

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.013

CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.013

周鑫蓉,牛全福,朱登峰,等.甘肃黄土高原区植被物候变化及影响因素[J].水土保持学报,2025,39(4):118-128,138.

ZHOU Xinrong, NIU Quanfu, ZHU Dengfeng, et al. Analysis of vegetation phenological changes and influencing factors in the Loess Plateau region of Gansu Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):118-128,138.

甘肃黄土高原区植被物候变化及影响因素

周鑫蓉¹, 牛全福^{1,2,3}, 朱登峰¹, 邵东虎¹, 程西安¹

(1.兰州理工大学土木工程学院,兰州 730050; 2.甘肃省应急测绘工程研究中心,兰州 730050;

3.甘肃大禹九州空间信息科技有限公司院士专家工作站,兰州 730000)

摘要: [目的] 为研究甘肃黄土高原地区植被物候,即植被生长和发育的季节性变化,深入了解气候变化如何影响该地区的植被生长规律。[方法] 基于2002—2021年的MODIS NDVI数据集、气象数据、数字高程模型(DEM)及标准化降水蒸散指数(SPEI)数据,提取甘肃黄土高原区植被生长季始期(SOS)、植被生长季末期(EOS)、植被生长季长度(LOS),采用Theil-Sen趋势分析法和Mann-Kendall检验法探究黄土高原植被SOS、EOS和LOS的时空动态变化情况,采用偏相关分析法研究植被物候变化与气温、降水、干旱和地形的关系,基于Hurst指数和随机森林回归模型预测未来甘肃黄土高原区植被物候变化。[结果] 1)甘肃黄土高原区植被SOS集中在第81~138 d,变化速率为 -4.5 d/10 a;EOS集中在第266~305 d,变化速率为 -0.4 d/10 a;LOS集中在131~218 d,变化速率为 2.6 d/10 a。2)研究期温度与植被SOS(90%)、EOS(54%)呈正相关,与LOS呈负相关;降水与植被SOS(85%)呈正相关,与植被EOS(57%)、LOS呈负相关;陇西黄土高原西部植被SOS变化和天水南部植被EOS与干旱呈显著负相关,兰州、临夏及定西等部分地区植被LOS与干旱呈显著正相关。3)未来甘肃黄土高原植被物候南部地区SOS提前,EOS推迟,LOS延长;北部地区SOS推迟,EOS提前,LOS缩短。[结论] 2002—2021年,研究区由于气象等因素的显著影响,整个甘肃黄土高原地区植被的生长周期有效延长,改善当地生态环境,促进生态系统稳定和可持续发展,未来应继续加强生态环境保护力度,推动生态修复和治理工作深入开展,为甘肃黄土高原地区的生态文明建设作出更大贡献。

关键词: 甘肃黄土高原; 植被物候; 气象; 标准化降水蒸散指数; 预测

中图分类号: TP751.1; P2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0118-11

Analysis of Vegetation Phenological Changes and Influencing Factors in the Loess Plateau Region of Gansu Province

ZHOU Xinrong¹, NIU Quanfu^{1,2,3}, ZHU Dengfeng¹, SHAO Donghu¹, CHENG Xi'an¹

(1.School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2.Emergency Mapping Engineering Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 3.Academician Expert Workstation of Gansu Dayu Jiuzhou Space Information Technology Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the phenology of vegetation, i.e., the seasonal changes in the growth and development of vegetation in the Loess Plateau region of Gansu Province, and to gain a deeper understanding of how climate change affects the growth patterns of vegetation in this area. [Methods] Based on MODIS NDVI datasets, meteorological data, digital elevation models (DEM), and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) data from 2002 to 2021, the start of the growing season (SOS), end of the growing season (EOS), and length of the growing season (LOS) of vegetation in the Loess Plateau region of Gansu Province were extracted. Theil-Sen trend analysis and Mann-Kendall tests were used to explore the spatiotemporal dynamics of SOS, EOS and LOS. Partial correlation analysis was employed to investigate the

收稿日期: 2024-12-20

修回日期: 2025-03-31

录用日期: 2025-04-11

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(42261069)

第一作者: 周鑫蓉(2001—),女,硕士研究生,主要从事环境遥感研究。E-mail: zhou-0107@foxmail.com

通信作者: 牛全福(1973—),男,教授,博士,主要从事环境遥感研究。E-mail: Niufq@lut.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

relationships between vegetation phenology and temperature, precipitation, drought, and topography. The Hurst index and random forest regression model were utilized to predict future changes in vegetation phenology in the Loess Plateau region of Gansu. [Results] 1) The SOS of vegetation in the Loess Plateau region of Gansu was concentrated between day 81 to 138, with a change rate of -4.5 d/10 a; the EOS was concentrated around day 266 to 305, with a change rate of -0.4 d/10 a; and the LOS was concentrated around 131 to 218 days, with change rate of 2.6 d/10 a. 2) During the study period, temperature was positively correlated with SOS (90%) and EOS (54%), and negatively correlated with LOS. Precipitation was positively correlated with SOS (85%), and negatively correlated with EOS (57%) and LOS. SOS in the western part of the Longxi Loess Plateau and EOS in the southern part of Tianshui were significantly negatively correlated with drought, while LOS in some areas such as Lanzhou, Linxia and Dingxi was significantly positively correlated with drought. 3) In the future, in the southern part of the Loess Plateau region of Gansu, SOS is expected to advance, EOS is expected to delay, and LOS is expected to extend; in the northern part, SOS is expected to delay, EOS is expected to advance, and LOS is expected to shorten. [Conclusion] From 2002 to 2021, due to significant influences of meteorological factors, the growth cycle of vegetation in the Loess Plateau region of Gansu has effectively lengthened, and has improved the local ecological environment and promoted the stability and sustainable development of the ecosystem. In the future, efforts should be made to further strengthen ecological environment protection, promote in-depth ecological restoration and governance, and make greater contributions to the construction of ecological civilization in the Loess Plateau region of Gansu.

Keywords: Gansu Loess Plateau; vegetation phenology; meteorology; standardized precipitation evaporation index; forecast the future

Received: 2024-12-20

Revised: 2025-03-31

Accepted: 2025-04-11

Online(www.cnki.net): 2025-05-21

植被物候作为“全球气候变化指示器”,在全球生态系统研究中起着重要的作用^[1]。植被物候是植物在生长过程中,特定的时间段内发生的季节性生物学事件,一般定义为生长季开始阶段(start of the season, SOS)和结束阶段(end of the season, EOS),通过获取区域植被物候生长季长度(length of the season, LOS)^[2]及其对气候变化的响应特征来研究生态系统的变化^[3]。植物的开花、叶片生长与凋落等物候现象与气候密切相关。物候变化不仅影响碳储存、水循环等生态系统服务,更是生态系统稳定性与恢复力的直接反映。因此,长期进行植被物候监测,捕捉植被物候变化的影响因素及作用机制,对生态环境监测与保护、资源管理与利用及科学研究等具有重要的意义^[4]。

传统的依靠人工观察和记录来进行的植被物候监测,其观测范围有限、时效性差、不经济。随着遥感数据的广泛应用,使得大尺度、长期连续的植被物候监测更加便捷^[5]。现阶段,植被物候的提取基于不同的数据源有不同的提取方法,李强等^[6]基于1998—2012年的SPOT NDVI数据结合谐波分析法、线性趋势等方法发现,黄土高原区植被物候SOS平均每年提前0.9 d, EOS平均每年推迟约0.8 d。在SOS

