

艾比湖流域过去 20 年植被物候变化及其对气候和非气候要素的响应*

刘子泰¹, 王雪梅^{1,2}, 赵枫^{1,2}

1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830017

2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017

摘要: 探究艾比湖流域植被物候的变化特征及其对气候暖湿化的响应机制, 可为揭示干旱区生态系统碳水循环提供关键信息。鉴于此, 研究基于 2001—2021 年的 MODIS EVI 时序数据, 采用动态阈值法提取艾比湖流域植被物候信息, 并结合气温和降水量数据进行偏相关分析和驱动分区。结果显示, 2001—2021 年艾比湖流域的植被物候总体表现为: 返青期以 0.17 d/a 的速率推迟, 枯黄期约以 0.06 d/a 的速率推迟, 生长季长度以 -0.42 d/a 的速率缩短, 但这些变化均不显著 ($P > 0.05$)。气候因素与植被物候的相关性较为复杂, 且存在一定的空间差异。在局部区域, 返青期与气温、降水量呈显著正相关性 ($P < 0.05$), 而枯黄期和生长季长度则与气温、降水量呈显著负相关性 ($P < 0.05$), 且植被物候对降水的敏感性明显高于气温。气候暖湿化对局部区域的植被物候变化具有一定的驱动作用, 而非气候因素 (土地利用方式、灌溉、放牧、地形和土壤属性等), 对流域大部分区域的影响则更为显著。研究结果可为干旱区内陆湖流域生态系统健康发展提供依据。

关键词: 植被物候; 气候暖湿化; 气候响应; 时空变化; 艾比湖流域

中图分类号: S812; X171 文献标志码: A 文章编号: 2097 - 0137(2026)02 - 0027 - 12

Vegetation phenology changes in the Ebinur Lake basin during the past 20 years and their responses to climatic and non-climatic factors

LIU Zitai¹, WANG Xuemei^{1,2}, ZHAO Feng^{1,2}

1. College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830017, China

2. Xinjiang Arid Area Lake Environment and Resources Laboratory, Urumqi 830017, China

Abstract: Understanding the variation characteristics of vegetation phenology and its response mechanisms to climate warming and wetting in the Ebinur Lake basin is essential for elucidating ecosystem carbon and water cycles in arid regions. Utilizing MODIS EVI time-series data from 2001 to 2021, this study extracted key vegetation phenological parameters in the Ebinur Lake Basin employing the dynamic threshold method. Partial correlation analysis and driver attribution analysis were conducted using temperature and precipitation data. The results revealed the following general trends of vegetation phenology from 2001 to 2021: the start of the growing season was delayed at a rate of 0.17 d/a, the end of the growing season was slightly delayed at 0.06 d/a, and the length of the growing season length was shortened at a rate of -0.42 d/a. However, none of these trends were statistically significant ($P > 0.05$). The relationships between climatic factors and vegetation phenology

* 收稿日期: 2025 - 08 - 15

录用日期: 2025 - 10 - 24

网络首发日期: 2026 - 01 - 04

基金项目: 国家自然科学基金 (42461042); 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2023D01A44)

作者简介: 刘子泰 (2002 年生), 男; 研究方向: 资源环境遥感; E-mail: 107622025210662@stu.xjnu.edu.cn

通信作者: 王雪梅 (1976 年生), 女; 研究方向: 干旱区资源环境遥感; E-mail: xmwang2022@xjnu.edu.cn

全文阅读



ZR20250171

were complex and exhibited considerable spatial heterogeneity. In certain local areas, the start of the growing season was significantly positively correlated with both temperature and precipitation, whereas the end and length of the growing season were significantly negatively correlated with them ($P < 0.05$). Moreover, vegetation phenology was more sensitive to precipitation than to temperature. While climate warming and wetting served as notable driving effects on phenological variations in some local areas, non-climatic factors, such as land use patterns, irrigation and grazing activities, topography, and soil properties, etc., had a more pronounced influence across most of the basin. These findings offer a scientific basis for promoting the sustainable and healthy development of inland lake basin ecosystems in arid regions.

Key words: vegetation phenology; warming and humidification climate; climate response; spatiotemporal variation; Ebinur Lake basin

植被物候是植物在特定环境条件下随季节变化而表现出的周期性生长发育现象,包括植物的发芽、展叶、开花、结果和落叶等各种生长过程(夏传福等,2013)。植被物候通过改变陆地生态系统的碳、氮循环从而影响大气系统的碳水循环,同时植被物候又受到气候、环境和人类活动等多种因素影响,进而对气候与人类活动做出响应(吉珍霞等,2021)。作为气候变化直接效应中最敏感的生物学指标,植被物候可综合反映区域生态环境的变化。因此,开展植被物候研究不仅有助于理解植被对环境变化的响应,还能改善陆地生态系统的结构和功能,有效调节碳水循环,从而对应对全球气候变化具有重要意义(杨涵等,2024)。植被物候的关键参数主要包括返青期(SOS, start of the growing season)即生长季开始的日期,枯黄期(EOS, end of the growing season)即生长季结束的日期,以及生长季长度(LOS, length of the growing season); SOS、EOS 和 LOS 均用日序即一年中的第几天表示(DOY, day of year)。目前,基于中等空间分辨率的成像光谱仪(MODIS, moderate-resolution imaging spectroradiometer)提取的归一化植被指数(NDVI, normalized difference vegetation index)和增强型植被指数(EVI, enhanced vegetation index)能够较好地表征植被的生长状况,因而被广泛用于植被物候监测。国内外学者多基于动态阈值法确定生长季开始或结束的阈值,从而提取到较为准确的植被物候参数(Jonsson et al., 2002)。例如,已有研究利用动态阈值法分别研究了中国北方草地和森林的物候参数,并分析了物候对气候变化的响应(秦格霞等,2019; Zheng et al., 2022)。与 NDVI 相比, EVI 通过优化利用蓝光、红光和近红外波段,可以有效减弱气溶胶和土壤噪声等地表背景因素的影响,更稳定地反映监测区域的植被状况,从而更敏感地捕捉植

被的细微变化。特别是在高空间分辨率下, EVI 既能有效区分稀疏植被,也能准确反映茂盛植被的生长动态,表现出更高的稳定性和更低的背景噪声敏感度(杨铭鑫等,2024),因此,利用 EVI 进行植被物候提取得到了较为广泛的应用(Zhang et al., 2022)。

植被物候的变化通常会同时受到气候以及非气候因素的影响。研究表明,相较于降水,高寒植被物候期对气温变化更为敏感;随着气温升高,这种敏感性表现为高寒植被返青期提前、枯黄期推迟(马晓芳,2016)。非气候因素也是影响植被生长发育变化和植被物候的关键因素之一。国内外学者尝试采用不同方法来量化气候与非气候的不同影响。例如, Tong et al. (2018) 使用 LPJ-GLESS 动态植被模型,模拟计算了无人人类活动影响下的叶面积指数和地上生物量碳,定量证明了中国的大型植被保护工程可对地球绿化作出贡献。刘欣怡等(2025)采用 IPAT 理论构建了人类活动强度综合指数,量化证明了成渝城市群碳平衡的主导因子以人类活动类因子为主。因此,植被物候对气候变化和非气候因素响应具有高度的复杂性,厘清气候因素(气温、降水)与非气候因素(土地利用方式、灌溉、放牧、土壤属性等)对植被物候的影响,对应对气候变化、维护生态系统稳定具有重要意义。同时,气候变化与非气候因素对植被物候的影响存在明显的空间分异性和区域特征。在气候变化极为敏感的西北干旱地区开展植被物候研究尤为重要。

新疆艾比湖流域作为西北生态环境退化严重的典型区域,气候呈现明显的空间差异,暖湿化趋势明显。探究艾比湖流域植被物候特征对气候暖湿化的响应,对深入开展干旱区生态系统碳水循环研究具有重要意义。虽然国内外已有一些关于干旱区内陆湖流域植被物候的研究,但针对艾比湖流域的研究相对较少,特别是关于气候暖湿化对植被

