

DOI: 10.5846/stxb202204261156

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.
Zhao X R, Liu J, Yang S K, Zhang Q, Gao F, Liu Y L. Spatio-temporal variations of typical woodland and grassland phenology and its response to meteorological factors in Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3744-3755.

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

赵心睿^{1,2}, 刘冀^{1,2,*}, 杨少康^{1,2}, 张茜^{1,2}, 高放^{1,2}, 刘艳丽^{3,4}

1 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002

2 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002

3 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098

4 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029

摘要:为探究北方地区典型植被林地、草地物候特征及其对气候变化的响应,本文基于 1982—2015 年的 GIMMS NDVI 3gv1 数据集和气象资料,采用动态阈值法提取植被物候,应用线性回归和偏相关分析法分析林、草地物候时空变化特征及其与气候变化的关系。结果表明:(1)林地生长季长度(LOS)以 0.32d/a 的速率极显著延长,整体表现为生长季始期(SOS)以-0.18d/a 极显著提前,生长季末期(EOS)以 0.14d/a 极显著推迟。林地 SOS 提前、EOS 推迟和 LOS 延长的区域面积占比分别为 93.3%、90.4% 和 96.3%。(2)草地 LOS 以-0.01d/a 的速率不显著缩短,表现为 SOS 以-0.09d/a 不显著提前,EOS 以-0.10d/a 不显著提前。SOS 提前、EOS 提前和 LOS 缩短的区域占比为 67.5%、69.1%和 50%。(3)林地 SOS 主要受冬末春初的气温升高和降水增加而提前,EOS 受夏季气温升高、秋季以及冬末春初降水增加而推迟。(4)草地 SOS 主要受春季气温升高和短波辐射减少而提前,EOS 受秋季气温升高和短波辐射减少而提前,草地物候与气象因子的响应时长小于林地。

关键词:物候;林草地;北方地区;遥感;气候变化

Spatio-temporal variations of typical woodland and grassland phenology and its response to meteorological factors in Northern China

ZHAO Xinrui^{1,2}, LIU Ji^{1,2,*}, YANG Shaokang^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}, GAO Fang^{1,2}, LIU Yanli^{3,4}

1 Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, China

2 School of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

3 State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China

4 Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China

Abstract: To reveal the phenological characteristics of typical vegetation woodland and grassland and its response to climate change in Northern China, adopting the GIMMS data and meteorological data from 1982 to 2015, the woodland and grassland phenology were extracted by using a dynamic threshold method, and the spatio-temporal variations of phenology and its response to climate change were identified by linear regression and partial correlation analysis methods. The results can be summarized as follows. (1) The woodland length of season (LOS) was significantly extended with a rate of 0.32d/a, while the start of season (SOS) was significantly advanced with rate at -0.18d/a and the end of season (EOS) was obviously delayed with rate at 0.14d/a. The advanced SOS, delayed EOS, and extended LOS areas covered 93.3%,

基金项目:国家自然科学基金(52079079);江苏省自然科学基金(BK20191129)

收稿日期:2022-04-26; **网络出版日期:**2022-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuji@ctgu.edu.cn

90.4%, and 96.3% of the whole woodland area, respectively. (2) The grassland LOS was insignificantly shortened with a rate of -0.01d/a , while the SOS was insignificantly advanced with rate at -0.09d/a and the EOS was insignificantly advanced with rate at -0.10d/a . The advanced SOS and EOS areas covered 67.5% and 69.1% of the whole grassland area, respectively. And, the LOS was shortened in 50% of the areas. (3) The advanced woodland SOS was mainly influenced by the increase in temperature and precipitation in late winter and early spring, and the delayed EOS was affected by the increased temperature in summer and precipitation in autumn, late winter, and early spring. (4) The advanced grassland SOS was mainly related to the increase in temperature and the decrease of short-wave radiation in spring, and the advanced EOS was affected by the increase in temperature and the decrease of short-wave radiation in autumn. The response time of grassland phenology and meteorological factors was shorter than that of woodland.

Key Words: phenology; woodland and grassland; Northern China; remote sensing; climate change

植被物候是指自然界中植物受到气候及其他环境因子的影响,出现以年为周期重复性变化的生物现象,是植被长期适应气候变化和环境作用而形成的生长发育节律^[1]。因此,植被物候可以直观反映气候的变化特征,是衡量环境变化的综合指示体^[2]。当前许多学者借助遥感数据与模型对植被物候进行研究,结果表明不同植被间物候差异较大^[3-6]。因此对比分析不同植被物候特征,对理解不同地带性植被与气候的响应关系意义重大。

我国北方地区典型植被主要为林地和草地,自东向西横跨湿润、半湿润、半干旱、干旱 4 个气候区,近些年来气候变化导致该区域的生态系统极不稳定^[7]。区域地理位置差异导致气候差异,进而造成植被分布的强空间异质性,不同植被物候变化对气候的响应机制较为复杂,因此分析和揭示北方不同植被的物候变化趋势及其对气象因子的响应规律^[8-9],对维护区域生态安全至关重要。不同研究表明,典型植被林、草地物候对气候变化的内在响应机理不同^[8]。对于林地,浮媛媛等^[3]发现大兴安岭植被枯黄期受秋季气温升高而推迟,而俎佳星等^[10]认为其主要受秋季降水控制;对于草地,黄文琳等^[5]研究表明内蒙古草原枯黄期受秋季干旱影响而推迟,张雯^[11]和 Wu 等^[12]指出植被枯黄期受秋季气温升高而提前,生长季长度 (Length of Season; LOS) 表现为缩短趋势;针对物候影响因子,董晓宇等^[13]指出内蒙古植被物候主要受前 3 个月的气温和降水影响;但事实上,光照对物候的影响不可忽视^[14]。高成蹊等^[15]认为驱动温度和冷激天数的增加以及光周期的延长均对木本植物的返青有提前效应;丛楠等^[16]针对北半球中高纬度地区的研究表明,春季物候对温度的显著响应时滞为 0—1 个月,降雨和辐射对温度有各自或协同的调控作用。上述研究表明植被物候主要受生长关键期的气候影响^[17-18]。

综上所述,北方地区典型林草地物候空间变异显著,而目前少有研究分析不同植被类型间的物候差异,且多数仅分析物候变化与气温、降水的关系,忽略了与植物生长发育密切相关的辐射因子的影响。鉴于此,本文基于 1982—2015 年的 GIMMS NDVI 3gv1 数据,揭示北方地区典型林、草地物候时空变化特征差异,探究导致林、草地物候特征差异的主导因子,为我国北方地区生态环境评估及保护提供科学依据。

1 研究区概况

研究区如图 1 所示,介于 $34^{\circ}35'—53^{\circ}23'N$, $97^{\circ}11'—126^{\circ}5'E$ 之间,包括内蒙古自治区、山西省、河北省、北京市和天津市,总面积约为 153 万 km^2 。大部分地区属于温带大陆性季风气候,多年平均气温为 $-9—18^{\circ}\text{C}$,区域内植被分布以林、草地为主,面积占比达 56.24%。其中,林地面积占比 16.37%,主要分布在大兴安岭,并沿西南方向,延伸到阴山东部、坝上高原、燕山、太行山、吕梁山。草地占 39.87%,主要分布在内蒙古高原、呼伦贝尔草原、科尔沁草原、锡林郭勒草原和鄂尔多斯草原。