提前和EOS推迟的作用下,生长季长度平均每年延长1.7 d;赵丽蓉^[7]基于MOD13C1数据采用NDVI的Logistic曲线曲率极值法和动态阈值等方法发现,2001—2020年,中国北方植被SOS在第93~166 d波动,植被EOS主要出现在第256~295 d,植被LOS为137~241 d。植被物候对气候因素和非气候因素的变化极为敏感^[7];季舒平^[8]基于GIMMS NDVI数据发现,频发的季前干旱可能推迟华北平原区植被春季物候开始的时间,小麦的SOS对季前干旱的抵抗力最强,其次是其他农作物、森林和草地;吉珍霞等基于MODIS NDVI发现,黄土高原当年春季降水增加,当年春季、上年秋季和年初冬季的温度升高均导致植被SOS提前;EOS与当年秋季温度呈正相关性,即植被EOS受当年秋季温度影响推迟。以往研究^[7-9]大多聚焦于整个黄土高原的生态环境特征,而对位于黄土高原西南部甘肃省一带的研究相对较少。随着全球气候变化的加剧,甘肃黄土高原的降水和气温模式也在发生变化,降水和气温变化直接影响农作物的生长发育^[10];甘肃黄土高原地区近年来面临着水土流失、土地荒漠化等严重的生态问题,研究植被物候对气温和降水因素的响应,可评估气候变化对甘肃黄土高原生态系统的影

响程度;有助于减缓气候变化对生态系统的负面影响,保护生态系统的健康和稳定^[11]。在此背景下,遥感技术在监测甘肃地区植被物候变化及其影响因素方面具有不可替代的重要作用。遥感技术可提供大范围、长时间序列的植被覆盖数据,能够有效监测植被的生长周期、覆盖度变化及生态环境的动态演变^[5]。通过分析遥感数据,可更准确地评估气候变化、人类活动对甘肃地区生态环境的影响,为制定科学合理的生态保护和修复措施提供依据。

本研究以甘肃黄土高原区作为研究对象,基于2002—2021年MODIS NDVI数据和Savitzky-Golay (S-G)滤波法提取植被物候参数,研究甘肃黄土高原区植被物候2002—2021年的时空变化特征,揭示其对不同影响因素的响应及差异,与以往对于黄土高原等地区植被物候研究不同的是,本次研究将基于未来气象数据,预测甘肃黄土高原区植被物候期的变化趋势,为提高研究区植被固碳能力及促进生态环境建设等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃黄土高原区位于中国黄土高原的西南边缘,以六盘山为界分为陇东黄土高原和陇西黄土高原两大部分,面积约11.3万km²,占黄土高原总面积的18%。该区地势西北高、东南低,整体海拔为794~4286m(图1a)。区内气候属于暖温带大陆性季风气候,冬季严寒、夏季暖热,年平均气温为6~10℃。年降水量稀少,主要集中在夏季,但蒸发量普遍高于实际降水量,植被分布较稀疏,植被类型包括阔叶林、针叶林、栽培植被、灌丛、草丛、草原、草甸和荒漠等^[12](图1b)。

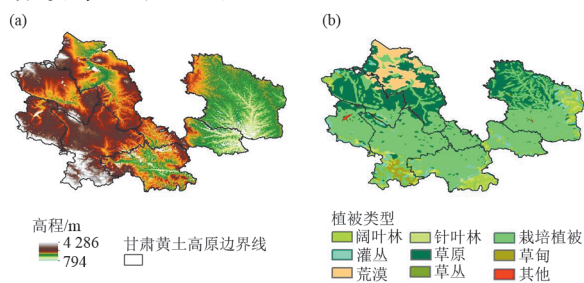


图1 研究区位置

Fig. 1 Map of the study area

1.2 数据源与预处理

本研究所用数据主要包括NDVI数据、气象、地形、植被类型及干旱等数据。其中,NDVI数据采用MOD13A2数据集,下载自google earth engine(GEE)遥感云平台(<https://code.earthengine.google.com/>),

用于研究区植被物候参数的提取;植被类型数据来源于《1:100万中国植被图集》^[12](<https://www.plantplus.cn/doi/10.12282/plantdata.0155>),用于分析研究区不同植被类型物候参数变化情况;气象数据来源于《中国1km分辨率逐月平均气温数据集(1901—2021)》^[13]和《中国1km分辨率逐月降水量数据集(1901—2021)》^[14](<https://poles.tpdac.ac.cn/>),主要用于植被物候参数的相关性分析;未来气象数据来源于《2021—2100年中国1km分辨率多情景多模式逐月降水量数据集》^[15]和《2021—2100年中国1km分辨率多情景多模式逐月平均气温数据集》^[16](<https://data.tpdac.ac.cn>),地形数据采用全国DEM高程空间分布数据(<http://www.resdc.cn>),干旱数据利用《2001—2020年中国1km分辨率多时间尺度SPEI数据集》^[17](<https://blog.csdn.net>),用于预测研究区未来植被物候变化趋势。以上数据的研究时间皆选取2002—2021年,空间分辨率为1km,利用ArcGIS软件对气象数据、DEM和SPEI数据统一投影到WGS84,并进行配准、裁剪等预处理,在Pycharm平台运用相关算法进行物候与影响因子的响应性分析,并构建物候参数回归预测模型。

1.3 研究方法

1.3.1 植被物候参数的提取

1) 数据平滑与拟合

本研究采用Savitzky-Golay (S-G)滤波器对MODIS NDVI时间序列数据进行重建。S-G滤波器公式为:

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

式中: Y_j^* 为滤波后的NDVI值; C_i 为S-G滤波器的滤波系数,即平滑窗口,本研究选取滤波平滑窗口为3; m 为平滑窗口的半宽; Y_{j+i} 为原始的NDVI值^[18]。

2) 物候参数提取

本文采用由JONSSON等^[19]动态阈值法提取植被物候期,即像元尺度上设定不同的NDVI阈值来获得每个像元的植被SOS和植被EOS,对于不同的研究区阈值的设定不同。本文将NDVI增长达到当年DNVI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,最终得到2002—2021年的物候数据。

1.3.2 Theil-Sen斜率与Mann-Kendall检验 Theil-Sen斜率(T-S)是一种基于成对点的所有线的斜率的中值的非参数趋势计算方法,能够有效避免离群值

的影响^[3]。其计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) (\forall j > i) \quad (2)$$

式中: β 为斜率;Median为取中值; i 和 j 为年份; x_j 和 x_i 为植被物候时间序列数据。若 $\beta > 0$,则表明为增加趋势,反之为减少趋势^[3]。

Mann-Kendall 检验(M-K)是一种非参数的时间序列趋势性检验方法^[20],适用于长时间序列数据的趋势显著检验。使用检验统计量 Z 进行趋势检验^[21],计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{s}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: Z 为检验统计量;VAR为方程计算; n 为植被物候序列中数据个数; x_j 和 x_i 为植被物候时间序列数据; S 为所有成对差异的总和;sgn为符号函数。本研究采用 Theil-Sen 斜率对 SOS、EOS、LOS 进行逐像元的趋势估计,并对趋势进行 M-K 检验(置信水平设置为 95%),即若 $T-S > 0, p < 0.05$,则为显著推迟或延长; $T-S > 0, p > 0.05$,则为不显著推迟或延长; $T-S < 0, p < 0.05$,则为显著提前或缩短; $T-S < 0, p > 0.05$,则为不显著提前或缩短^[3]。

1.3.3 稳定性和持续性分析 物候变化的稳定性通过变异系数(CV)进行衡量^[3],其计算公式为:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Phe}_i - \overline{\text{Phe}})^2}{n-1}}}{\overline{\text{Phe}}} \quad (6)$$

式中:CV为变异系数; Phe_i 为第 i 年的SOS(EOS或LOS); $\overline{\text{Phe}}$ 为2002—2021年的SOS(EOS或LOS)平均值; n 为研究时段长度^[3]。本研究将CV等间距划分为5个等级^[3], $CV \leq 0.05$ 为低波动状态; $0.05 < CV \leq 0.10$ 为较低波动状态; $0.10 < CV \leq 0.15$ 为中等波动状态; $0.15 < CV \leq 0.20$ 为较高波动状态; $CV > 0.20$ 为高波动状态。其中,CV为0~0.15为相对稳定状态,高于0.15则定义为不稳定状态,并与植被物候的显著变化趋势进行叠加和统计分析。