物候影响的定量分析更为匮乏。目前,有关艾比湖流域植被的研究仅局限于植被覆盖的时空变化(陈瑜等,2021;任立清,2022)。随着近几十年来气候变化与人口扩张以及经济活动的影响,艾比湖流域土地利用结构发生较大变化,直接影响了流域内植被物候的空间分布格局。为揭示艾比湖流域植被物候的时空演变规律,定量分析其对气候与非气候变化的响应,本研究基于2001—2021年MCD12Q2 EVI数据,采用动态阈值法提取流域植被物候关键参数,揭示其时空变化特征及演变趋势;进一步采用偏相关分析方法探讨气温、降水量对植被物候的影响,在此基础上结合残差分析阐明植被物候变化的驱动机制,以期应对气候变化、维持干旱区生态系统健康发展提供科学依据。

1 研究区概况

艾比湖流域位于79°91'E—85°95'E,43°62'N—46°32'N,地处中国新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州,横跨精河县、博乐市以及阿拉山口市口岸区。艾比湖位于准噶尔盆地西部,是该区域的最低洼地和水盐汇集中心,同时也是新疆最大的咸水湖泊。艾比湖流域地貌类型多样,大部分为平原,主

要的土地覆盖类型为耕地、林地、草地和未利用地(图1)。研究区属于温带干旱大陆性气候,光照充足,降水量较少,蒸发量较大,气温最高可达42℃左右,最低约为-36℃,年日照时数约2700h,年降水量约105mm,年蒸发量约2200mm(尼格娜热·阿曼太等,2021)。受水热条件影响,艾比湖流域植物分布的空间差异性较大,南部植物的物种多样性和生长状况明显优于北部,而北部植物群落的空间演替并不明显(马玉娥等,2012)。在艾比湖西南部和东部分布着大面积的耕地,主要农作物有小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)和棉花(*Gossypium hirsutum*)等。以盐穗木(*Halostachys caspica*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)等盐生植物为主的盐碱地分布在艾比湖东北部。在西部和南部山区,土地覆盖主要以草地和林地为主,林地主要为以云杉(*Picea asperata* Mast.)为主的山地针叶林,草地主要由苔草(*Carex tristachya* Thunb.)和蒿草(*Artemisia*)等组成。其他区域大部分为未利用地,以胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)、梭梭(*Cyperus rotundus*)、多枝怪柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)和芦苇(*Phragmites australis*)等组成的群落为主。

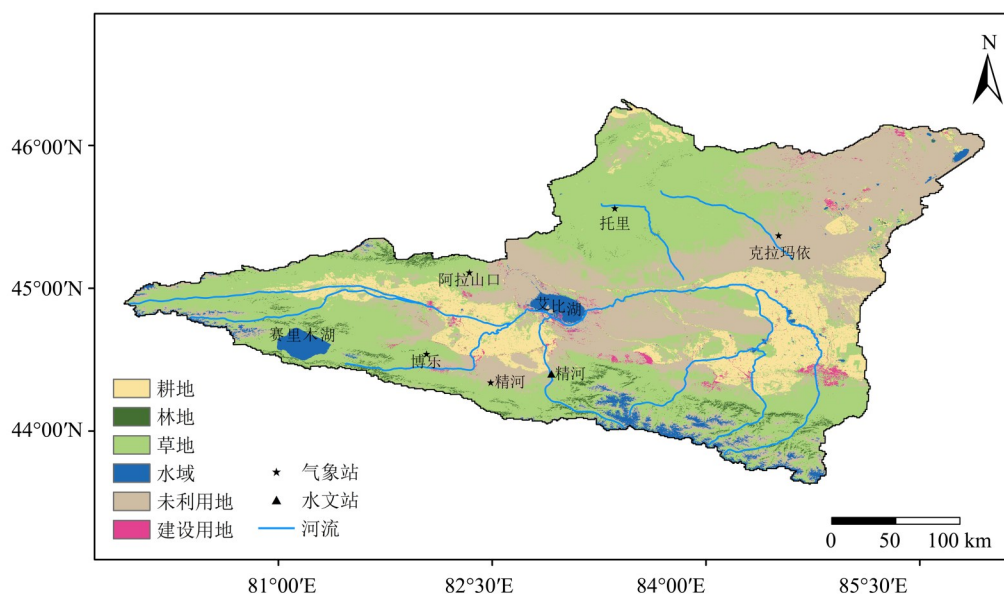


图1 研究区土地利用图

Fig. 1 Land use map of the study area

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究使用的MODIS EVI数据来源于美国国家航空航天局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order>)提供的MCD12Q2(Collection 6)数据集,时段为2001—2021年,空间分辨率为500m,时间分辨率为16d。首先,利用MODIS重投影工具(MRT,MODIS reprojection tool)工具,在MCD12Q2原始数据集中提取出EVI数据进行重投影与格式转

gov/search/order)提供的MCD12Q2(Collection 6)数据集,时段为2001—2021年,空间分辨率为500m,时间分辨率为16d。首先,利用MODIS重投影工具(MRT,MODIS reprojection tool)工具,在MCD12Q2原始数据集中提取出EVI数据进行重投影与格式转

换,并利用研究区边界对数据进行裁剪,获得研究区 2001—2021 年长时间序列的 MODIS EVI 影像。而后,考虑影像数据存在一定的噪声,结合研究区实际情况与同期高分辨率遥感影像,利用 TIMESAT 3.2 软件去除偏离正常轨迹的噪声,将 $EVI < 0.05$ 的像元定义为非植被区域(包括水体、沙地等植被极其稀疏的荒漠区)并将其去除(王鑫等, 2023)。本研究使用的气象数据来自中国国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/home>) (2001—2021 年)长时序年平均气温和月降水量栅格数据集,空间分辨率为 1 km,通过克里金插值方法将气象数据的空间分辨率重采样为 500 m,并进行重投影,从而与 MODIS EVI 数据集图像的空间分辨率保持一致。土地利用及覆盖分类数据使用的是 2022 年中国土地覆被数据集 (CLCD, China land cover dataset),该数据集来源于中国国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>),分类系统包括耕地、森林、灌木、草原、水、冰雪、贫瘠、不透水和湿地 9 类。空间分辨率为 30 m,数据格式为 Geo-Tiff。

2.2 研究方法

2.2.1 S-G 滤波重构降噪 Savitzky-Golay (S-G)

滤波作为一种基于局部窗口的卷积算法,其优势在于同一段曲线上可灵活选择不同的窗口宽度,以满足不同的平滑滤波需求 (Savitzky et al., 1964)。本研究采用 MATLAB R2018b 软件对 MODIS EVI 时间序列数据进行平滑降噪处理,通过反复实验,最终设定 S-G 滤波的滑动窗口宽度为 9、拟合阶数为 3,以平衡滤波后的平滑度与原始信号的保真度。如图 2 所示,原始 EVI 数据虽能反映植被生长的整体趋势,但受云、大气散射等多种因素影响,存在大量噪声与异常波动,数据跳跃现象显著,不利于物候信息的准确识别。经 S-G 滤波处理后,MODIS

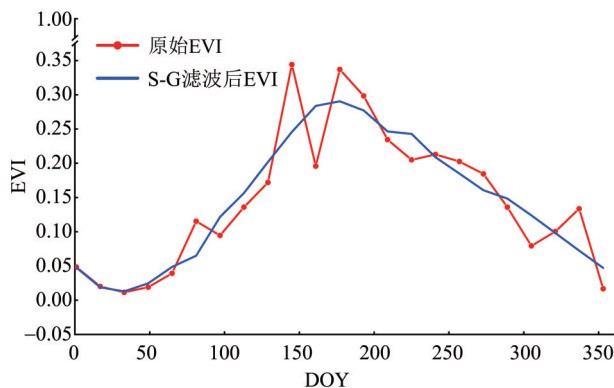


图2 S-G滤波重构时间序列对比图

Fig. 2 Comparison of S-G filtering reconstruction time series

EVI原始时间序列的重构效果得到了显著改善;不仅有效滤除了高频噪声,使滤波后曲线更趋向于连续平滑,同时还能精准跟踪并保留原始数据中完整的生长季轮廓及关键物候特征。

