

DOI: 10.20103/j.stxb.202303150487

崔红婧, 褚琳, 尹雅琦, 潘妍, 孟红杰, 王天巍. 1990—2020 年三峡库区植被物候时空格局及其演变机制. 生态学报, 2024, 44(9): 3775–3790.

Cui H J, Chu L, Yin Y Q, Pan Y, Meng H J, Wang T W. Spatio-temporal patterns of vegetation phenology and their evolutionary mechanisms in the Three Gorges Reservoir Area from 1990 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3775–3790.

1990—2020 年三峡库区植被物候时空格局及其演变机制

崔红婧^{1,2}, 褚琳^{1,*}, 尹雅琦¹, 潘妍¹, 孟红杰³, 王天巍¹

1 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

2 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

3 华中农业大园林艺林学院, 武汉 430070

摘要: 作为长江上游生态屏障的核心区, 三峡库区特殊的地理位置使其在推动长江经济带发展和生态文明建设中肩负着重大使命。三峡库区的生态环境在蓄水前后发生了较大改变, 其变化能通过植被物候的变动体现, 研究三峡库区植被物候时空演变特征及其驱动力, 对于区域生态可持续发展和长江经济带生态文明建设具有重要意义。借助动态阈值法提取物候参数, 整合多源遥感物候参数提取结果, 分析 1990—2020 年三峡库区植被物候时空格局; 结合 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验等方法, 定量分析三峡库区蓄水前后植被物候时空演变特征; 运用地理加权回归分析、Pearson 相关性分析以及主成分分析等方法, 定量探究三峡库区植被物候时空演变的影响因素。结果表明: (1) 近 31 年来, 三峡库区植被的生长季开始时间 (Start of Growing Season, SOS) 主要出现在 60 DOY (Date of Year), 生长季结束时间 (End of Growing Season, EOS) 主要出现在 301 DOY, 生长季长度 (Length of Growing Season, LOS) 总体为 248 d。在空间上, SOS 与 EOS 均呈现出从库首至库尾逐渐提前的趋势, LOS 的空间异质性较小。(2) 库区植被物候表现出 SOS 提前、EOS 推迟和 LOS 延长的特征, SOS 提前的平均幅度为 0.3 d/a, 库首区域最为典型; EOS 推迟的平均幅度为 0.8 d/a, 库尾区域尤为明显; LOS 延长的平均幅度为 1.7 d/a, 库尾区域更加突出。植被物候对库区蓄水的响应表现出一定的滞后性。(3) 人为因素与间接人为因素 (水位、人口和水域面积等) 是影响库区植被物候时空分异的主要因素。

关键词: 三峡库区; 植被物候; 时空格局; 演变机制; 影响因素

Spatio-temporal patterns of vegetation phenology and their evolutionary mechanisms in the Three Gorges Reservoir Area from 1990 to 2020

CUI Hongjing^{1,2}, CHU Lin^{1,*}, YIN Yaqi¹, PAN Yan¹, MENG Hongjie³, WANG Tianwei¹

1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: As the core area of the ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River, the Three Gorges Reservoir Area (TGRA), due to its special geographical location, has a major role to promote the development of the Yangtze River Economic Belt and the construction of ecological civilization. The ecological environment of the TGRA has altered significantly before and after the impounding of the reservoir, which may be a reflection of the change in vegetation phenology. Therefore, it is of great significance to study the spatial and temporal evolutionary characteristics of vegetation

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41907052); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500703); 中央高校基本科研业务费专项基金 (2662021YLQD001)

收稿日期: 2023-03-15; 网络出版日期: 2024-02-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chulin@mail.hzau.edu.cn

phenology and its driving forces in the TGRA for sustainable development of regional ecology and the construction of ecological civilization in the Yangtze River Economic Belt. The study analyzed the spatial and temporal patterns of vegetation phenology in the TGRA from 1990 to 2020 by integrating the results of multi-source remote sensing phenological parameter extraction using the dynamic threshold method. Combined with Theil-Sen Median trend analysis and Mann-Kendall test, the temporal and spatial evolution characteristics of vegetation phenology before and after the impounding of the reservoir were quantitatively analyzed. Geographic weighted regression analysis, Pearson correlation analysis and principal component analysis were used to quantitatively explore the factors influencing the spatio-temporal evolution of vegetation phenology in the TGRA. The results showed that: (1) over the past 31 years, the Start of Growing Season (SOS) of vegetation in the TGRA mainly occurred at 60 DOY (Date of Year), the End of Growing Season (EOS) mainly occurred at 301 DOY, and the Length of Growing Season (LOS) was 248 days. Spatially, both SOS and EOS showed a trend of gradually advancing from the head to the tail of the reservoir, and the spatial heterogeneity of the LOS was smaller. (2) The vegetation phenology showed the characteristics of SOS advance, EOS delay, and LOS prolongation. The average amplitude of SOS advance was 0.3 d/a, which was particularly evident at the head of the reservoir. The average amplitude of EOS delay was 0.8 d/a, which was particularly evident at the tail of the reservoir. The average amplitude of LOS prolongation was 1.7 d/a, which was particularly evident at the tail of the reservoir. The response of vegetation phenological to reservoir water storage showed a certain time lag. (3) Anthropogenic factors and indirect anthropogenic factors, including water level, population, and water area were main factors influencing the spatial and temporal variability of vegetation phenology in TGRA.

Key Words: the Three Gorges Reservoir Area; vegetation phenology; spatial and temporal patterns; evolutionary mechanisms; influence factors

植被物候是指植被生长的周期性变化现象^[1],它可以直观反映出陆地生态系统的季节和年际变化,是植被长期适应环境季节性变化而形成的生长发育节律^[2]。作为表征生态系统动态及其对环境变化响应方式的重要生态系统参数^[3],植被物候的主要指标包括生长季开始时间(SOS)、生长季长度(LOS)和生长季结束时间(EOS)等^[4-5]。目前,植被物候已成为气候-植被能量交换模型^[6]、植被净初级生产力估算^[7]和碳循环收支平衡等模型^[8]的重要参数之一,被广泛应用于研究植被自身生长变化、监测生态环境、揭示植被变化对气候的响应机制等重要领域。因此,研究植被物候的时空演变规律及其影响因素,对于区域可持续发展、生态文明建设等领域有重要意义。

遥感技术为提取宏观区域尺度范围的植被物候提供了可能,植被指数(VI)常被用来提取植被物候,其中归一化植被指数(NDVI)应用最为广泛^[9-12]。针对非特定的植被物候提取主要以地表物候(LSP)检测为主,该方法大致可分为两类:阈值法和植被指数更改检测法^[13]。阈值法在使用上较为简便,即设定一个阈值,认定VI数值达到此阈值后开始进入某物候阶段。阈值的确定通常有两种方法,分别为设定固定阈值与根据时间序列计算获得的动态阈值。设定固定阈值指建立任意单个固定指数值的相对固定阈值,例如将NDVI达到0.17作为确定植被SOS的标志^[14]。为消除不同土壤背景值和植被类型差异的影响,动态阈值法在此基础上进行了改进^[15-16],将阈值的设定与NDVI时间序列关联。通常设置振幅的20%和50%作为物候参数的阈值^[17-19],在实际使用过程中,需要结合已有植被物候信息记录进行一定的调整。

借助遥感数据融合技术,可实现高精度长时间序列物候数据的整合^[20-21]。如今,遥感影像融合方法大致分为两类,即空间和光谱融合、时间和空间融合^[21]。在时间和空间融合算法中,时空自适应反射融合模型(STARFM)算法较为成熟,常用于MODIS数据与Landsat数据的融合^[22]。STARFM算法通过一组或两组获取时间一致且覆盖区域相同的MODIS反射率影像与Landsat ETM+反射率影像,以及一景或两景预测时间的MODIS反射率影像,生成了拥有MODIS时间分辨率(8 d)和Landsat ETM+空间分辨率(30 m)的多光谱融合影像^[22]。STARFM算法需要数据获取的时空信息一致,且在异质性区域预测结果差^[23]。基于移动窗口的数

据融合方法,即增强时空自适应反射融合模型(ESTARFM)算法是 STARFM 算法的改进,该算法考虑了从邻近的光谱相似像元所获得的辅助信息及这些像元本身的权重,在异质性较强区域进行融合时能有效提高精度^[24]。然而,在保持数据获取的时空信息一致性方面,ESTARFM 算法亦无法实现更早更长时序的研究。为向前拓展数据的时间序列,基于 MODIS 数据对 GIMMS 数据进行延长的方法被提出^[25],该方法将两种数据源的植被指数进行时间序列重建,重采样到 GIMMS 数据的时空尺度上并进行一致性检验,得到一个更长时序的植被指数数据集,但数据的空间分辨率低。区域植被动态变化分析中,基于像元的一元数据融合方法在保证较高融合准确度^[26]与空间分辨率的同时,对数据时间获取方面要求不高,即不需要时间完全一致。该方法先对两个数据源共有年份的最大 VI(如 NDVI、EVI 等)进行相关分析,再采用基于像元的一元线性回归,对相关系数最大的两种数据作线性拟合,得到长时间序列的 VI 后进行物候提取。