通过估算 Hurst 指数进行植被物候变化的持续性分析。该指数(H)取值为 $0 < H < 1$,当 $0.5 < H <$

1时,表明时间序列将继续保持过去趋势,在未来具有持续性,并且当 H 越接近1则持续性越强;反之, $0 < H < 0.5$ 时,表明时间序列与过去的趋势相反,在未来具有反持续性;当 $H=0.5$ 时,则表明时间序列未来变化不可预测^[3,21]。植被物候时间序列为 $A_i, i=1, 2, \dots, n$ 对于任意整数 m ,定义该时间序列^[21]。

差分序列:

$$\Delta A_i = \Delta A_i - \Delta A_{i-1} \quad (7)$$

均值序列:

$$\overline{\Delta A} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta A_i \quad m=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

累计离差:

$$X(t) = \sum_{i=1}^m (\Delta A_i - \overline{\Delta A(m)}) \quad 1 \leq t \leq m \quad (9)$$

极差:

$$R(m) = \max X(t)_{1 \leq m \leq n} - \min X(t)_{1 \leq m \leq n} \quad (10)$$

标准差:

$$S(m) = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\Delta A_i - \overline{\Delta A(m)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

对于比值 $R(m)/S(m) \cong R/S$,若存在关系 $R/S \propto m^H$,即说明分析的植被物候时间序列存在 H 现象,在双对数坐标系($\ln i, \ln R/S$)中用最小二乘法拟合式得到。

1.3.4 偏相关性分析 偏相关分析是在多要素构成的自然系统中,控制其他变量不变,衡量某2个变量间线性关系的密切程度,以偏相关系数来度量^[22]。偏相关计算公式为:

$$r_{xy \times z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} \times r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (12)$$

式中: $r_{xy \times z}$ 为变量 Z 固定后变量 x 和 y 的偏相关系数,即 xy 相关中剔除 z 的影响; r_{xy} 为变量 x 与变量 y 的相关系数; r_{xz} 为变量 x 与变量 z 的相关系数; r_{yz} 为变量 y 与变量 z 的相关系数^[23]。

本研究采用偏相关分析气象等影响因子与植被物候期的关系,剔除其他因子的影响。通过 t 检验方法完成偏相关系数的显著性检验^[22],计算公式为:

$$t = \frac{r_{xy \times z}}{\sqrt{1 - r_{xy \times z}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (13)$$

式中: n 为总年数; m 为自变量个数。

1.3.5 随机森林回归预测 基于随机森林算法的数据回归预测是一种集成的学习方法,通过构建多个决策树并将其预测结果通过集成来进行回归任务^[24]。此研究中,划分训练集与验证集的比为8:2,通过气温和降水与2002—2021年的植被物候期建立

回归预测模型,并借助未来气温和降水数据模拟未来物候期。采取 R^2 对预测模型进行评估,取值为 0~1,越接近 1 表示模型的解释能力越强,本研究构建的 SOS 预测模型为 0.900,EOS 预测模型为 0.901,预测模型效果 LOS 预测值由 EOS 减去 SOS 可得。基本公式为:

$$D^{(b)}=\{(x_i,y_i)|i\in S_b\}$$
 (14)

式中: $D^{(b)}$ 为第 b 个子数据集; S_b 为第 b 个子数据集的样本索引集合; (x_i,y_i) 为第 i 个样本的特征 x_i 和对应的真实值 y_i 。

$$\text{SplitFeature}=\operatorname{argmin}_{j\in\text{RandomSubset}}\sum_{i=1}^m(y_i-\hat{y}_i)^2$$
 (15)

式中:RandomSubse 为随机选择的一部分特征,符合随机森林的特征随机选择策略; j 为特征索引; m 为当前节点中的样本数; y_i 为第 i 个样本的真实值; $\hat{y}_i$ 为根据特征 j 进行分裂后的预测值。该公式用于决策树生长过程中选择最优分裂特征。

$$\hat{y}=\frac{1}{B}\sum_{b=1}^B\hat{y}^{(b)}(x)$$
 (16)

式中: $\hat{y}$ 为输入样本 x 的最终预测值; B 为决策树的数量; $\hat{y}^{(b)}(x)$ 为第 b 棵树的预测值。

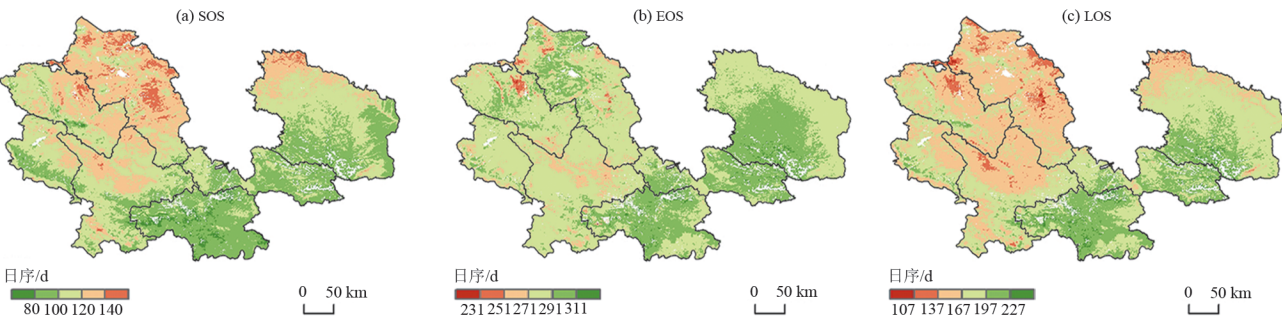


图2 甘肃黄土高原区 2002—2021 年植被物候平均值分布

Fig. 2 Distribution of mean vegetation phenology in the Loess Plateau region of Gansu Province from 2002 to 2021

2.1.2 植被物候时间变化特征 由表 1 可知,2002—2021 年甘肃黄土高原区植被物候期 SOS 以 4.5 d/10 a 速率逐年提前($p<0.05$);EOS 以 0.4 d/10 a 速率逐年提前($p<0.05$);LOS 以 2.6 d/10 a 速率逐年延长($p<0.05$)。不同植被分区的变化趋势同样存在差异性,就 SOS 变化来看,9 个植被分区 SOS 提前变化速率由大到小依次为草甸(10.0 d/10 a)>灌丛(8.1 d/10 a)>阔叶林(7.9 d/10 a)>针叶林(7.7 d/10 a)>草丛(7.5 d/10 a)>草原(7.3 d/10 a)>其他(4.7 d/10 a)>栽培植被(2.6 d/10 a)>荒漠(−1.4 d/10 a),可见,草甸、灌丛、阔叶林、针叶林、草丛和草原的 SOS 提前较为明显,其他植被和栽培植被的 SOS 提前缓慢,而荒漠的 SOS 处于推迟状态。

2 结果与分析

2.1 甘肃黄土高原区植被物候时空特征

2.1.1 植被物候空间分布特征 甘肃黄土高原区植被物候 SOS、EOS、LOS 的平均值空间分布采用相等间隔法^[25]进行分类(图 2)。SOS 在空间分布上由西北向东南呈“晚—早”特征,主要发生在每年的第 81~138 d(占整体像元 95%)。统计发现,研究区仅 2% 的区域植被物候 SOS 发生在每年的第 61~80 d,主要分布于研究区的南部;95% 的区域植被物候 SOS 发生于第 80~140 d;有 3% 的区域植被物候 SOS 发生在每年第 140~163 d,主要分布于研究区的北部,该区域以荒漠为主。EOS 在空间分布上由西北向东南方向呈“早—晚—早”的特征,发生在每年的第 266~305 d(占整体像元 95%)。统计发现,研究区大部分区域的植被物候 EOS 发生在每年的第 271~291 d,主要分布于研究区的北部和南部的大部分地区,占研究区总面积的 63%。受研究区 SOS、EOS 较大空间差异影响,LOS 呈强空间异质特征。在空间分布上,LOS 由西北向东南呈“短—长”特征,生长季长度为 131~218 d,其中,约 78% 的植被区域生长季长度处于 137~197 d,主要分布于研究区南部的天水、平凉和庆阳南部的广大区域。

