 气温; 降水

中图分类号: TP79

文献标识码: A

植被是生态系统的重要组成部分, 通过光合作用维系着全球和区域尺度的能量流动与物质平衡, 对调节气候、保持水土和维护生物多样性起着至关重要的作用^[1-2]。同时, 植被还是人类满足日常生活所需的重要资源, 为人类社会的世代繁衍提供了基础保障。对于一个流域生态系统, 植被在涵养水源和保持水土方面发挥着巨大作用, 原因在于其不但能够通过发达的根系有效固定土壤, 而且还能够通过截留降雨, 减小雨水对土壤的冲击^[3]。近年来, 随着我国经济和社会的大力发展, 某些区域的植被覆盖急剧减少, 对区域生态系统和社会经济发展产生了诸多不利影响。要从根本上解决上述不利影响, 首要问题便是对该区域植被时空变化的特征、过程及驱动机制进行系统的分析和研究。

归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 是一种基于植被光谱特性的遥感指标, 由红光与近红外波段的反射率差异计算得到, 已被广泛用于地表植被覆盖度、健康状况

及生物量分布等的定量评估^[4]。NDVI, 作为一种遥感观测数据, 具有获取成本低、覆盖范围广和更新速度快等优点, 各类 NDVI 产品已成为流域生态评估和环境变化研究领域的主要数据源^[5-6]。针对基于 NDVI 产品进行流域植被的时空变化趋势及驱动机制研究, 研究人员已经做了大量工作并积累了丰富的成果, 其中趋势提取方法如线性回归、Mann-Kendall 方法和驱动机制研究方法如相关性分析、地理探测器、地理加权回归等方法是最常被用到的一类方法^[7-9]。然而这一类研究多集中于使用年均值序列数据进行分析调查, 忽视了更细尺度上的作用机制, 因此, 一些研究人员又从不同尺度的角度出发研究了 NDVI 及其影响因子之间的相互作用机制^[10-11]。尽管上述成果考虑了多尺度性, 但是在 NDVI 和气象因子时间序列中仍然存在着影响相互作用机制的因素, 如序列中的非平稳性, 包含了序列中存在的趋势和周期等特征, 因此, 一些学者又从时间序列分解的角度研究了不同分量

收稿日期/Received: 2025-06-27

修回日期/Revised: 2025-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42173062); 河南省高等学校重点科研项目(23B170001)。

第一作者: 高歌(1981—), 男, 副教授, 博士, 从事地理时空统计方面的研究。E-mail: gxin826@126.com。

通信作者: 闫慧(1980—), 男, 教授, 硕导, 博士, 从事环境地球化学方面的研究。E-mail: yanhuichj08@163.com。

上 NDVI 及其影响因子之间的作用机制^[12-13]。通过分析上述的研究结果,可以说,如果不考虑时间序列中的多尺度性和非平稳性,在进行区域 NDVI 的相关研究中就会得到不可靠甚至不正确的结论。从数据特性看,年均值序列是对月均值数据的低通滤波,这种特性在研究 NDVI 同气象因子关系时会产生以下问题:(1) 样本数量少且概化,对序列中存在的长期趋势估计不足;(2) 忽视了植被对气象因子的短期响应和降低了植被对气象因子滞后响应的灵敏度^[14-15]。要有效应对上述问题,就需要使用高分辨率的数据,然而,采用高分辨率数据如月均值时间序列就不能回避对其中周期特征的建模,鉴于此,本文将引入谐波回归方法对 NDVI 及气象因子时间序列进行建模,并分析其在时空中的变化趋势和驱动机制。

沙颍河流域位于河南省中部,地理位置优越,是全省经济最活跃和发达的区域之一。近年来,随着地区经济的迅猛发展,区域植被覆盖发生了巨大变化,生态环境问题愈发严峻,梳理植被变化和社会经济发展之间的关系,维持区域生态平衡,已成为该区域实现高质量发展的核心问题之一^[16-17]。鉴于上述分析,本文将沙颍河流域为研究区域,使用 2000—2024 年 NDVI 时序数据,通过谐波回归方法对植被时序数据进行建模,在得到趋势项、周期项和残差项等分量的基础上,研究该区域植被的时空变化趋势,不同尺度下植被和气象因子的相关性以及气象因子驱动植被变化的滞后效应。

1 研究区域概况

沙河与颍河在周口市汇流后始称沙颍河,于安徽省颍上县沫河口汇入淮河,是淮河最大的支流,其中沙河发源于鲁山县西部石人山北侧,颍河发源于登封市阳乾山和少室山麓^[18]。沙颍河流域(图 1)大部分区域分布在河南省,主要涵盖了河南省平顶山、许昌、漯河、周口和安徽省阜阳等地。该区域介于 111°54'E~116°36'E, 32°25'N~34°58'N 之间,面积约 4 万 km²,是河南省和安徽省的粮食主产区,位于河南省的区域也是该省经济最为活跃的区域之一。流域呈现阶梯状地势格局,西部是以伏牛山、外方山和嵩山构造带为主体的山地地貌,东部为黄淮冲积平原,两者间发育有宽约 10~40 km 的丘陵过渡带,受新构造运动差异性抬升影响,形成典型“山地-丘陵-平原”三级地形单元。流域的经济重心主要集中在区域内交通沿线一带如京港澳和宁洛高速周边区域,由于交通地利的影

响,近年来沿线的社会经济发生了巨大的变化。流域属暖温带季风气候区,热量资源丰富,雨量充沛,年均降水量介于 477~900 mm 之间,年均气温约为 15 °C。流域大部分处于平原区域,主要土地覆盖类型(图 2)为耕地和不透水面,以 2023 年为例,两者分别占到总面积的 71%和 19%。

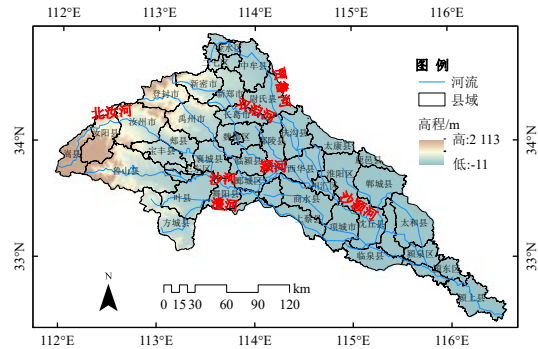


图 1 沙颍河流域概况

Fig.1 Location of the Shaying River Basin

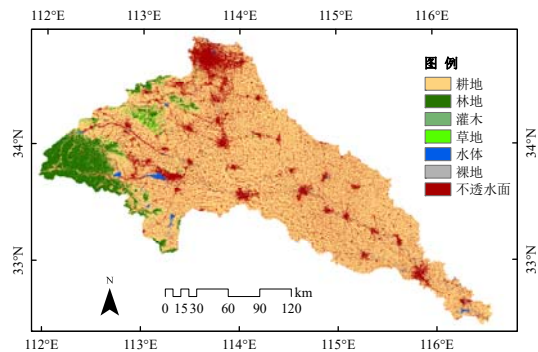


图 2 2023 年沙颍河流域土地覆盖分类

Fig.2 Land cover classification of the Shaying River Basin in 2023

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本文所用 NDVI 数据是 MODIS-NDVI 产品 (MOD13Q1), 时间间隔为 2000—2024 年, 合计 25 年。对于 MOD13Q1 数据, 其分辨率为 250 m, 由参考周期 16 天内云量最小、视角最佳和 NDVI 最大的像元合成得到, 来自美国 NASA 官网 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。月降水和气温数据来自国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn/>), 时间间隔为 2000—2023 年, 分辨率为 1 000 m。土地利用类型数据来自武汉大学 CLCD (China Land Cover Dataset) 土地利用数据集, 分辨率为 30 m, 时间间隔为 2000—2023 年^[19]。土壤湿度数据来自国家青藏高原数据中心, 分辨率为 1 000 m, 时间间隔为 2000—2022 年^[20]。所有数据均在 ArcGIS 中进行批处理操作, 包括地理坐标转换、重采样、裁剪、投影、文件格式转换等步骤, 处理后的数据输入至 R 环境作进一步的计算和分析。数据分辨率统一设置