植被物候受到温度、光周期、水分、养分等多种因素综合影响^[1-2,10],各因素间相互作用机制较为复杂^[27]。其中,气候等周围环境变化被认为是植被生长季节性变化的主要影响因素^[28],不同物候参数受气候因子类型和时期的影响程度不同^[29]。降水被认为是影响植被物候的主要气象因子^[30],研究表明,降水量的增加将导致植被 SOS 的提前、EOS 的推迟及 LOS 的延长^[19,31]。除了降水,地表水分条件同样对植被物候有重要的影响^[32]。同时,温度对物候的影响在全球、全国以及区域尺度上也十分显著,研究表明全球变暖导致了返青期的提前以及枯黄期的推迟^[17]。我国草本植被物候受温度影响较大,物候对温度的响应是多重且非线性的^[33],日照与水分的影响则相对较小^[34];此外,有研究认为年平均气温并未显著影响植被物候,气温日较差^[19]和积温^[35]则对植被物候的影响较为显著。在我国南方山区,气候因子是影响森林物候时空变化趋势的主要因素^[36],复杂地形对物候的空间差异影响也不容忽视,即地形差异显著影响物候的空间异质性^[37-39]。上述针对南方地区植被物候影响因素开展的分析研究大多集中在自然因子方面,针对人为因子以及间接人为因子的讨论较少。据 1991 年至 2010 年的农业物候监测数据显示,除温度、降水量、日照时数等自然因子之外,可能存在其他局地影响因子对植被物候变化产生作用^[40]。但鉴于区域城市化和工业化进程等一系列人为活动^[41]难以量化的特点,使得其与植被物候之间的关系更加复杂。

长江经济带是我国纵深最长、覆盖面最广、影响最大的黄金经济带,是我国经济重心所在。党的二十大再次强调了生态文明建设的重要性,建设人与自然和谐共生的现代化。习近平总书记明确要求,全面推动长江经济带的绿色发展,使长江经济带成为我国生态优先绿色发展主战场。作为长江流域最重要的生态屏障,三峡库区的特殊地理位置使得它在国家推动长江经济带发展和生态文明建设中肩负着重大使命。蓄水前后(1990—2020 年),库区生态环境,特别是植被的生长环境发生了较大改变。因此,解析三峡库区植被物候时空格局演变特征,揭示其演变机制,对于区域生态可持续发展具有重要现实意义,对整个区域乃至全国的生态文明建设也是影响深远的,是全国生态文明建设和和谐社会构建的基础和保证。

1 研究区概况

三峡库区地处 105.72°—111.68°E,28.52°—31.74°N 之间(图 1),西起重庆江津,东至湖北宜昌,占地面积约为 $5.78 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其所辖区县众多,包括湖北省的 4 个县,重庆市的 13 个区县及其 9 个主城区^[42]。地形起伏大且复杂多变^[43],其中山地占 74%、丘陵占 21.7%、河谷平坝占 4.3%。库区东西气候差异较大,气候垂直变化明显。研究区属于亚热带季风气候,冬季仅 60 d 至 70 d,夏季炎热,降水充沛但季节分配不均,云雾多,日照少,日照百分率约 30%。库区内植被类型丰富,主要有阔叶林、竹林、针叶林、灌丛和草丛等^[43],常绿阔叶林仅零星分布,落叶阔叶林分布极广,主要存在于平原、低山丘陵、山地上,常绿针叶林主要分布于长江河谷 100—2000 m 左右,灌木林广泛分布于低山、丘陵地区。

三峡工程是人类历史上迄今为止最伟大的工程之一,分为三个工期阶段,从 1994 年开工,到 2009 年竣工,15 年间进行了大量的移民等人为举措。三峡库区于 1993 年开始蓄水,大坝于 2006 年建成,可分为四期工程,1993—1996 年蓄水至 90 m 水位,1997—2002 年蓄水至 135 m 水位,2003—2006 年蓄水至 156 m 水位,

2007—2009 年蓄水至 175 m 水位。

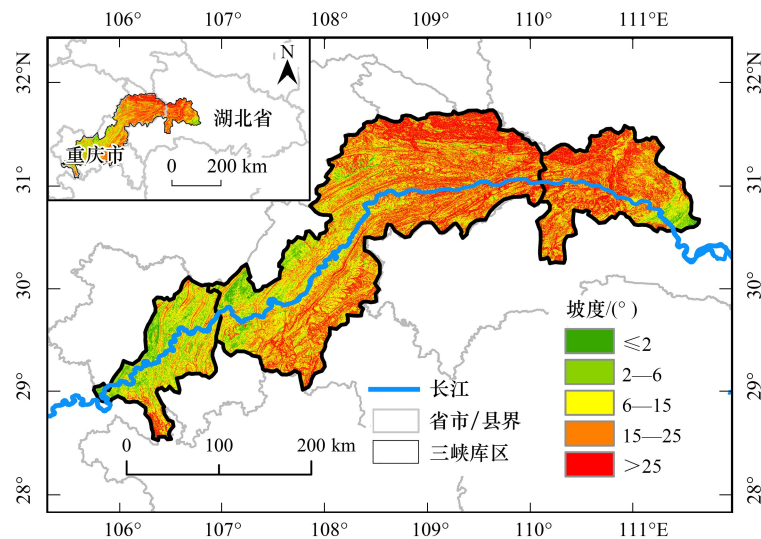


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

2.1.1 归一化植被指数 (NDVI)

采用 GIMMS 和 MODIS 两种 NDVI 数据源提取 1990—2020 年的植被物候参数。1990—2012 年的数据为 GIMMS NDVI 3gv1, 是 NASA 公布的第三代长时间序列 GIMMS AVHRR NDVI 数据集 (<https://nasanex.s3.amazonaws.com/>), 该数据集采用 WGS-84 世界大地坐标系, 时间分辨率为 15 d, 空间分辨率为 $1/12^\circ$ (8 km); 2001—2021 年的数据为 MOD13Q1 数据集 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), 时间分辨率为 16 d, 空间分辨率为 250 m。为进行数据整合, 将数据的空间投影坐标系统一为 WGS_1984_UTM_Zone_49N。

2.1.2 气象数据

气象数据来自隶属于美国国家海洋及大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的美国国家气候数据中心 (National Climatic Data Center, NCDC) 的气候数据集, 包括 1990—2020 年的气温、露点、气压、风向、风速、云量与 6 h 积累降水量数据。数据基于 NCDC 公开的 FTP 服务器 (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-lite/>) 进行下载, 在研究区域内的站点共有 9 个, 数据的时间精度为 3 h (少量站点为 1 h)。

2.1.3 高程和坡度

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 为 SRTMDEMUTM 90M 分辨率数字高程数据产品, 在地理空间数据云中获取 (<http://www.gscloud.cn/search>)。根据研究区范围, 选取编号 utm_srtm_58_06、utm_srtm_58_07、utm_srtm_59_06 和 utm_srtm_59_07 共四幅影像。

结合 DEM 数据, 根据研究区所在纬度确定 Z 因子为 0.00001036, 计算坡度。按照 1984 年中国农业区划委员会颁发的《土地利用现状调查技术规程》将坡度分为五级, 即 $\leq 2^\circ$ 、 $2^\circ-6^\circ$ 、 $6^\circ-15^\circ$ 、 $15^\circ-25^\circ$ 、 $>25^\circ$ 。

2.1.4 统计年鉴

水位与流量数据 (宜昌站和武隆站) 来自湖北水利厅发布的江河水情表 (<http://113.57.190.228:8001/web/Report/RiverReport>)。三峡库区重庆段的水位与径流数据没有被公布, 因此, 本研究仅用湖北段的水位与流量数据代表整个研究区域来进行驱动力分析; 水域面积数据摘录自文献, 文章中指出在 2000—2010 年三峡

库区水域面积增长约为 388.18 km², 每年增长约 38.81 km²[44]; 人口和国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)数据来自统计年鉴, 包括湖北统计年鉴、重庆统计年鉴、四川统计年鉴、宜昌统计年鉴、恩施统计年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 物候参数信息提取

基于 GIMMS 数据与 MODIS 数据, 采用 Savitzky-Golay (S-G) 滤波方法进行平滑。S-G 滤波是一种在时域内基于局部多项式最小二乘拟合的滤波方法[45], 其表达式如式 1 所示。

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+1}}{2m+1} \quad (1)$$

式中, Y_j^* 代表滤波后的 NDVI 值, C_i 代表 S-G 滤波器的滤波系数, 即平滑窗口, m 代表平滑窗口的半宽, Y 代表原始的 NDVI 值。