表 1 2002—2021 不同植被类型物候的年均变化趋势

vegetation types		d/a		
植被类型	SOS	EOS	LOS	
甘肃黄土高原区	−0.451 2	−0.041 8	0.255 5	
草 丛	−0.751 5	−0.310 0	0.340 0	
草 甸	−1.002 1	0.621 0	1.639 0	
草 原	−0.735 3	−0.007 2	0.500 9	
灌 丛	−0.811 1	0.008 0	0.720 0	
荒 漠	0.145 4	−0.338 0	−0.086 8	
阔 叶 林	−0.791 7	0.128 5	0.840 0	
栽培植被	−0.267 5	−0.105 2	0.074 1	
针 叶 林	−0.776 1	0.135 0	0.842 7	
其 他	−0.472 3	−0.546 0	−0.249 0	

不同植被分区的EOS出现两极化,从草甸、针叶林、阔叶林及灌丛来看,其EOS明显推迟,推迟速率由大到小为草甸(6.2 d/10 a)>针叶林(1.3 d/10 a)>阔叶林(1.2 d/10 a)>灌丛(0.08 d/10 a);而其他植被类型的EOS提前,提前速率由大到小为其他植被(5.5 d/10 a)>荒漠植被(3.4 d/10 a)>草丛(3.1 d/10 a)>栽培植被(1.0 d/10 a)>草原(0.07 d/10 a)。

综上,SOS和EOS的变化趋势中,9个植被分区的LOS除荒漠和其他植被的LOS缩短外,其他7个植被区域均显著延长。LOS延长速率由大到小为草甸(16.3 d/10 a)>阔叶林(8.4 d/10 a)=针叶林(8.4 d/10 a)>灌丛(7.2 d/10 a)>草原(5.0 d/10 a)>草丛(3.4 d/10 a)>栽培植被(0.7 d/10 a);而荒漠植被较其他植被的LOS缩短速率较慢,即其他(2.4 d/10 a)>荒漠(0.8 d/10 a)。

2.1.3 植被物候的空间变化特征分析 基于Theil-Sen与Mann-Kendall,本研究模拟甘肃黄土高原区2002—2021年植被SOS、EOS和LOS的空间演变特征,并统计植被物候变化的面积(图3、表2)。研究区29%的区域植被物候SOS提前,其中SOS呈不显著提前的区域占比为25%,主要集中在研究区中部和西北部,植被类型为温带丛生禾草典型草原、温带落叶林及农作物种植区;71%的区域植被物候SOS在推迟,其中SOS呈不显著推迟的区域占比为61%,主要在庆阳北部及定西与白银交界处,植被类型为温带丛生禾草典型草原及温带丛生矮禾草、矮半灌木荒漠草原(图3);63%的区域植被物候EOS在推迟,其中EOS呈不显著推迟的区域占比为50%,主要集中在研究区中东部和西北部,植被类型为温带丛生矮禾草和温带禾草和杂类草草甸草原;37%的区域植被物候EOS在提前,其中EOS呈不显著提前的区域占比为31%,主要集中在定西南部及与兰州、白银交界处,植被类型为温带半灌木和矮半灌木荒漠;60%的区域植被物候LOS在缩短,其中LOS呈不显著缩短的区域占比为52%,主要集中在研究区东北部及西部地区,植被类型为温带落叶阔叶林、温带落叶灌丛及农作物种植区;40%的区域植被物候LOS在延长,其中LOS呈不显著延长的区域占比为33%,主要集中在天水中北部、平凉北部及与庆阳的交界处,植被类型为亚热带落叶阔叶林和温带草丛。

2.1.4 植被物候变化稳定性和持续性分析 由图4、表3可以看出,甘肃黄土高原植被SOS大部分区域呈不稳定状态,面积占比为65%。其中,不稳定

且显著提前和不显著提前趋势的区域面积占比为21%,主要位于白银南部和庆阳北部,植被类型为温带丛生禾草典型草原;不稳定且显著推迟和不显著推迟趋势的区域面积占比为43%,主要位于兰州、白银和庆阳部分区域,植被类型为温带丛生矮禾草和农业种植区。

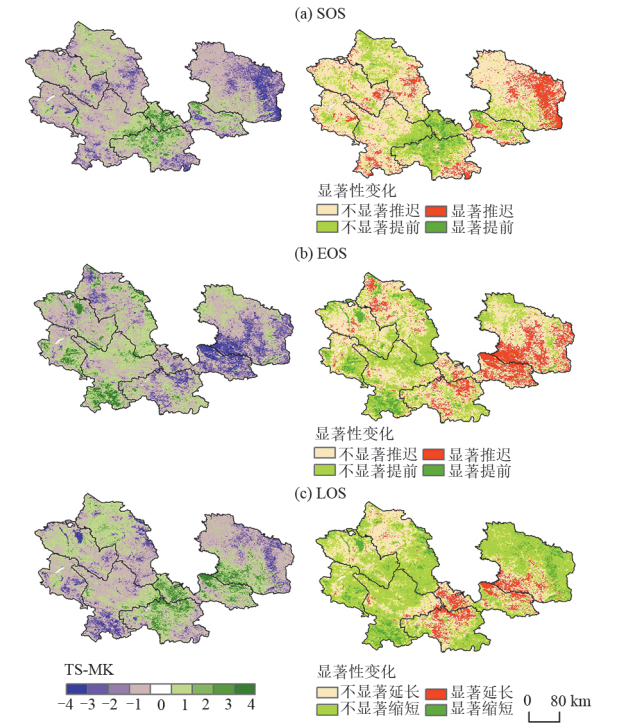


图3 甘肃黄土高原区2002—2021年植被空间格局及物候显著性变化分布

Fig. 3 Distribution of spatial pattern and significant changes in vegetation phenology in the Loess Plateau region of Gansu Province from 2002 to 2021

表2 甘肃黄土高原区不同物候期显著性变化面积占比
Table 2 Proportion of areas with significant changes during different phenological periods in the Loess Plateau region of Gansu Province

显著性等级	SOS	EOS	LOS	%
不显著推迟/延长	61	50	33	
显著推迟/延长	10	13	7	
显著提前/缩短	4	6	8	
不显著提前/缩短	25	31	52	

EOS的变化相对较稳定,稳定区域面积占比高达99%。其中,稳定且显著推迟和不显著推迟趋势的区域面积占比为63%,主要位于研究区的西北部,植被类型为温带丛生禾草典型草原;稳定且显著提前和不显著提前趋势的区域面积占比为36%,主要位于定西和白银南部,植被类型为温带丛生矮禾草等。从LOS来看,主要以显著延长趋势为主,其中,稳定且显著延长和不显著延长趋势的区域面

积占比为 37%，植被类型主要为研究区南部的农业种植区；不稳定且显著延长和不显著延长趋势的区域面积占比为 26%，主要位于研究区北部，植被类型为温带丛生禾草典型草原、农业种植区及温带半灌木植被。