为 250 m，数据投影为高斯克吕格投影，中央经线设置在 114°E 附近，地理坐标系采用 GCS_WGS_1984 坐标系。

2.2 研究方法

2.2.1 谐波回归模型

谐波回归模型是一种时间序列建模方法，它能够原序列分解为趋势项、周期项和残差项 3 个部分^[21]。趋势项反映了某种驱动因子如气候变化、经济增长等因素带来的长期变化特征；周期项反映了数据中固定的周期波动，如春夏秋冬带来的季节波动；残差代表了噪声、突发事件的影响或随机波动等短期行为和响应^[22]。这些分量反映了不同时间尺度上的行为，以气候为例，趋势项的尺度通常为数十年到数十万年，周期项的尺度通常为 1 年，而残差项的尺度可能仅为数小时到数天^[23-24]。因此，这种方法不仅可以用于分析长期的变化趋势，中期的周期特征，还可以获得短期的随机震荡和异常观测。鉴于多数的研究方法是作用于年际尺度，本方法可以作用于季尺度、月尺度甚至更高时间分辨率的数据上，其多元回归形式为^[25]：

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 \times 2\pi t + \sum_{i=1}^n \left(\beta_{2i} \times \cos\left(\frac{i2\pi t}{T}\right) + \beta_{3i} \times \sin\left(\frac{i2\pi t}{T}\right) \right) + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中： Y_t 为要分析的时间序列， t 为时间点，如相对于某个基准时间的第几天或第几月，本文的基准时间是 2000 年 1 月 1 日，以天为单位共计 571 个时间点（每年 23 期，其中 2000 年第 1、17、33 天和 2021 年第 273 天数据缺失），每个时间点之间相隔 16d，以月为单位共计 299 个月，其中 2000 年 1 月缺失； β_0 为截距， β_1 、 β_{2i} 和 β_{3i} 为系数； T 为周期，如果时间序列单位是天，则使用 1 回归年天数 365.25d^[26]，如果时间序列单位为月，则为 12； n 为谐波的阶，即谐波的数量，本文将采用 $n=1$ 、3 和 6 三种不同的拟合度进行分析，即使用 1、3 和 6 个频率的谐波进行拟合； i 表示谐波分量，值越高频率就越高； ε_t 为残差项，这里假设独立同正态分布。如果 $n=3$ ，则上述公式将变为：

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 \times 2\pi t + \beta_{21} \times \cos\left(\frac{1 \times 2\pi t}{T}\right) + \beta_{22} \times \cos\left(\frac{2 \times 2\pi t}{T}\right) + \beta_{23} \times \cos\left(\frac{3 \times 2\pi t}{T}\right) + \beta_{31} \times \sin\left(\frac{1 \times 2\pi t}{T}\right) + \beta_{32} \times \sin\left(\frac{2 \times 2\pi t}{T}\right) + \beta_{33} \times \sin\left(\frac{3 \times 2\pi t}{T}\right) + \varepsilon_t \quad (2)$$

可以看出，该公式含有 8 个参数，1 个表示截距，

1 个表示趋势的斜率，其余 6 个则是周期性参数；如果 $n=1$ 和 $n=6$ ，则参数分别是 4 和 14 个。如果是月数据，即每月采样 1 次，根据 Nyquist 采样定理，则 n 最大是 6，还原谐波分量的最小周期为 2 个月，由于本文中用到的是 16d 合成数据，因此，设 $n=6$ 还原的最小周期也能达到 2 个月^[27]。根据验证结果，实际上 $n=3$ 就可以拟合出 NDVI 序列中的所有特征。由于该模型简化成了一个多元回归模型，因此采用最小二乘法就可以估计。模型和参数估计采用 P 值检验法，显著性水平设为 0.05。

2.2.2 相关分析

为了研究 NDVI 时间序列与其影响因子相关性在空间上的异质性，需要逐像元计算每个位置的相关性，某点相关性的计算公式如下：

$$(r_i)_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^n [(y_{it} - \bar{y}_i)(x_{it} - \bar{x}_i)]}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (y_{it} - \bar{y}_i)^2 \sum_{t=1}^n (x_{it} - \bar{x}_i)^2}} \quad (3)$$

式中： $(r_i)_{xy}$ 表示序列 x 和 y 在 i 点的相关系数；

y_{it} 、 x_{it} 表示流域 y 、 x 序列在第 i 点和 t 时的观测， t 代表时间， i 代表区域中的某个位置； \bar{y}_i 、 \bar{x}_i 表示变量 y 和 x 在 i 点多年的均值； n 代表时间序列在某点的长度，即观测值个数。模型和参数检验同上述方法相同。

3 结果分析

3.1 沙颍河流域 NDVI 年均值的时空变化特征

逐像元计算 2000—2024 年沙颍河流域 571 期 NDVI 序列的均值，得到沙颍河流域 NDVI 多年均值的空间分布图（图 3）。按照几何间隔法将全区 NDVI 划分为 5 个等级，分别对应高植被覆盖区、较高植被覆盖区、中植被覆盖区、较低植被覆盖区和低植被覆盖区。可以看出，高植被覆盖区主要位于嵩县东部、汝阳县南部、鲁山县西部等区域，面积占到全区的 5%，该区域位于外方山西缘，山势起伏大，植被以天然林和人工经济林为主。较高和中植被覆盖区主要位于流域中下游平原，该区域用地类型主要是农用地，农作物 NDVI 全年变化幅度大，既有生长期的较高水平，又有出苗期、成熟期的较低水平，甚至还有空窗期的最低水平，因此经过多年平均后，其值明显低于林地。一部分较低和低植被覆盖区位于城镇和交通建设用地区域，该区域由硬化地表（道路、建筑）和稀疏绿地主导，即使存在高植被覆盖类型，也是以面积占比不大的公园绿地形式存在；另一部分位于流域西部的低山丘

陵区域，由于开发强度大和水利条件不佳等因素，该区域 NDVI 覆盖处于较低水平。

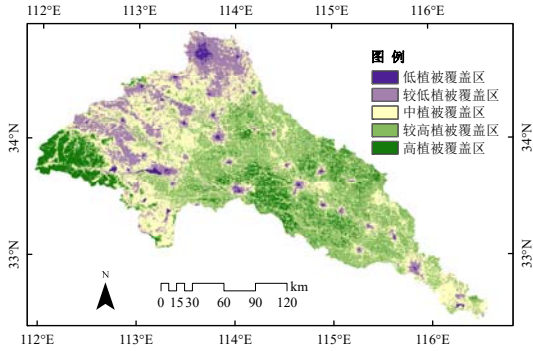


图3 沙颍河流域 2000—2024 年 NDVI 多年均值空间分布
Fig.3 The spatial distribution of the average NDVI values in the Shaying River Basin from 2000 to 2024

图4展示了2000—2024年的沙颍河流域NDVI年均值随时间变化趋势，根据一元线性回归拟合结果，研究期内区域NDVI覆盖度呈现出一个微弱的提升，但是模型 $P=0.127>0.05$ ， $R^2=0.098$ ，显然模型无显著解释能力。研究期内NDVI最大值出现在2007年，为0.545，超过平均值9.89%；最小值出现在2001年，为0.44，低于平均值11.29%。相邻年份增长最快的是2006—2007年，年增长幅度约0.053，降低最快的是2007—2008年，下降幅度为0.039。在整个研究期内，出现了3段连续增长的时间段，分别是2003—2005年，2013—2015年和