采取动态阈值法对滤波重构后的 NDVI 时序数据进行物候参数提取。该法使用植被指数定义作物营养生长和生殖生长的开始期, 它采用的阈值是一种动态的比值形式, 即给定像元和给定年份的植被指数值与当年植被指数振幅的比[46]。研究采用儒略日表示 SOS 与 EOS, 将 NDVI 增长达到当年 NDVI 振幅 20% 的时刻定义为 SOS, 将 NDVI 降低到当年 NDVI 振幅 50% 的时刻定义为 EOS, 将 EOS 与 SOS 之差定义为 LOS, 分别如式 2、式 3 和式 4 所示。

$$\text{SOS} = 0.2 \times f_{\text{in}} \quad (2)$$

$$\text{EOS} = 0.5 \times f_{\text{de}} \quad (3)$$

$$\text{LOS} = \text{EOS} - \text{SOS} \quad (4)$$

式中, f_{in} 表示 NDVI 增长时的振幅, f_{de} 表示 NDVI 降低时的振幅。

2.2.2 基于物候信息的长时间序列数据整合

为更简便与精细地获取物候数据, 分别对 GIMMS 数据和 MODIS 数据进行了物候提取, 整合两种物候信息, 得到 MODIS 数据分辨率(250 m)的数据。首先将 GIMMS 数据提取到的物候信息进行批量重采样(双线性插值法), 控制输出像元大小与 MODIS 数据相同(250 m); 之后建立两个数据源重合年份(2001—2011 年)物候信息之间的关系(通过了显著性检验, 相关系数为 0.901); 最后进行回归分析, 设置截距为 0, 得到回归方程如式 5 所示, 并利用该方程, 生产出空间分辨率为 250 m 的 1990—2020 年三峡库区植被物候信息。

$$y = 1.038x \quad (5)$$

式中, x 为 GIMMS 数据物候信息, y 为 MODIS 数据物候信息, 回归平方和与总离差平方和之比 $R^2 = 0.7982$, 拟合度较高。

2.2.3 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen Median 趋势分析又称为 Sen 斜率估计, 是一种非参数统计的趋势计算方法[47]。其计算公式如式 6 所示。

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (6)$$

式中, β 为斜率, $\text{Median}()$ 代表取中值, x_i 和 x_j 为时间序列数据。若 β 大于 0, 则表明为增加趋势, 反之为减少趋势。

Mann-Kendall (MK) 检验是一种非参数的时间序列趋势性检验方法, 适用于长时间序列数据的趋势显著检验[48]。使用检验统计量 Z 进行趋势检验, Z 值计算公式如式 7 所示。

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中, S 表示检验统计量, $\text{VAR}()$ 代表方程计算, 其计算公式如式 8 所示。

$$\text{VAR}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)]}{18} \quad (8)$$

式中, n 为序列中数据的个数, m 为序列中重复出现的数据组的数目, t_i 是第 i 组重复数据组中的重复数据个数。

2.2.4 驱动力分析

研究选取了气温、露点温度、气压、风向、风速、云量、6 小时积累液体深度、水位、流量、水域面积、人口、GDP、高程、坡度、蓄水时间, 共 15 个因子定量探究三峡库区植被物候的时空分异。其中, 高程与坡度的年际变化非常小, 可以忽略不计。因此, 基于高程与坡度, 利用地理加权回归 (Geographically weighted regression, GWR) 分析三峡库区植被物候空间分异的影响因素 (式 9)。利用 Pearson 相关系数分析三峡库区植被物候时间分异的影响因素 (式 10 和式 11), 并基于主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 定量探究三峡库区植被物候时空分异的主要影响因素 (式 12 和式 13)。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)x_{i1} + \beta_2(u_i, v_i)x_{i2} + \cdots + \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (9)$$

式中, y_i 为 i 因变量解释值, (u_i, v_i) 为地理坐标, $x_{ik} (k=1, 2, \cdots, 9)$ 为 i 自变量解释值, $\beta_k(u_i, v_i)$ 为研究单元 i 区域质心 (u_i, v_i) 处的回归参数, ε_i 为随机误差项。

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

式中, r 为两个变量之间相关系数, n 为统计年份, 即 31 年, x_i 和 y_i 分别为要素变量, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为变量的平均值。为检验两个变量之间的相关系数的可信程度, 并查验相关系数在给定的置信水平下是否呈显著性, 利用 t 统计量对相关系数 r 来进行检验。 t 的计算公式如式 11 所示:

$$t = \frac{\sqrt{n-2} \times r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (11)$$

式中, n 为统计年份。

$$A = \begin{bmatrix} \text{cov}(x_1, x_1) & \cdots & \text{cov}(x_1, x_2) & \cdots & \text{cov}(x_1, x_n) \\ \text{cov}(x_2, x_1) & \cdots & \text{cov}(x_2, x_2) & \cdots & \text{cov}(x_2, x_n) \\ \cdots & & \cdots & & \cdots \\ \text{cov}(x_n, x_1) & \cdots & \text{cov}(x_n, x_2) & \cdots & \text{cov}(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, 矩阵 A 的对角线是特征 $x_1, x_2 \cdots x_n$ 的方差, 非对角线上的为协方差, 协方差的求解公式如式 13 所示。

$$\text{cov}(x_n, x_n) = \frac{\sum_{i=1}^M (x_n^i - \bar{x}_n)(x_n^i - \bar{x}_n)}{M-1} \quad (13)$$

式中, M 为样本个数。

3 结果与分析

3.1 三峡库区植被物候时空格局特征

3.1.1 SOS 时空格局特征

图 2 展示了 1990—2020 年三峡库区植被的平均 SOS 空间分布特征, 表现出从库首到库尾 SOS 逐渐提前的趋势。SOS 在库尾与库中的西南部出现较早, 一般在 40—60 DOY (2 月中上旬); 在库首与库中的东北部出现较晚, 一般在 60—80 DOY (2 月下旬至 3 月中上旬); 但在个别区域会出现高低值镶嵌分布的现象。31 年平

均 SOS 的平均值为 60 DOY(2 月下旬),标准差为 12 d。其中,库首的 SOS 平均值为 72 DOY,库中的 SOS 平均值为 58 DOY,库尾的 SOS 平均值为 49 DOY。整体来看,三峡库区植被的 SOS 呈库尾早、库首晚的空间分布格局,相差约 15 d,一般出现在 2 月份。

3.1.2 EOS 时空格局特征

图 3 展示了 1990—2020 年三峡库区植被的平均 EOS 空间分布特征,表现出从库首到库尾 EOS 逐渐提前的趋势。EOS 在库尾与库中的西南部出现较早,一般在 280—300 DOY(10 月中下旬);在库首与库中的东北部出现较晚,一般在 300—320 DOY(11 月中上旬);但在个别区域会出现高低值镶嵌分布的现象。31 年平均 EOS 的平均值为 301 DOY(10 月底至 11 月初),标准差为 17 d。其中,库首的 EOS 平均值为 301 DOY,库中的 EOS 平均值为 304 DOY,库尾的 EOS 平均值为 287 DOY。整体来看,三峡库区植被的 EOS 呈库尾早、库首晚的空间分布格局,相差约 15 d,一般出现在 10 月至 11 月。结合前文对 SOS 的分析,可以看出,库尾地区的 SOS 出现较早,EOS 出现也较早;库首地区的 SOS 出现较晚,EOS 出现也较晚。

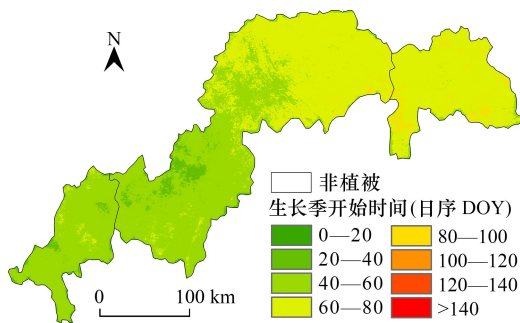


图 2 1990—2020 年三峡库区植被平均 SOS 空间分布

Fig.2 Mean SOS spatial distribution of vegetation in the TGRA from 1990 to 2020

SOS:生长季开始时间 Start of growing season;DOY:一年中的第几天 Date of year;TGRA:三峡库区 the Three Gorges Reservoir Area

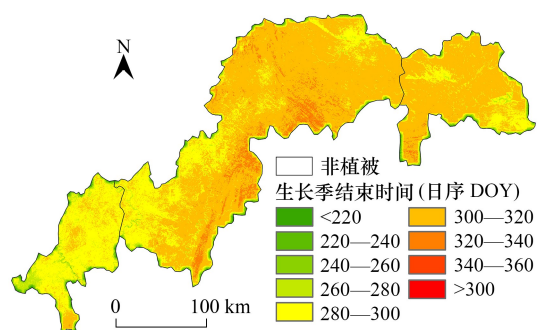


图 3 1990—2020 年三峡库区植被平均 EOS 空间分布

Fig.3 Mean EOS spatial distribution of vegetation in the TGRA from 1990 to 2020

EOS:生长季结束时间 End of growing season

3.1.3 LOS 时空格局特征

图 4 展示了 1990—2020 年三峡库区植被的平均 LOS 空间分布特征,LOS 呈镶嵌分布的空间格局,31 年间平均情况的空间异质性较低,一般持续 220—280 d(8 个月至 10 个月)。31 年平均 LOS 的平均值为 248 d,标准差为 17 d。其中,库首的 LOS 平均值为 235 d,库中的 LOS 平均值为 253 d,库尾的 LOS 平均值为 249 d。

3.2 近 31 年三峡库区植被物候时空演变

1990—2020 年三峡库区植被的 SOS 整体变化较小,库首与库中的西南部的 SOS 有提前的趋势,变化幅度为 0—2 d/a,平均提前幅度为 0.3 d/a,如图 5 所示。结合显著性分析结果,可以看出 1990—2020 年的 SOS 大多无变化,少量提前,极少量推迟。从变化的面积来看,呈无变化、极显著提前、显著提前、微显著提前、不显著提前、极显著推迟、显著推迟、微显著推迟和不显著推迟特点的像元面积分别占总面积的 92.64%、0.87%、0.90%、0.53%、2.58%、0.47%、0.38%、0.21%和 1.42%。