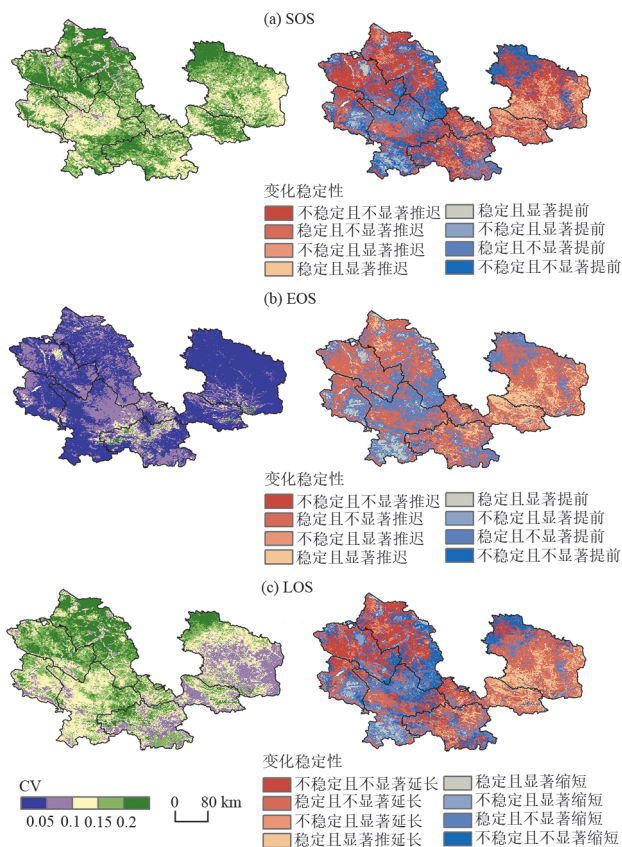


图 4 甘肃黄土高原区 2002—2021 年植被物候波动及变异性系数空间分布

Fig. 4 Distribution of vegetation phenological and spatial variability coefficient in the Loess Plateau region of Gansu Province from 2002 to 2021

表 3 甘肃黄土高原区植被物候变化稳定性面积占比
Table 3 Proportion of areas with stable changes in vegetation phenology in the Loess Plateau region of Gansu Province

变化稳定性等级划分	SOS	EOS	LOS
不稳定且不显著推迟/延长	35	0	23
稳定且不显著推迟/延长	15	50	28
不稳定且显著推迟/延长	8	0	3
稳定且显著推迟/延长	5	13	9
稳定且显著提前/缩短	3	5	3
不稳定且显著提前/缩短	3	0	3
稳定且不显著提前/缩短	12	31	15
不稳定且不显著提前/缩短	19	1	16

由图 5、表 4 可以得到，从 SOS 来看，研究区反持续变化的面积为 49%。其中，显著推迟和不显著推

迟且反持续变化的面积占比为 35%，主要分布研究区北部，植被类型为温带丛生矮禾草、矮半灌木荒漠草原和温带丛生禾草典型草原；显著提前和不显著提前且反持续趋势的区域面积占比为 14%，主要分布在定西、天水和平凉交界处，植被类型为温带落叶阔叶林、温带落叶灌木及亚热带针叶林；其他区域以持续性变化为主。从 EOS 来看，研究区内呈反持续变化的面积占比为 72%，其中，显著推迟和不显著推迟且反持续变化的面积占比为 44%，主要分布在陇东地区，植被类型为温带丛生禾草典型草原；显著提前和不显著提前且反持续趋势的区域面积占比为 28%，主要集中于定西西南部，植被类型为温带禾草、杂类草草甸；从 LOS 来看，研究区内呈反持续变化的面积占比为 50%，其中，显著延长和不显著延长且反持续趋势的区域面积占比为 19%，主要分布在白银北部，植被类型为温带半灌木、矮半灌木荒漠和温带多汁盐生矮半灌木荒漠；显著缩短和不显著缩短且反持续趋势的区域面积占比为 31%，主要分布在研究区中部，植被类型为温带丛生矮禾草、矮半灌木荒漠草原。

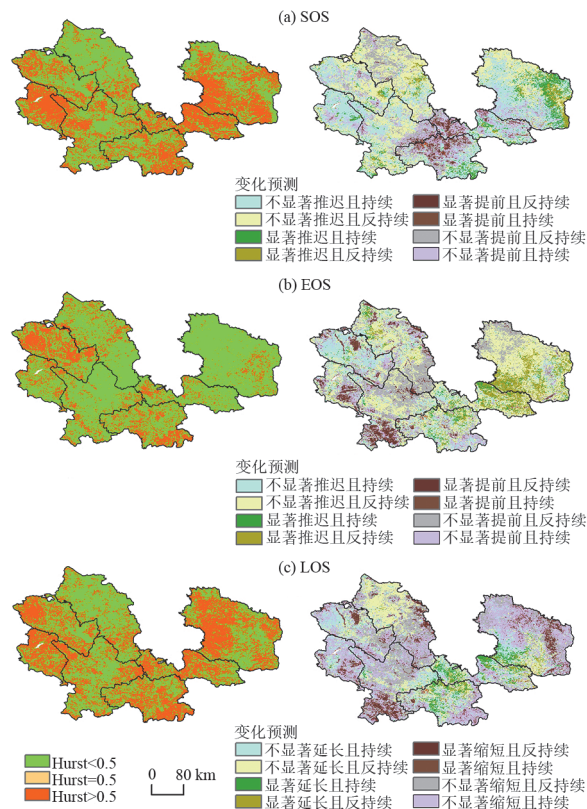


图 5 甘肃黄土高原区 2002—2021 年 Hurst 指数及未来趋势空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Hurst index and future trend in the Loess Plateau region of Gansu Province from 2002 to 2021

表 4 甘肃黄土高原区植被物候持续性变化面积统计
Table 4 Proportion of areas with persistent changes in vegetation phenology in the Loess Plateau region of Gansu Province %

Hurst 变化预测等级划分	SOS	EOS	LOS
不显著推迟/延长且持续	31	15	16
不显著推迟/延长且反持续	30	35	17
显著推迟/延长且持续	6	3	4
显著推迟/延长且反持续	5	9	2
显著提前/缩短且反持续	2	4	5
显著提前/缩短且持续	3	2	4
不显著提前/缩短且反持续	12	24	26
不显著提前/缩短且持续	13	8	26

2.2 甘肃黄土高原区植被物候变化影响因素分析

2.2.1 植被物候变化与气温和降水的关系 图 6 为甘肃黄土高原区 2002—2021 年植被物候变化与气候因子的偏相关空间分布。统计发现,研究期间温度与 SOS 变化趋势呈正相关,面积占比约为 90%,其中,显著正相关区域主要位于研究区的中部和北部;与 EOS 正相关区域面积占比为 54%,显著正相关区域主要位于白银北部和定西的南部;综合 SOS 和 EOS,LOS 与温度呈负相关,其中,显著负相关区域主要位于中部和北部。同时,降水与 SOS 也呈正相关,面积占比为 85%,其中显著正相关区域主要位于白银北部、定西与平凉交界处;降水与 EOS 呈显著负相关,面积占比为 57%,其中显著负相关区域主要位于白银中部及庆阳东部。降水与 LOS 呈负相关,其中显著负相关区域主要位于白银及庆阳北部(图 6b)。

2.2.2 植被物候变化与地形和干旱的关系 图 7 为甘肃黄土高原区 2002—2021 年植被物候变化与地形的线性回归关系及与干旱的偏相关空间分布,其中,将 DEM、物候参数和采样点的密集度均进行归一化处理。可见,研究期间,海拔与 SOS 变化趋势呈弱正相关,与 EOS 和 LOS 呈弱负相关。统计发现,陇西黄土高原西部的 SOS 变化与干旱呈显著负相关;天水南部植被 EOS 变化与干旱呈显著负相关。综合 SOS 和 EOS 来看,兰州、临夏及定西交界处和陇东、陇西黄土高原交界处的 LOS 变化与干旱呈显著正相关。

2.3 研究区植被物候未来变化预测

采用随机森林回归算法构建未来物候变化模型,预测未来第 2030 年、2040 年、2050 年及 2060 年植被物候的空间分布(图 8、表 5),并对预测结果取 95% 的置信区间进行统计分析。研究发现,未来甘肃黄土高原区植被物候出现明显的南北部区域差异化,