2018—2020年，也出现一段连续下降的时间段，为2007—2010年。

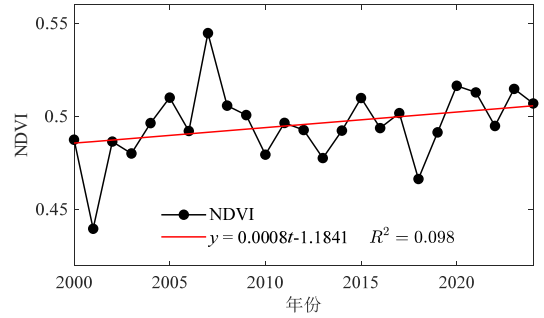


图4 沙颍河流域 2000—2024 年 NDVI 年均值变化
Fig.4 The change of annual average NDVI in the Shaying River Basin from 2000 to 2024

3.2 基于谐波回归的沙颍河流域 NDVI 时空变化特征

对沙颍河流域 16d 时序 NDVI 数据使用 1 阶、3 阶和 6 阶谐波回归方程拟合的结果见图 5 和 6。根据参数估计结果，3 阶方程的参数估计全部是显著的，6 阶拟合中只有高频正弦系数 β_{36} 不显著，而 1 阶拟合的趋势系数 β_1 和正弦系数 β_{31} 不显著。从模型的总体检验结果来看，尽管部分参数存在不显著的情况，但是三个模型总体上都是显著的。如图 6(a)所示，1 阶的拟合距离观测值较远，不能真

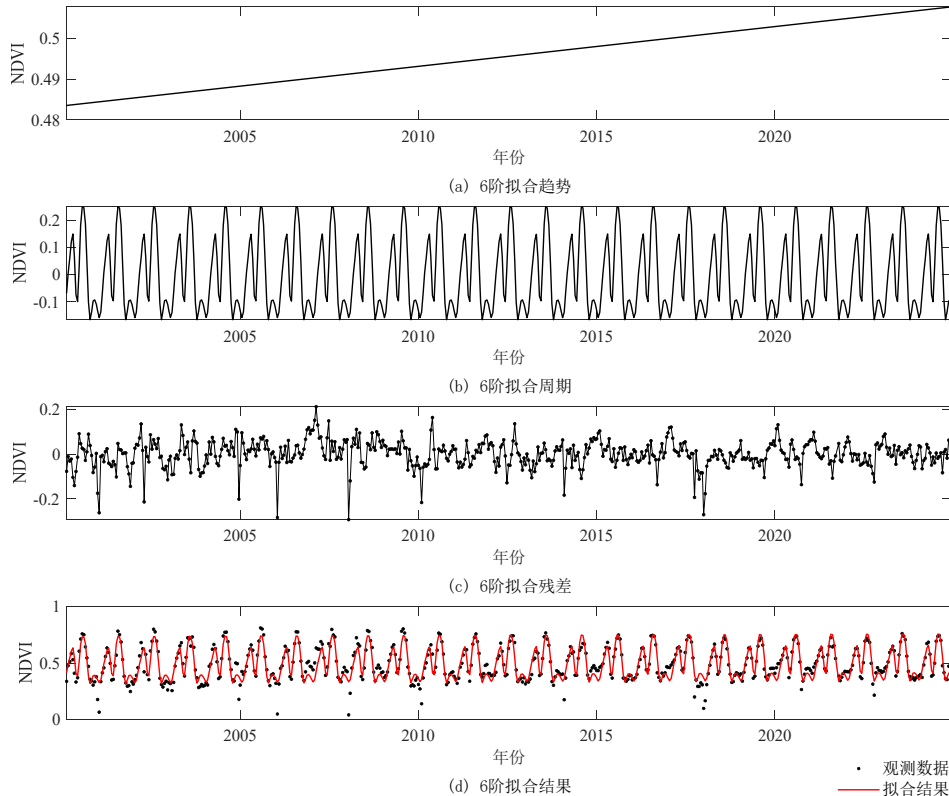


图5 2000—2024 年沙颍河流域 16d 时序 NDVI 数据 6 阶谐波回归拟合

Fig.5 The fitting of 16d NDVI series in the Shaying River Basin from 2000 to 2024 using six-order harmonic regression model

实反映实际数据的变化规律,因此在对数据拟合时,不仅要检查模型的总体显著性,也要检查某个参数的显著性。另外,与其余两个模型相比,6阶模型的决定系数 R^2 最大,达到 0.829,高于3阶模型的 0.801,远高于1阶模型的 0.390。从趋势拟合结果来看,3个模型都得到了一个缓慢的上升趋势,除了1阶模型,其余模型都是显著的,例如,如图 5(a)所示,6阶模型的估计是 4.264×10^{-7} 。根据图 5(b)中的周期提取结果,每个周期包含了3个波峰和3个波谷。根据图 5(c)中的残差分解结果,残差最大值出现在 2007 年 2 月 18 日,值为 0.211;最小值出现在 2008 年 1 月 17 日,值为 -0.292。从曲线拟合效果上看(图 5(d)和 6(b)),3阶和6阶的结果很接近,对农作物和气候因素的周期性都有较好的体现,而1阶仅对全年气候因素的周期性得到体现。从图

5(d)可以得出 NDVI 在一个完整的周期中所经历的变化,具体如下:1—2 月份,气候变暖,降水增加,植物开始生长,NDVI 缓慢上升;3—4 月,乔木、灌木和各类农作物快速生长,NDVI 迅速增加;5—6 月份,林地植被叶面积继续扩大,但是冬小麦成熟,叶片枯黄,NDVI 呈断崖式下降,随着收割,NDVI 达到上半年最低值;7—8 月份,林地植被叶片完全展开、冠层茂密、光合作用旺盛,以玉米、大豆、花生为主的秋季轮作农作物也进入全面生长期,NDVI 值处于全年最高水平;随着轮作作物成熟,叶子枯黄,以及收割,在 9 月份开始下降,10 月份达到全年最低值;进入到 11—12 月,天气转冷,气温下降,树叶掉落,小麦幼苗处于越冬期,NDVI 处于全年中一段较长时间的低值期。

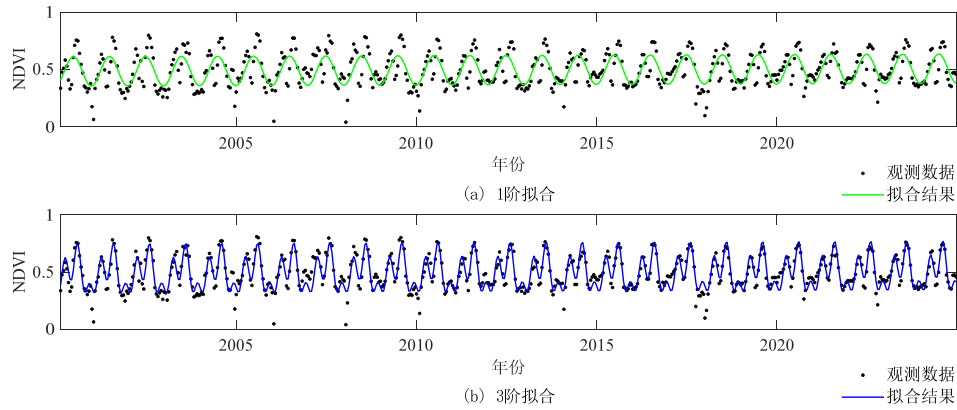


图 6 2000—2024 年沙颍河流域 16d 时序 NDVI 数据 1、3 阶谐波回归拟合

Fig.6 The fitting of 16d NDVI series in the Shaying River Basin from 2000 to 2024 using one-order and three-order harmonic regression model