EOS 表现为整体以推迟趋势为主的特征,变化幅度为 0—4 d/a,平均推迟幅度为 0.8 d/a,如图 5 所示。结合显著性分析结果,可以看出 1990—2020 年的 EOS 除

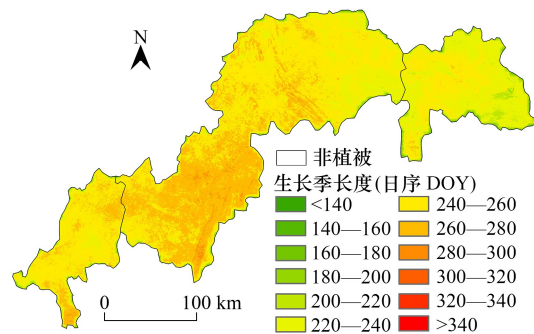


图 4 1990—2020 年三峡库区植被平均 LOS 空间分布

Fig.4 Mean LOS spatial distribution of vegetation in the TGRA from 1990 to 2020

LOS:生长及长度 Length of growing season

无变化区域外,呈极显著推迟趋势的区域较多。另外,三峡库区的库尾与库中的东北部的 EOS 呈推迟趋势的区域较多,而库首与库中的西南部的 EOS 呈提前趋势的区域较多。从变化的面积来看,呈无变化、极显著提前、显著提前、微显著提前、不显著提前、极显著推迟、显著推迟、微显著推迟和不显著推迟特点的像元面积分别占总面积的 41.68%、1.97%、3.03%、2.31%、15.51%、15.73%、4.17%、2.06%和 13.54%。

LOS 表现为整体以延长趋势为主的特征,变化幅度为 0—4 d/a,平均延长幅度为 1.7 d/a,如图 5 所示。结合显著性检验的结果,可以看出大部分区域都呈延长趋势,并且在延长趋势的类别中,呈不显著延长特点的区域较多。另外,在三峡库区内,库尾与库中的东北部的 LOS 延长趋势较库首与库中的西南部的 LOS 延迟趋势更加显著。从变化的面积来看,呈无变化、极显著缩短、显著缩短、微显著缩短、不显著缩短、极显著延长、显著延长、微显著延长和不显著延长特点的像元面积分别占总面积的 41.68%、0.08%、0.25%、0.30%、8.52%、15.81%、8.27%、4.15%和 20.94%。

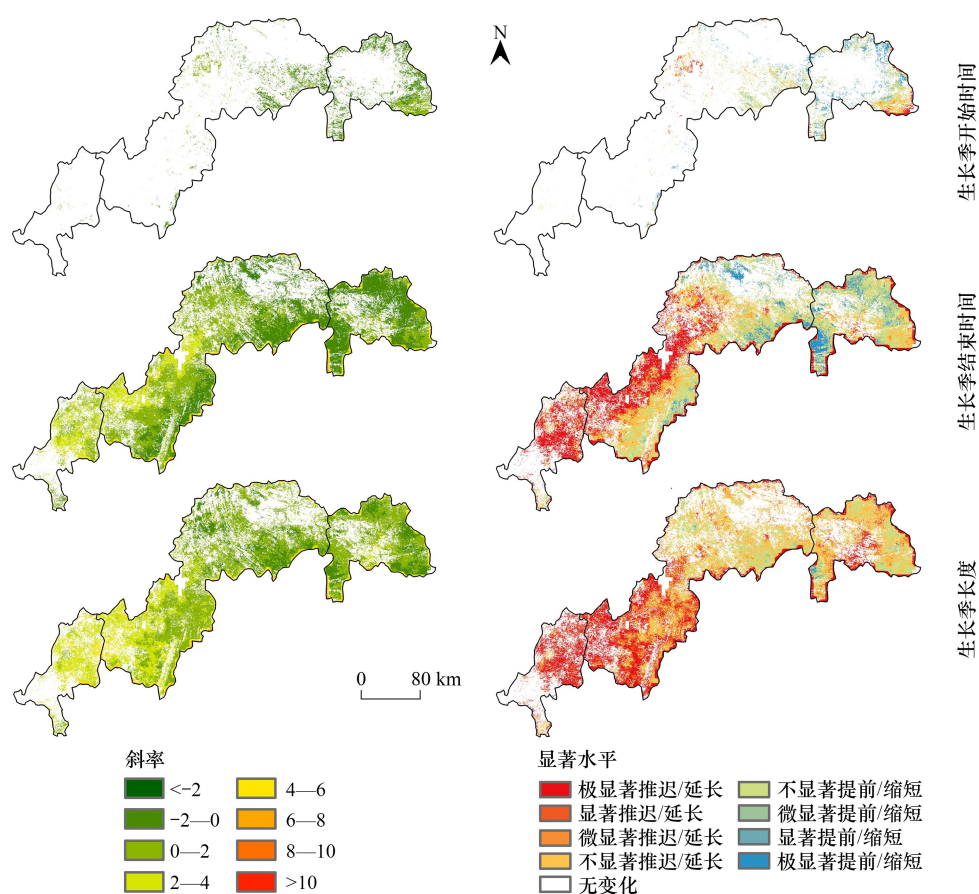


图 5 1990—2020 年三峡库区植被物候变化趋势空间分布

Fig.5 Spatial distribution of vegetation phenological trends in the TGRA from 1990 to 2020

近 31 年来, SOS、EOS、LOS 具有较大的年际波动特征,整体上, SOS 呈提前趋势、EOS 呈推迟趋势、LOS 呈延长趋势(图 6)。SOS 的 R^2 为 0.0957, 提前的平均幅度约为 0.3 d/a。EOS 的 R^2 为 0.2635, 推迟的平均幅度约为 0.8 d/a。LOS 的拟合度 R^2 为 0.4447, 延长的平均幅度约为 1.7 d/a。总体来说, 1990—2020 年三峡库区植被的平均年际变化特征与前文所分析的时空变化趋势结果一致。

研究根据三峡工程的建设进度, 将研究时段分为蓄水前(1990—1993 年)、蓄水中(1993—2009 年)和蓄水后(2009—2020 年)^[49]。图 6 展示了三峡库区植被物候年际变化趋势, 在蓄水前, SOS 总体变化不明显, 呈提前的趋势; EOS 的变化幅度较大, 呈提前趋势; LOS 较为波动, 呈缩短趋势。在蓄水中, SOS 的波动频率和变

化幅度都较小,呈波动提前的趋势;EOS 的波动频率和变化幅度都较大,呈波动推迟的趋势;LOS 的波动频率和变化幅度都很大,且较为规律,呈波动延长的趋势。在蓄水后,SOS 的波动频率和变化幅度较蓄水中变化不明显,依旧呈提前的趋势;EOS 的变化幅度较之前有所减小,波动频率较之前没有较大改变,但总体呈提前的趋势;LOS 的波动频率和变化幅度都变小了,有较小的延长趋势。值得注意的是,植被物候参数在 2018 年均发生了较大突变,表现为 SOS 提前趋势加剧、EOS 推迟趋势加剧、LOS 延长趋势加剧。

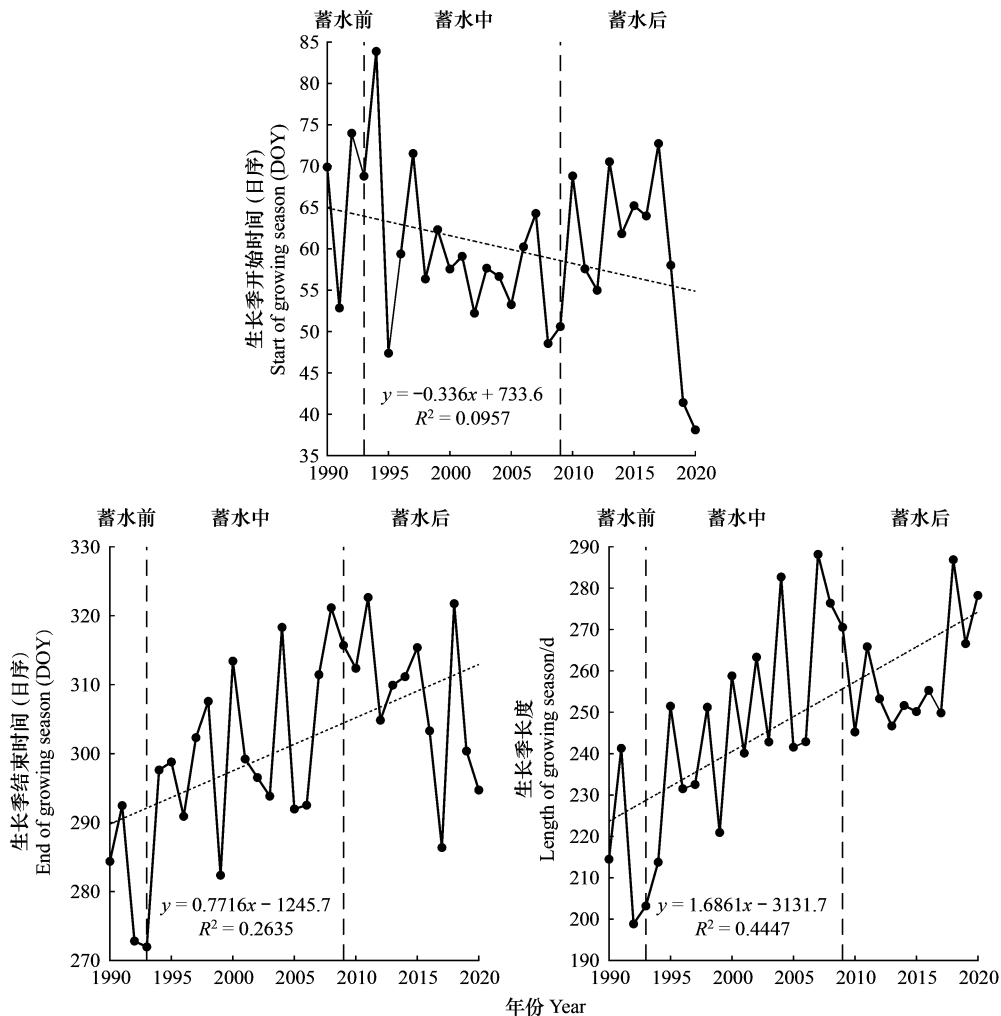


图 6 1990—2020 年三峡库区植被物候年际变化趋势

Fig.6 Interannual variation trend of vegetation phenology in the TGRA from 1990 to 2020