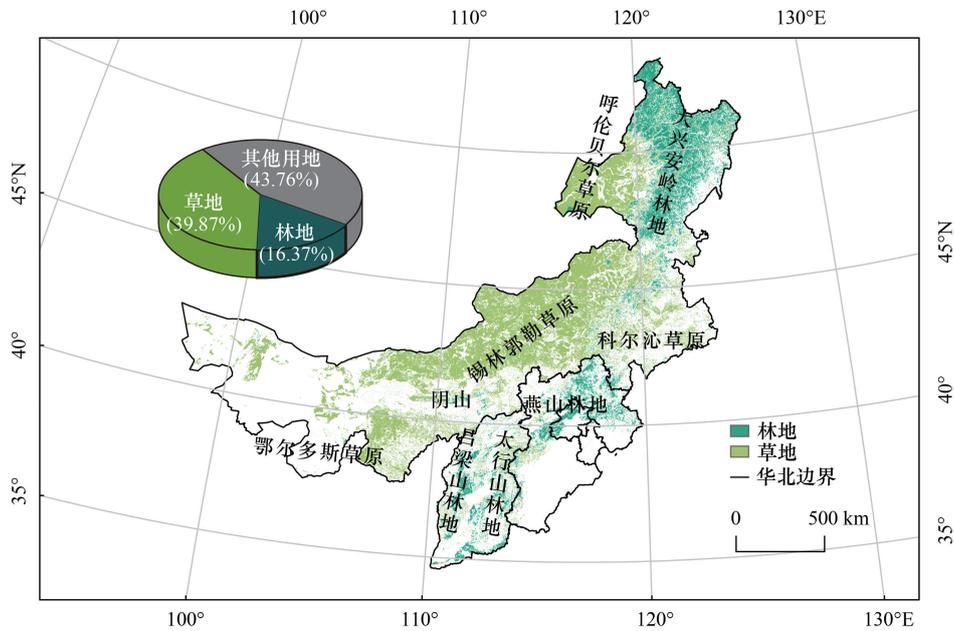


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview map of the study region

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文使用 NDVI 数据、气象数据和土地利用类型数据,数据来源见表 1。

表 1 研究数据来源及相关说明

Table 1 Data sources and related descriptions

数据名称 Data name	数据来源 Data sources	时空分辨率 Spatio-temporal resolution
归一化植被指数数据 GIMMS NDVI 3gv1	美国国家航天航空局戈达德航天中心 (https://www.nasa.gov/nex)	15d, 8km
1979—2015 年中国区域高时空分辨率地面气象要素 驱动数据集 China meteorological forcing dataset (1979—2015)	中国科学院青藏高原研究所 (http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/)	3h, 1km
1980—2015 年中国土地利用数据 Landuse dataset in China (1980—2015)	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)	7 期, 1km

采用 ArcGIS 软件将 GIMMS NDVI 3gv1 重采样为 1km 空间分辨率,然后利用 TIMESAT 程序包^[19]提取植被物候。将土地利用类型中的 25 个二级分类按照 6 个一级类型进行重分类,提取 7 期数据中土地利用类型未发生改变的林地和草地像元进行分析。

2.2 研究方法

2.2.1 动态阈值法

为了减少云和大气的干扰,首先采用 Savitzky-Golay (SG) 滤波剔除 NDVI 序列中的噪声和异常值,从而更好的描述植被活动,然后将 $NDVI < 0.1$ 的区域视为非植被覆盖区。采用基于季节振幅的动态阈值法提取植被物候,计算不同阈值(10%、20%、30%、40%、50%)下的物候指标,并参照文献^[3,5,10,20-21]中的物候数据,最终将动态阈值设定为 30%。以一年的 NDVI 数据为例,NDVI 经过滤波后生成拟合曲线,如图 2 所示,然后据此定

义各年 NDVI 的基本水平(左侧 $NDVI_{min1}$, 右侧 $NDVI_{min2}$)和最大值($NDVI_{max}$),最大值与基本水平的差为 NDVI 振幅;从左侧基本水平开始计数,当 NDVI 沿拟合曲线增长达到当年左侧 NDVI 振幅 30% 的时刻定义为生长季开始时间(Start of Season; SOS),而从右侧基本水平开始计数,当 NDVI 沿拟合曲线增长达到当年右侧 NDVI 振幅 30% 的时刻定义为生长季结束时间(End of Season; EOS),生长季的结束时间减去开始时间即为生长季的长度(LOS)。动态阈值法通过在像元尺度上动态设定基于当年植被指数季节变化幅度的阈值,在一定程度上避免了绝对阈值法的缺陷^[1]。

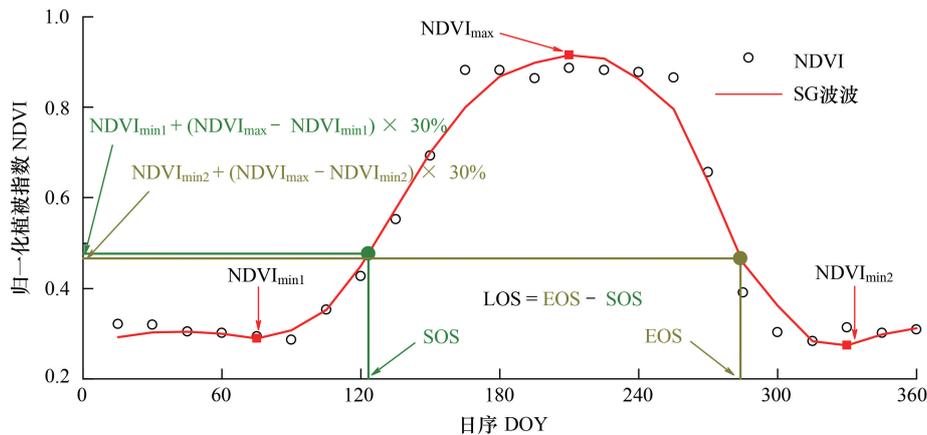


图 2 基于 SG 滤波的 NDVI 时间序列重构提取物候

Fig.2 Extraction of phenology from NDVI time series reconstruction based on SG filtering

2.2.2 偏相关分析

本文通过计算物候与当季和前季逐月气象因子^[6,22-25]的偏相关系数以定量评价物候对气候变化的响应程度。以生长季开始最迟的科尔沁草原为参考,其 34a 平均生长季始于 5 月中旬,因此选择当年 5 月至前一年 6 月的逐月气象数据计算与植被 SOS 的偏相关系数;以生长季结束最迟的锡林郭勒草原为参考,其 34a 平均生长季大约在 10 月中旬结束,同理选择当年 10 月至前一年 11 月共 12 个月的气象数据计算与 EOS 的偏相关系数。

