王 进,周广胜,何奇瑾,等.克氏针茅草原植被物候变化及其对气温的响应 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6832-6840.
Wang J, Zhou G S, He Q J, et al. Phenological dynamics of *Stipa krylovii* steppe and their responses to air temperature [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6832-6840.

克氏针茅草原植被物候变化及其对气温的响应

王 进[1],周广胜[2*],何奇瑾[3,4],周 莉[2,5],买买提艾力•买买提依明[1],孙 帅[1],王 豫[1] (1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局阿克达拉大气本底野外科学试验基地/乌兰乌苏生态与农业气象新疆野外科学观测研究站,新疆 乌鲁木齐 830002；2.中国气象科学研究院灾害天气科学与技术国家重点实验室/河北固城农业气象国家野外科学观测研究站,北京 100081；3.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044；4.中国农业大学资源与环境学院,北京 100193；5.中国气象局-中国农业大学农业应对气候变化联合实验室,北京 100081)

摘要：基于2000~2024年MODIS NDVI遥感数据与地面物候观测资料,以内蒙古克氏针茅草原为研究对象,采用HANTS方法重建NDVI时间序列,并结合动态阈值法提取植被物候始期(SOS)与末期(EOS),评估并确定最优阈值,同时探讨其与平均最高和最低气温因子的关系.结果表明:(1)在50%和65%阈值下提取SOS和EOS的提取误差最小,RMSE分别为8和11d;(2)2000~2024年间,SOS以0.32d/10a的速率提前,EOS以0.12d/10a的速率推迟,表明草地生长季呈延长趋势;(3)EOS对气温变化的敏感性高于SOS,其中日间平均最高气温对EOS的提前作用明显强于夜间平均最低气温.该研究探索了遥感监测克氏针茅草原植被物候的最优阈值,揭示了气温主导下草地物候的变化规律,为气候变化背景下草地植被生产指导提供了依据.

关键词：植被物候；动态阈值法；NDVI；气温；克氏针茅草原
中图分类号：X87 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6832-09

Phenological dynamics of *Stipa krylovii* steppe and their responses to air temperature. WANG Jin[1], ZHOU Guang-sheng[2*], HE Qi-jin[3,4], ZHOU Li[2,5], Ali Mamtimin[1], SUN Shuai[1], WANG Yu[1] (1.Institute of Desert Meteorology/Field Scientific Experiment Base of Akdala Atmospheric Background, China Meteorological Administration/Wulanwusu Ecology and Agrometeorology Observation and Research Station of Xinjiang, Urumqi 830002, China；2.State Key Laboratory of Severe Weather Science and Technology (LaSW)/Hebei Gucheng Agricultural Meteorology National Observation and Research Station, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China；3.Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China；4.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China；5.CMA-CAU Jointly Laboratory of Agriculture Addressing Climate Change, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6832~6840

Abstract：This study focuses on the phenological changes of *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia and their responses to the maximum and the minimum air temperature, based on MODIS NDVI data and corresponding ground-based phenological observations from 2000 to 2024. The HANTS method was employed to reconstruct NDVI time series, and the start of season (SOS) and the end of season (EOS) were obtained using a dynamic threshold method. The results showed that: (1) the thresholds of 50% for SOS and 65% for EOS resulted in the lowest extraction errors, with RMSE values of 8d and 11d, respectively; (2) from 2000to 2024, the SOS advanced at a rate of 0.32d/10a, while the EOS was delayed at a rate of 0.12d/10a, indicating a prolonged growing season; (3) the EOS was more sensitive to air temperature than the SOS, the daytime mean maximum temperature had a significantly stronger advancing effect on EOS than the nighttime mean minimum temperature. This study determined the remote sensing-based optimal thresholds of *Stipa krylovii* steppe phenology, revealed the effect of air temperature on phenological change, and provided a scientific basis for steppe management under climate change.

Key words：vegetation phenology；dynamic threshold method；NDVI；air temperature；*Stipa krylovii* steppe

气候变暖对植被物候影响是气候变化领域研究的核心议题之一[1-3].草地在维系生物多样性、调节气候、涵养水源等方面具有重要生态功能[4-5].与其它植被类型相比,草地植被物候对气候变化的指

收稿日期：2025-05-29
基金项目：国家自然科学基金重点项目(42130514);中国气象科学研究院科技发展基金项目(2021KJ034)
* 责任作者, 研究员, zhougs@cma.gov.cn

示性更为敏感[6].

陆表物候学研究旨在通过遥感植被季节性数据估算关键物候指标,尤其对估算植被物候始期(SOS)和末期(EOS)时间节点至关重要[7].传统的地面观测方法为记录植被生长变化提供了第一手直接证据[8-9],但其面临观测点空间分布不均、标准不统一、低纬度区域数据稀缺等问题[10-11],限制了数据整合与区域尺度研究的开展[8,12].近年来,遥感技术的发展弥补了传统观测的不足,凭借其覆盖范围广、长时序监测与高时空分辨率的特点,成为研究植被动态变化的重要手段[13].物候反演是遥感物候研究中的重要环节.而提取植被关键物候指标方法中阈值法的应用最为广泛[13-14].阈值法分为固定阈值和动态阈值两类.固定阈值易受地表背景信息干扰,仅适用于特定区域[14].而动态阈值弥补了固定阈值的局限性,可适应区域差异,但缺乏统一标准[15-17].

全球气候变暖显著影响了植被物候[18-19].温度、水分与光照是驱动植被物候变化的主要环境因子.其中,温度作为主导因素,通过影响植物酶活性并调节其生长速率[13,20],而不同生长期对温度的敏感性存在差异.例如,Shi 等[21]指出夏秋季较高气温可延缓叶绿素降解,推迟植被的衰老进程.Walker 等[22]研究发现冬末春初积雪与温度的交互作用可能引起物候的时空异质性.尽管多项研究表明气候变暖导致 SOS 提前和 EOS 延迟[23–26],但气温因子对植被动态的影响机制仍存争议[13,27-29].因此亟需获取更长时序数据的可靠物候指标估算结果,以深入理解气候因子与植被物候的关联机制.