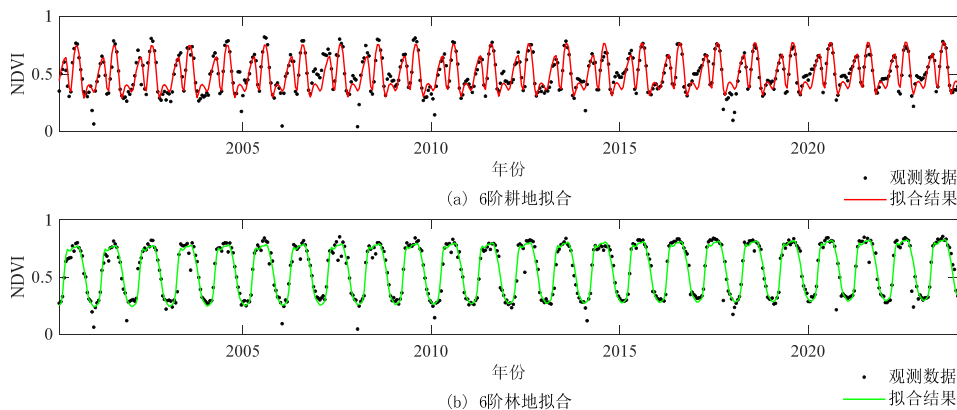


图 7 2000—2023 年沙颍河流域 16d 时序耕地和林地 NDVI 时序数据 6 阶谐波回归拟合

Fig.7 The fitting of 16d agricultural and forest NDVI series in the Shaying River Basin from 2000 to 2023 using six-order harmonic regression model

作为研究区域两种主要土地覆盖形式,通过 2023 年土地利用类型数据对 2000—2024 年 16dNDVI 序列进行掩膜提取,分别得到耕地和林地的 NDVI 序列。图 7 显示了耕地和林地两种土地覆盖类型使用 6 阶模型拟合的结果,可以看出,两者具有完全不同的周期特征,耕地受到气候因素和

农业耕作模式的双重约束,而林地仅受到气象因素的影响。根据参数估计结果,耕地拟合中高频正弦系数 β_{36} 不显著,其余参数均显著,这种情况与整体上分析类似;林地拟合中中频余弦参数 β_{24} 和高频正弦系数 β_{35} 不显著,其余参数均显著;两者的决定系数 R^2 分别达到 0.815 和 0.927。趋势估计结

果同整体估计相似,耕地和林地也都存在一个缓慢的上升趋势,值分别是 6.513×10^{-7} 和 1.095×10^{-6} ,可以看出,林地上升速度稍快一些。根据多年的趋势拟合结果,每年 10 月至次年 1 月,耕地 NDVI 观测值和拟合值偏差较大,整体上在趋势上下波动。反观,林地的估计值和观测值拟合效果更好,仅在少数的几个年份出现了偏离。此外,2017 年底至 2018 年初,耕地和林地 NDVI 同时下降,这可能跟 2017 年夏季降水不足有关。

按照趋势估计和检验的显著性,将长期趋势的变化分为 5 类:显著上升 ($\beta_1 > 0, P < 0.05$)、不显著上升 ($\beta_1 > 0, P > 0.05$)、不变 ($\beta_1 = 0$)、显著下降 ($\beta_1 < 0, P < 0.05$) 和不显著下降 ($\beta_1 < 0, P > 0.05$)。经过计算,最后得到了 4 类增长情况,趋势不变的情况不存在。沙颍河流域趋势的空间分布异质性结果见图 8,显著上升的区域主要位于林地和耕地范围内,面积占比约 54%。不显著上升区和不显著下降区主要分布在村镇用地、城市近郊、乡村和道路边缘等人口密度变化、土地利用变化活跃的区域,

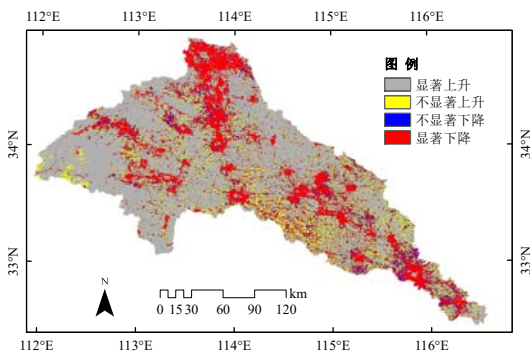


图 8 沙颍河流域趋势分类空间分布

Fig.8 The spatial distribution of trend classification in the Shaying River Basin

面积分别占比约 17%和 10%。由于一些县市农用地耕种效率逐年提升,城镇化基础设施面积不断扩大,不显著上升区和不显著下降区也出现的比较集中。如上蔡县近些年实施“一村一品”特色产业发展战略,在粮食主产区推进田块整治、灌排系统升级工程,高标准农田成效建设显著,项城县则积极推广大豆玉米复种模式,实施玉米单产提升工程,这一系列农业增产措施使得这些区域出现了一定面积的不显著上升区。显著下降区主要分布在城市、乡村密集区域、浅山丘陵及农业用地类型变更区,面积占比约 19%。前者是由建筑面积不断扩大,建筑密度不断增高所致,浅山丘陵地区则是过度开发、自然环境恶劣、退耕还林还草和生态修复力度不够导致,农业用地类型变更如粮食作物转为经济类作物或大棚蔬菜种植也会显著降低 NDVI。例如,

周口市淮阳区 NDVI 出现了明显下降,《周口市淮阳区大蒜产业发展规划(2023—2025 年)》明确要求把淮阳区建设成为大蒜生产基地,到 2025 年,全区大蒜要发展到 20 万亩,正是这一调整,全区 NDVI 出现了明显下降。然而在城市的内部区域,也出现了不少显著上升的单元,面积占不透水面积的 2.54%,这可能与城市大力发展绿地,修建公园等绿化措施有关,例如,根据《郑州市城市绿地系统规划(2013—2030 年)》,郑州市城区绿地覆盖率在 2020 年和 2030 年分别要达到 42%和 45%。

3.3 沙颍河流域气象因子对 NDVI 的驱动效应

使用 6 阶谐波方程对气温和降水序列进行拟合,其结果呈现在图 9 中。整体上看,两个因子的拟合结果与观测值均能较好地吻合,两者都存在相同的周期,即季节周期,最高值出现在 7 月,最低值出现在 1 月。另外,两种因子在由春季进入夏季时增长的速度不同,气温增加的比较匀速,而降水在 6 月份之前增长速度较慢,但是 6 月进入 7 月后,其速度呈现出攀升特征。从整体上看,降水围绕拟合曲线的波动比气温严重,在 2000、2003—2005、2007—2008、2020—2022 等年份 7 月的降水量高于平均水平,而在 2002、2011、2014—2015 和 2017—2019 等年份 7 月份降水量低于平均水平,还可以看出 2001 年春季和秋季的降水明显低于同期。根据参数估计结果,气温存在一个显著的上升趋势,斜率估计为 4.952×10^{-4} ,而降水存在一个不显著的下降趋势。尽管降水趋势检验不显著,但是降水模型的检验是显著的。对于周期参数,气温在中高余弦频率分量 β_{24} 、 β_{26} 和中高频正弦分量 β_{34} 、 β_{35} 和 β_{36} 不显著;降水在中低余弦频率分量 β_{22} 、 β_{23} 和高频正弦分量 β_{36} 不显著。为了分析气象因子趋势的空间异质性,这里逐像元计算了气象因子的趋势特征,根据统计结果,气温所有像元均显示出了显著上升特征;降水不存在显著上升和下降的像元,所有的像元趋势的检验结果都是不显著的,其中不显著上升的面积占比 19%,不显著降低的面积占比为 81%。