3 结果

3.1 1982—2015 年北方地区典型林草地物候变化

3.1.1 林草地物候的空间格局

本研究提取的 1982—2015 年北方地区典型林草地物候的时空分布与中国温带和蒙古高原地区物候基本一致^[12,14,26-27],表明提取的物候准确可靠。图 3 为 1982—2015 年林草地 3 个物候指标平均值的空间分布。林地和草地 SOS 分别为第 109—129d 和第 101—138d,均值为第 118d 和第 119d,主要在 4 月中上旬到 5 月中旬进入返青期,林地 SOS 分布更集中且略早于草地;以阴山-燕山为南北分界线,SOS 区域分布差异明显,界线以南,自西部草地向东部林地 SOS 逐渐提前,界线以北则相反。林地和草地 EOS 分别为第 251—280d 和第 258—282d,均值为第 264d 和第 270d,可见林地的 EOS 明显早于草地,大约在 9 月中下旬到 10 月初,植被枯黄;分界线南侧,林草地 EOS 相近,北侧,EOS 自东北林地向西南草地逐渐推迟。林地和草地 LOS 分别为 122—167d 和 121—182d,生长周期的均值为 146d 和 151d;其区域特征明显,其中内蒙古中部锡林郭勒草原 LOS 最长,大兴安岭林地最短;分界线南侧,东部林地 LOS 略长于西部草地,北侧则是西部草地明显长于东部林地。总体而言,林地的物候分布比草地更为集中且离散程度更小,林地 SOS 略早于草地,EOS 则明显早于草地,LOS 短于草地;林地物候的空间离散程度显著小于草地。

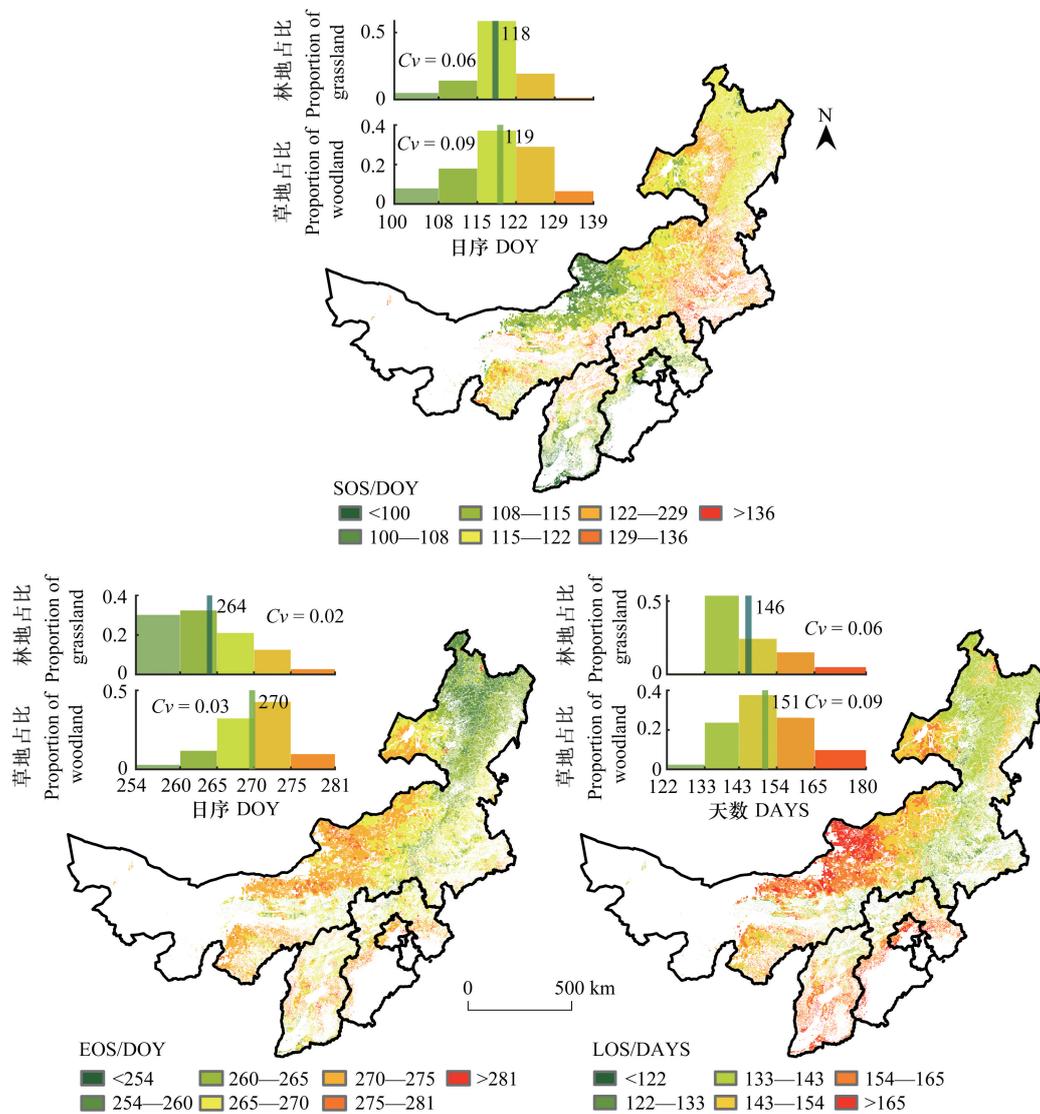


图3 1982—2015年北方地区典型林草地物候空间分布

Fig.3 Spatial distribution of typical woodland and grassland phenology in Northern China from 1982 to 2015

3.1.2 林草地物候的年际变化

图4为1982—2015年研究区典型林草地物候的年际变化情况,除SOS均呈现提前趋势外,EOS和LOS中林、草地年际变化趋势相反。林地SOS从1982年的第122d(5月初)极显著提前到2015年的第116d(4月下旬),提前速率为 -0.18d/a ;而草地提前速度仅为林地的1/2,且不显著。林地EOS从1982年的第262d(9月下旬)以 0.14d/a 的速率推迟到2015年的第267d(9月底);草地则以 -0.10d/a 的速率呈不显著提前,但整体还是晚于林地。林地LOS从1982年的142d,延长到2015年的152d,平均每年延长 0.32d ($P < 0.01$);草地LOS呈现不显著的缩短趋势,变化速率为 -0.01d/a 。总体而言,林地物候变化趋势大于草地且显著,物候年际波动小于草地,表明林地对环境变化的韧性优于草地^[28-29]。

图5为像元尺度上北方地区典型林草地34a物候年际变化趋势。图6、图7为林地、草地年际变化趋势直方图。林草地SOS年际变化趋势整体表现为提前,但二者的提前日数和面积不同,林地平均提前速率(-0.18d/a)大于草地(-0.09d/a)(图5);93.3%的林地SOS提前,其中显著提前的面积占38.1%(图6),平均变化速率为 -0.29d/a ,广泛分布在大兴安岭周边、燕山和吕梁山;67.5%的草地SOS也呈现提前趋势,其中显