2.2.2 植被物候的提取与精度检验

植被物候常用的提取方法包括动态阈值法、滑动平均法、最大比率法、导数法和函数拟合法等 (Ding et al., 2013)。其中,动态阈值法在提取植被物候方面具有较高的准确性和适用性 (Jonsson et al., 2002),能够根据不同的环境条件和植被类型自适应地调整阈值,从而更好地适应不同地区和时期的植被变化,并且能够更准确地识别植被的生长和凋落阶段,使其能够更好地适应不同的环境条件和植被类型,捕捉植被的生长周期变化。因此,根据艾比湖流域 EVI 的变化情况,采用动态阈值法提取植被物候的主要参数 (SOS、EOS 和 LOS)。本研究根据袁沫汐等 (2023) 的研究分析和反复测试,将研究区 SOS 与 EOS 的提取阈值均设置为 20% 时提取效果较好。因此,在 EVI 曲线上上升阶段,将植被指数增加至拟合函数左半部分振幅 20% 的时刻定义为生长季的开始时间,即 SOS;在 EVI 曲线下下降阶段,其降低至拟合函数右半部分振幅 20% 的时刻定义为生长季的结束时间,即 EOS,而将 EOS 与 SOS (以 DOY 计) 之差定义为 LOS (单位: d)。

由于艾比湖流域缺乏植被物候观测站点,因此依据玛地尼亚提·地里夏提等 (2019) 基于遥感数据反演的天山新疆段艾比湖流域植被物候研究结果,随机提取 138 个样点作为植被物候的观测值,与本研究提取的 SOS 和 EOS 进行对比和验证 (图 3)。结果显示,艾比湖流域 SOS 的遥感提取值与观测值之间的相关系数 (R) 为 0.892 ($P < 0.05$),偏差 (Bias) 为 6.87,均方根误差 (RMSE) 为 15.35 d; EOS 的 R 为 0.942 ($P < 0.05$), Bias 为 10.48,差 RMSE 为 16.44 d。可以看出二者的相关性较高,均方根误差约为 15 d;考虑到物候观测的特殊性,该误差仍在可接受范围内。已有研究也得到类似结果,在我国西北干旱区黑河流域开展物候产品验证研究中发现,植被物候产品 (MLCD, MODIS global land cover dynamics product) 与地面观测数据相关性较高 ($R > 0.90$) (王聪等, 2017);此外,研究发现 MCD12Q2 物候产品的 SOS 与地面观测值之间的 R 为 0.76 ($P < 0.05$),说明物候产品能够较好地反映新疆地区 SOS 的空间分布格局 (张仁平, 2017)。因此,考虑到本研究的区域特征和研究时段,选择 MCD12Q2 (Collection 6) 数据集的 MODIS EVI 数据,对新疆艾比湖流域植被

物候参数进行提取,其结果经验证精度良好,与已有研究结果具有很好的一致性。

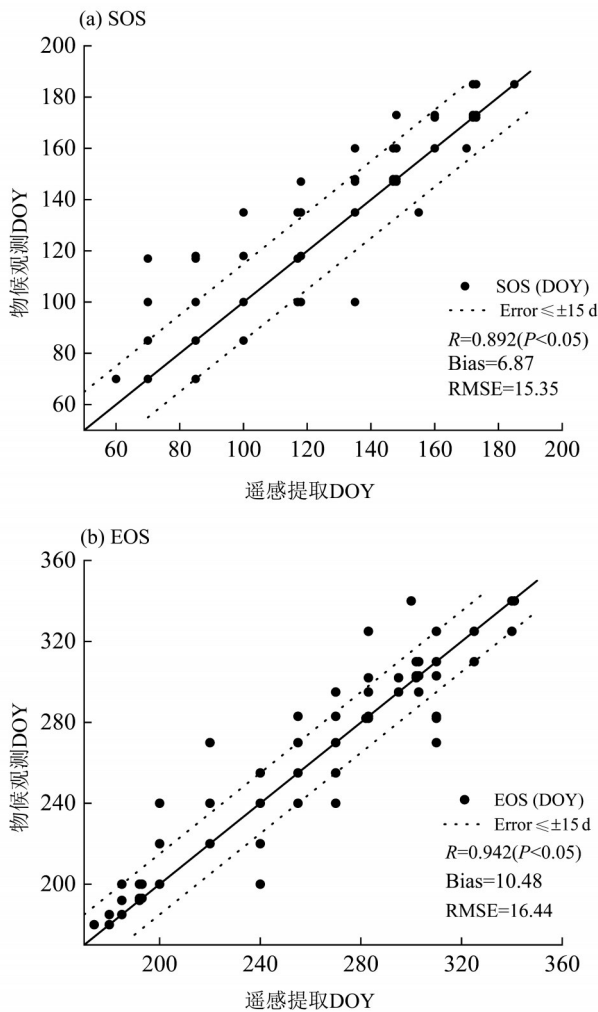


图3 SOS和EOS的提取精度评价

Fig. 3 Accuracy assessment of SOS and EOS Extraction

2.2.3 Theil-Sen+Mann-Kendall 趋势分析法和偏相关分析 本研究采用 T -sen 斜率估计法与 Mann-Kendall 趋势检验法分析植被物候参数的时间变化趋势。 T -sen 斜率估计法具有效率高,不受缺失值和异常值影响,且对测量误差和离群数据不敏感的优点;Mann-Kendall 检验法则适用于长时间序列数据的趋势显著性检验 (Sen, 1968; Helsel et al., 2006)。本研究采用 T -sen 斜率法,对艾比湖流域植被 SOS、EOS 和 LOS 的变化进行判断。若 T -sen >0 ,则表明物候期趋势为推迟或延长; T -sen <0 ,则表明物候期趋势为提前或缩短。同时,在 90%、95% 和 99% 置信水平下进行 Mann-Kendall 趋势检验。结合 T -sen 和 M-K 检验结果,将艾比湖流域植被物候期年际变化趋势等级分为:极显著增加 (T -sen $>0, P<0.01$);显著增加 (T -sen $>0, 0.01<P<0.05$);不显著增加 (T -sen $>$

$0, 0.05<P<0.1$);极显著减少 (T -sen $<0, P<0.01$);显著减少 (T -sen $<0, 0.01<P<0.05$);不显著减少 (T -sen $<0, 0.05<P<0.1$);无变化 (T -sen=0)。

偏相关分析能够在控制其他气候变量影响的情况下,量化单一气候因子对物候参数的作用,从而避免因自变量之间相互干扰而导致的偏差,进而更准确地反映气候因素对植被物候的影响。本研究利用 R 4.0.5 软件,对艾比湖流域植被物候期与平均气温、降水量进行偏相关分析并采用 t 检验方法进行显著性检验。基于显著性水平 0.05,将结果分为显著正相关、显著负相关和变化不显著 3 个等级,来分析植被物候变化对气温、降水量的响应特征。

2.2.4 多元回归残差分析和 Slope 趋势分析 研究中采用多元回归残差分析来研究气候变化 (CC, climate change) 和非气候变化 (NC, no climate) 对植被物候参数变化的影响及相对贡献。基于物候参数、气温和降水量建立回归模型预测气候变化的影响量 (Y_{CC}),用来反映气候因素对植被的影响;通过计算观测值物候期 Y 与预测值 Y_{CC} 之间的差异,揭示非气候因素对植被物候的影响量 (Y_{NC})。计算公式为 (Wessels et al., 2007):

$$Y_{cc} = a \times t + b \times P_t + c, \quad (1)$$

$$Y_{NC} = Y - Y_{cc}, \quad (2)$$

式中 Y 为物候期 (SOS、EOS、LOS) 的实际观测值, Y_{CC} 为物候期的预测值 (气候变化的影响量); a 、 b 、 c 为模型参数, t ($^{\circ}\text{C}$) 和 P_t (mm) 分别指艾比湖流域平均气温和累计降水量, Y_{NC} 为残差 (非气候因素的影响量,包括误差),表示观测值与模型预测值之间的差异。