克氏针茅草原作为内蒙古典型的温带草原,其物候变化对气候变化极其敏感[30].相比木本植物,草本植物在春季物候方面对气候波动的响应更为显著[31].目前,温带草原物候对气候变化的响应机制仍存在较大争议.一些研究指出春季升温会导致 SOS 提前[32].但也有研究认为,在降水受限的情况下,升温未必能促进物候始期提前,甚至可能造成延迟[33-34].

本研究基于地面长期物候观测数据和 2000~2024 年 MOD13A1NDVI 遥感数据,提取克氏针茅草原 SOS 与 EOS,旨在评估遥感提取物候的最优阈值,并分析物候变化与气候因子的关系.研究结果可为草原生态系统监测提供技术支撑,也为应对气候变化背景下的草地管理与保护提供理论参考.

1　研究区及数据源

1.1　研究区概况

本研究区位于内蒙古锡林浩特国家气候观象台(44°8' N、116°19' E,海拔 990m),该站始建于 1985 年,设有长期定位的克氏针茅物候观测样地(图 1).研究区属温带半干旱大陆性气候,年均气温 3℃,夏季平均气温 18.3℃,冬季平均气温−22.0℃,年均降水量为 283.6mm,具有冬季寒冷干燥、夏季温暖湿润、四季分明等典型气候特征.该区土壤类型为淡栗钙土,表层腐殖质层较薄,0~30cm 为轻壤土,30~100cm 为中壤土.植被群落以克氏针茅(*Stipa krylovii*)与羊草(*Leymus chinensis*)为优势种,常见伴生植物包括知母 (*Anemarrhena asphodeloides*) 、矮葱 (*Allium anisopodium*)、细叶葱(*Allium tenuissimum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrasa*)等.

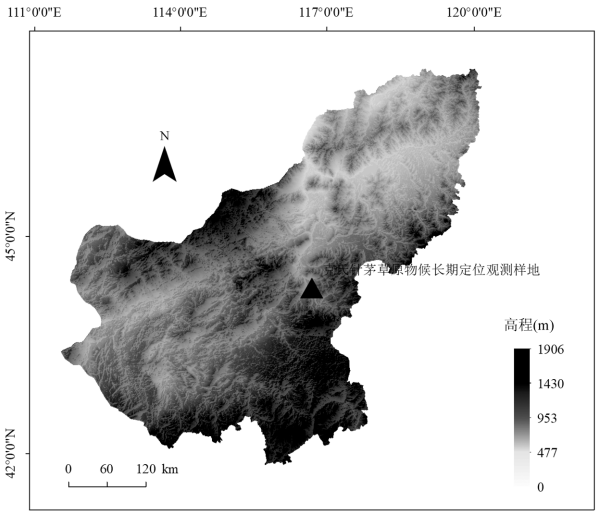


图 1　试验区位置

Fig.1　Location of the experimental area

审图号为 GS(2024)0650 号

1.2　数据来源及预处理

遥感数据来源为中分辨率成像光谱仪 MOD13A1NDVI 产品,获取平台为 Google Earth Engine(GEE).数据时间跨度为 2000 年 2 月 18 日~2024 年 12 月 31 日,时间分辨率为 16d,空间分辨率为 500m.由于遥感影像易受云层、气溶胶、积雪等因素干扰,原始 NDVI 数据常包含噪声.为提高数据质量与表达季节性变化的准确性,本研究采用时间序

列谐波分析(HANTS)方法对 NDVI 数据进行重建.该方法基于傅里叶变换原理,将时间序列分解为不同频率的正余弦波,通过频谱重构提高数据平滑性,从而更准确揭示植被的周期性变化特征.计算公式为如下:

$$y_i = A_0 + \sum_{j=1}^{m} A_j \sin(\omega_j + \theta_j) \quad i = 1,2,.....,N \tag{1}$$

式中:y_i 为第 i 天重建后的 NDVI 值,A_0 为常数项,A_j 为第 j 个谐波振幅,ω_j 为频率,θ_j 为初相位,N 为时间序列长度.

基于 HANTS 平滑后的 NDVI 数据基础上,采用六次多项式拟合曲线以提升时间分辨率至日尺度,拟合公式如下:

$$\mathrm{NDVI} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots \alpha_6 x^6 \tag{2}$$

式中:x 为日序(1~365),$a_{0...6}$ 均为拟合系数,NDVI 表示第 x 天的 NDVI 值.

植物物候观测资料和气象数据均来自中国气象局内蒙古锡林浩特国家气候观象台,包括 2000~2024 年克氏针茅、羊草、糙隐子草、矮葱、冷蒿、细叶葱等物种的物候观测资料,气象数据包括该时段 3~5 月和 8~10 月的逐日最高、最低气温数据.植物物候观测资料按照《中国物候观测方法》[35]进行人工观测,记录克氏针茅 SOS、EOS 等关键物候的时间.两日为一个观测周期,每日下午两点开始物候的观测.当小区 50%的克氏针茅由黄转青,为达到 SOS;当小区 50%的克氏针茅由绿转黄,为达到 EOS.本研究选取优势种克氏针茅的 SOS 和 EOS 用于遥感数据验证.

2 研究方法

2.1 遥感物候提取

采用动态阈值法提取植被关键物候节点[36].该方法可适应区域差异、处理效率高等优点,并可根据研究对象调整参数设置.计算公式为:

$$\mathrm{Percentage}(C) = \left((\mathrm{Max}\,N - \mathrm{Min}\,N)C\right) + \mathrm{Min}\,N \tag{3}$$

式中:Max$N$ 和 Min$N$ 分别为 NDVI 时间序列的最高值和最低值,C 为阈值因子.在前人研究基础上[11,15,37-39],本研究以 5%步长,将 C 设定在 20%~80%之间,作为提取 SOS 和 EOS 的阈值.在 NDVI 最高值左侧,当 NDVI 上升达到最高值与最低值之间距离的 C 对应的日序(DOY)点即为 SOS;在 NDVI 最高值右侧,当 NDVI 下降至最高值与最低值之间距离的 C 对应的 DOY 点即为 EOS(图 2).