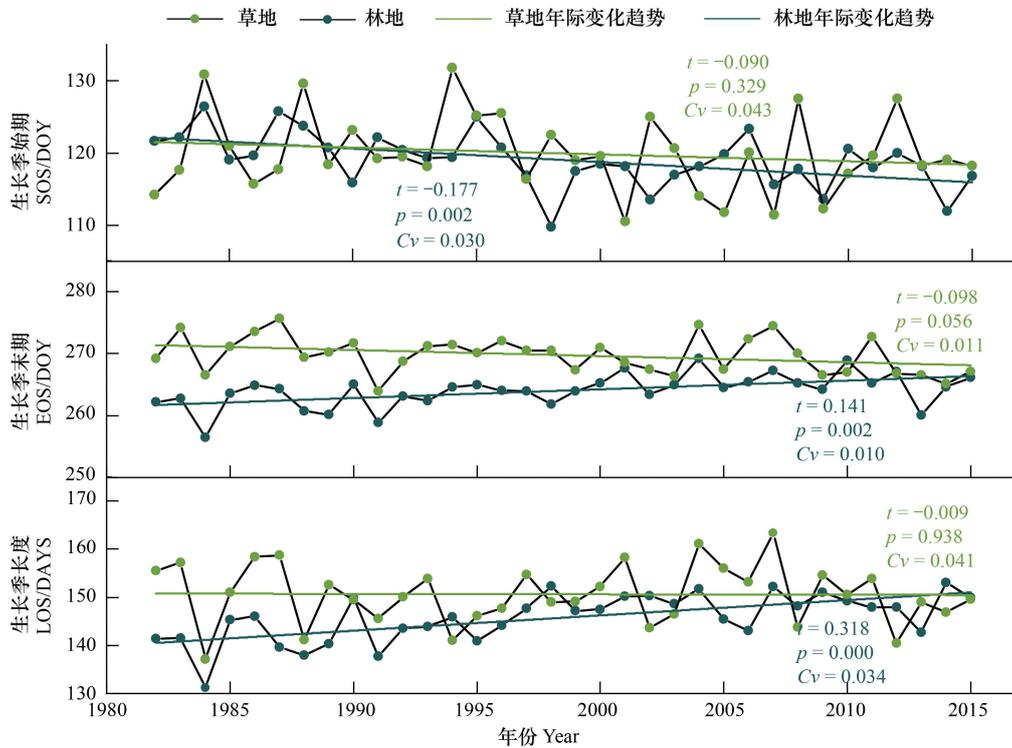


图 4 1982—2015 年北方地区典型林草地物候年际变化趋势

Fig.4 Interannual variation trend of typical woodland and grassland phenology in Northern China from 1982 to 2015

著提前区域占 21.3% (图 7), 平均变化速率为 -0.38d/a , 广泛分布在呼伦贝尔草原的东部和锡林郭勒草原的东北部。林地和草地 EOS 年际变化趋势相反; 林地和草地 EOS 变化速率分别为 $-0.13\text{—}0.41\text{d/a}$ 和 $-0.61\text{—}0.42\text{d/a}$, 林地 EOS 平均推迟 0.14d/a , 而草地平均提前 0.10d/a ; 90.4% 的林地 EOS 呈现推迟, 其中显著推迟 (0.26d/a) 的区域占 38.6%, 广泛分布在大兴安岭东部、北部林地以及太行山-燕山一带; 69.1% 的草地 EOS 呈提前趋势, 其中显著提前 (-0.36d/a) 的区域占 18%, 分布在锡林郭勒草原中部, EOS 呈推迟趋势的区域零散分布在科尔沁草原和鄂尔多斯草原东部。林地向草地转变时, LOS 由延长转为缩短趋势, 并且显著性减弱; 林地和草地 LOS 变化速率分别为 $-0.13\text{—}0.74\text{d/a}$ 和 $-0.94\text{—}0.94\text{d/a}$, 林地 LOS 平均延长趋势 (0.32d/a) 大于草地的缩短趋势 (-0.01d/a); 96.3% 的林地 LOS 呈现延长, 其中显著延长 (0.42d/a) 的区域占 62.2%, 集中分布在大兴安岭林地、燕山和太行-吕梁山; 草地 LOS 延长和缩短的占比均为 50%, 其中 14.9% 区域显著延长 (0.47d/a), 主要分布在呼伦贝尔草原东部和锡林郭勒草原的东北部, 6.8% 的区域显著缩短 (-0.67d/a), 零散分布在锡林郭勒草原中部和鄂尔多斯草原北部。

3.2 典型林草地物候对气象因子的响应

3.2.1 SOS 对气象因子的响应

图 8 和图 9 分别为研究区林地和草地 SOS 与气象因子的偏相关系数图。可知, 林草地 SOS 在多数时间与气温、降水呈现负相关, 与辐射呈现正相关, 且与气温、降水的相关性强于辐射, 草地 SOS 与气温和辐射的相关性最强。林地 SOS 对气象因子的迟滞响应时间较长, 冬末春初气温升高和降水增加造成 SOS 提前; 而草地 SOS 提前主要由春季气温升高和短波辐射减少导致, 同时长波辐射增加可推迟草地 SOS。

林地 SOS 与气温的负相关性自 5 月起逐月增强, 至 2 月份达到极显著水平 ($R = -0.51$), 而草地情况则相反, 在 5 月和 2 月均达到极显著水平 ($R = -0.50, R = -0.43$), 在冬季 1 月和 12 月, 林草地 SOS 与气温转为正相关。林地 SOS 与降水的负相关性随着月份提前而增强, 在 3 月和上一年 12 月达到显著负相关 ($R = -0.48, R = -0.34$); 草地 SOS 与降水呈类似不显著相关变化。林地 SOS 与春季辐射表现为正相关, 与上一年冬季辐射呈