进一步对艾比湖流域 Y_{CC} 和 Y_{NC} 进行 Slope (植被物候参数预测值斜率或植被物候参数残差斜率,以下简称 S) 趋势分析以及 F 检验,以揭示其变化趋势与速率特征 (刘悦等, 2023)。 S 趋势分析的计算公式为:

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times P_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n P_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (3)$$

式中 n 为研究时段的年份, i 表示 1~21 的实数, P_i 表示第 i 年的 Y_{CC} 或 Y_{NC} 。当 $S>0$ 时,代表气候变化或非气候因素对植被物候参数起到促进作用; $S<0$ 时,表示气候变化或非气候因素对植被物候参数起到抑制作用。在此过程中,进一步确定 Y_{CC} 和 Y_{NC} 的线性趋势率,并分析气候变化与非气候因素对植被物候的影响。根据 Y_{CC} 和 Y_{NC} 的变化趋势,并参考 Sun et al. (2015) 的研究,对艾比湖流域植被物候参数变化的主要驱动因素进行区分,计算气候变化和非气候因

素对植被物候变化的相对贡献率。通过划分等级(表 1),综合评价气候变化和非气候因素对植被生长的影响(金凯等,2020)。

表 1 气候和非气候因素对植被生长的影响分级

Table 1 Classification of climatic and non-climatic factors on vegetation growth

等级	S	影响程度
I	<-2.0	明显抑制
II	-2.0~-1.0	中度抑制
III	-1.0~-0.2	轻微抑制
IV	-0.2~0.2	基本无影响
V	0.2~1.0	轻微促进
VI	1.0~2.0	中度促进
VII	>2.0	明显促进

3 结果与分析

3.1 植被物候的时空变化特征

从艾比湖流域植被物候年际变化来看(图 4),近 20 年植被物候呈现出 2 个变化阶段,即在 2009 和 2015 年左右出现植被物候的异常波动。在 2009 年以前,SOS 呈提前趋势,EOS 呈推迟趋势,而 LOS 呈增长趋势,但物候变化均不显著($P>0.05$)。然而 2009 年以后,受气候因素影响植被 SOS 呈推迟趋势,EOS 则呈现波动式提前趋势,LOS 受 SOS 和 EOS 的影响呈缩短趋势。到 2015 年,SOS 和 EOS 均表现为提前趋势,但 EOS 提前幅度更大,故 LOS 快速缩短,在 2016 年 LOS 达到最低水平,此后植被物候参数呈波动变化。总体来看,在气候因子作用下,艾比湖流域植被 SOS 主要表现为不显著的推迟趋势,变化速率为 0.17 d/a;EOS 也同样呈现出缓慢的推迟趋势,变化速率为 0.06 d/a;而 LOS 则表现为以 -0.42 d/a 的变化速率呈缩短趋势。总体表现为,LOS 的缩短趋势相较于 SOS 和 EOS 的推迟趋势更为明显。

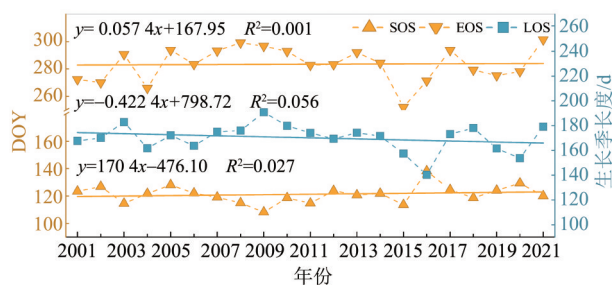


图 4 植被物候时间变化特征

Fig. 4 Temporal variation in vegetation phenology

2001—2021 年,艾比湖流域的植被 SOS 呈现出明显的空间差异性,SOS 主要集中在第 65 至第 125 天(图 5)。整体来看艾比湖和赛里木湖周围地区较早进入 SOS,而流域北部山区局地相对较晚进入 SOS,这可能与人类农业活动以及荒漠植被的生长特点有关。受近几十年气候变化和人类活动的影响,艾比湖流域呈现出大面积的 SOS 推迟趋势。2001 和 2006 年,艾比湖流域大部分地区的 SOS 主要介于第 65 至第 140 天,局部区域的 SOS 介于第 140 至第 185 天。在 2011 年,流域内植被 SOS 呈明显的提前趋势,而到了 2016 年,春季气温降低导致 SOS 呈大面积延迟现象,同时人工绿洲的扩张也导致植被覆盖度明显增加。2021 年,流域内植被 SOS 以第 95 至第 140 天为主,其他 SOS 零散分布。2001—2021 年,位于艾比湖流域南部以及西南部的林草地由于受人类活动的影响较小,其 SOS 相对较早,无明显变化;而中部和东部区域的植被 SOS 呈大面积推迟趋势。2001—2021 年,艾比湖流域植被 EOS 在空间上呈现出与 SOS 大致相反的分布,即表现为 SOS 越早的区域 EOS 则越迟(图 6)。整个流域植被 EOS 主要集中在第 240 至第 310 天,而艾比湖湖区周围良好的水热条件可以促进植物生长,使植被物候 EOS 推迟到第 310 至第 335 天,其他区域的植被 EOS 则主要介于第 270 至 295 天。在各年份上,流域中部和东北部的植被 EOS 普遍较晚,且整个流域植被 EOS 呈现出自北向南逐渐推迟的趋势。

近 20 年来,艾比湖流域植被 LOS 受 SOS 和 EOS 影响,呈逐渐缩短的趋势,且表现为明显的空间分异特征(图 7)。流域内植被 LOS 主要集中在第 120 至第 240 天,60.4% 的区域在第 150 至第 210 天之间变化。在空间上,总体表现为湖区周围的植被 LOS 相对较长且变化明显,湖区西南部及流域中东部的耕地受到气候变化和人类活动的影响,植被 LOS 存在较大的空间分异。而流域南部的高山林草区受人类活动干扰较少,植被 LOS 保持基本稳定。受气温和降水量等气候因子的波动影响,流域内植被物候在不同年份呈现出一定的空间差异。特别是在 2016 年,整个流域的植被 LOS 普遍呈缩短趋势,这与当年春、夏季的强降水密切相关。由此表明,气候的暖湿化对植被物候具有重要影响。

3.2 植被物候变化趋势

艾比湖流域大部分区域(54.1%)的植被 SOS 呈提前趋势(图 8)。SOS 推迟速率 >0.5 d/a 的区域占比(14.6%)高于提前速率 <0.5 d/a 的区域占比(9.2%)。从空间分布来看,受人类活动干预,耕地