3.3 三峡库区植被物候时空格局演变机制

3.3.1 植被物候时空分异的影响因素

地理加权回归分析的结果表明,坡度对植被物候的空间分异具有负面影响,其影响显著高于高程。三峡库区坡度的空间分布总体变化趋势为从库首到库尾逐渐降低(图 1),平均坡度约为 17.66° ,其中库首的平均坡度约为 20.77° ,库中的平均坡度约为 18.41° ,库尾的平均坡度约为 10.10° 。其中,坡度小于等于 2° 的区域占总面积的 3.79%,坡度在 $2^\circ-6^\circ$ 的区域占总面积的 12.28%,坡度在 $6^\circ-15^\circ$ 的区域占总面积的 29.79%,坡度在 $15^\circ-25^\circ$ 的区域占总面积的 29.46%,坡度大于 25° 的区域占总面积的 24.68%。图 7 展示的是植被物候与坡度的相关系数(表 1)和地理加权回归分析的拟合优度。三峡库区植被物候整体与坡度主要呈负相关关系,值得注意的是,库首与库中的中间区域的植被物候与坡度呈正相关关系,库首和库中接壤的位置与库尾的植被物候与坡度呈负相关关系。拟合度(R^2)可以反映出模型结果的好坏,三峡库区库中的中间部分拟合效果

较好(拟合度均大于 0.2, 其中 SOS 的拟合度大于 0.6), 库首和库尾的拟合结果稍差。

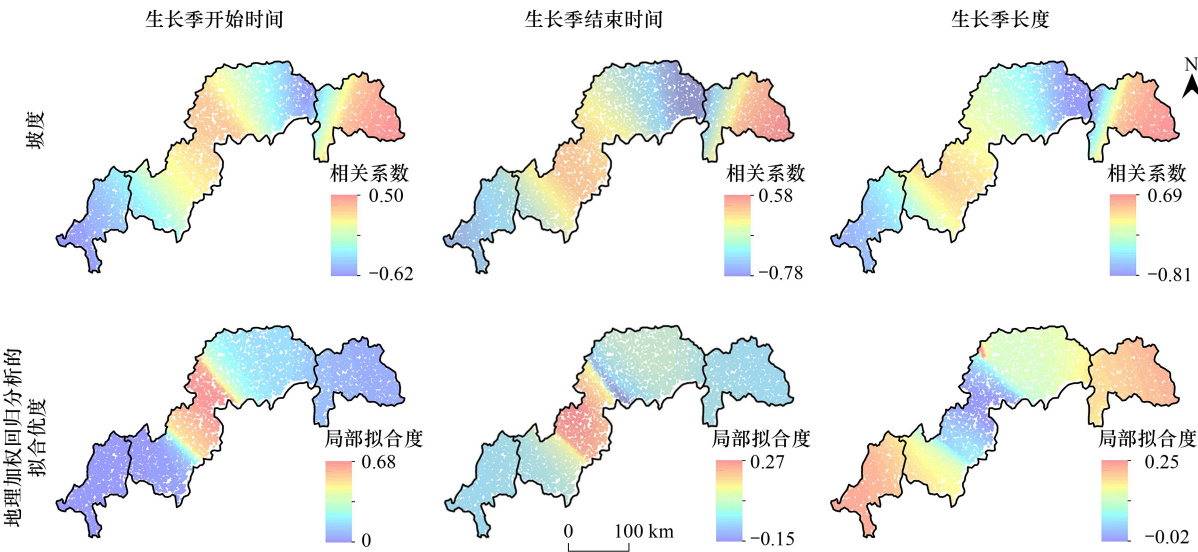


图 7 物候与坡度的相关系数与拟合度

Fig.7 Correlation coefficient and fit degree between phenology and slope

表 1 物候与坡度的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between phenology and slope

相关系数 Correlation coefficient	坡度均值 Slope mean	坡度中值 Slope median
生长季开始时间 Start of Growing Season	-0.12	-0.10
生长季结束时间 End of Growing Season	-0.13	-0.10
生长季长度 Length of Growing Season	-0.15	-0.12

图 8 展示的是三峡库区蓄水时间与植被物候的关系,在蓄水过程中,每进行一次大规模蓄水,SOS 会在当年或转年有提前趋势,EOS 在当年有推迟趋势,LOS 在当年或转年有延长趋势。这与 3.2 节中所得的 31 年间 SOS、EOS、LOS 分别呈提前、推迟、延长的趋势结果一致,说明库区的人为蓄水对其植被物候有较大的影响,且表现出一定的滞后性。

研究选取气温、露点温度、气压、风向、风速、云量、6 h 积累液体深度、水位、流量、水域面积、人口、GDP,共 12 个因子探究植被物候参数时间分异的驱动力。图 9 表明气温、露点温度、风向、风速、6 h 积累液体深度的变化趋势表现为波动上升的特征;水位、水域面积、人口、GDP 的变化趋势均呈直线上升的特征;气压、云量和流量在 31 年间的变化趋势较为波动,没有明显的上升或下降趋势。

Pearson 相关性分析结果(图 10)表明,EOS 和 LOS 与各影响因子之间的相关性高于 SOS。其中,SOS 与气温、露点温度、风向、6 h 积累液体深度、水位、流量、水域面积、人口、GDP 等因子主要呈负相关关系,且相关性相对较低;EOS 与气温、风向、6 h 积累液体深度、水位、水域面积、人口等因子主要呈正相关关系,且相关性较高;LOS 与气温、风向、6 h 积累液体深度、水位、水位、水域面积、人口、GDP 等因子呈正相关的关系,且大部分相关性较高(大于 0.50)。此外,气温与人口、露点温度、水域面积、水位、6 h 积累液体深度等因子的相关系数都较大,6 h 积累液体深度与水位、风向、水域面积、人口、GDP、气温等因子的相关系数都较大(图 10)。

3.3.2 植被物候时空分异的主导因素

主成分分析的结果表明,人为因素与间接人为因素与植被物候的相关性较大,其它因素的影响较小(图 11)。第一个主成分包括水位、人口、水域面积、6 h 积累液体深度、风向和 GDP,代表了人为因素与间接

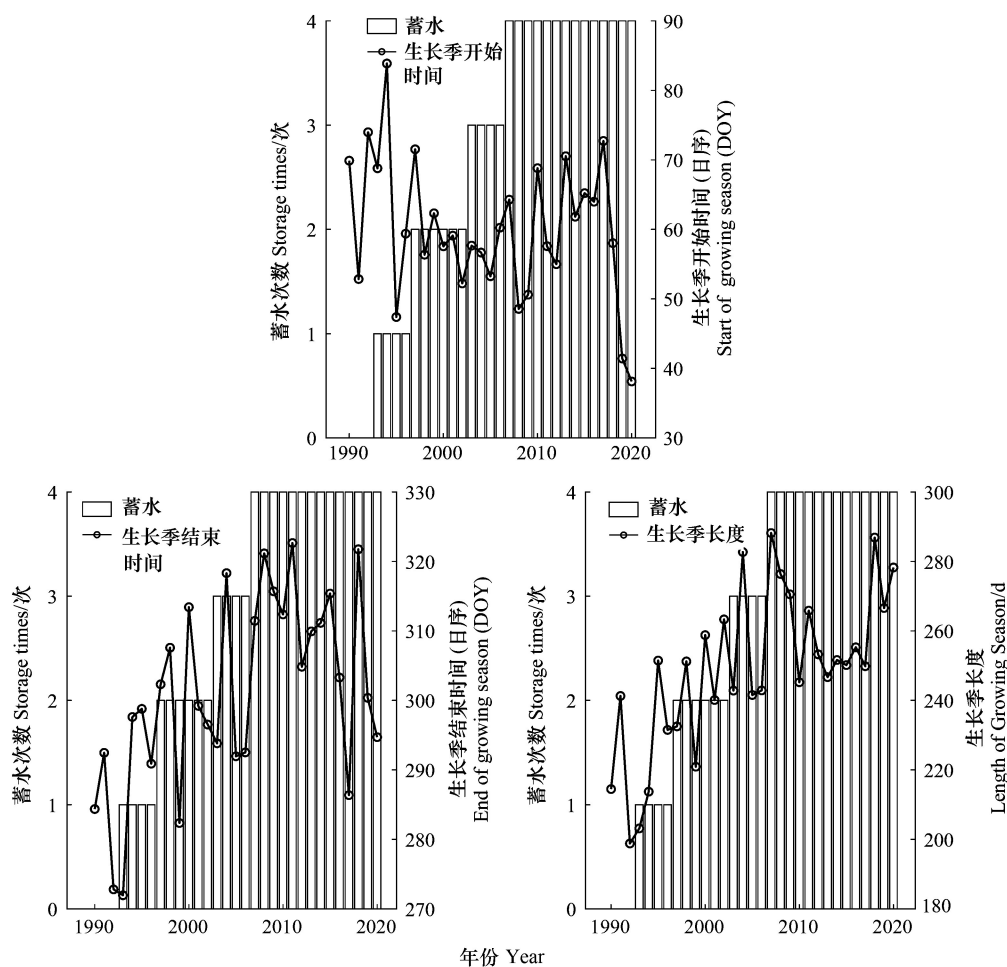


图8 三峡库区植被物候与蓄水时间的关系

Fig.8 Relationship between vegetation phenology and water storage time in the TGRA