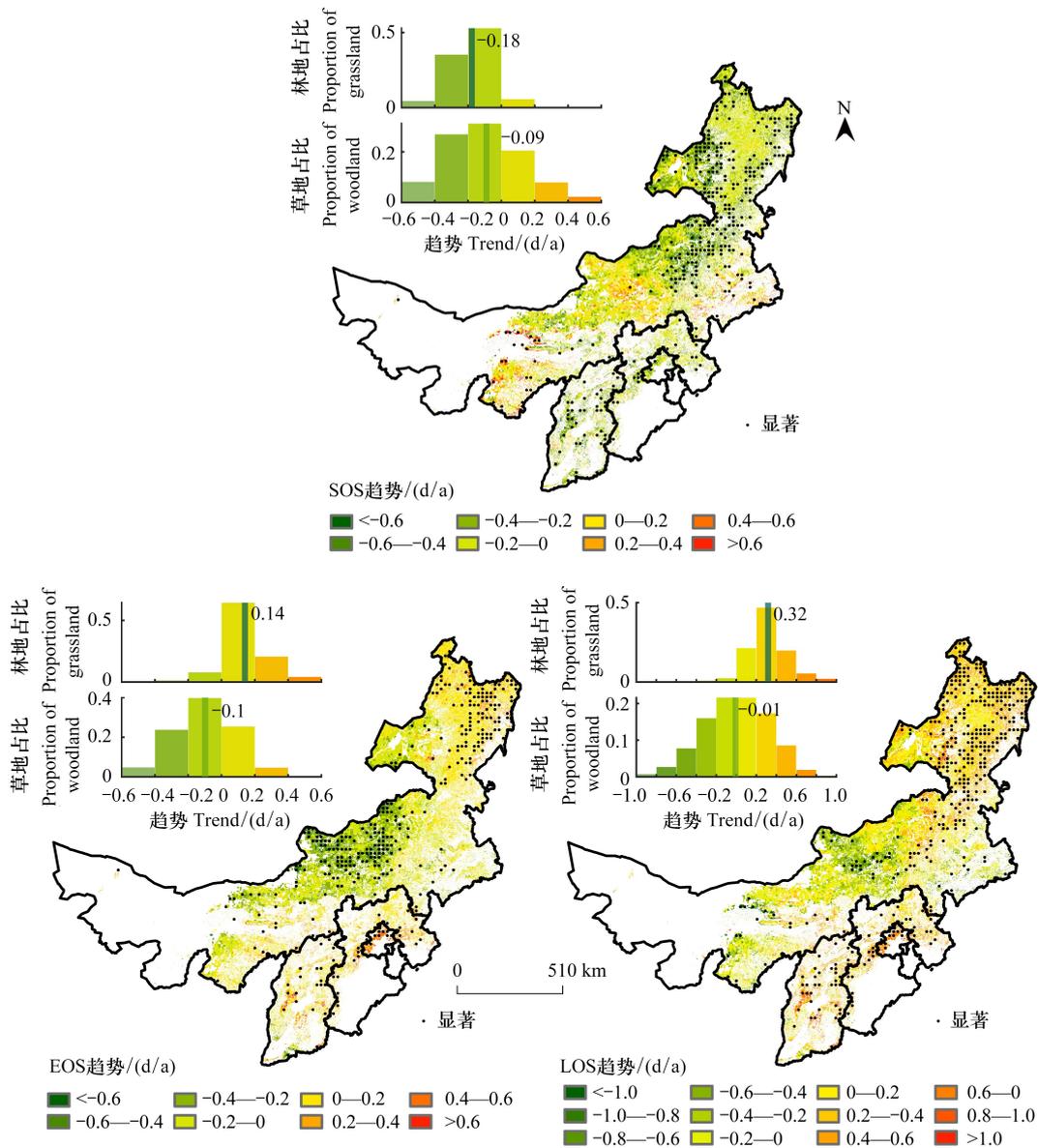


图5 1982—2015年北方地区典型林草地物候年际变化空间分布

Fig.5 Spatial distribution of interannual changes in typical woodland and grassland phenology in Northern China from 1982 to 2015

负相关,且随着月份提前相关性增强;草地 SOS 与辐射的正相关性随月份提前减弱,显著相关的为 5 月和 2 月。

3.2.2 EOS 对气象因子的响应

图 10 和图 11 分别为林草地 EOS 与气象因子的偏相关系数图。生长季内,林地 EOS 和气温、降水呈现正相关,与辐射呈现负相关,且与气温、降水的相关性强于辐射;草地与降水呈负相关,与气温和辐射关系相反且在 7 月前后逆转。林地 EOS 对气象因子的迟滞响应时间长,因夏季气温升高、秋季以及冬末春初降水增加而推迟;草地秋季物候对气候的响应较为复杂,草地 EOS 主要受秋季气温升高、短波辐射减少及 5 月降水、辐射增加的共同作用而提前,受秋季长波辐射增加而推迟。

林地 EOS 与气温的正相关性自 10 月份起逐月增强,在 5—7 月达到显著水平 ($R = 0.41, R = 0.35, R = 0.43$);草地 EOS 与气温的负相关性逐渐减弱并在 7 月份逆转,在 10 月和 5 月达到显著相关 ($R = -0.46, R = 0.35$)。林地 EOS 与降水的正相关性随着月份提前先减弱后增强,在 10 月、2 月和 1 月达到显著水平 ($R =$

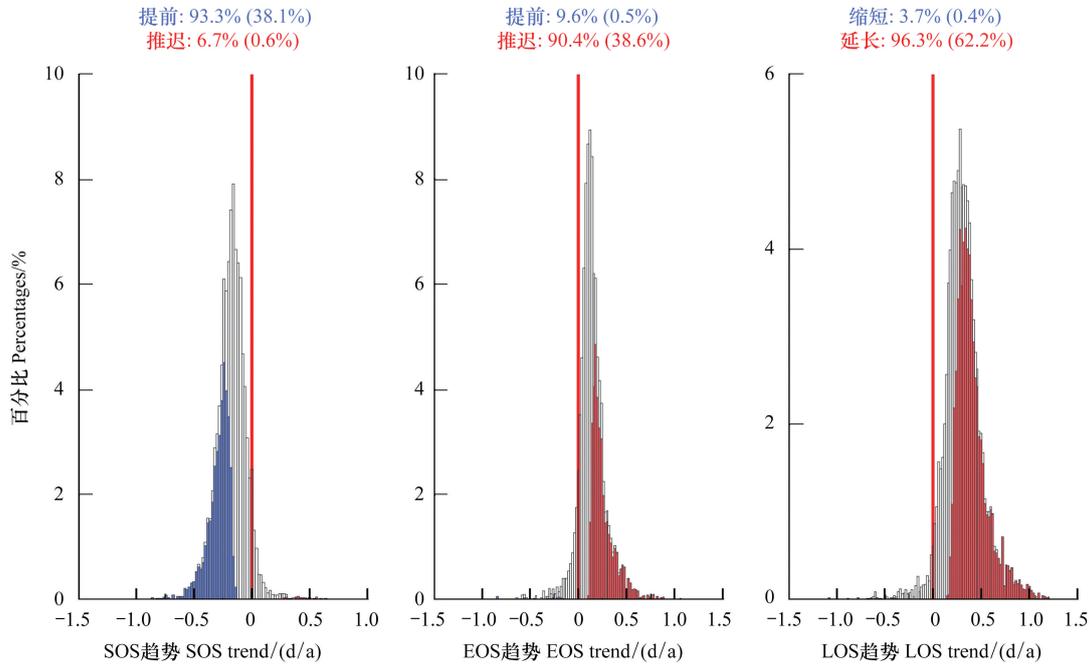


图 6 1982—2015 年北方地区典型林地物候年际变化频率直方图

Fig.6 Histogram of interannual variation frequency of typical woodland phenology in Northern China from 1982 to 2015
蓝色为显著提前,红色为显著推迟 ($P < 0.05$)