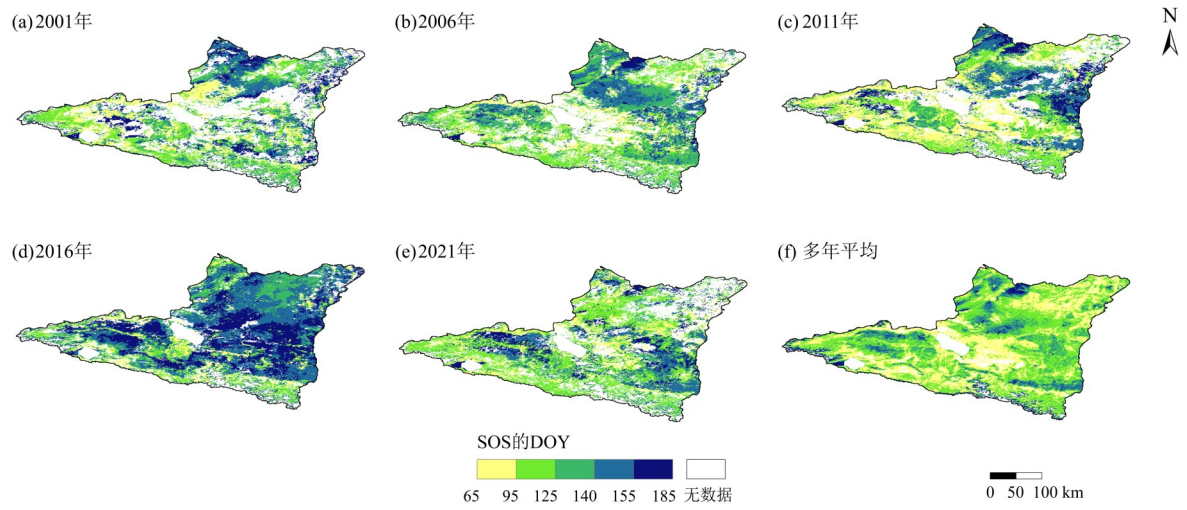


图 5 生长季开始日期空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the start of the growing season

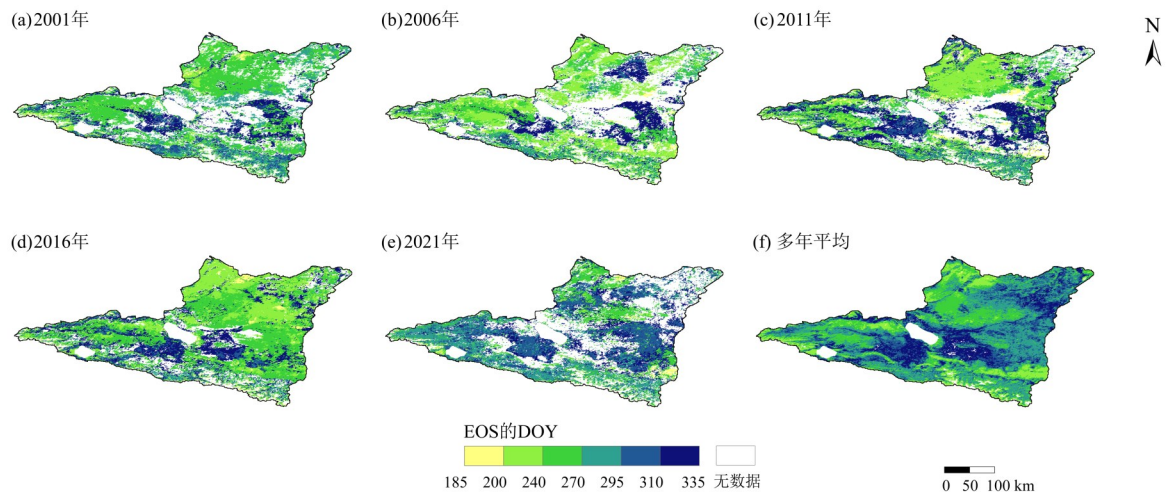


图 6 生长季结束日期空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the end of the growing season

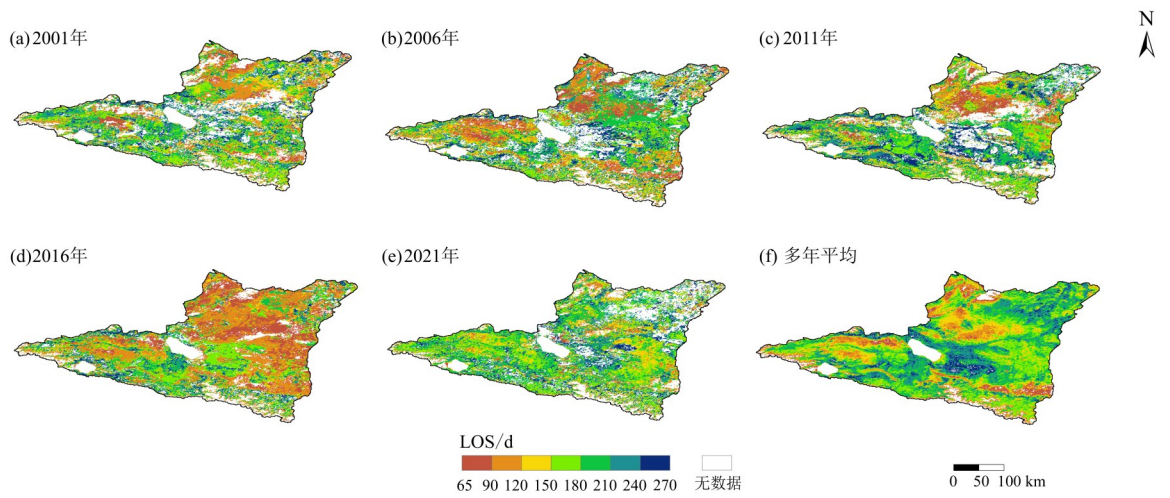


图 7 生长季长度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the length of the growing season

SOS 总体呈较显著的推迟趋势,而林草地 SOS 则呈现出轻微的提前趋势。值得注意的是,在流域东部尤其是中东部的耕地区域,植被 SOS 推迟速率最大且明显高于提前速率,植被返青期以 0.5 d/a 速率呈显著推迟。从植被 EOS 的变化可以看出,在艾比湖流域北部,EOS 变化速率以提前为主,而在南部则以推迟为主,且提前的变化速率明显大于推迟速率;从

空间上来看,呈提前趋势的所占面积较大,且在人类活动干扰下,流域内耕地的枯黄期主要以 <-1 d/a 的变化速率呈显著提前,这与 SOS 的变化趋势恰好相反。受 SOS 和 EOS 影响,植被 LOS 在空间上呈现较大差异,在艾比湖流域中东部及西南部区域植被 LOS 以 <-1 d/a 的变化速率呈显著缩短趋势,而其他地区的植被 LOS 则以不显著增加和减少为主。