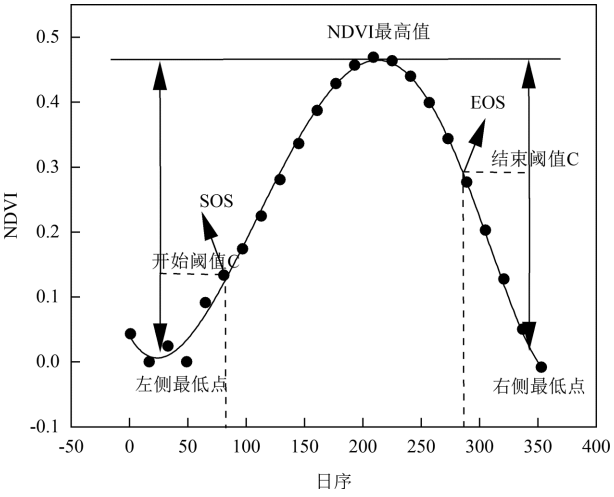


图 2 采用动态阈值法反演物候节点原理

Fig.2 Schematic diagram illustrating the extraction of phenological nodes using the dynamic threshold method

SOS 为植被物候始期;EOS 为植被物候末期;下同

2.2 趋势分析法

为分析植被物候期的年际变化趋势及其与气象因子的关系,采用一元线性回归模型.模型表达式如下:

$$y = kt + b \tag{4}$$

式中:y 表示植被 SOS 或 EOS,t 为年份,k 为物候变化速率(d/a),b 为回归常数项.

2.3 误差分析法

利用均方根误差(RMSE)评估不同阈值下遥感物候的提取精度.RMSE 是度量遥感物候与实际物候事件的发生日期的准确性,RMSE 值越小,表明该阈值提取的遥感物候与地面物候偏差越小.计算公式分别为:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(O_i - P_i)^2}{n}} \tag{5}$$

式中:n 是样本数量,O_i 是遥感提取的 SOS 或 EOS,P_i 表示地面观测值.

2.4 偏相关分析法

为探讨温度因子对物候变化的独立影响,采用偏相关分析法,剔除协变量影响后分析两个变量的相关性.计算公式为:

$$r_{xy\times z}=\frac{r_{xy}-r_{xz}\times r_{yz}}{\sqrt{\left(1-r^2_{xz}\right)\left(1-r^2_{yz}\right)}} \tag{6}$$

式中:r_{xy}为剔除变量z后变量x与变量y的偏相关系数,r_{xy}、r_{xz}、r_{yz}分别为对应变量之间的相关系数.

3　结果与分析

3.1　NDVI 的重建曲线特征

图 3 展示了 HANTS 和六次多项式拟合后 NDVI 时间序列变化特征.重建前的原始 NDVI 序列表现出明显的波峰波谷,但伴有锯齿波动,存在一定噪声干扰,不利于准确识别物候节点.经 HANTS 方法处理后,曲线整体更加平滑且保留原始数据的季节性变化趋势.由于经过云量筛选后的数据点较少,及获取更为准确的物候节点,采用六次多项式函数将其平滑为日尺度的数据,提高曲线的时间分辨率.尽管局部区间略有过拟合现象,但并不影响关键物候节点(SOS 和 EOS)的提取.

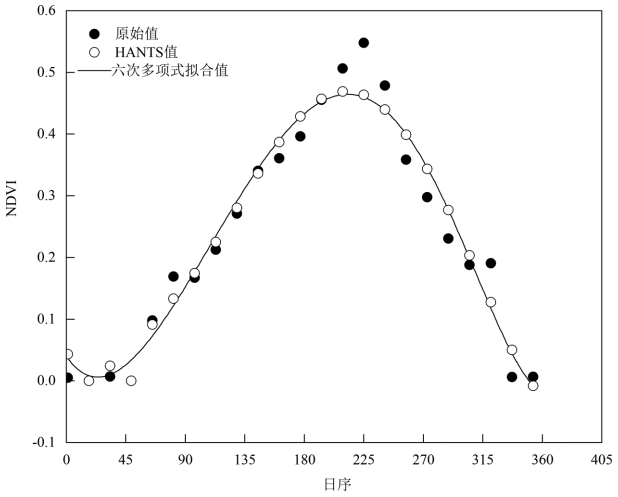


图 3　克氏针茅草原植被 NDVI 拟合曲线

Fig.3　Fitted NDVI curve for vegetation in the *Stipa krylovii* steppe

3.2　不同阈值提取物候的精度检验

图 4 展示了不同阈值下提取 SOS 与 EOS 的 RMSE 误差变化.整体来看,SOS 的提取误差普遍小于 EOS,表明物候始期在遥感识别中更为稳定.此外,当阈值过大或过低时,SOS 与 EOS 的误差均较大.具体而言,SOS 在阈值为 50%时,RMSE 最低,为 8d;EOS 在 65%阈值下 RMSE 最低,为 11d.因此,本研究将 50%和 65%确定为提取 SOS 与 EOS 的最优阈值.