人为因素;第二个主成分包括风速、云量和气温,代表了气候因素;第三个主成分包括流量、露点温度和气压,代表了气压因素(水的流量和露点温度都与气压有关)。其中,SOS、EOS、LOS 和人为因素与间接人为因素的相关系数分别为-0.19、0.55、0.63,和气候因素的相关系数分别为 0.05、-0.18、-0.16,和气压因素的相关系数分别为-0.12、-0.21、-0.01。

4 讨论

4.1 三峡库区植被物候时空格局特征

近 31 年来,三峡库区植被的 SOS 主要出现在 60 DOY, EOS 主要出现在 301 DOY, LOS 平均持续 248 d,与现有遥感和站点观测结果基本一致^[17,36,50-51]。相关研究表明,2002 年至 2012 年长江干流水系周边植被的 SOS 主要在 49—161 DOY(2 月下旬至 5 月中旬),EOS 主要在 273—337 DOY(9 月下旬至 12 月上旬),LOS 持续 113—305 d^[36]。1982—2015 年湖北省大部分区域植被的 SOS 出现在 100—150 DOY, EOS 出现在 260—320 DOY, LOS 持续 110—220 d^[17]。据调查统计数据显示,三峡库区植被的明显生长季节在 4 月至 9 月^[50],平均展叶期在 3 月初、平均初花期在 4 月、平均终花期在 5 月、平均落叶期在 12 月^[51]。值得注意的是,在 GIMMS 数据的处理中,重采样导致 1999 年之前的数据在 250 m 的分辨率上有斑块效应的问题,可能会对结果产生一定的影响。

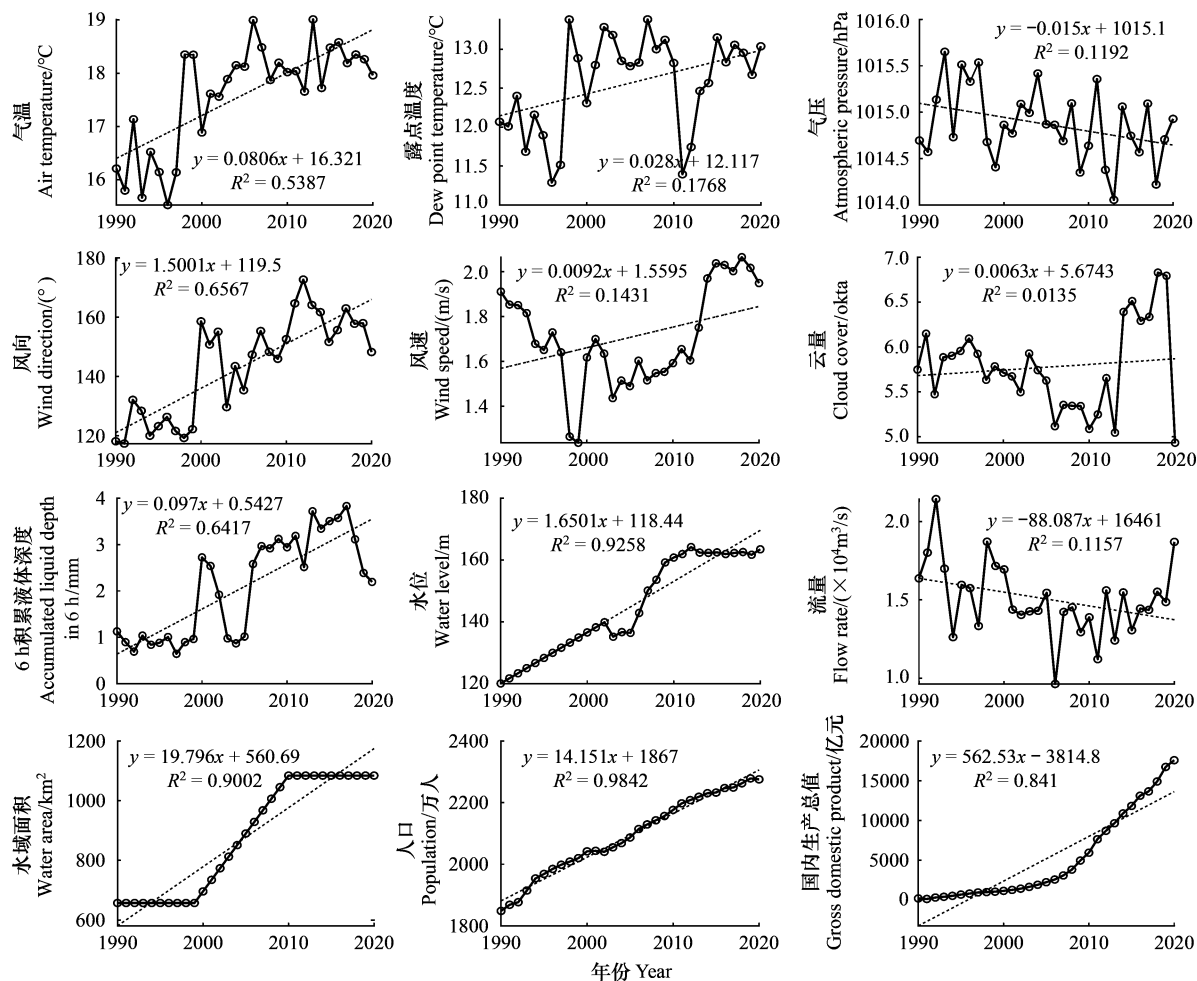


图9 1990—2020年三峡库区各影响因子年际变化趋势

Fig.9 Diagram of interannual variation trend of factors in the TGRA from 1990 to 2020

4.2 近31年三峡库区植被物候时空演变

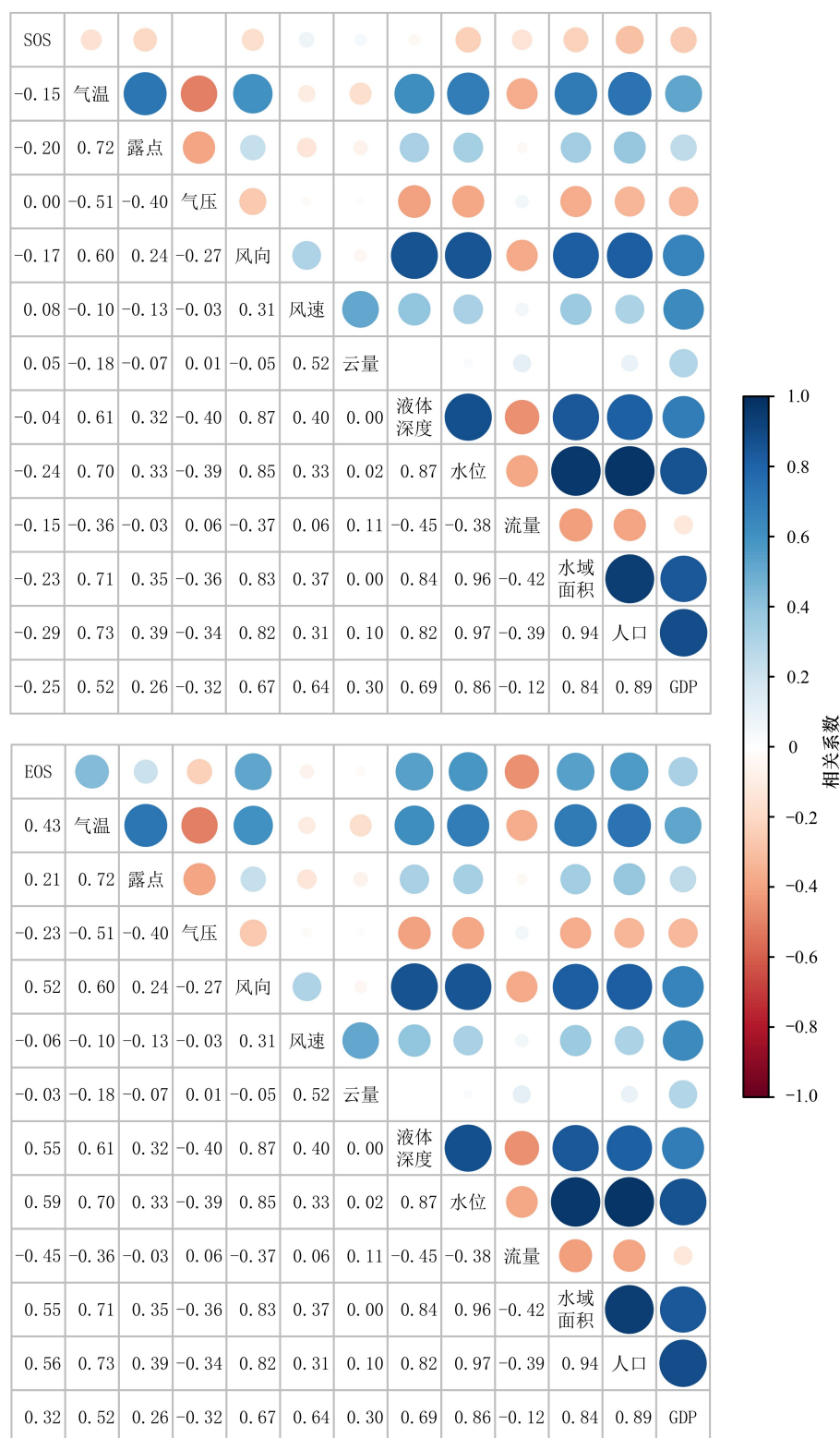
三峡库区植被 SOS 平均提前 0.3 d/a, EOS 平均推迟 0.8 d/a, LOS 平均延长 1.7 d/a, 与现有研究结论基本一致^[40,52]。2001 年至 2016 年长江流域中不同空间分辨率下马尾松、旱地和落叶阔叶林与常绿阔叶混交林的物候变化趋势大多表现为 SOS 提前、EOS 推迟、LOS 延长^[52]；三峡库区所辖物候站点（江津站、万州站、丰都站）的一季稻播种期平均提前幅度为 0.33 d/a, 出苗期平均推迟幅度为 2.52 d/a, 成熟期平均推迟幅度为 4.40 d/a, 生长季平均延长幅度为 7.86 d/a^[40]。值得注意的是, 三峡库区蓄水前中后, SOS、EOS 和 LOS 的波动频率、变化幅度和趋势均较小, 这可能是植被物候的改变具有一定滞后性, 三峡库区的修建对局部小气候的改变不是立竿见影的。2016 年国家发改委和国家林业局发布了《关于加强长江经济带造林绿化的指导意见》, 并进行了一系列植树造林的举措^[53]。3.2 节中 2018 年植被物候表现出较大的波动可能与该政策与举措有关。