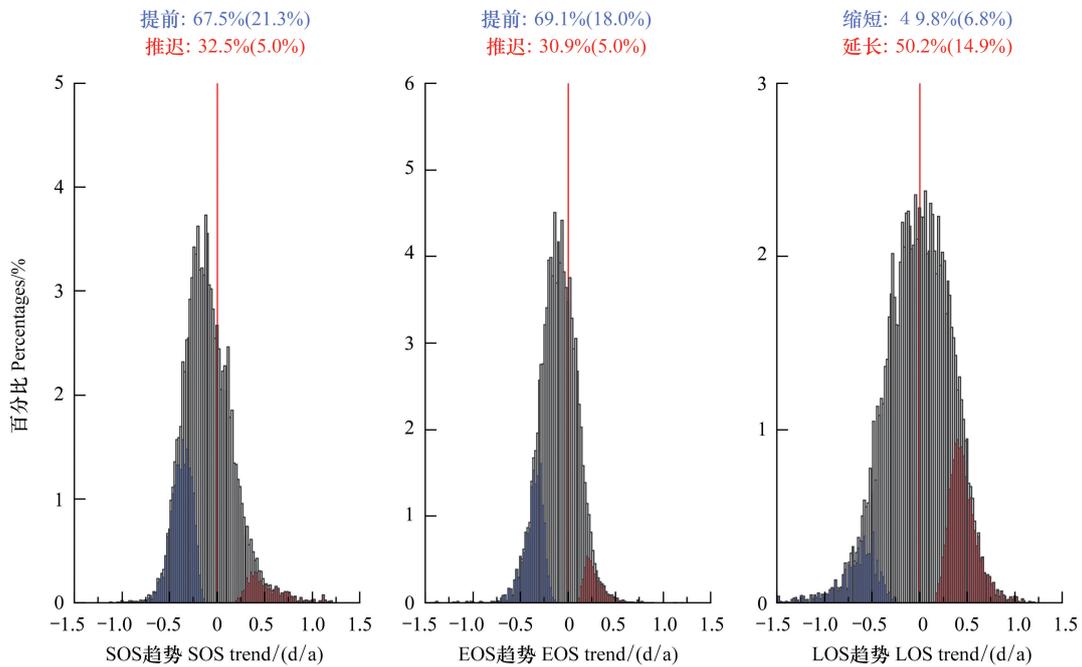


图 7 1982—2015 年北方地区典型草地物候年际变化频率直方图

Fig.7 Histogram of interannual variation frequency of typical grassland phenology in Northern China from 1982 to 2015
蓝色为显著提前,红色为显著推迟 ($P < 0.05$)

0.52, $R = 0.40$, $R = 0.44$); 草地与降水的负相关性也是先减弱后增强,但仅在 5 月达到显著负相关 ($R = -0.35$)。林地 EOS 与夏季辐射的负相关性最强; 草地 EOS 与辐射的正相关性逐渐减弱并在 7 月份逆转,显著相关的为

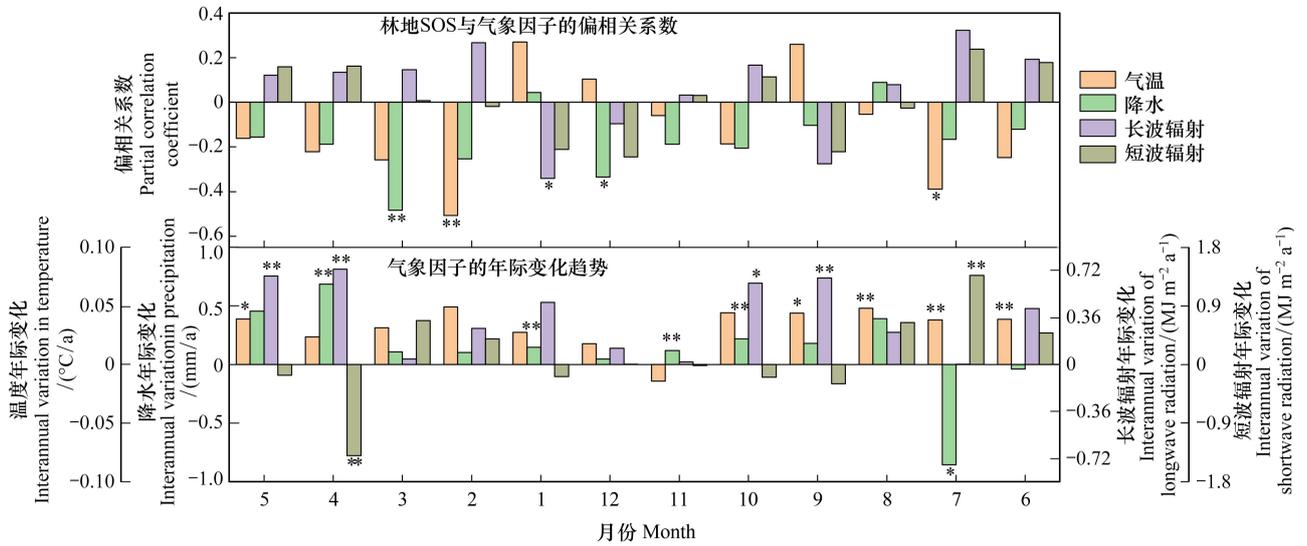


图8 北方地区典型林地 SOS 与气象因子的偏相关系数及气象因子的年际变化趋势

Fig.8 Partial correlation coefficient of typical woodland SOS and meteorological factors in Northern China and interannual variation trend of meteorological factors

* 为显著 ($P < 0.05$), ** 为极显著 ($P < 0.01$)

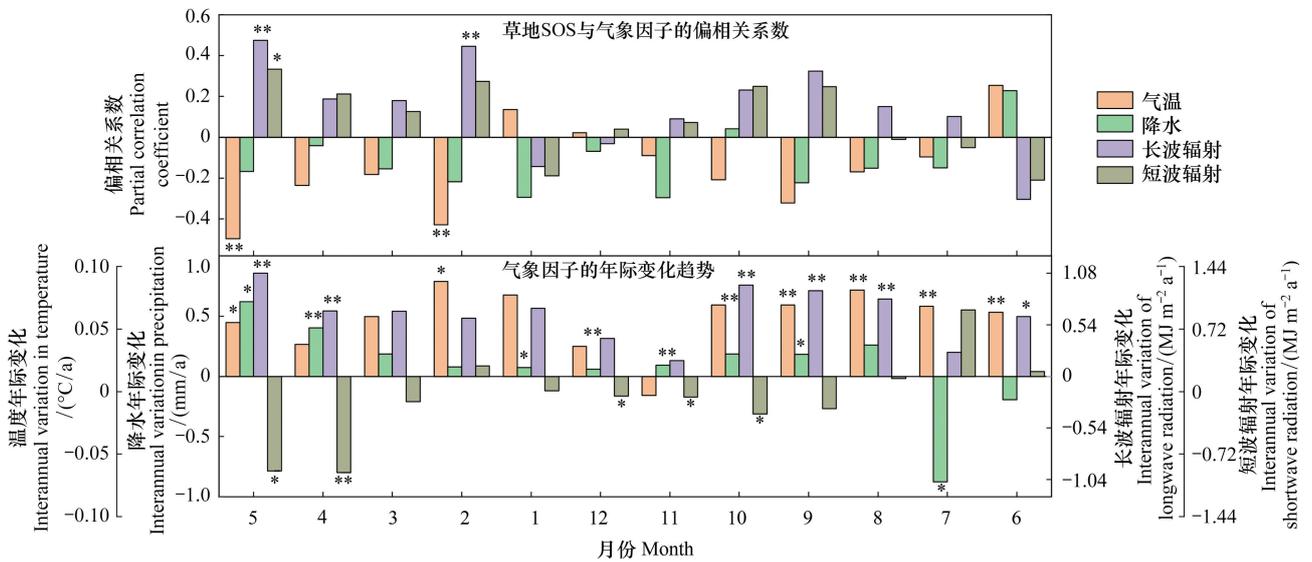


图9 北方地区典型草地 SOS 与气象因子的偏相关系数及气象因子的年际变化趋势

Fig.9 Partial correlation coefficient of typical grassland SOS and meteorological factors in Northern China and interannual variation trend of meteorological factors