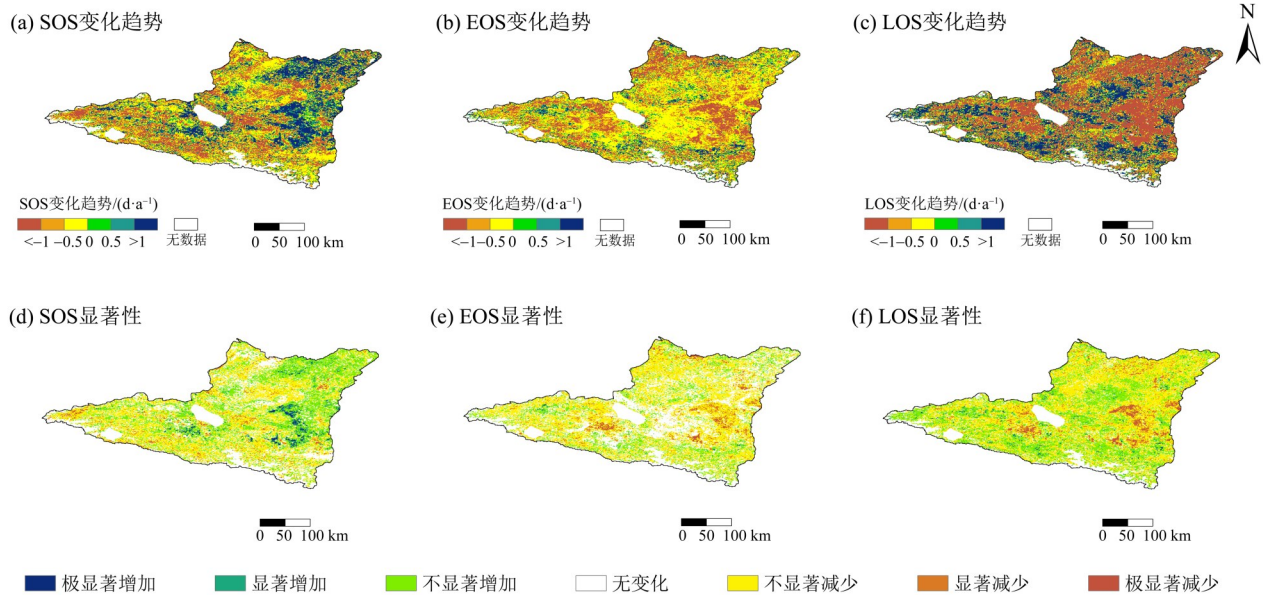


图8 物候变化趋势和显著性

Fig. 8 Trends and Significance of phenology changes

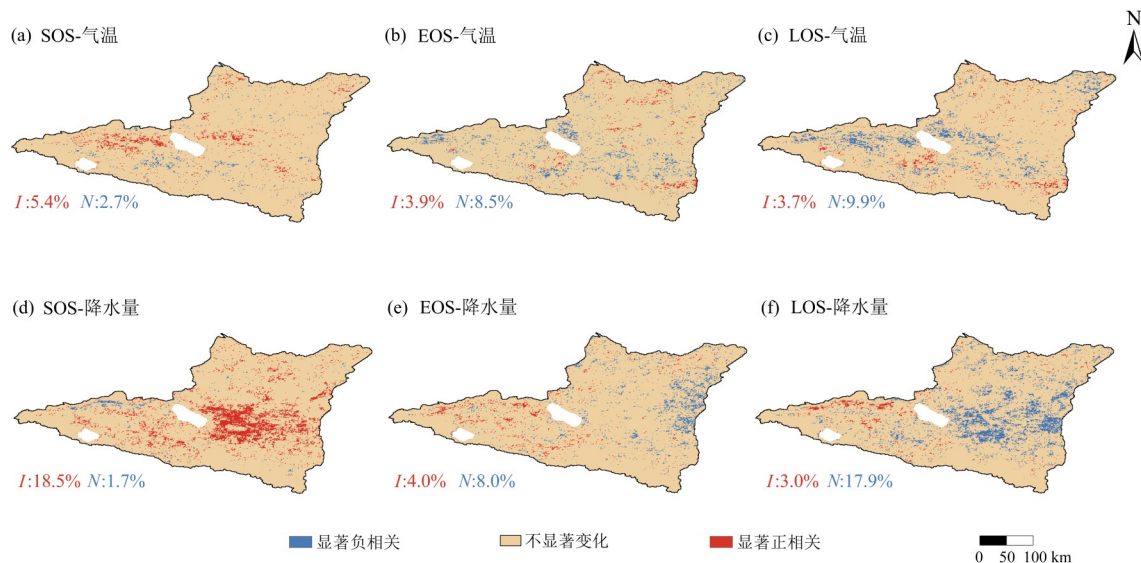
3.3 植被物候与气温、降水量的偏相关分析

分别对艾比湖流域的植被物候参数与气温、降水量进行逐像元偏相关分析(图9)。总体而言,流域内植被物候与气温、降水量之间的相关性呈现出一定的空间异质性。具体来看,SOS与气温、降水量呈显著正相关性($P<0.05$)的区域占比分别为5.4%和18.5%,呈显著负相关性($P<0.05$)的区域占比仅为2.7%和1.7%;总体而言,SOS对降水量的响应程度较气温更为明显。在艾比湖流域的中东部区域,SOS与降水量呈现显著的正相关性,即SOS随降水量的增加而延迟。而EOS对气温、降水量的响应较小,主要呈现出较低的相关性,零散分布在艾比湖周围以及流域东部地区。在气温和降水量的共同作用下,LOS对气候的响应也呈现出一定的空间差异。LOS与气温呈现出显著的正、负相关性($P<0.05$)的区域占比分别为3.7%和9.9%,主要分布在艾比湖流域周围以及流域的东、西部。相对于气温而言,降水量对植被LOS的影响更为明显,存在显著正相关性的区域零散分布于流域的西北部,

而在流域的中东部地区,LOS与降水量呈显著负相关性,即随着降水量增加,生长季长度显著缩短。以上分析表明,水热条件的差异直接影响了艾比湖流域植被物候的空间分布格局。

3.4 气候变化和非气候因素对植被物候的影响

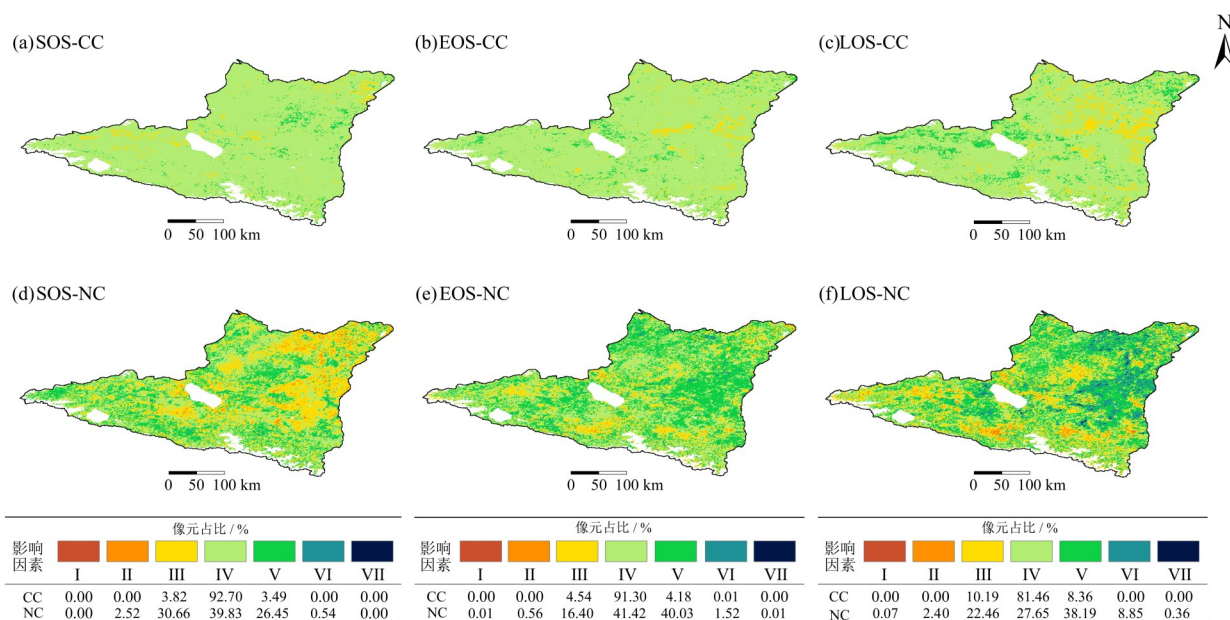
艾比湖流域的气候变化和非气候变化对植被生长发育的影响存在较大的空间异质性(图10)。比较而言,气候变化对植被物候的影响相对较小,而非气候变化则为主导因素。气候变化对植被SOS和EOS基本无影响的占比较高,分别为92.70%和91.30%。在艾比湖流域的西北部,气候变化对植被SOS呈轻微抑制作用,而在流域中东部地区,则表现为轻微促进作用;在艾比湖湖区周围,气候变化对EOS呈轻微促进作用,而在流域中东部地区,则表现为轻微抑制作用;LOS受气候变化影响较大,其中基本无影响区域占比为81.46%,轻微影响约占18.54%。在流域的中东部地区,受植被SOS和EOS影响,气候变化对生长季长度呈轻微的抑制作用。而在艾比湖湖区附近以及流域的北部则表现