4.3 三峡库区植被物候时空格局演变机制

三峡工程建设与库区蓄水对当地的小气候造成了一定影响, 即气温升高、降水量增加^[54—56], 进而对植被物候产生了相关的影响^[57]。3.2 节的研究结果表明, 库首和库尾的物候变化较库中更加显著。这可能是由于水库位于库首, 引起了库首的局地小气候更剧烈的变化, 由 3.3 节的结果可知, 蓄水后, 库区的气温升高、降水量增加。大量研究表明, 气温的升高和降水量的增加可以使 SOS 提前、EOS 推迟和 LOS 延长^[17,19,31—32], 与本

5 结论

生长季结束时间



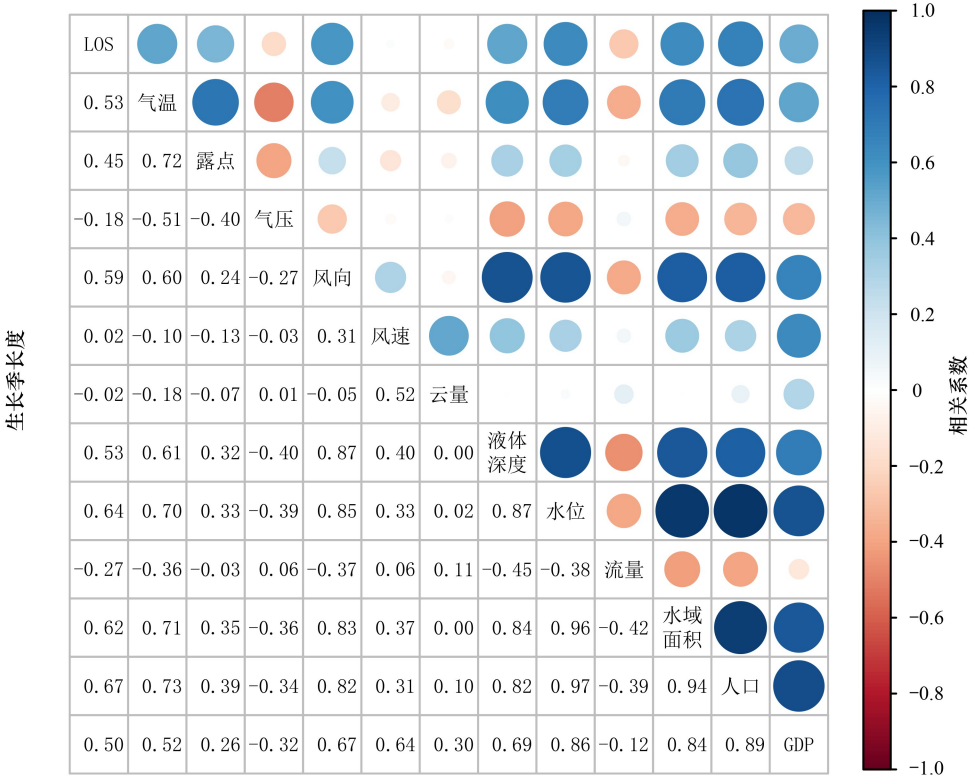


图 10 物候与 12 个因子 Pearson 相关性分析结果

Fig.10 Results of Pearson correlation analysis between phenology and 12 factors

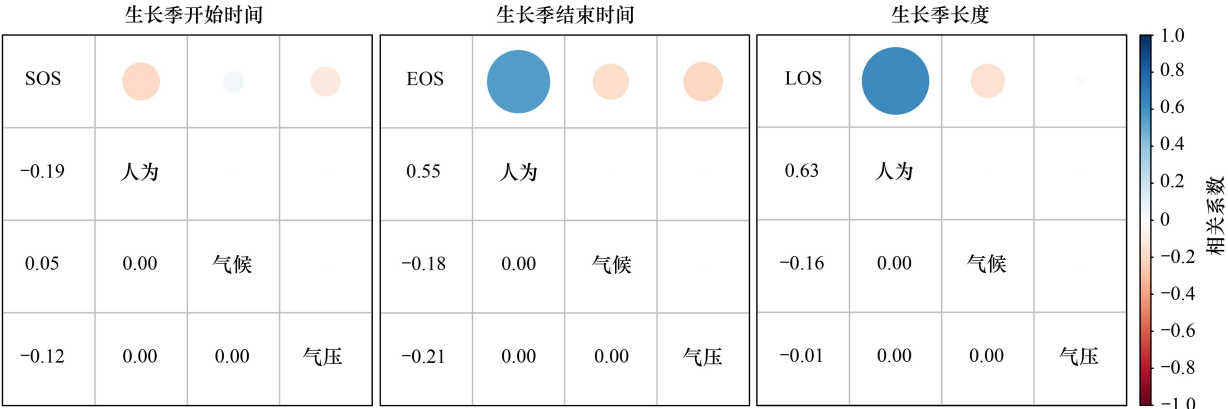


图 11 物候与 3 个主成分 Pearson 相关性分析结果

Fig.11 Results of Pearson correlation analysis between phenology and three principal components

植被物候参数,整合多源遥感物候参数提取结果,分析近 31 年来植被物候参数时空分布特征;结合 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验,定量分析三峡库区蓄水前后植被物候的时空动态演变特征;运用地理加权回归分析、Pearson 相关性分析与主成分分析等方法,定量地探究三峡库区植被物候时空分异的影响因素。主要结论如下:

(1) 1990—2020 年三峡库区植被的 SOS 主要出现在 2 月下旬至 3 月上旬,均值在 60 DOY;EOS 主要出现在 10 月底至 11 月初,均值在 301 DOY;LOS 一般持续 9 个月,均值为 248 d。在空间上,SOS 和 EOS 均表现出从库首至库尾逐渐提前的趋势,LOS 则呈现出较小的空间异质性。

(2)近 31 年来,三峡库区植被表现出 SOS 提前、EOS 推迟以及 LOS 延长的特征。值得注意的是,库区每次蓄水时,植被物候参数均表现出一定的滞后性。具体来讲,SOS 变化较小,其中无变化的面积占总面积的 92.64%,整体呈提前的趋势,平均幅度达到 0.3 d/a,呈提前趋势的面积占有变化面积的 66.30%,且主要分布在库首;EOS 整体呈推迟的趋势,平均幅度达到 0.8 d/a,呈推迟趋势的面积占总面积的 51.01%,其中呈极显著推迟的面积占比最大,值得注意的是,在库尾与库中的西南部呈推迟的区域较多,而库首与库中的东北部呈提前的区域较多;LOS 整体呈延长趋势,平均幅度达到 1.7 d/a,呈延长趋势的面积占总面积的 49.17%,其中呈不显著延长的面积占比最大,库尾与库中的西南部的延长趋势较库首与库中的东北部的延迟趋势更加显著。

(3)三峡库区植被物候的时空分异程度受人为及间接人为因素影响显著。整体而言,人为因素及间接人为因素与 SOS 相关系数为-0.19,与 EOS 相关系数为 0.55,与 LOS 相关系数为 0.63,其主要的因子有水位、人口、水域面积、6 h 积累液体深度、风向和 GDP(以上因子与物候的相关系数的绝对值基本上均大于 0.50)。