* 为显著 ($P < 0.05$), ** 为极显著 ($P < 0.01$)

10 月长波辐射 ($R = 0.45$)、短波辐射 ($R = 0.43$) 以及 5 月长波辐射 ($R = -0.39$) 和短波辐射 ($R = -0.50$)。

4 讨论

(1) 林、草地 EOS 年际变化趋势相反, 本文认为是, 随着全球气温升高, 处于半湿润区的林地获得较好水热条件的时间得以延长, 故 EOS 逐渐推迟; 而草地一般处于高海拔半干旱区, 气温的升高则会加剧水分胁迫^[30], 从而迫使 EOS 逐渐提前; 林地物候指标的 C_v 值也小于草地, 原因是生产力较高的林地对于外部环境往

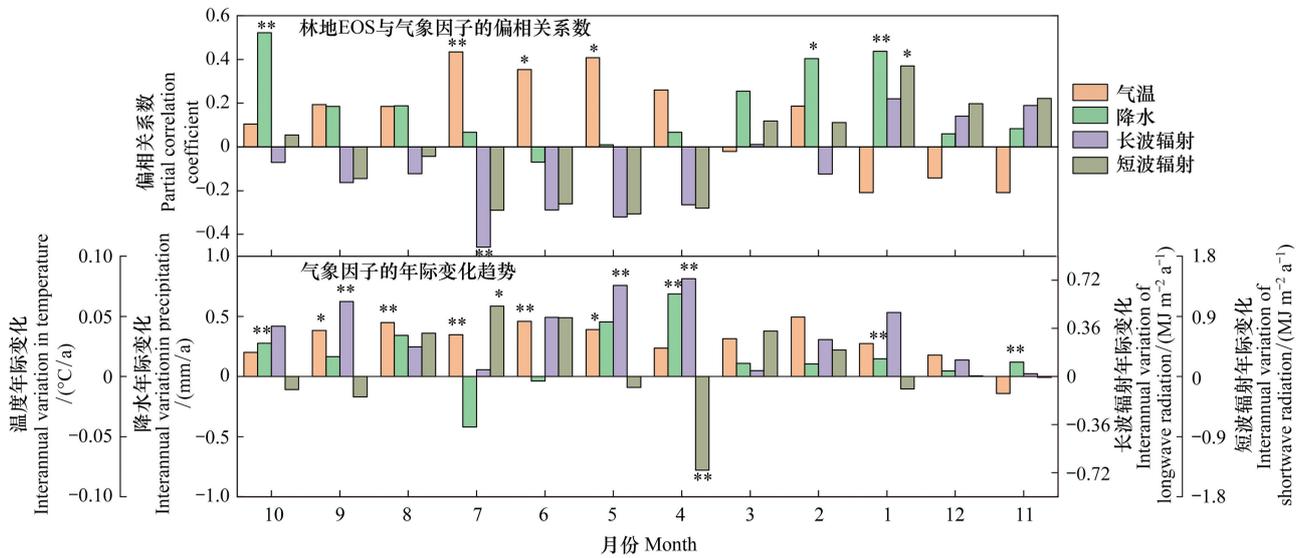


图 10 北方地区典型林地 EOS 与气象因子的偏相关系数及气象因子的年际变化趋势

Fig.10 Partial correlation coefficient of typical woodland EOS and meteorological factors in Northern China and interannual variation trend of meteorological factors

* 为显著 ($P < 0.05$), ** 为极显著 ($P < 0.01$)

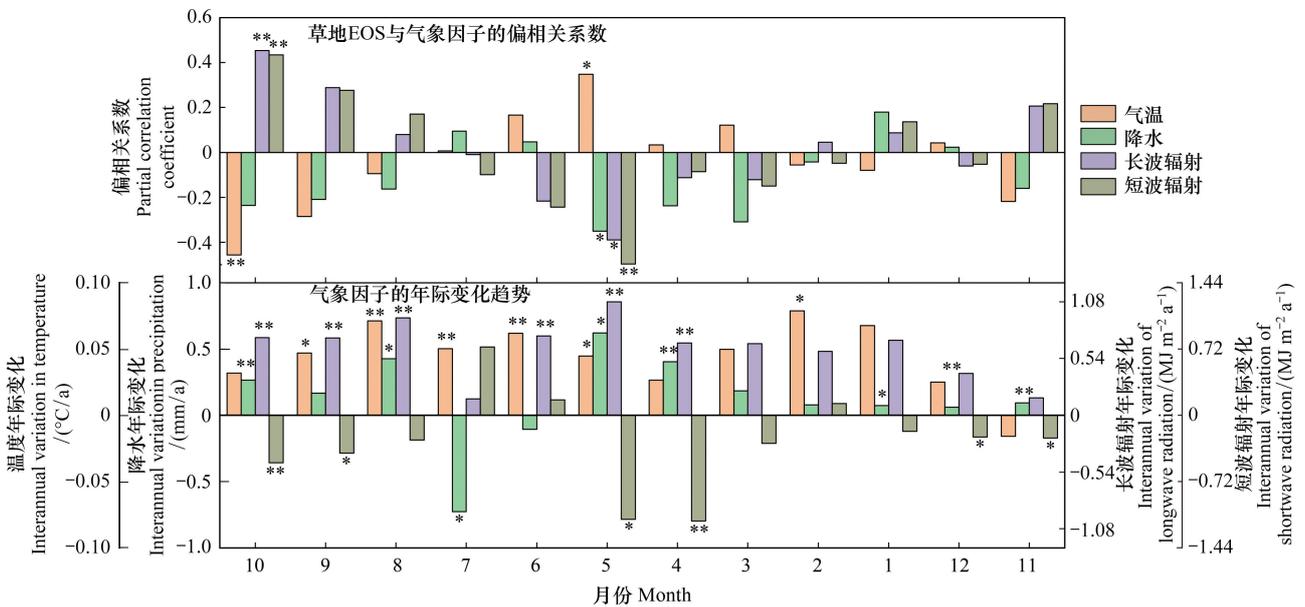


图 11 北方地区典型草地 EOS 与气象因子的偏相关系数及气象因子的年际变化趋势

Fig.11 Partial correlation coefficient of typical grassland EOS and meteorological factors in Northern China and interannual variation trend of meteorological factors

* 为显著 ($P < 0.05$), ** 为极显著 ($P < 0.01$)

往具有较低的敏感性和较高的耐受性^[29],所以林地物候离散程度小,研究中林草地 EOS 的 C_v 值小于 SOS 的结论也可以证明这一点。

(2) 林、草地 SOS 与气温在春季负相关转为冬季正相关,因为受休眠期冷激需求的影响,植被会进入生态休眠阶段,进行热量积累^[15,31-32],但在本文中冬季的强烈变暖不满足低温累积量,从而导致春季物候推

迟^[12,32-33]。随着春季温度升高,降水导致土壤水分增加,促使土壤微生物量增加及活动加强。之后,土壤有机质的分解、矿物元素的释放以及植物可吸收养分的增加开始促进植被生长^[34],这体现了降水对林草地返青期的“触发”作用^[35]。此外,辐射增加对草地 SOS 有推迟作用,这与辐射能量的增加会促进植物萌芽^[32]的结论不同,考虑是受多因子互作效应的影响,以后可进一步研究。