为了研究沙颍河流域 NDVI 同气象因子之间的相关性,首先将 NDVI 原数据集按照最大值合成法生成流域 NDVI 月数据集;其次对 NDVI、气象月序列进行 6 阶谐波回归建模,并提取 NDVI 和气象月数据的生长季各谐波分量,根据上述的分析进行以下选择,林地、草地和灌木选择 2—6 月数据,耕地选择 2—4 月、6—7 月数据;最后逐像元计算去周期月数据序列、去周期趋势(残差)月数据序列的相关关系。如图 10(a)所示,去周期后,NDVI

与气温的相关性均值为 0.261, 面积占比约 49.15%, 主要为正相关性。整体上看, 嵩县、汝阳、鲁山等南部山地区域, 郟县、禹州、襄城交界区域, 临颍南部、扶沟和尉氏南部等区域显示出较高的正相关性, 在汝阳-石龙, 登封-禹州等沿线浅山丘陵区域显示出中等程度的相关性, 在其他农作物植被区域也分布有一定面积的正相关性。如图 10(b)所示, 去周期趋势后, 强度和面积都呈现下降的趋势, NDVI 和气温相关整体均值下降为 0.252, 面积降至 47.69%。如图 10(c)所示, 去周期后和去周期趋势

势后的差异主要存在于西部浅山丘陵、山地区域和中东部鄢陵、扶沟等县及周边地区。如图 10(d)所示, 去周期后, NDVI 和降水的整体相关性为 0.231, 面积比为 23.51%, 主要为正相关性。西部宝丰、石龙、禹州和襄城等浅山丘陵区域构成了主体部分, 在东部郸城、太和、沈丘等交界区域也存在部分正相关区域。如图 10(e)所示, 去周期趋势后, NDVI 与降水之间相关性均值变为 0.236, 占比为 27.48%。如图 10(f)所示, 较去周期后, 两个数值都有所增加, 其差异也主要分布在流域西部的浅山丘陵区域。

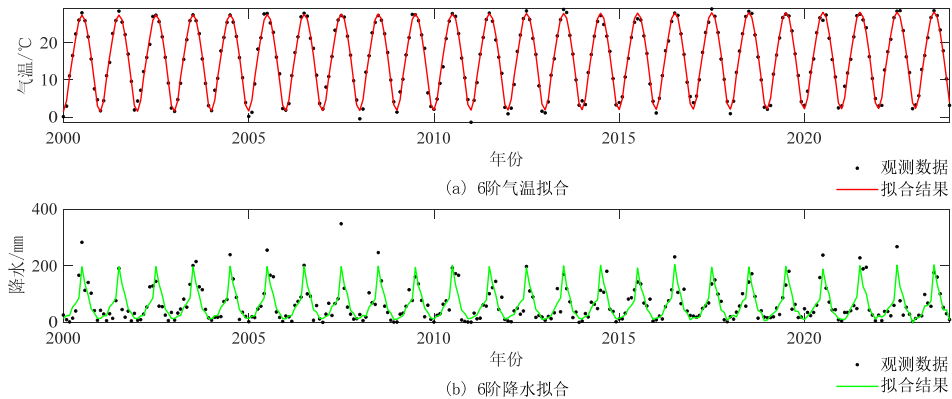


图 9 2000—2023 年沙颍河流域月气温和降水序列 6 阶谐波回归拟合

Fig.9 The fitting of monthly temperature and precipitation series in the Shaying River Basin from 2000 to 2023 using six-order harmonic regression model

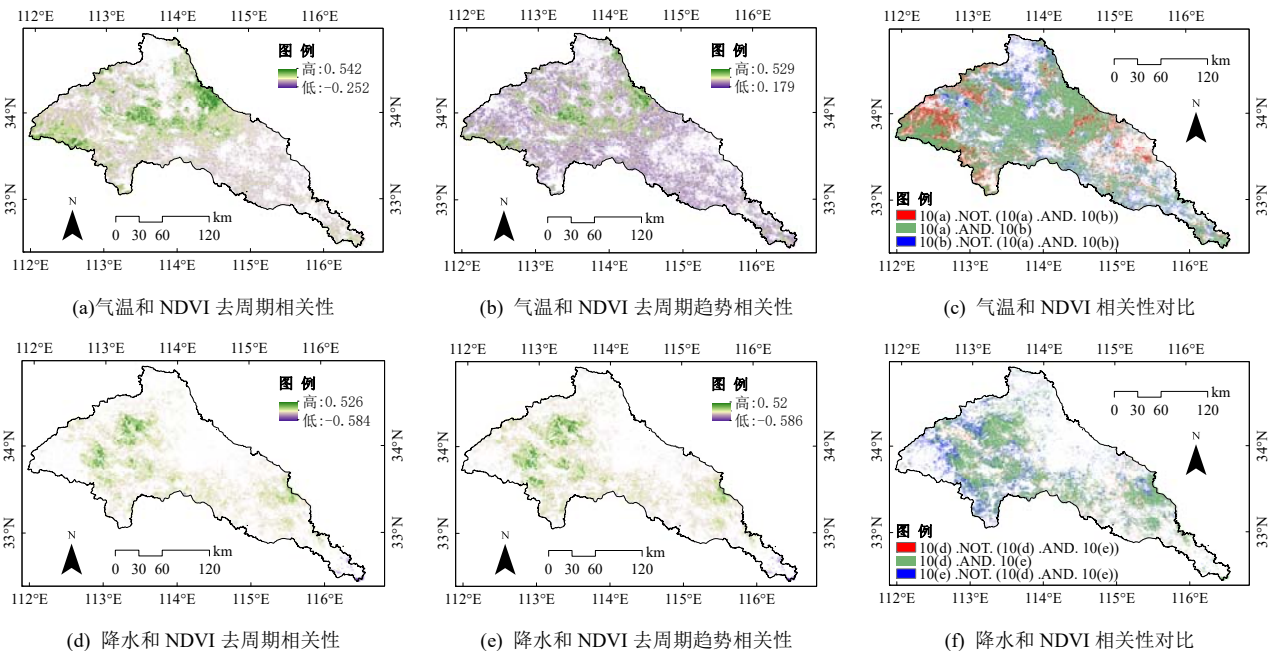


图 10 沙颍河流域 NDVI 和气温、降水去周期、去周期趋势后的相关性

Fig.10 Detrending and residual correlation between NDVI and temperature, precipitation in the Shaying River Basin

除此以外, 上述差异在流域其余区域也存在疏密程度不等的分布。由前面的时间序列分解结果可知, 气温和 NDVI 序列都包含了一个显著的上升趋势, 去掉趋势前后, 两者之间相关性的强度和在空间上的分布面积都有一定程度的减少, 因此, 可以推断造成该差异的原因便是两者中存在的上升趋势。然

而, 对于去趋势前后 NDVI 和降水序列出现相反的情况, 原因可能是 NDVI 滤掉的是显著上升的趋势, 而降水滤掉的是不显著的下降趋势。根据非平稳统计研究, 去掉趋势后得到的相关性可能才能代表两个序列之间真实的相关性^[28]。根据上述分析结果, 可以得出, 流域西部山地植被的主控因子是气