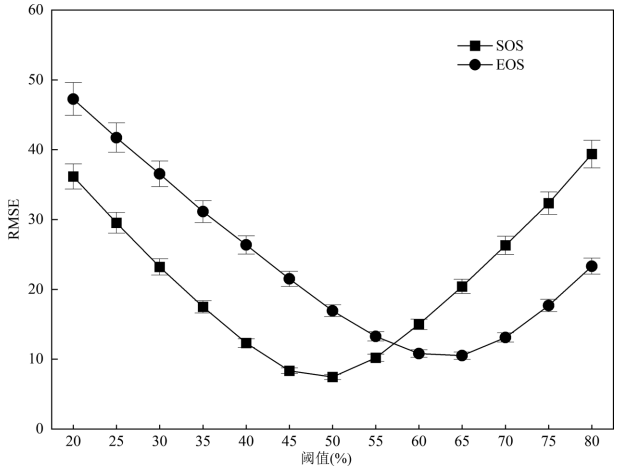


图 4　不同阈值提取物候期的 RMSE

Fig.4　RMSE of phenological phase extraction using different thresholds

RMSE 为均方根误差

从图 5 可知,物候始、末期均存在一定波动.总体上,SOS 呈缓慢提前趋势,提前速率为每 10 年 0.32d;EOS 呈缓慢推迟趋势,推迟速率为每 10 年 0.12d.2000~2024 年间,SOS 的年均值为第 114d,最晚出现在 2016 年(第 116d),最早为 2021 年和 2024 年,均为第 112d.EOS 的年均值为第 275d,最晚(2012、2020、2021 和 2024 年的第 276d)和最早(2005、2015、2019 和 2023 年的第 274d)均有 4 年出现.

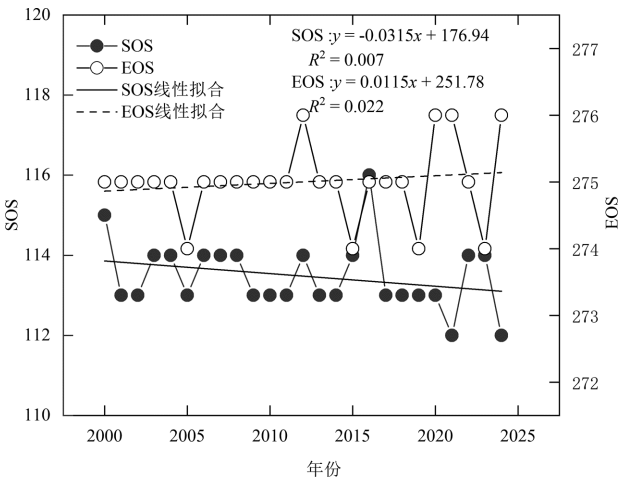


图 5　遥感物候始、末期年际变化特征

Fig.5　Interannual variation in remote sensing–derived SOS and EOS

3.3　植被物候与气温的关系

如图 6 和表 1 所示,总体上,年尺度气温变化趋势较为平缓.8 月日间平均最高气温与夜间平均最低

气温最高,分别为 26.91 和 13.77℃,两者差值为 13.14℃;3 月的日间平均最高气温和夜间平均最低气温则为最低,差值为−6.36℃.年尺度上,日间平均最高气温呈缓慢下降趋势,而夜间平均最低气温则呈显著上升趋势,气候倾向率分别为−0.22 和 0.43℃/10a.月尺度上,日间平均最高气温总体上呈下降趋势,其中 8 月日间平均最高气温达到了显著水平,气候倾向率为−1.22℃/10a.而夜间平均最低气温则相反,总体呈上升趋势,其中 3 月夜间平均最低气温上升尤为显著,气候倾向率为 1.39℃/10a.

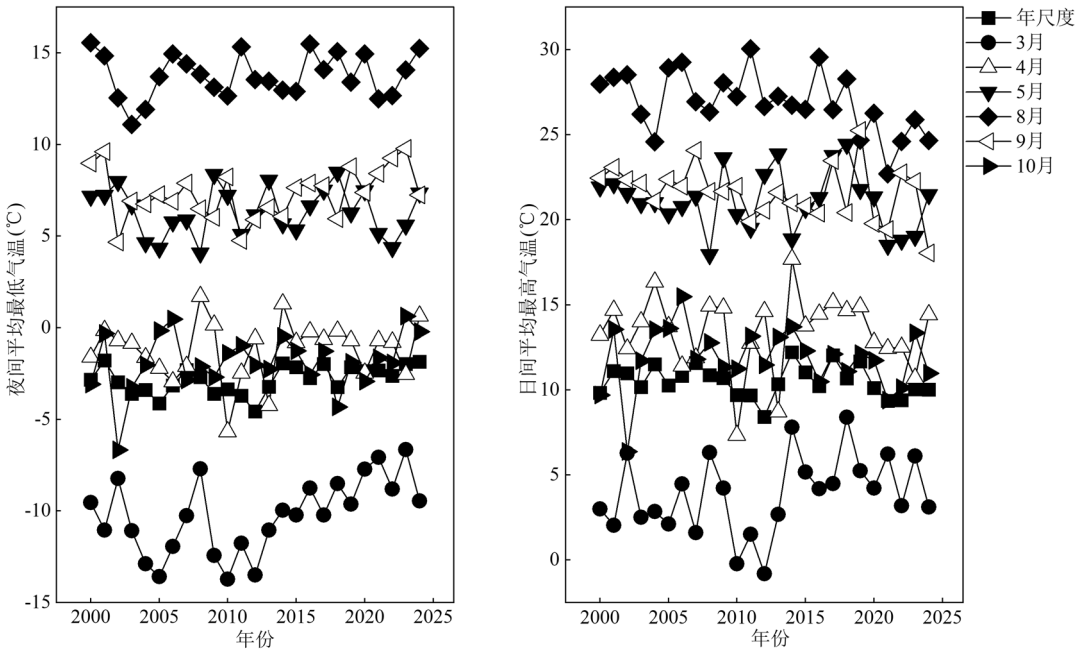


图 6 2000~2024 年不同尺度气温的变化特征

Fig.6 Multi-scale temperature variations from 2000 to 2024

表 1 2000~2024 年不同尺度气温的气候倾向率(℃/10a)

Table 1 Climate tendency rates of multi-scale temperatures from 2000 to 2024(℃/10a)

气温	气候倾向率						
	年尺度	3 月	4 月	5 月	8 月	9 月	10 月
日间平均最高气温	−0.22	1.00	−0.12	−0.28	−1.22*	−0.72	−0.16
夜间平均最低气温	0.43*	1.39*	0.23	−0.03	0.21	0.45	0.54

注: *表示达到0.05显著性水平.下同.