参考文献(References):

- [1] 玛地尼亚提·地里夏提, 玉素甫江·如素力, 姜红. 2001—2014 年博斯腾湖流域植被物候时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2018, 38(19): 6921-6931.
- [2] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 余卫东. 植物物候与气候研究进展. 生态学报, 2010, 30(2): 447-454.
- [3] 王敏钰, 罗毅, 张正阳, 谢巧云, 吴小丹, 马轩龙. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展. 遥感学报, 2022, 26(3): 431-455.
- [4] 丁海勇, 卜亚勤, 徐路明. 长三角地区植被物候时空变化及其对城市化的响应. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1352-1360.
- [5] 代武君, 金慧颖, 张玉红, 周志强, 刘彤. 植物物候学研究进展. 生态学报, 2020, 40(19): 6705-6719.
- [6] 林楠, 徐琳, 卢凡青, 王姝纯, 王森, 李秋月. 华北区域杨柳科树木春季物候期模拟. 生态学报, 2023, 43(6): 2452-2464.
- [7] 夏安全, 王艳芬, 郝彦宾, 胡容海, 王芳, 吴文超, 崔骁勇. 复杂地形草地植被碳储量遥感估算研究进展. 生态学报, 2020, 40(18): 6338-6350.
- [8] 许蕊, 黄贤金, 王佩玉, 刘泽森, 梁洁, 杨琳, 张秀英. 黄河流域国土空间碳中和度研究——以内蒙古段为例. 生态学报, 2022, 42(23): 9651-9662.
- [9] 赵心睿, 刘冀, 杨少康, 张茜, 高放, 刘艳丽. 北方地区典型林草地物候时空变化特征及其对气象因子的响应. 生态学报, 2023, 43(9): 3744-3755.
- [10] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 秦格霞, 侯青青, 谢保鹏, 吴华武. 黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化的响应. 生态学报, 2021, 41(16): 6600-6612.
- [11] 黄文琳, 张强, 孔冬冬, 顾西辉, 孙鹏, 胡畔. 1982—2013 年内蒙古地区植被物候对干旱变化的响应. 生态学报, 2019, 39(13): 4953-4965.
- [12] Chu L, Liu Q S, Huang C, Liu G H. Monitoring of winter wheat distribution and phenological phases based on MODIS time-series: a case study in the Yellow River Delta, China. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(10): 2403-2416.
- [13] Zeng L L, Wardlaw B D, Xiang D X, Hu S, Li D R. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 111511.
- [14] Lloyd D. A Phenological Classification of Terrestrial Vegetation Cover Using Shortwave Vegetation Index Imagery. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(12): 2269-2279.
- [15] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to inter annual climatic variability. Global Biogeochem Cycles, 1997, 11(2): 18.
- [16] Shabanov N V, Zhou L M, Knyazikhin Y, Myneni R B, Tucker C J. Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(1): 115-130.
- [17] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, Brown M E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [18] 封敏, 李再明, 邱炳文, 王重洋, 罗钰涵. 21 世纪初中国农作物与自然植被物候时空差异. 遥感技术与应用, 2016, 31(5): 1003-1012.
- [19] 陈珂, 李星华, 管小彬, 沈焕锋. 武汉市植被物候变化规律及影响因素分析. 华中师范大学学报(自然科学版), 2019, 53(3): 433-442.
- [20] 尉毓姣, 朱琳, 曹鑫宇, 王文科, 龚建师, 余慧琳, 孟丹. 南京地区蒸散发降尺度研究——基于增强型时空自适应反射融合模型. 生态学报, 2022, 42(15): 6287-6297.
- [21] 靳丽丽. 基于 STARFM 模型的高时空叶面积指数产品融合方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [22] Gao F, Masek J, Schwaller M, Hall F. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2207-2218.
- [23] 石晨烈, 王旭红, 张萌, 刘状, 祝新明. 3 种时空融合算法在洪水监测中的适用性研究. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 111-119.

- [24] Zhu X L, Chen J, Gao F, Chen X H, Masek J G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2610-2623.
- [25] 曾凤, 时伟宇, 马明国, 狄东睿. 一种基于 MODIS 数据对 GIMMS 数据进行延长的方法, 2019, 专利申请号: CN201910428703.7.
- [26] 张韵婕, 桂朝, 刘庆生, 刘高焕. 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*, 2016, 31(5): 1022-1030.
- [27] Piao S L, Liu Q A, Chen A P, Janssens I A, Fu Y S, Dai J H, Liu L L, Lian X, Shen M G, Zhu X L. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [28] 陈效述, 王林海. 遥感物候学研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 33-40.
- [29] 李丹, 吴秀芹, 张靖宙, 于洋. 西南喀斯特断陷盆地植被物候动态变化及其与气候因子的响应. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 168-173.
- [30] 邵周玲, 周文佐, 李凤, 周新尧, 杨帆. 2003—2018 年米仓山地区植被物候时空变化及对气候的响应. *生态学报*, 2021, 41(9): 3701-3712.
- [31] 袁沫汐, 邹玲, 林爱文, 朱弘纪. 湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2016, 36(17): 5315-5323.
- [32] 温都日娜, 包玉海, 银山, 王永芳. 2000—2014 年蒙古高原植被覆盖时空变化特征及其对地表水热因子的响应. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1345-1356.
- [33] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [34] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. *地理学报*, 1995, 50(5): 402-410.
- [35] Chu L, Huang C, Liu Q S, Liu G H. Estimation of winter wheat phenology under the influence of cumulative temperature and soil salinity in the Yellow River Delta, China, using MODIS time-series data. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(10): 2211-2232.
- [36] 张延兵. 基于时间序列 MODIS 数据的长江流域森林物候时空分异[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
- [37] Ahmad M, Uniyal S K, Batish D R, Rathee S, Sharma P, Singh H P. Flower phenological events and duration pattern is influenced by temperature and elevation in Dhauladhar Mountain range of Lesser Himalaya. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107902.
- [38] Malik R, Rossi S, Sukumar R. Variations in the timing of different phenological stages of cambial activity in *Abies pindrow* (Royle) along an elevation gradient in the north-western Himalaya. *Dendrochronologia*, 2020, 59: 125660.
- [39] Zhang R P, Guo J, Liang T G, Feng Q S. Grassland vegetation phenological variations and responses to climate change in the Xinjiang region, China. *Quaternary International*, 2019, 513: 56-65.
- [40] 郅继英. 数据挖掘算法下三峡库区及周边地区一季稻物候时空演变[D]. 重庆: 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 2016.
- [41] 胡召玲, 戴慧, 侯飞, 李二珠. 中国东北城乡植被物候时空变化及其对地表温度的响应. *生态学报*, 2020, 40(12): 4137-4145.
- [42] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 马朋, 杨予静, 任庆水, 张雯. 三峡库区生态脆弱性评价. *生态学报*, 2015, 35(21): 7117-7129.
- [43] 廖桃, 温兆飞, 周旭, 陈珊珊, 马茂华, 吴胜军. 三峡库区重庆段森林长势空间分异性及其驱动因子. *生态学报*, 2022, 42(10): 4076-4090.
- [44] 王铭峰. 三峡库区水库运行前后土壤侵蚀动态变化及人为驱动机制: 成都: 中国科学院大学, 2020. 163.
- [45] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [46] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [47] 赵维清, 李经纬, 褚琳, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力. *生态学报*, 2019, 39(20): 7722-7736.
- [48] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 172-182.
- [49] 梁福庆. 三峡工程移民问题研究. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- [50] 叶润根, 陈国建, 王震, 何谦, 张春叶. 三峡库区 2000—2019 年基于 MODIS NDVI 的植被覆盖时空变化. *宜宾学院学报*, 2021, 21(6): 81-84, 98.
- [51] 赖小红, 李名扬, 刘聪, 钟雨航, 林立, 王海洋. 植物物候对重庆主城区热岛效应的响应. *生态学报*, 2019, 39(19): 7025-7034.
- [52] 郭洋. 基于多空间分辨率的长江流域植被物候变化及尺度敏感性研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2019.
- [53] 国家发展改革委. 关于加强长江经济带造林绿化的指导意见(发改农经[2016]379 号)_政府信息公开_政务公开-国家发展改革委: 国家发展改革委, 2016.
- [54] 高蕾, 陈海山, 孙善磊. 基于 MODIS 卫星资料研究三峡工程对库区地表温度的影响. *气候变化研究进展*, 2014, 10(3): 226-234.
- [55] 何军, 陈鹏, 冯睿, 董秋明. 三峡工程建成前后宜昌市气候变化研究. *中国农村水利水电*, 2016(6): 26-28, 33.
- [56] 岳遥, 柴元方. 气候变化、三峡工程蓄水及支流人类活动对长江年内径流均化的影响. *中国水利学会 2019 学术年会. 中国湖北宜昌*, 2019. 5.
- [57] 姚荣鹏, 张勃, 张耀文, 王立兵. 甘肃河东地区植被物候及其对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 714-723.
- [58] Zhou Y K. Relative Contribution of Growing Season Length and Amplitude to Long-Term Trend and Interannual Variability of Vegetation Productivity over Northeast China. *Forests*, 2020, 11(1): 112.