北部以兰州、白银、临夏回族自治区和庆阳为主,南部以定西、天水和平凉为主。植被 SOS 由北向南呈现“晚一早”的特征,南部区域 SOS 提前,最早可发生在每年的第 65 d(2060 年),主要分布在水天和临夏、定西及平凉南部,植被类型为温带落叶阔叶林;北部区域 SOS 推迟,最迟可发生在每年的第 156 d(2040 年),主要分布在兰州、白银南部和庆阳北部,植被类型为温带丛生禾草典型草原。

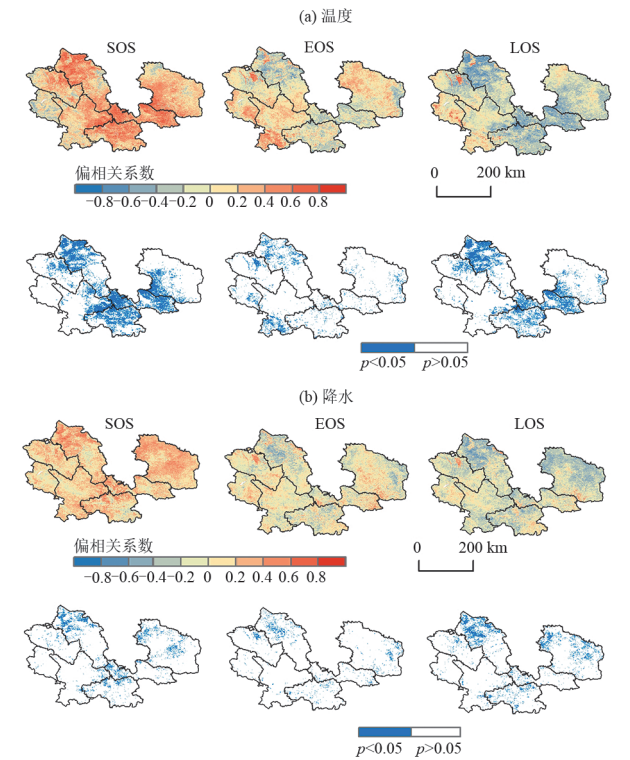


图 6 甘肃黄土高原区不同物候期与气候因子偏相关性分布
Fig. 6 Distribution map of partial correlation between different phenological periods and climatic factors in the Loess Plateau region of Gansu Province

EOS 在空间分布上由西北向东南方向呈“晚一早一晚”的特征,南部区域 EOS 推迟,最迟可发生在每年的第 321 d(2030 年),主要分布在定西、天水及平凉交界处和庆阳南部,植被类型为温带落叶灌木和农业种植物;北部区域 EOS 提前,最早可发生在每年的第 254 d(2030 年),主要分布在兰州北部和白银北部少部分区域,植被类型为一年一熟短生育期耐寒作物、粮食作物和耐寒经济作物。由于 SOS 和 LOS 的空间分布差异性影响,LOS 在空间分布上由北向南呈“短—长”的特征,最短可达 116 d,主要分布在研究区北部及中西部,植被类型为温带半灌木、矮半灌木荒漠、温带丛生矮杂草及矮半灌木荒漠草原等;最长可达 230 d,主要分布在研究区西南部,植被类型为亚热带针叶林、温带丛生禾草典型草原、杂类草草甸及亚高山常绿针叶灌丛等。

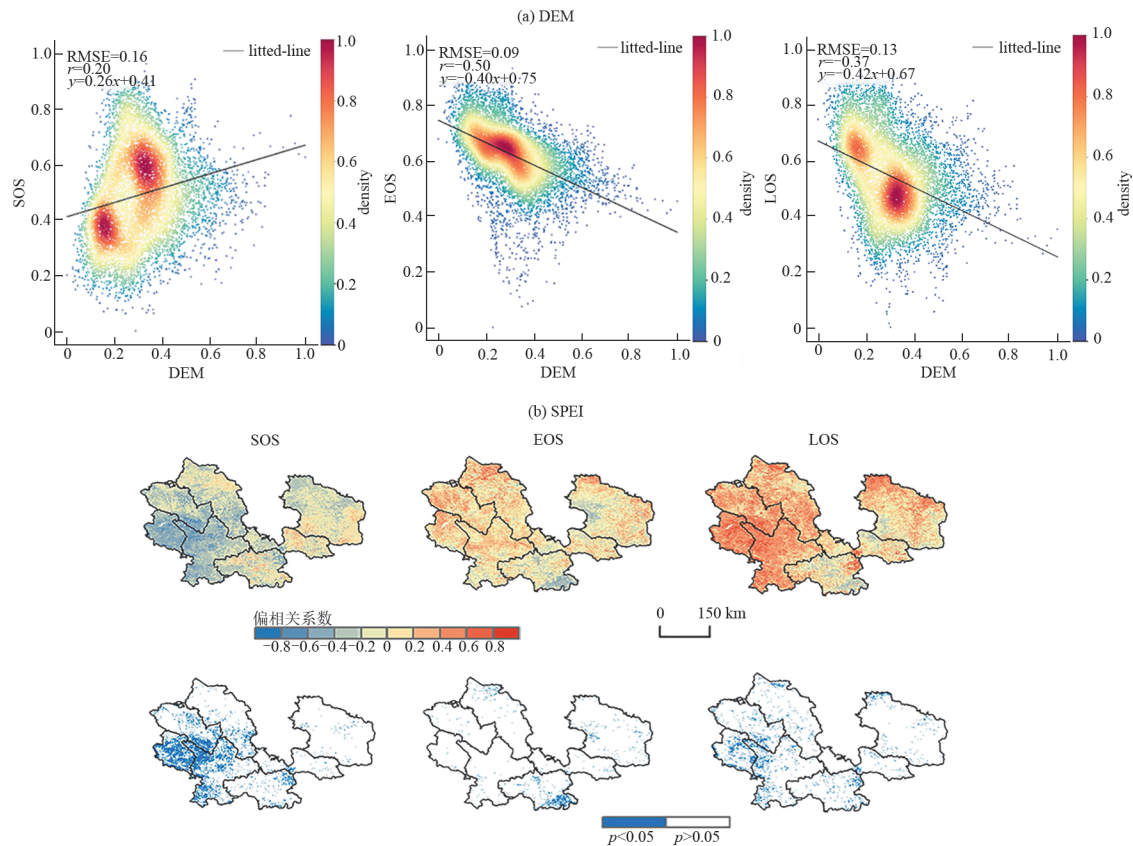


图 7 甘肃黄土高原区植被物候对地形和干旱的响应

Fig. 7 Response of vegetation phenology to topography and drought in the Loess Plateau region of Gansu Province

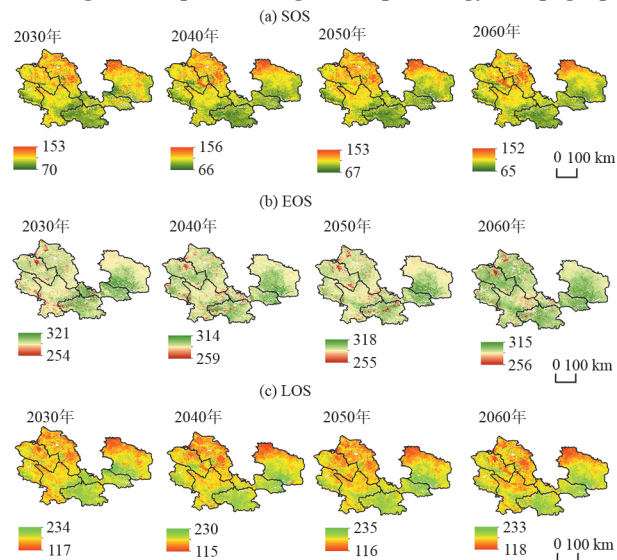


图 8 甘肃黄土高原区未来植被物候平均值空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of future mean vegetation phenology in the Loess Plateau region of Gansu Province

表 5 甘肃黄土高原区不同年份未来物候期平均值

Table 5 Mean future phenological periods in different years in the Loess Plateau region of Gansu Province