从表 2 中可以看出,气温因子对 EOS 的敏感性总体上要高于 SOS.年尺度上,SOS 与日间平均最高气温和夜间平均最低气温均呈微弱负相关,偏相关系数分别为−0.225 和−0.202;而 EOS 则与日间平均最高气温和夜间平均最低气温表现出不显著的相反关系,偏相关系数分别为−0.128 和 0.045.月尺度上,SOS 与 3 月和 5 月的日间平均最高气温和夜间平均最低气温均呈负相关,其中 5 月的气温因子对 SOS 影响较为明显.4 月的日间平均最高气温与 SOS 的偏相关性强于夜间平均最低气温,均表现为正相关.对于 EOS,8~10 月日间平均最高气温的影响均表现为负相关,其中 9 月的影响尤为显著,偏相关系数为−0.531.而夜间平均最低气温对 EOS 的影响较日间平均最高气温弱,总体上呈负相关.

植被物候始、末期对气温的响应存在一定的滞后效应[40].如图 7 所示,SOS 与 3~5 月日间平均最高气温和夜间平均最低气温均呈负相关,相关性均未达到显著水平.具体来看,3~5 月日间平均最高气温每升高 1℃,SOS 提前约 0.043d;夜间平均最低气温每升高 1℃,SOS 提前约 0.053d.

EOS 与 8~10 月日间平均最高气温和夜间平均最低气温的关系如图 8 所示.结果显示,EOS 与日间平均最高气温的负相关性(R^2=0.3342,P<0.05)显著强于夜间最低气温(R^2=0.0257),表明其对日间温度变化更敏感.从 EOS 响应气温的关系来看,日间平均最高气温每升高 1℃,EOS 显著提前约 0.304d,达到了显著水平;夜间平均最低气温每升高 1℃,EOS 提前约 0.94d.这说明较高的秋季昼夜气温均可促进植被枯黄,尤其日间最高气温的促进作用更为显著.

表 2　植被物候与各时期气温的偏相关关系

Table 2　Partial correlations between vegetation phenology and temperatures at different periods

气温	SOS				EOS			
	年尺度	3 月	4 月	5 月	年尺度	8 月	9 月	10 月
日间平均最高气温	−0.225	−0.009	0.262	−0.190	−0.128	−0.209	−0.531*	−0.254
夜间平均最低气温	−0.202	−0.116	0.121	−0.373	0.045	0.167	−0.183	−0.134

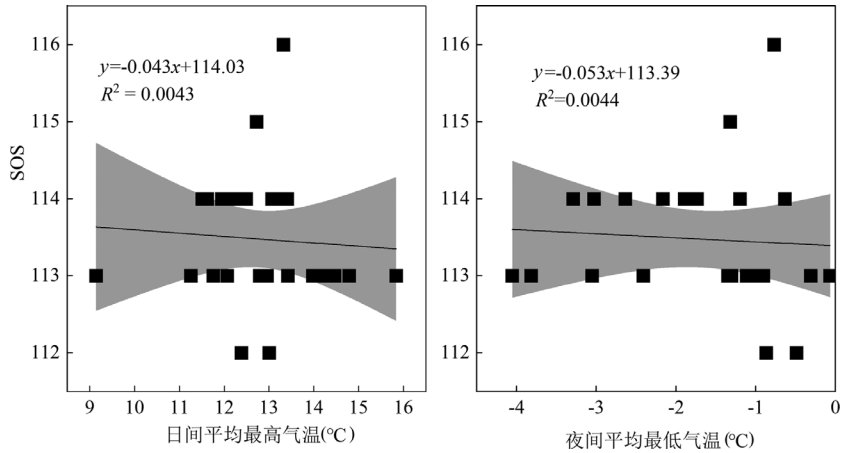


图 7　SOS 与 3~5 月日间平均最高气温和夜间平均最低气温的关系

Fig.7　Relationship between SOS and the average daytime maximum and nighttime minimum temperatures from March to May

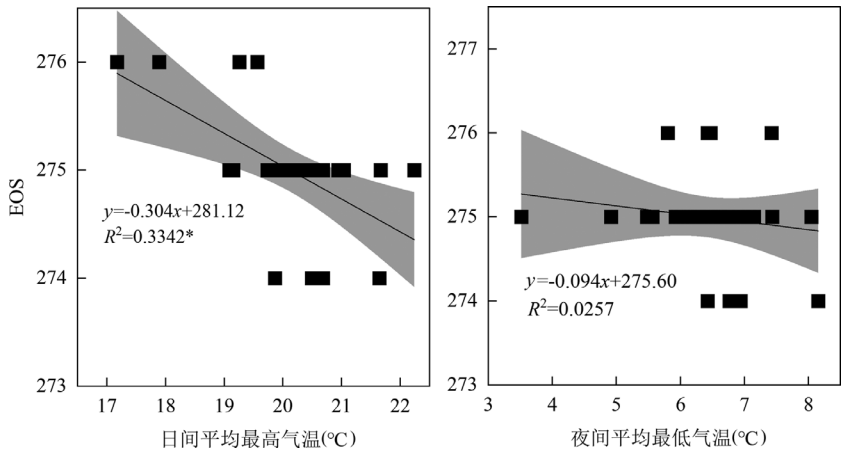


图 8　EOS 与 8~10 月日间平均最高气温和夜间平均最低气温的关系

Fig.8　Relationship between EOS and the average daytime maximum and nighttime minimum temperatures from August to October