温,流域西部浅山丘陵植被的主控因子是气温和降水,许昌、漯河、周口等部分县区平原植被的主控

因子是气温和降水,东部平原大部分区域农作物植被的主控因子是气温。

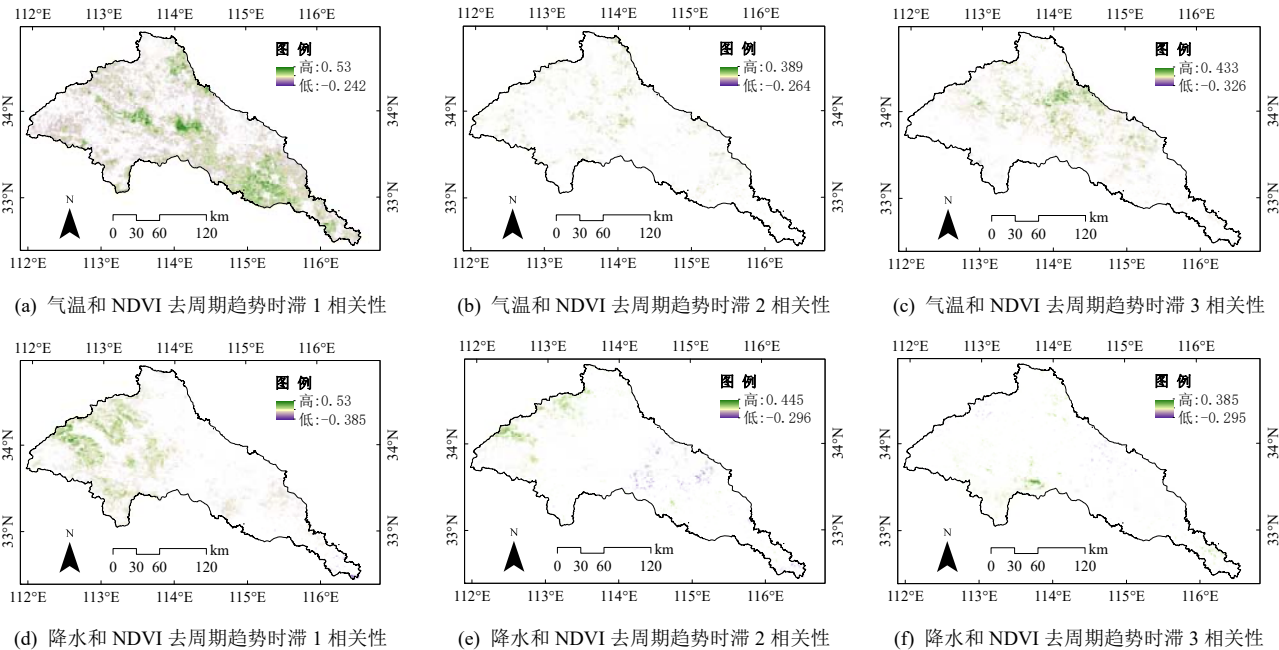


图 11 沙颍河流域 NDVI 对气温、降水去周期趋势后的滞后响应

Fig.11 Lagged response of correlations between NDVI and temperature, precipitation based on the residual series in the Shaying River Basin

地球表面的植被对气候因子的响应往往不是实时的,存在一定的滞后性,下面选择 3 个时滞期研究一下沙颍河流域植被气候响应的滞后特征,3 个时滞期分别为 1、2 和 3 个月(简称为时滞 1、时滞 2 和时滞 3)。这里仅对去周期趋势情况展示说明,如图 11(a)所示,时滞 1 相关性均值降为 0.251,面积比降为 38.66%,与无时滞相比,其空间上的相关面积和强度都有所降低,一个显著的不同在于时滞 1 在流域东部的项城、沈丘及周边县市分布有较强相关性,平原地区农作物植被的相关性向东发生了偏移。经过分析发现,这些区域 1 月份气温与 2 月份 NDVI 相关性最强,也最显著,次强是 2 月份气温和 3 月份 NDVI,原因可能是该区域 1 月份气温在全区处于较高水平,能加速土壤热量的积累,再加上充足的水分,更容易促进植被的吸收和生长。如图 11(b)和 11(c)所示,时滞 2 和时滞 3 较时滞 1 和无时滞发生了明显的变化,相关性均值分别下降为 0.207 和 0.22,面积比则下降为 6.18%和 13.43%。时滞 2 相关性除中部平原地区残存部分以外,在东部区域几乎消失殆尽,西部山地和浅山丘陵区域也出现了大幅度的衰减。时滞 3 相关性在西部山地区域消失,东北部扶沟及附近地区呈现了一块较强的相关性,农作物植被不仅受到气候因子的影响,也受到种植结构的影响,由于参与计算的序列长度达到 25 年,期间种植结构变化可能是导致这一结果的原因,也可能是伪相关所导致。对于

降水的滞后效应,如图 11(d)所示,时滞 1 相关系数均值降为 0.232,面积比下降为 15.71%,流域东部相关面积急剧减少,只剩下项城、太和等县市及附近区域,流域西部山地和浅山丘陵区域相关性面积也有所变化,如嵩县、鲁山山地相关性增加,汝阳、登封、新密境内浅山丘陵相关性增加,而禹州、宝丰等县浅山区域相关性有所减少,另外,中部临颍附近相关性面积有所增加。如图 11(e)所示,时滞 2 的相关性均值继续下降为 0.174,面积比迅速衰减至为 3.58%,只剩下西部浅山丘陵的部分区域,中东部的相关性所剩无几,在一些区域出现了零星的负相关;如图 11(f)所示,时滞 3 均值有了些许升高,为 0.192,面积比则继续下降为 2%,只剩下舞阳、中牟等及周边区域分布有一定面积的相关性。

降水水分在被植物吸收以前,需要经历一番损耗和相当长一段时间的迁移转化,对植被的影响具有滞后性和不确定性。土壤水分作为更直接作用于植被的因子,通过分析它与植被的相关关系,不仅可以估计植被对降水的利用效率,也可以分析非降水措施对 NDVI 的影响程度。如图 12(a)所示,去周期后,NDVI 与土壤湿度的整体相关性为 0.263,占比 33.45%。如图 12(b)所示,去周期趋势后,整体相关性升为 0.285,占比升为 37.41%。两种情况下的相关性和显著性面积均高于降水,主要原因是降水需经过蒸发、径流、入渗后才成为土壤水分,因此对降水的敏感性会降低。如图 12(c)所示,两

者在空间分布上有两个明显的区别，去周期后，尉氏县、扶沟县出现了大面积负相关，去周期趋势后，负相关消失；去周期趋势后，在嵩县、汝阳县南部等西部山地林地覆被区域，正相关面积显著增多。由于 NDVI 序列存在趋势和周期特征，这里只讨论去周期趋势的时滞效应。如图 12(d)、12(e)、12(f) 所示，土壤湿度时滞 1、时滞 2 和时滞 3 的整体均值分别下降为 0.246、0.217 和 0.094，占比则下降为 21.08%、11.19% 和 5.07%。如图 12(d) 所示，从时滞 1 的空间分布上看，存在于降水中(图 11(d))汝阳县北部，汝州市南部、登封市和新密市等浅山丘陵区域的时滞现象在土壤湿度中并没有出现。因

此可以得出，西部浅山丘陵区域产生时滞性的主要原因是，在灌溉条件不佳的背景下，降水转换为土壤水分需要一定时间，而东部之所以没有产生时滞性的原因是植被土壤根系较浅和灌溉充分等原因造成的。另外，如图 10(e) 和 12(b) 所示，降水和土壤湿度相关性空间分布相同点在于两者的最强相关都是分布在西部的浅山丘陵区域，主要区别在于前者对嵩县、汝阳县南部等西部山地和鲁山县、汝州市、登封市等部分浅山丘陵区相关特征识别不佳，对林地识别不佳的原因是林地的降水大部分被林冠截留和蒸发。