物候期	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
SOS	112	111	110	109
EOS	288	287	287	286
LOS	176	176	176	176

3 讨论

3.1 2002—2021 年甘肃黄土高原区植被物候

在过去的二十多年,我国政府实施多项措施,如退耕还林还草、天然林保护、育草等,提出《生态文明建设和绿色发展战略》和《黄土高原生态保护与恢复重点工程》等相关策略,将甘肃黄土高原地区的生态恢复纳入国家生态文明建设战略,通过生态恢复、环境治理、绿色产业等综合措施,黄土高原区的生态环境得到明显改善^[23]。在研究期内,随着封沙育林、退耕还林等生态恢复措施的实施,甘肃黄土高原区植被 SOS 提前 4.5 d/10 a,EOS 提前 0.4 d/10 a,LOS 延长 2.6 d/10 a,与谢宝妮等^[25]研究结果类似,即温度上升促进植被 SOS 和 EOS 提前,降水增多促进植被 SOS 提前,抑制 EOS 提前。而干旱导致该地区 SOS 提前、EOS 推迟和 LOS 延长,主要是在部分地区暖春使得植被有更好的萌芽环境,暖秋因为降水不足延迟霜冻等极端天气的发生,导致植被进行较长时间的光合作用,从而延长生长周期,与黄莹等^[26]研究结论类似。

土壤类型、土壤有机质质量分数和土壤湿度也是影响植被生长的主要因素,特别是对甘肃黄土高原地区,土壤的水分保持能力和养分供应能力直接影响植物的生长速度和生长季节。由于植被在暖春季节促进植物发芽和叶片热量的扩张,改善土壤湿

度,加快土壤有机质的分解速率,促进植被能更好地吸收土壤养分加快生长,例如,森林和草地的恢复改变土壤的水分保持能力,影响植被的萌芽和休眠时间;而暖秋促进植被提前进入休眠期,降水不足和高温的影响,严重减少植被有效生长时间;但夏季过多的降水,导致土壤水分饱和,抑制植被的根系呼吸和养分吸收,影响整个植被的生长季度^[21]。随着气候变化,极端气候事件在研究区发生的频率和强度逐渐增多,例如,长时间的干旱可能导致植被生长停滞或提前进入休眠期,而暴雨或霜冻可能导致植物生长季节的缩短或生长季节内的休眠期延长。

本研究发现,海拔升高抑制植被SOS提前,促进植被EOS提前,主要是高海拔地区春秋季节气温较低,降水和湿度低,导致植被萌芽晚休眠早^[27]。相比之下,其他研究未考虑海拔或所研究区域的海拔差异较小,未能观察到海拔对物候的显著影响。而且不同的研究采用不同的气候模型、数据时间段或采样方法,导致对气候趋势不同的解读和物候变化的时间和幅度上存在差异。

3.2 未来甘肃黄土高原区植被物候

甘肃黄土高原区未来植被物候预测具有重要的生态、环境管理和社会经济意义。因此,本文基于随机森林回归模型预测甘肃黄土高原区2030年、2040年、2050年及2060年的物候期,得到甘肃黄土高原南部的定西市东南地区、庆阳市西南地区及天水市和平凉市全域为主的植被区域,未来植被SOS提前、EOS推迟和LOS延长的趋势。依据IPCC第六次评估报告,评估指出全球平均表面气温将在未来20 a内达到或超过1.5℃,21世纪全球陆地的年平均降水量将增加^[24]。更早的春季解冻和暖春的增多促进SOS提前,暖秋促进植物能够维持更长的生长活力使得EOS推迟,延长植被LOS。

黄土高原区生态恢复措施效果较为显著,植被覆盖度和生态系统的健康状况逐渐改善,生态恢复有助于促进植物更快地适应气候变化,在2015—2100年黄土高原年平均气温增加速率分别为0.07~0.13、0.25~0.30、0.46~0.54、0.62~0.71℃/10 a,表明黄土高原未来面临强大的增温变化压力,黄土高原大部分地区呈气温增加态势,到20世纪末,增量加大至2℃左右,并且未来高原地区极端降水趋于频繁,强度也有所增加,生态脆弱区的水资源分布也面临巨大的风险^[28]。针对位于甘肃黄土高原区北部的白银市中东部和庆阳市北部区域为主的区域来看,预测未来植被SOS推迟、EOS提前和LOS缩短趋势。主要是由于北部地区气候更加寒冷,春季升温慢且水资源严重短缺推迟SOS。秋季降温迅速促进初霜和霜冻过早到来抑制植被的生长,使得EOS提前。

土壤结构脆弱,水土流失严重,土壤保水能力差,植被的生长持续时间受限缩短LOS。生态系统退化严重,植被覆盖度下降,植被的恢复力和适应力较差,难以应对气候变化的挑战。植被的脆弱性进一步加剧SOS推迟、EOS提前的现象。

4 结论

1)SOS集中在每年第81~138 d,EOS集中在每年第266~305 d,LOS周期为131~218 d。对于整个草原、草丛及栽培植被SOS和EOS均提前,草甸、针叶林、阔叶林及灌丛植被SOS提前、EOS推迟,荒漠地区SOS推迟、EOS提前,LOS除荒漠和其他植被地区均延长。该研究区内,65%的植被SOS持不稳定(提前/推迟)变化,99%的植被EOS持稳定(提前/推迟)变化。

2)植被SOS与气温、降水呈正相关,与干旱呈负相关,海拔越高SOS越晚;植被EOS与气温、干旱呈正相关,与降水呈负相关,海拔越高EOS越早;植被LOS与干旱呈正相关,与气温、降水呈负相关,海拔越高LOS越短。

3)在未来甘肃黄土高原区植被物候南部地区SOS提前,EOS推迟,LOS延长,主要发生于定西、天水和平凉的植被区域;北部地区SOS推迟,EOS提前,LOS缩短,主要发生于白银、兰州、庆阳及临夏回族自治州的植被区域。

参考文献:

- [1] 倪璐,吴静,李纯斌,等.近30年中国天然草地物候时空变化特征分析[J].草业学报,2020,29(1):1-12.
NI L, WU J, LI C B, et al. Temporal and spatial variations in natural grassland phenology in China over the last 30 years[J].Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(1): 1-12.
- [2] 韩红珠.黄土高原植被物候和净初级生产力(NPP)的关系及其对气候变化的响应[D].西安:陕西师范大学,2020.
HAN H Z. Relationship between vegetation phenology and net primary productivity(NPP) in Loess Plateau and its response to climate change[D].Xi'an: Shanxi Normal University, 2020.
- [3] 姚荣鹏.中国西北地区植被物候变化及其对气候变化的响应[D].兰州:西北师范大学,2022.
YAO R P. Phenological changes of vegetation in north-west China and its response to climate change[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2022.
- [4] 吴建国,翟盘茂,武亚堂.对基于土地应对气候变化的新认知[J].气候变化研究进展,2020,16(1):50-69.
WU J G, ZHAI P M, WU Y T. New understanding on the land-based response options to climate change[J].Climate Change Research, 2020, 16(1): 50-69.
- [5] 焦阜生.植被物候变化趋势的演变及其对气候变化的非线性响应[D].南京:南京师范大学,2020.