*I*代表显著正相关的占比, *N*代表显著负相关的占比, $P < 0.05$ 。

图 9 气温、降水量和植被物候的相关性

Fig. 9 The correlation between temperature, precipitation, and vegetation phenology



CC代表气候变化, NC代表非气候因素。

图 10 气候变化和非气候因素对物候期的影响

Fig. 10 Impacts of climate change and non-climatic factors on phenology

为轻微促进作用。与气候变化相比,非气候变化对植被发育的影响较大,对 SOS 提前起抑制作用的影响区域约为 33.18%,起促进作用的区域约占 26.99%,其中轻微促进的区域占比为 26.45%。在艾比湖西南部与流域东部,非气候变化对植被 SOS 和 EOS 的作用效果明显不同,主要表现为对 SOS 的抑制作用和对 EOS 的促进作用。受 SOS 和 EOS 的影

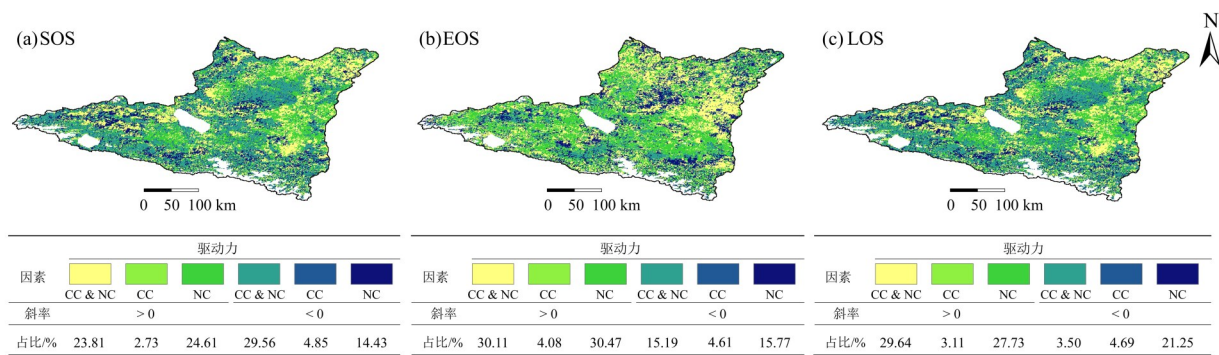
响,非气候变化对 LOS 的驱动作用更加突出,影响范围高达 73.35%。从空间分布上看,非气候变化对 LOS 的轻微促进作用主要出现在流域东部及艾比湖西岸;东北部地区受非气候变化影响较大,表现为中度促进,而南部地区则呈轻微抑制作用。从不同的土地利用类型角度出发,在人类活动较强的土地利用类型上(耕地和建设用地),各物候期中呈促

进或抑制变化的区域,其受非气候因素主导的面积比例均明显大于受气候因素影响的,这表明非气候因素中的人类活动是导致植被变化的不容忽视的因素。

近 20 年来,气候变化和非气候因素是艾比湖流域植被 SOS、EOS 和 LOS 变化的主要驱动因素(图 11)。气候因素对植被物候参数的变化总体呈现为抑制作用。与气候变化相比,非气候变化在驱动 SOS 变化中占据主导地位,影响愈来愈大,SOS 推迟趋势在流域东部、艾比湖西南部和西北部尤为明显。在 EOS 变化中,非气候变化的驱动作用尤为重要,主要表现出明显的推迟趋势,其中非气候变化导致 EOS 的推迟区域约占 30.47%,主要分布在流域东部、艾比湖西南部和西北部区域。非气候变化对 LOS 的影响最为明显,特别是在流域中部和中东部地区,对 LOS 起抑制作用。从土地利用角度出发,

非气候因素影响区域大部分为耕地,在不考虑气候因素的情况下,可能主要通过人类活动改变土地利用方式,并影响水资源量等环境要素,对植被生长产生显著作用。

2001—2021 年,气候变化对艾比湖流域植被物候参数的变化基本无明显影响(表 2),气候变化和非气候因素均为艾比湖流域植被物候变化的主要驱动因素。其中,非气候因素占据主导地位,在短期内人为主导的资源开发与土地利用活动是影响植被发育的主要途径,包括但不限于城市建设和扩张导致占用耕地、林地、草地,以及大面积的伐林等。受气候变化和人类活动的共同作用,植被 SOS 呈推迟趋势,而 EOS 则呈轻微推迟趋势。在非气候因素干扰下,LOS 呈轻微缩短趋势。非气候因素则主要通过人类活动改变土地利用方式和水资源量等环境要素,对植被生长造成一定的制约作用。



CC代表气候变化,NC代表非气候因素。

图 11 物候期驱动因素空间分布

Fig. 11 The spatial distribution of driving factors for the Phenology

表 2 物候参数变化趋势及其驱动因素的影响

Table 2 Variation trends of phenological parameters and influences of driving factors

物候参数	S	对植被生长的影响		驱动力
		CC	NC	
SOS	0.170	基本无影响	基本无影响	CC&NC
EOS	0.057	基本无影响	轻微促进	CC&NC
LOS	-0.422	基本无影响	轻微抑制	NC

4 讨论

4.1 植被物候提取结果的不确定性探讨

研究植被物候变化有助于了解区域植被的生长动态,并识别植被物候对气候变化的响应(朱文博等,2019)。本研究发现,近 20 年来艾比湖流域的

植被物候呈现出明显的时空分异特征,其中 SOS 和 EOS 均呈推迟趋势,但 SOS 的变化速率高于 EOS,从而导致 LOS 呈缩短趋势。艾比湖流域植被物候的变化趋势均不显著($P>0.05$),说明该荒漠生态系统的植物群落结构具有一定的稳定性。流域内植被多以盐穗木、盐节木和梭梭等耐旱物种为主,且分布稀疏,其物候节律对气候波动的响应较为迟缓(约日古丽卡斯木,2019)。从物候期分布来看,流域内植被 SOS 主要集中在第 65 至第 125 天,EOS 与 SOS 的空间分布大体相反,即表现为生长初期越早的区域末期越迟,且 EOS 主要集中在第 240 至第 310 天,与对天山新疆段植被物候特征研究得到的结论基本一致(玛地尼亚提·地里夏提等,2019)。不同生态系统的植被物候对气候的响应机制不同,探究不同植被类型的物候特征及其气候响应可降

低分析结果的不确定性。同时,频发的极端气候事件可能导致某些年份的结果偏离总体趋势,对时间序列异常值的合理分析将会提高植被物候的提取精度。已有研究发现,动态阈值法对新疆植被物候具有较好的提取效果,但其稳定性在不同生态系统上存在差异,从而导致物候提取结果具有一定的不确定性(何宝忠等,2018)。因此,未来需要结合机器学习算法改进物候模型,提高对物候参数提取的准确性和稳定性。同时,利用多源遥感数据和地面观测数据进行模型训练,提高物候提取算法的精度和适用性(龚健雅等,2022)。在数据源选取上,可利用高时空分辨率的光学影像、雷达卫星、物候相机和日光诱导叶绿素荧光数据进行植被物候的精准提取(Kong et al.,2022)。

4.2 植被物候的驱动机制研究

已有研究普遍认为气温和降水量是影响植被生长的关键因子(金晓亮等,2025)。从气候变化来看,艾比湖流域整体呈暖湿化趋势。本研究选取年均气温和年降水量作为主要气候因子,探讨植被物候对气候暖湿化的响应。结果显示,SOS相较EOS对降水量的响应程度较气温更为明显。在艾比湖流域的中东部区域,SOS与降水量呈显著正相关性,而EOS则与其主要呈现出较低的正或负相关性。在气温和降水量的共同作用下,LOS对气候的响应也呈现出一定的空间差异,在大部分区域,LOS主要受非气候因素影响。在非气候方面,本研究着重分析了人类活动的主导作用,人类活动是干旱区流域植被物候变化的重要驱动力,特别是在耕地集中的区域。研究区域复杂的地形地貌(南部山区、北部平原、湖滨低地)和土壤类型(东北部盐碱土与风沙土)构成了植被生长的基础环境框架,是导致物候呈现显著空间分异格局的根本非气候原因之一。地形通过塑造局地小气候和水文条件,土壤则影响水分、养分的有效性及其植被类型,共同决定了不同区域植被物候的特征及其对气候变化和人类活动的敏感性。因此,非气候因素对艾比湖流域植被物候的影响,是地形地貌、土壤属性等自然地理基础因素与人类活动叠加作用的结果。人类活动主要在平原绿洲上,通过改变土地利用和水资源施