*表示达到 0.05 显著性水平

4　讨论

卫星遥感监测为陆表植被季节性变化研究提供了重要手段,而通过地面实测数据验证遥感反演结果的准确性,是确保物候研究可靠性的关键环节[15].研究区为温带草地,郭剑等[37]研究表明采用 25%阈值提取 SOS 的 RMSE 为 9d;范瑛等[38]研究表明基于 10%阈值下 SOS 为第 120~130d,50%阈值下 EOS 为第 265~302d;乌日汉等[41]通过曲线曲率极值法确定锡林郭勒草原 SOS 为第 128d,EOS 为第 275d.本研究通过 50%阈值提取的 SOS 均值为第 114d(RMSE 为 7.46d),其精度优于或接近已有研究结果.邵亚婷等[42]采用 50%阈值的研究表明内蒙古植被 EOS 主要分布在第 290~295d;而本研究使用 65%阈值提取的 EOS 均值为第 275d,与乌日汉等[41]的研究结果一致,但较邵亚婷等[42]的结果提前了 15~20d.这可能是由于不

同遥感数据在时空分辨率、平滑方式及植被类型选择上的差异,导致提取结果出现差异.此外,随着遥感时序数据的更新,以往固有阈值并不能满足当前植被物候的反演.另外,本研究地面物候观测数据主要基于个体或小尺度区域,而遥感数据则覆盖较大范围,尺度不一致也可能影响比对结果[15].为此,张晓春等[17]通过融合 GF-1、HJ-2、Landsat-8 和 Sentinel-2 四种高分辨率遥感数据,在田区尺度提取冬小麦抽穗期和成熟期,精度控制在 5d 以内,为统一地面与遥感尺度提供了有效思路.

大多研究表明,温带地区植被 SOS 显著提前、EOS 推迟[15,43-44,].这与本研究结果一致.但张锋等[30]研究表明 SOS 显示为推迟趋势,这可能由于该区域气候变暖的同时,伴随降水减少、蒸发增强,造成土壤水分亏缺,延迟植被返青日期[45–48].温度调控酶活性,影响植物生长生理过程[47,49].基于此,本研究通过偏相关分析揭示了昼夜温度对植被物候的非对称影响机制.结果显示,SOS 对年尺度昼夜气温保持着负相关关系,且对日间平均最高气温的响应更加强烈.此外,SOS 对 3~5 月的昼夜气温的响应关系为由负转正再转负的相关性变化,且与 5 月夜间平均最低温显示出较强的负相关(偏相关系数为-0.373),这表明了夜间最低气温上升能够有效缓解低温胁迫对植被的伤害[6].此外,温带地区生态系统的水文循环受春季融雪过程调控,而夜间平均最低气温的上升通过多重机制缓解草地植被的水分亏缺[50].EOS 对昼夜气温的响应结果显示,EOS 与所有时期的日间平均最高气温呈负相关关系,其中与 9 月日间平均最高气温的负相关性达到显著水平.而与年尺度和 8 月的夜间平均最低气温呈正相关关系.这与袁沫汐等[6]结论一致.白天较高的气温会促使植被通过气孔关闭来抑制蒸腾作用,以减少水分过度散失,从而降低光合作用效率.但光合作用能力的减弱,植被的生长和代谢活动从而受到抑制,最终导致 EOS 提前[51].通常霜冻作为诱导植物衰老的重要环境因子之一,较高夜间气温能够有效降低夜晚霜冻的风险[49].而霜冻作为诱导植物衰老的关键环境因子之一,其减少会直接延缓植物的衰老进程,从而延长 EOS.此外,日间平均最高气温升高加重干旱,促使 EOS 提前;而夜间平均最低气温升高可缓解水分胁迫,部分抵消这一效应[15].

5 结论

5.1 遥感 NDVI 数据经 HANTS 与多项式拟合平滑处理后,能较好地反映克氏针茅草原的季节性动态特征.在所设定的 20%~80%阈值范围内,提取 SOS 和 EOS 精度最高的阈值分别为 50%和 65%,对应的 RMSE 分别为 8 和 11d.

5.2 2000~2024 年间,克氏针茅草原的 SOS 整体呈略微提前趋势,EOS 则表现为略微推迟趋势,分别以每 10 年 0.32 和 0.12d 的速率变化,反映出植被生长季存在一定延长的趋势.

5.3 月尺度上,EOS 对 9 月日间平均最高气温的响应显著,偏相关系数为-0.513;SOS 对 5 月夜间平均最低气温的响应最为明显,偏相关系数为-0.373;年尺度上,SOS 对昼夜气温的敏感性明显高于 EOS;累计效应上,8~10 月日间平均最高气温对 EOS 的影响呈显著负相关.

参考文献:

[1] IPCC, 2013: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group l to the fifth assessment report of the lntergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming [J]. Nature, 2008,451(7174):49-52.

[3] Bosch A, Schmidt K, He J S, et al. Potential CO_2 emissions from defrosting permafrost soils of the Qinghai-Tibet Plateau under different scenarios of climate change in 2050 and 2070 [J]. Catena, 2017,149:221-231.

[4] Zhang M R, Zhang F, Guo L Y, et al. Contributions of climate change and human activities to grassland degradation and improvement from 2001 to 2020 in Zhaosu County, China [J]. Journal of Environmental Management, 2023,348:119465.

[5] O'Mara F P. The role of grasslands in food security and climate change [J]. Annals of Botany, 2012,110(6):1263-1270.

[6] 袁沫汐,文佐时,何利杰,等.中国温带草地物候对气候变化的响应及其对总初级生产力的贡献 [J]. 生态学报, 2024,44(1):354-376.
Yuan M X, Wen Z S, He L J, et al. Response of temperate grassland phenology to climate change and its contribution to gross primary productivity in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1):354-376.

[7] 丁明军,张镱锂,刘林山,等.青藏高原植物返青期变化及其对气候变化的响应 [J]. 气候变化研究进展, 2011,7(5):317.
Ding M J, Zhang Y L, Liu L S, et al. Spatiotemporal changes of commencement of vegetation regreening andits response to climate change on Tibetan Plateau [J]. Climate Change Research, 2011,7(5): 317.

[8] Piao S L, Liu Q, Chen A P, et al. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges [J]. Global Change Biology, 2019,25(6):1922−1940.

[9] Cleland E E, Chuine I, Menzel A, et al. Shifting plant phenology in response to global change [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22(7):357−365.