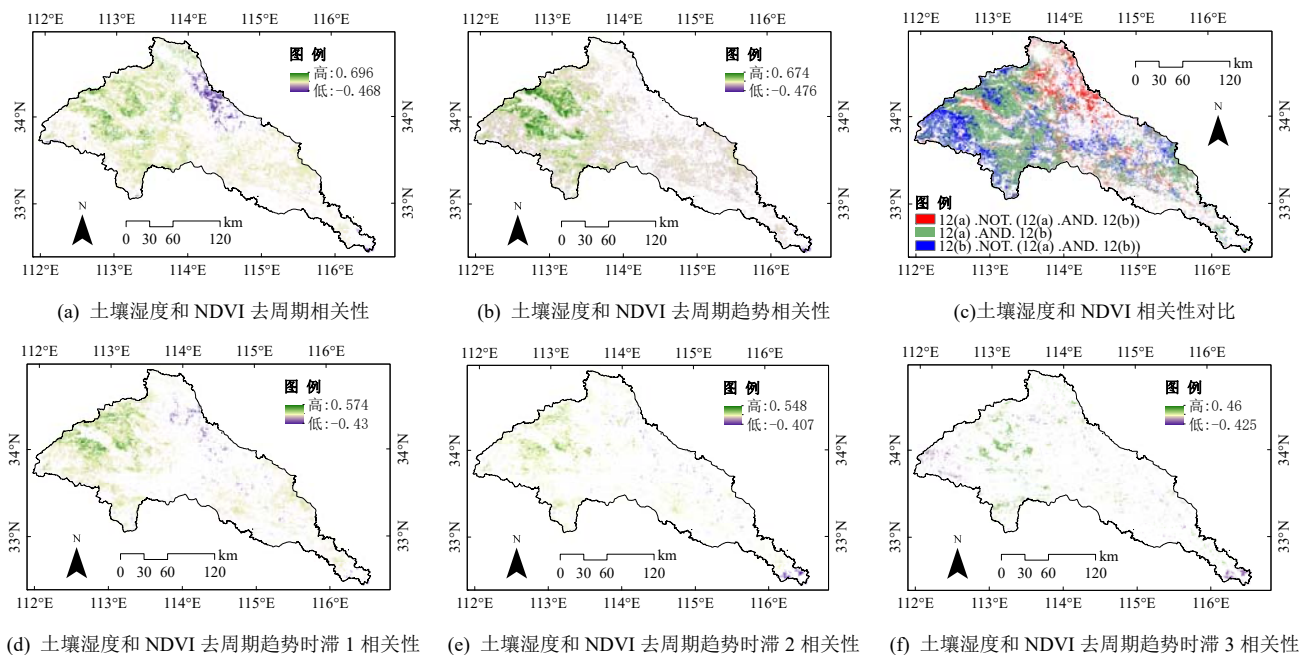


图 12 沙颍河流域 NDVI 和土壤湿度去周期、去周期趋势后的相关性和滞后响应

Fig.12 Correlation and lagged response between NDVI and soil moisture based on the detrending and residual series in the Shaying River Basin

4 讨论

流域植被对气象因子的响应融入了长期趋势的影响，对降水的响应仅为短期行为，这与张辰等的研究结果接近^[12]。在去除趋势项和周期项后，降水数据残差分量的震荡幅度较大，而气温数据残差分量的震荡幅度较小，这表明气温数据的周期和趋势分量已能基本解释其全部信息。NDVI 与气象因子中的周期项均与地球公转密切相关，其周期特征存在地球公转这一共同驱动因素，气温和降水均被驱动且同时施加影响，若采用周期项计算两者相关性，势必会高估其真实关联程度。

NDVI 对气温响应的时滞性在东部平原和中西部区域呈现出一定的差异性，这种差异可能与不同区域的水热条件及种植结构有关。东部平原区域灌溉条件优越、降水充沛，以农作物种植为主；而

中西部区域降水偏少、灌溉条件相对不足，且地形复杂，森林和多年生经济作物植被分布较为广泛^[29]。从 NDVI 同降水和土壤湿度的相关性来看，考虑到本文采用的是滤掉趋势和周期的残差序列，因此，可以推断相关性是植被供水临界状态的一种反映。

文中所用多源数据在空间分辨率上的适配性也会对植被与气象因子之间的相关性产生影响。具体而言，在发展精细农业的城市边缘地带、人类活动频繁的城乡结合部以及开垦难度较大的浅山丘陵等区域，这些区域植被斑块破碎化程度较高，250m 分辨率的 NDVI 数据会平滑掉该区域内存在的空间异质性，因此，细小斑块植被对气候变化的响应将无法反映。而对于地形复杂区域，局部微气候作用显著，使得降水空间分布变异强烈，若采用气象站点分布稀疏或空间分辨率不足的插值数据，则可能无法精准量化植被与降水等气象因子之间

的相关性。

5 结论

本文基于沙颍河流域高时间分辨率的MODIS-NDVI、气温、降水、土壤湿度及土地利用等多源数据,采用谐波回归方法对NDVI时序数据进行分解,在取得趋势项、周期项和残差项的基础上,系统分析和研究了2000—2024年沙颍河流域NDVI对气象因子实时响应与滞后响应的空间分布特征,并深入剖析了这些特征的形成原因及驱动机制,最终得出以下主要结论:

1)使用线性回归方法对2000—2024年沙颍河流域NDVI年均值进行趋势性分析,得到了一个不显著的上升趋势,而通过扩展样本容量,使用谐波回归方法对16dNDVI序列进行分解,则得到了一个显著的随时间变化缓慢上升的趋势。

2)沙颍河流域植被对气温因子的响应以短期响应为主,长期响应为辅,长期趋势导致的影响主要存在于西部浅山丘陵、山地区域和中东部鄢陵、扶沟等县及周边地区;而对降水因子的响应则仅由短期行为主导。

3)沙颍河流域NDVI对气温响应的时滞时间在全域范围内普遍呈现出0~1个月的滞后期;而对降水的响应时滞时间则自东向西逐渐延长。

4)通过对比流域NDVI与降水、土壤水分的相关性发现,西部浅山丘陵区因海拔较高且灌溉条件不足,从而形成时滞效应;而东部区域因植被根系较浅、灌溉条件充分,未出现明显的时滞现象。

综合上述分析,提出以下建议:西部浅山丘陵区需重点改善灌溉基础设施,因地制宜发展林下经济,尤其在矿山生态修复区域,应优先选育耐旱作物品种,通过植被恢复与产业协同,实现生态效益与经济效益的双重提升;中东部平原区可根据NDVI动态调整小麦、玉米种植密度,推广复合种植模式,发展精细农业,提升单位面积作物产量。

参考文献

- [1] 何浩,潘耀忠,朱文泉,等.中国陆地生态系统服务价值测量[J].应用生态学报,2005,16(6):1122-1127.[HE H,PAN Y Z,ZHU W Q,et al.Measurement of terrestrial ecosystem service value in China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2005,16(6):1122-1127.]
- [2] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.[ZHANG K,LYU Y H,FU B J,et al.The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau[J].Acta Geographica Sinica,2020,75(5):949-960.]
- [3] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,(9):3137-3143.[XU X L,MA K M,FU B J,et al.Research review of the relationship between vegetation and soil loss[J].Acta Ecologica Sinica,2006,26(9):3137-3143.]
- [4] 王正兴,刘闯,HUETE A.植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J].生态学报,2003,23(5):979-987.[WANG Z X,LIU C,HUETE A.From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research[J].Acta Ecologica Sinica,2003,23(5):979-987.]
- [5] 郭锐.植被指数及其研究进展[J].干旱气象,2003,21(4):71-75.[GUO N.Vegetation index and its advances[J].Arid Meteorology,2003,21(4):71-75.]
- [6] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.[ZHU W Q,PAN Y Z,ZHANG J S.Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J].Journal of Plant Ecology,2007,31(3):413-424.]
- [7] 解晗,同小娟,李俊,等.2000—2018年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2022,42(11):4536-4549.[XIE H,TONG X J,LI J,et al.Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000—2018[J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(11):4536-4549.]
- [8] 成毅,张富,张志强,等.唐白河流域植被覆盖时空变化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(5):60-68.[CHENG Y,ZHANG F,ZHANG Z Q,et al.Research on spatial and temporal changes in vegetation cover in the tangbai river basin[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2024,45(5):60-68.]
- [9] 李京忠,辛振华,谢潇,等.半干旱区植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应:以锡林郭勒盟为例[J].应用生态学报,2024,35(1):80-86.[LI J Z,XIN Z H,XIE X,et al.Spatio-temporal variations of vegetation cover in semi-arid regions and its response to climate change: A case study of Xilin Gol, Inner Mongolia, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(1):80-86.]
- [10] 沈斌,房世波,余卫国.NDVI 与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异[J].遥感学报,2016,20(3):481-490.[SHEN B,FANG S B,YU W G.Different correlations between NDVI and meteorological factors at temporal-time