- JIAO F S. Evolution of vegetation phenology and its non-linear response to climate change[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020.
- [6] 李强, 张翀, 任志远. 近 15 年黄土高原植被物候时空变化特征分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(22): 4352-4365.
- LI Q, ZHANG C, REN Z Y. Analysis of temporal and spatial variation of vegetation phenology in the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(22): 4352-4365.
- [7] 赵丽蓉. 2001—2020 年中国北方植被物候变化及其对气候因子的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2022.
- ZHAO L R. Phenological changes of vegetation in northern China from 2001 to 2020 and its response to climate factors[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2022.
- [8] 季舒平. 华北平原植被春季物候对季前干旱和变暖的响应[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- JI S P. Response of spring phenology of vegetation in north China plain to pre-season drought and warming[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [9] 吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 等. 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, 2021, 41(16): 6600-6612.
- JI Z X, PEI T T, CHEN Y, et al. Vegetation phenology change and its response to seasonal climate changes on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6600-6612.
- [10] 冯梓浩. 青藏高原高寒植被物候时空变化特征及其对植被水分利用效率的影响研究[D]. 广西 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- FENG Z H. Temporal and spatial variation characteristics of alpine vegetation phenology in Qinghai-Tibet Plateau and its influence on vegetation water use efficiency[D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2023.
- [11] 张洪芬, 韩涛, 黄斌. 甘肃黄土高原春季气温变化对物候的影响[J]. 资源科学, 2007(6): 10-15.
- ZHANG H F, HAN T, HUANG B. Influence of air temperature change on phenology spectrum in spring season in the Loess Plateau of Gansu[J]. Resources Science, 2007(6): 10-15.
- [12] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国 1:100 万植被数据集. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>), 2020 [DB/OL]. <https://cstr.cn/CSTR:11738.11.ncdc.nieer.2020.1561>.
- Editorial Committee of China Vegetation Map, Chinese Academy of Sciences. China 1:1 million vegetation dataset National Glacier. Frozen Soil and Desert Science Data Center(<http://www.ncdc.ac.cn>), 2020 [DB/OL]. <https://cstr.cn/CSTR:11738.11.ncdc.nieer.2020.1561>.
- [13] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. Earth System Science Data, 2019(11): 1931-1946.
- [14] PENG S. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901—2023). National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center.
- [15] PENG S Z, DING Y X, WEN Z M, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011—2100[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183-194.
- [16] DING Y X, PENG S Z. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021.
- [17] HAO M X, XIAO Y Z, YIN T S. HSPEI: A 1-km spatial resolution SPEI Dataset across Chinese Mainland from 2001 to 2022 [DS/OL]. V6. National Ecosystem Data Bank, 2024 [2024-11-28]. <https://cstr.cn/15732.11.sciencedb.ecodb.00090>. CSTR: 15732.11.sciencedb.ecodb.00090.
- [18] 赵维清, 李经纬, 褚琳, 等. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7722-7736.
- ZHAO W Q, LI J W, CHU L, et al. Analysis of spatial and temporal variations in vegetation index and its driving force in Hubei Province in the last 10 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7722-7736.
- [19] JONSSON P, EKLUNDH L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [20] 张宇涛, 李梦云, 纪维东, 等. 2000—2023 年贵州省归一化植被指数时空变化特征分析[J]. 数字农业与智能农机, 2024(3): 45-48.
- ZHANG Y T, LI M Y, JI W D, et al. Spatial and temporal variation characteristics of normalized vegetation index in Guizhou Province from 2000 to 2023[J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery, 2024(3): 45-48.
- [21] 吉珍霞. 黄土高原植被物候变化及其对气候因子的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- JI Z X. Phenological changes of vegetation in Loess Plateau and its response to climate factors[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.
- [22] 王永财, 孙艳玲, 王中良. 1998—2011 年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 594-602.
- WANG Y C, SUN Y L, WANG Z L. Spatial-temporal change in vegetation cover and climate factor drivers of variation in the Haihe River basin 1998—2011 [J]. Resources Science, 2014, 36(3): 594-602.
- [23] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449-460.
- ZHAO A Z, ZHANG A B, LIU H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of grain for green project in the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 449-460.

(下转第 138 页)

- ment in Chaoyang District Beijing [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [2] WANG S J, LIU H, YU Y, et al. Evaluation of groundwater sustainability in the arid Hexi Corridor of northwestern China, using GRACE, GLDAS and measured groundwater data products [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: e135829.
- [3] 张娜, 韩小龙, 汤英, 等. 宁夏石嘴山市引黄灌区地下水时空变化特性及影响因素 [J]. *干旱区研究*, 2020, 37(5): 1124-1131.
- ZHANG N, HAN X L, TANG Y, et al. Temporal and spatial characteristics of groundwater and its influencing factors in the Yellow River diversion irrigation area of Ningxia Shizuihan [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(5): 1124-1131.
- [4] HOLMAN I P, TASCONE D, HESS T M. A comparison of stochastic and deterministic downscaling methods for modelling potential groundwater recharge under climate change in east Anglia, UK: Implications for groundwater resource management [J]. *Hydrogeology Journal*, 2009, 17(7): 1629-1641.
- [5] KENDY E, GÉRARD-MARCHANT P, WALTER M T, et al. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the north China plain [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(10): 2011-2031.
- [6] 樊丽琴, 吴霞, 李磊, 等. 平罗县不同地下水位分布区地下水埋深变化特征分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(6): 107-114.
- FAN L Q, WU X, LI L, et al. Spatiotemporal variation in groundwater table in Pingluo County [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(6): 107-114.
- [7] GROGAN D S, ZHANG F, PRUSEVICH A, et al. Quantifying the link between crop production and mined groundwater irrigation in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 161-175.
- [8] LI Y F, FENG J G, WANG W, et al. Optimization and rationalization of karst groundwater resource in Feicheng basin, China [J]. *Environmental Geology*, 2007, 53(4): 741-749.
- [9] 王璟珉. 全球气候变化问题的认知比较研究 [D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2007.
- WANG J M. The cognitive comparative research on global climate change [D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2007.
- [10] 李巧媛. 不同气候变化情景下青藏高原冰川的变化 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2011.
- LI Q Y. The glacier variation of tibetan plateau under different climate changes scenarios [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2011.
- [11] HUANG J P, YU H P, GUAN X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [12] 赵玮, 张铜会, 赵学勇, 等. 近5 a来科尔沁沙地典型区域地下水埋深变化分析 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 995-1000.
- ZHAO W, ZHANG T H, ZHAO X Y, et al. Dynamics of groundwater depth in typical zone of Horqin sand land from 2002 to 2006 [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(5): 995-1000.
- [13] 朱永华, 张生, 孙标, 等. 科尔沁沙地典型区地下水、降水变化特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2017, 40(4): 718-728.
- ZHU Y H, ZHANG S, SUN B, et al. Variation of groundwater and precipitation in typical zone of Horqin sandy area [J]. *arid Land Geography*, 2017, 40(4): 718-728.
- [14] SHEFFIELD J, WOOD E F, RODERICK M L. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012, 491(7424): 435-438.
- HUANG Y, WU L J, ZHAO G. Effects of seasonal drought on spatial-temporal changes of vegetation phenology in the Loess Plateau [J]. *Yellow River*, 2023, 45(3): 108-113.
- [27] 于海英, 杨莉琳, 谭廷鸿, 等. 北京东灵山森林木本植物物候对气温响应的季节差异 [J]. *林业科学研究*, 2023, 36(3): 80-90.
- YU H Y, YANG L L, TAN T H, et al. Divergent responses of woody plant phenology to seasonal temperature in Dongling mountain of Beijing [J]. *Forest Research*, 2023, 36(3): 80-90.
- [28] 刘俏华, 姚秀萍, 马嘉理, 等. 青藏高原夏季极端降水研究进展与展望 [J]. *大气科学学报*, 2024, 47(5): 737-754.
- LIU Q H, YAO X P, MA J L, et al. Research progress and prospects on summer extreme precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2024, 47(5): 737-754.

(上接第128页)

- [24] 刘世博. 汉江上游流域水源涵养功能时空演变及其驱动因素研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- LIU S B. Temporal and spatial evolution of water conservation function and its driving factors in the upper reaches of Hanjiang River [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [25] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 153-160.
- XIE B N, QIN Z F, WANG Y, et al. Monitoring vegetation phenology and their response to climate change on Chinese Loess Plateau based on remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 153-160.
- [26] 黄莹, 吴丽娟, 赵刚. 黄土高原植被物候时空变化及其与季节性干旱的关系 [J]. *人民黄河*, 2023, 45(3): 108-113.