加影响,而地形与土壤则在流域尺度上奠定了物候空间分异的基础。在气候变化和非气候因素影响下,艾比湖流域植被整体呈现出SOS、EOS推迟,LOS缩短的趋势,气候变化对植被物候存在局部影响,这与已有研究结果基本一致(Zhang et al.,2020)。同时,陈瑜等(2021)的研究也同样证实,气候变化对艾比湖流域的植被生长存在一定影响,植被覆盖度与降水量有显著的正相关性。气候变化影响了局部区域的植被SOS和LOS,而非气候因素主要为人类活动,如人类通过改变土地利用方式、开发水资源等影响着植被的整个生长过程。同时,不同生态系统的物候驱动机制也存在较大差异。此外,由大气条件、卫星观测、数据处理等因素造成的误差(如噪声)也属于非气候因素,且不可避免地影响到物候提取精度。因此,为深入探究植被物候的驱动机制,后续研究将利用多源数据开展融合与对比分析,并引入太阳辐射、土壤湿度、地形因子及人类活动等多个因素,系统开展不同植被类型的物候研究。

5 结 论

本文基于2001—2021年的MODIS EVI时序数据,分析艾比湖流域植被物候变化趋势及其对气候和非气候要素的响应。结果表明,近20年来艾比湖流域植被SOS以0.17 d/a的速率发生缓慢推迟,EOS呈轻微推迟趋势(0.06 d/a),LOS则以-0.42 d/a的速率呈缩短趋势。植被物候与气候因子之间存在复杂的相关性,植被物候对降水的敏感性高于气温,并存在一定的空间差异,尤其在流域中东部,降水量的增加导致了SOS的显著推迟;EOS对气候的响应相对较弱,而在流域的中东部LOS随降水量的增加而显著缩短。进一步分析表明,艾比湖流域植被物候与气候变化、非气候因素之间存在复杂的相关性。虽然气候变化对植被物候的影响相对较小,但仍然存在一定的空间差异。近20年来,气候变化和非气候因素是艾比湖流域植被物候变化的主要驱动因素;非气候因素主要为人类活动对植被物候产生影响,表现为对SOS的抑制作用,以及对EOS、LOS的促进作用。

参考文献:

陈瑜,张鹏,2021.新疆艾比湖流域植被覆盖度对气候的响应[J].中国农业信息,33(5):42-50.
龚健雅,张冕,胡翔云,等,2022.智能遥感深度学习框架与

模型设计[J].测绘学报,51(4):475-487.
何宝忠,丁建丽,李焕,等,2018.新疆植被物候时空变化特征[J].生态学报,38(6):2139-2155.

- 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 等, 2021. 黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化的响应[J]. 生态学报, 41(16): 6600-6612.
- 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等, 2020. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 75(5): 961-974.
- 金晓亮, 孙慧兰, 叶茂, 等, 2025. 伊犁河流域植被覆盖时空变化趋势及驱动力[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文), 64(2): 42-55.
- 刘欣怡, 张正勇, 刘琳, 等, 2025. 成渝城市群县域碳平衡与人类活动强度的关联性[J]. 生态学报, 45(11): 5246-5262.
- 刘悦, 刘欢欢, 陈印, 等, 2023. 2000—2018年中国植被光学厚度时空动态特征及驱动因素[J]. 地理学报, 78(3): 729-745.
- 玛地尼亚提·地里夏提, 玉素甫江·如素力, 海日古丽·纳麦提, 等, 2019. 天山新疆段植被物候特征及其气候响应[J]. 气候变化研究进展, 15(6): 624-632.
- 马晓芳, 陈思宇, 邓婕, 等, 2016. 青藏高原植被物候监测及其对气候变化的响应[J]. 草业学报, 25(1): 13-21.
- 马玉娥, 钱亦兵, 段士民, 等, 2012. 艾比湖地区植被分布及物种多样性研究[J]. 干旱区研究, 29(5): 776-783.
- 尼格娜热·阿曼太, 丁建丽, 葛翔宇, 等, 2021. 1960—2017年艾比湖流域实际蒸散量与气象要素的变化特征[J]. 地理学报, 76(5): 1177-1192.
- 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等, 2019. 中国北方草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 30(12): 4099-4107.
- 任立清, 2022. 艾比湖流域植被时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 45(2): 467-477.
- 王聪, 李静, 柳钦火, 等, 2017. 黑河流域遥感物候产品验证与分析[J]. 遥感学报, 21(3): 442-457.
- 王鑫, 刘新月, 母艳梅, 等, 2023. 毛乌素沙地植被物候变化及其对气候的响应[J]. 北京林业大学学报, 45(7): 61-75.
- 夏传福, 李静, 柳钦火, 2013. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 17(1): 1-16.
- 杨涵, 孙慧兰, 叶茂, 等, 2024. 伊犁河谷植被物候变化特征及其对气候变化的响应[J]. 草地学报, 32(3): 859-868.
- 杨铭鑫, 李俊, 同小娟, 等, 2024. 2001—2020年中国森林植被EVI对气候因子的响应[J]. 生态学报, 44(23): 10850-10863.
- 袁沫汐, 赵林, 李鑫鑫, 等, 2023. 1982—2015年中国温带不同草地植被枯黄期对极端气候事件的响应[J]. 生态学报, 43(14): 6015-6032.
- 约日古丽卡斯木, 2019. 艾比湖流域经济—生态系统耦合时空分异及影响因素研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学.
- 张仁平, 2017. 新疆地区草地NPP和物候对气候变化的响应研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- 朱文博, 张晓东, 张静静, 等, 2019. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应[J]. 地理学报(英文版), 29(1): 131-145.
- DING M, ZHANG Y, SUN X, et al, 2013. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009[J]. Chin Sci Bull, 58(3): 396-405.
- HELSEL D R, FRANS L M, 2006. Regional Kendall test for trend[J]. Environ Sci Technol, 40(13): 4066-4073.
- JONSSON P, EKLUNDH L, 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 40(8): 1824-1832.
- KONG D, McVICAR T R, XIAO M, et al, 2022. Phenofit: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing[J]. Meth Ecol Evol, 13(7): 1508-1527.
- SAVITZKY A, GOLAY M J E, 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Anal Chem, 36: 1627-1639.
- SEN P K, 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. J Am Stat Assoc, 63(324): 1379-1389.
- SUN W, SONG X, MU X, et al, 2015. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. Agric For Meteorol, 209: 87-99.
- TONG X, BRANDT M, YUE Y, et al, 2018. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. Nat Sustain, 1(1): 44-50.
- WESSELS K J, PRINCE S D, MALHERBE J, et al, 2007. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa[J]. J Arid Environ, 68(2): 271-297.
- ZHANG H, WANG X, PENG D, 2022. Evaluation of urban vegetation phenology using 250 m MODIS vegetation indices [J]. Photogramm Eng Remote Sensing, 88(7): 461-467.
- ZHANG J, DING J, WU P, et al, 2020. Assessing arid inland lake watershed area and vegetation response to multiple temporal scales of drought across the ebinur lake watershed[J]. Sci Rep, 10: 1354.
- ZHENG W, LIU Y, YANG X, et al, 2022. Spatiotemporal variations of forest vegetation phenology and its response to climate change in Northeast China[J]. Remote Sens, 14(12): 2909.