- scales[J].*Journal of Remote Sensing*,2016,20(3):481-490.]
- [11] 王谦,关颖慧,刘玉国.不同时间尺度下红河流域植被 NDVI 对极端气候的响应[J].*水土保持学报*,2025,39(3):1-11.[WANG Q,GUAN Y H,LIU Y G.Response of vegetation NDVI to extreme climate in the red river basin at different time scales[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2025,39(3):1-11.]
- [12] 张辰华,李书恒,白红英,等.太白山地区 7 月 NDVI 多尺度周期变化及其对气候因子的响应[J].*资源科学*,2019,41(11):2131-2143.[ZHANG C H,LI S H,BAI H Y,et al.Multi-scale periodic variation of NDVI in July and its response to climatic factors in the Taibai Mountain area[J].*Resources Science*,2019,41(11):2131-2143.]
- [13] LIU H Y,JIA J H,LIN Z S,et al.Relationship between net primary production and climate change in different vegetation zones based on EEMD detrending—A case study of Northwest China[J].*Ecological Indicators*,2021,122: 107276.
- [14] 李维.塔吉克斯坦 NDVI 变化及其与气象因子的相关性研究 [D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2015:34-35.[LI W.NDVI change and its correlation with meteorological factors in Tajikistan[D].Urumqi:Xinjiang Agricultural University,2015:34-35.]
- [15] 靖娟利,王永锋.滇黔桂岩溶区 NDVI 变化及其与气候因子的耦合关系[J].*桂林理工大学学报*,2017,37(1):146-153.[JING J L,WANG Y F.NDVI variation and coupling relation with climate factors in Yunnan — Guizhou — Guangxi karst area[J].*Journal of Guilin University of Technology*.2017,37(1):146-153.]
- [16] 丁婷婷,李强,杜士林,等.沙颍河流域水环境重金属污染特征及生态风险评价[J].*环境化学*,2019,38 (10):2386-2401.[DING T T,LI Q,DU S L,et al.Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Shaying River Basin[J].*Environmental Chemistry*,2019,38(10): 2386-2401.]
- [17] 刘盼盼,王龙,王培,等.沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价 [J]. *水生生物学报*,2018,42(2):373-381.[LIU P P,WANG L,WANG P,et al.The characteristics of zooplankton community and water quality in the Shaying river basin[J].*Acta Hydrobiologica Sinica*,2018,42(2):373-381.]
- [18] 张金泉.河南植物地理研究[M].开封:河南大学出版社,2013:12-13.[ZHANG J Q.Studies on Plant Geography of Henan Province[M].Kaifeng:Henan University Press,2013: 12-13.]
- [19] YANG J,HUANG X.The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J].*Earth System Science Data*,2021,13:3907–3925.
- [20] 上官微,李清亮,石高松.基于站点观测的中国 1km 土壤湿度日尺度数据集 (2000—2022).国家青藏高原科学数据中心,2022.[SHANGGUAN W,LI Q L,SHI G S.A 1 km daily soil moisture dataset over China based on in-situ measurement (2000 — 2022).National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center,2022.]
- [21] WILSON B T,KNIGHT J F,MCROBERTS R E. Harmonic regression of Landsat time series for modeling attributes from national forest inventory data[J].*ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,2018,137:29-46.
- [22] 何书元.应用时间序列分析[M].北京:北京大学出版社,2003:3-4.[HE S Y.Applied Time Series Analysis[M]. Beijing:Peking University Press,2003:3-4.]
- [23] KRISHNAMURTHY V.Predictability of weather and climate[J].*Earth and Space Science*,2019,6(7):1043-1056.
- [24] LOVEJOY S.What is climate?[J].*Eos, Transactions American Geophysical Union*,2013,94(1):1-2.
- [25] PHILIPP M,WEGMANN M,KÜBERT-FLOCK C. Quantifying the response of German forests to drought events via satellite imagery[J].*Remote Sensing*,2021,13(9): 1845.
- [26] ADAMS B,IVERSON L,MATTHEWS S,et al. Mapping forest composition with landsat time series: An evaluation of seasonal composites and harmonic regression[J].*Remote Sensing*,2020,12(4):610.
- [27] VAIDYANATHAN P P.Generalizations of the sampling theorem: Seven decades after Nyquist[J].*IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*,2002,48(9):1094-1109.
- [28] RUNGE J,BATHIANY S,BOLLT E,et al.Infering causation from time series in Earth system sciences[J].*Nature communications*,2019,10(1):2553.
- [29] 卢瑜,王笑影,周玉科,等.秦巴山地植被物候对气候变化的响应及其滞后效应研究 [J]. *遥感技术与应用*,2025,40(5):1255-1268.[LU Y,WANG X Y,ZHOU Y K,et al.Response of vegetation phenology to climate change in the qinba mountain region and its hysteresis effect[J]. *Remote Sensing Technology and Application*,2025,40(5): 1255-1268.]

Spatiotemporal Variation of Vegetation in the Shaying River Basin and Its Response to Meteorological Factors

GAO Xin, YAN Hui, LI Jingzhong, ZHANG Pengfei, XU Shuna

(College of Geography and Geomatics, Xuchang University, Xuchang, 461000, Henan, China)

Abstract: **【Objective】** This study aims to analyze vegetation changes and their responses to meteorological factors in the Shaying River Basin, and explore the spatial differentiation laws of regional vegetation coupling with hydrothermal conditions, so as to provide a theoretical basis for vegetation restoration and protection as well as scientific agricultural management in the basin. **【Methods】** Based on satellite remote sensing NDVI products, meteorological and land use raster data, harmonic regression and correlation analysis methods were adopted to analyze the spatio-temporal variation characteristics of vegetation in the Shaying River Basin at different scales from 2000 to 2024, and to study the differences in multi-scale responses of basin vegetation to meteorological factors during the growing season and the time lag effect. **【Results】** (1) The Shaying River Basin is dominated by crop vegetation, supplemented by shallow hills and mountain vegetation, with a pattern of high in the southwest and central-eastern regions and low in the northwest. (2) Compared with the univariate linear regression method, the harmonic regression method can effectively improve the pass rate of the significance test for trend estimation. (3) The correlation between basin vegetation and temperature is dominated by short-term behavior, supplemented by long-term trend, while the correlation with precipitation is dominated only by short-term behavior. (4) The time lag of watershed vegetation in response to meteorological factors exhibits significant spatial heterogeneity. The time lag for temperature across the entire region ranges from 0 to 1 month. For precipitation, mountainous and hilly areas show a time lag of 0 to 2 months, the central plains have a time lag of 0 to 1 month, and the eastern plains show no time lag. **【Conclusion】** In the Shaying River Basin, the vegetation coverage of agricultural and forestry land has increased significantly, and the growth trend is consistent with the rise in temperature. The real-time and lagged responses of vegetation to meteorological factors are closely related to factors such as the basin's topography and geomorphology, agricultural management measures, and vegetation type composition. In the future, field observations will be further combined with multi-source remote sensing data to deeply explore the internal mechanisms of different vegetation types responding to meteorological factors, so as to provide more scientific decision-making basis for precise restoration of the basin ecosystem, sustainable agricultural development and climate change adaptation.

Keywords: Harmonic regression; Vegetation; Shaying River Basin; Temperature; Precipitation