[10] 程建刚,王学锋,龙　红,等.气候变化对云南主要行业的影响 [J]. 云南师范大学学报(哲学社会科学版), 2010,42(3):1−20.
Cheng J G, Wang X F, Long J, et al. The influence of weather changes on the key industries in yunnan [J]. Journal of Yunnan Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2010,42(3):1−20.

[11] 王风兰.蒙古国杭爱山植被返青期变化及其影响因素分析 [D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2023.
Wang F L. Analysis on the changes and influencing factors of start of growing season for vegetation in khangai mountain of mongolia [D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2023.

[12] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,169: 156−173.

[13] 协子昂,张　超,冯绍元,等.植被物候遥感监测研究进展 [J]. 遥感技术与应用, 2023,38(1):1−14.
Xie Z A, Zhang C, Feng S Y, et al. Reviews of methods for vegetation phenology monitoring from remote sensing data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023,38(1):1−14.

[14] 谢志英,朱文泉,付永硕.植被物候遥感监测关键问题 [J]. 遥感学报, 2024,28(9):2131−2143.
Xie Z Y, Zhu W Q, Fu Y S, et al. Key issues of remote sensing−based vegetation phenology monitoring [J]. Journal of Remote Sensing, 2024,28(9):2131−2143.

[15] 袁沫汐,赵　林,李鑫鑫,等.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，2023,43(14):6015−6032.
Yuan M X, Zhao L, Li X X, et al. Diverse responses of end of growing season to extreme climate eventsin different grasslands in temperate China during 1982~2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(14): 6015−6032.

[16] 花艺玮,孟　丹,胡非凡,等.城市化背景下京津冀地区遥感植被物候的变化特征 [J]. 应用生态学报, 2025,36(3):693−702.
Hua Y W, Meng D, Hu F F, et al. Changes of remote sensing vegetation phenology in Beijing−Tianjin Hebei region under the backgroundof urbanization [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(3):693−702.

[17] 张晓春,况梦柯,史良胜,等.基于多源遥感 NDVI 时序曲线特征的田区尺度冬小麦物候期提取 [J]. 农业工程学报, 2025,41(1):181−191.
Zhang X C, Kuang M K, Shi L S, et al. Extracting the phenological periods of winter wheat at field scale based onthe characteristics of NDVI time series curves from multisource remotesensing images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions ofthe CSAE), 2025,41(1):181−191.

[18] 王晴晴,高　燕,王　嵘.全球变化对食物网结构影响机制的研究进展 [J]. 植物生态学报, 2021,45(10):1064−1074.
Wang Q Q, Gao Y, Wang R, et al. Review on impacts of global change on food web structure [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(10):1064−1074.

[19] Renner S S, Zohner C M. Climate change and phenological mismatch in trophic interactions among plants, insects, and vertebrates [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2018,49(1): 165−182.

[20] 邓晨晖,白红英,高　山,等.1964~2015 年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应 [J]. 地理学报, 2018,73(5):917−931.
Deng C H, Bai H Y, Gao S, et al. Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qingling Mountains regon during 1964~2015 (in chinese). Acta Geogr sin, 2018,73:917−931.

[21] Shi C G, Sun G, Zhang H X, et al. Effects of warming on Chlorophyll degradation and carbohydrate accumulation of alpine herbaceous species during plant senescence on the Tibetan Plateau [J]. Plos One, 2014,9(9):e107874.

[22] Walker M D, Ingersoll R C, Webber P J. Effects of interannual climate variation on phenology and growth of two alpine forbs [J]. Ecology, 1995,76(4):1067−1083.

[23] Gill A L, Gallinat A S, Sanders-DeMott R, et al. Changes in autumn senescence in northern hemisphere deciduous trees: a meta−analysis of autumn phenology studies [J]. Annals of Botany, 2015,116(6):875−888.

[24] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982~2008: Phenology shifts at start vs. end of growing season [J]. Global Change Biology, 2011,17 (7):2385−2399.

[25] Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern [J]. Global Change Biology, 2006,12(10):1969−1976.

[26] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite‐derived phenology in China's temperate vegetation [J]. Global Change Biology, 2006,12(4):672−685.

[27] 梁　艳,干珠扎布,张伟娜,等.气候变化对中国草原生态系统影响研究综述 [J]. 中国农业科技导报, 2014,16(2):1−8.
Liang Y, Ganjurjav, Zhang W N, et al. A review on effect of climate change on grassland ecosystem in china [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014,16(2):1−8.

[28] 曹晓云,周秉荣,周华坤,等.气候变化对青藏高原植被生态系统的影响研究进展 [J]. 干旱气象, 2022,40(6):1068−1080.
Cao X Y, Zhou B R, Zhou H K, et al. Research progress on the impact of climate change on vegetation ecosystem in the Tibetan Plateau [J]. journal of Arid Meteorology, 2022,40(6):1068−1080.

[29] 刘建文,周玉科.站点尺度的青藏高原时序 NDVI 重构方法比较与应用 [J]. 地理科学进展, 2018,37(3):427−437.
Liu J W, Zhou Y K. Comparison and application of NDVItime−series reconstruction methods at site scale on the Tibetan Plateau [J]. Progress in Geography, 2018,37(3):427−437.

[30] 张　峰,周广胜,王玉辉.内蒙古克氏针茅草原植物物候及其与气候因子关系 [J]. 植物生态学报, 2008,(6):1312−1322.
Zhang F, Zhou G S, Wang Y H. Phenilogical calendar of *stipa krylovil* steppe ininner Mongolia, China and its correlation with climatic variables [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008,(6):1312−1322.

[31] Ren S L, Yi S H, Peichl M, et al. Diverse responses of vegetation

phenology to climate change in different grasslands in Inner Mongolia during 2000~2016 [J]. Remote Sensing, 2018,10(1):17.

[32] Ge Q S, Wang H J, Rutishauser T, et al. Phenological response to climate change in China: A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2015,21(1):265−274.

[33] Hovenden M J, Wills K E, Vander Schoor J K, et al. Flowering phenology in a species−rich temperate grassland is sensitive to warming but not elevated CO_2 [J]. New Phytologist, 2008,178(4): 815−822.

[34] Cleland E E, Chiariello R N, Loarie S R, et al. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006,103(37): 13740−13744.

[35] 宛敏谓,刘秀珍.中国物候观测方法 [M]. 北京:科学出版社, 1979.
Wan M W, Llu X Z. Chinese phenological observation method [M]. Beijing: Science Press, 1979.

[36] Zhu W Q, Mou M J, Wang L L, et al. Evaluation of phenology extracting methods from vegetation index time series [C]//2012IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2012:1158−1161.

[37] 郭 剑,陈 实,徐 斌,等.基于 SPOT−VGT 数据的锡林郭勒盟草原返青期遥感监测 [J]. 地理研究, 2017,36(1):37−48.
Guo J, Chen S, Xu B, et al. Remote sensing monitoring of grassland vegetation greenup based on SPOT−VGT in Xilingol League [J]. Geographical Research, 2017,36(1):37−48.

[38] 范 瑛,李小雁,李广泳.基于遥感数据的内蒙古草原灌丛物候变化研究 [J]. 干旱气象, 2014,32(6):902−908.
Fan Y, Li X Y, Li G Y. Variation characteristics of shrub phenologyd in grassland of Inner Mongolia based on MODlS [J]. Journal of Arid Meteorology, 2014,32(6):902−908.

[39] 孙秀云,刘海新,赵玉玲,等.锡林郭勒盟草地物候期的时空演变及其对气候的响应 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019,36(2): 79−82.
Sun X Y, Liu H X, Zhao Y l, et al. Spatio−temporal evolution of grassland phenology and its response to meteorological factors in Xilin Gol league [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural science Edition), 2019,36(2):79−82.

[40] 袁艳峰,胡永红,王鹤松,等.高温热浪对北欧极地植被生产力的影响 [J]. 生态环境学报, 2025,34(6):831−844.
Yuan Y F, Hu Y H, Wang H S, et al. Impact of heat waves on vegetation productivity in northern europe [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(6):831−844.

[41] 乌日汗,红 雨,包 刚.2001~2016 年内蒙古植被物候变化及其对生产力的影响 [J]. 草地学报, 2019,27(6):1685−1693.
Wu R H, Hong Y, Bao G. The change of vegetation phenology and its impacts on vegetation productivity in lnner Mongolia during 2001~2016 [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019,27(6):1685−1693.

[42] 邵亚婷,王卷乐.内蒙古植被物候数据集(2001~2020 年) [J]. 中国科学数据, 2023,8(1):44−52.
Shao Y T, Wang J L. A dataset of vegetation phenology of Inner Mongolia (2001~2020) [J]. China Scientific Data, 2023,8(1):44−52.

[43] 王凯锋,包 刚,元志辉,等.内蒙古植被春季返青期和秋季枯黄期的气候敏感性研究 [J]. 草业学报, 2023,32(4):30−41.
Wang K F, Bao G, Yuan Z H, et al. Climate sensivity of the start of the growing season in spring and the end of the growing season in autumn for vegetation in Inner Mongolia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(4):30−41.

[44] 李 净,刘红兵,李彩云,等.基于 GIMMS 3g NDVI 的近 30 年中国北部植被生长季始期变化研究 [J]. 地理科学, 2017,37(4):620−629.
Liu H B, Li C Y, et al. Changes of green−up day of vegetation growing season based on GlMlS 3g NDVl in northern chinain recentg NDVl in northern China in recent 30 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(4):620−629.

[45] 李慧敏,魏江生,张 勇,等.土壤水分和水汽压亏缺对大兴安岭南段白桦林分蒸腾主导作用研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2025,39(6): 166−174.
Li H M, Wel J S, Zhang Y, et al. Predominant influence of soil moisture and vapor pressure deficit on the transpiration dynamics of Betula platyphylla stands in the southern region of the Greater Khingan Mountains [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025,39(6):166−174.

[46] 李 君,徐巾喻,石松林,等.气候变化对濒危植物长叶云杉径向生长的影响 [J]. 生态学报, 2025,45(14):6808−6821.
Li J, Xu J Y, Shi S L, et al. Effects of climate change on the radial growth of the endangered longleaf spruce [J]. Journal of Ecology, 2025,45(14):6808−6821.

[47] 王澄海,冯 祥.土壤温、湿度调控土壤呼吸过程的参数化进展及趋势 [J]. 中国科学:地球科学, 2025,55(6):1817−1836.
Wang C H, Feng X. Progress and perspective in parameterizing soil respiration responses to temperature and moisture [J]. Science China Earth Sciences, 2025,55(6):1817−1836.

[48] 陈 硕,赵文武,韩 逸.中国干旱半干旱区植被降水利用效率时空变化特征及影响因素分析 [J]. 生态学报, 2023,43(24):10295−10307.
Chen S, Zhao W W, Han Y. Spatio−temporal variation of vegetation precipitation use efficiency and influencing factors in arid and semi−arid areas of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(24): 10295−10307.

[49] 顾文杰,周广胜,吕晓敏,等.克氏针茅物候对气候变暖和水分变化的响应及其光合生理生态机制 [J]. 生态学报, 2022,42(20):8322−8330.
Gu W J, Zhou G S, Lv X M, et al. Photosynthetically ecophysiological mechanism of *stipa krylovil* phenology in response to climatic warming and precipitation alterationy [J]. Acta Ecologica sinica, 2022,42(20):8322−8330.

[50] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,209−210:87−99.

[51] Cochard H, Coll L, Le Roux X, et al. Unraveling the effects of plant hydraulics on stomatal closure during water stress in walnut.[J]. Plant Physiology, 2002,128(1):282−290.

作者简介：王 进(1997−),男,贵州纳雍人,研究实习员,硕士研究生,主要从事植被物候遥感监测.发表论文 4 篇.awan2022@163.com.