(3) 夏季变热和秋季变湿强烈推迟了林地区的 EOS^[25,36-37],在满足水量需求的情况下,气温升高可以增强有关光合作用的酶的活性,降低叶绿素的降解速率^[38]和植被暴露于秋季霜冻的可能性;秋季降水增加也会缓解水分胁迫^[37],从而使植被枯黄推迟。对于草地,秋季暖湿提前了 EOS,对应的辐射增加推迟了 EOS;原因是草地主要分布在干旱和半干旱地区,而秋季的升温会导致区域水资源量减少,加剧水分胁迫,加快叶绿素降解和增加植被死亡的风险;除此之外,在较冷的高海拔地区,降水增加也会加剧低温效应^[39],从而驱动 EOS 提前^[25],这说明了水分胁迫与低温效应的互作效应也会影响植被枯黄;而秋季辐射增加可以延缓脱落酸的积累,从而减缓叶片衰老的速度^[40]。值得注意的是,草地 EOS 与气象因子的关系在 7 月份发生转折,即气温、降水、辐射在不同的时段对物候的影响不同,这也能侧面体现物候是受多因子的协同控制,未来可以详细探究。

5 结论

本文基于 1982—2015 年的 GIMMS NDVI 3gv1 数据,采用动态阈值法提取了基于栅格的北方地区典型植被林、草地物候指标,探究了物候时空变化特征及其与气象因子的响应关系。结论如下:

(1) 北方地区典型林地 SOS 主要在第 109—129d,34 年间约提前 6d,EOS 在第 251—280d,推迟约 5d,LOS 为 122—167d,显著延长约 11d,不同区域的物候变化趋势没有显著差别。草地 SOS 主要在第 101—138d,提前约 3d,EOS 在 258—282d,提前约 3.3d,LOS 为 121—182d,不同区域物候变化趋势差异显著。林地物候分布比草地更为集中且离散程度更小,林地 SOS 略早于草地,EOS 明显早于草地,LOS 短于草地。

(2) 林地 SOS 对气象因子的响应跨越当年春季和上一年冬季,主要受冬末春初气温升高和降水增加而提前;EOS 受整个生长季的气候影响,尤其是夏季气温升高和春秋降水增加驱动了 EOS 推迟,而夏季辐射增加致使 EOS 提前;林地物候对气象因子的响应时间较长,越接近物候期相关性越弱,较强相关的时段主要在物候期前的 2—6 个月内。

(3) 草地 SOS 主要受春季气温升高和短波辐射减少而提前,受长波辐射增加而推迟,降水影响较小;EOS 受秋季气温升高、短波辐射减少以及 5 月降水和长波辐射的增加而提前,受秋季长波辐射增加而推迟。草地物候对气象因子的迟滞响应时间短,较强相关的时段主要在物候期当季。

参考文献 (References):

- [1] 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(03): 431-455.
- [2] 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.
- [3] 浮媛媛, 赵建军, 张洪岩, 贺红士, 郭笑怡. 基于生态地理分区的大兴安岭植被物候时空变化. 应用生态学报, 2016, 27(09): 2797-2806.
- [4] 乔灿灿, 贾铎, 程昌秀. 祁连山不同类型植被物候变化及其对温度的响应. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2022, 58(01): 168-177.
- [5] 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.
- [6] Zhou L, Zhou W, Chen J J, Xu X Y, Wang Y L, Zhuang J, Chi Y G. Land surface phenology detections from multi-source remote sensing indices capturing canopy photosynthesis phenology across major land cover types in the Northern Hemisphere. Ecological Indicators, 2022, 135: 108579.
- [7] 刘江, 谢遵博, 王千慧, 王婷婷, 郑晓, 宋立宁, 李秀芬. 北方防沙带东部区生态安全格局构建及优化. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3412-3423.
- [8] 苗百岭, 梁存柱, 韩芳, 梁茂伟, 张自国. 内蒙古主要草原类型植物物候对气候波动的响应. 生态学报, 2016, 36(23): 7689-7701.
- [9] 李俊霞, 白学平, 张先亮, 常永兴, 陆旭, 赵学鹏, 陈振举. 大兴安岭林区南、北部天然樟子松生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2017, 37(21): 7232-7241.
- [10] 俎佳星, 杨健. 东北地区植被物候时序变化. 生态学报, 2016, 36(07): 2015-2023.
- [11] 张雯. 内蒙古植被物候时空变化及其对气候变化的响应 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.

- [12] Wu C Y, Hou X H, Peng D L, Gonsamo A, Xu S G. Land surface phenology of China's temperate ecosystems over 1999 - 2013; Spatial - temporal patterns, interaction effects, covariation with climate and implications for productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216: 177-187.
- [13] 董晓宇, 姚华荣, 戴君虎, 朱梦瑶. 2000—2017 年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响. *地理科学进展*, 2020, 39(01): 24-35.
- [14] Ren S L, Qin Q M, Ren H Z, Sui J, Zhang Y. New model for simulating autumn phenology of herbaceous plants in the Inner Mongolian Grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275: 136-145.
- [15] 高成蹊, 王焕炯, 葛全胜. 增温和光周期变化对温带典型木本植物展叶始期的影响. *地理科学进展*, 2022, 41(03): 451-460.
- [16] 丛楠, 张扬建, 朱军涛. 北半球中高纬度地区近 30 年植被春季物候温度敏感性. *植物生态学报*, 2022, 46(02): 125-135.
- [17] Wang G C, Huang Y, Wei Y R, Zhang W, Li T T, Zhang Q. Inner Mongolian grassland plant phenological changes and their climatic drivers. *Science of the Total Environment*, 2019, 683: 1-8.
- [18] Chen X Q, Li J, Xu L, Liu L, Ding D. Modeling greenup date of dominant grass species in the Inner Mongolian Grassland using air temperature and precipitation data. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(4): 463-471.
- [19] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & geosciences*, 2004, 30(8): 833-845.
- [20] 王贝贝, 周淑琴, 荆耀栋, 宋晓静. 吕梁山地区植被物候变化及对气候的响应. *中国农学通报*, 2021, 37(16): 102-107.
- [21] 红英. 内蒙古极端气候变化对植被物候的影响研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [22] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 常庆瑞. 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. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 153-160.
- [23] 元志辉, 萨楚拉, 银山. 基于 MODIS 植被指数的浑善达克沙地植被物候变化. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5254-5263.
- [24] 周稳, 迟永刚, 周蕾. 基于日光诱导叶绿素荧光的北半球森林物候研究. *植物生态学报*, 2021, 45(04): 345-354.
- [25] Liu Q, Fu Y H, Zhu Z C, Liu Y W, Liu Z, Huang M T, Janssens I A, Piao S. Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology. *Global Change Biology*, 2016, 22(11): 3702-3711.
- [26] 包刚, 包玉龙, 阿拉腾图娅, 包玉海, 覃志豪, 王牧兰, 周义. 1982~2011 年蒙古高原植被物候时空动态变化. *遥感技术与应用*, 2017, 32(05): 866-874.
- [27] Bao G, Jin H G J L T, Tong S Q, Chen J Q, Huang X J, Bao Y H, Shao C L, Mandakh U, Chopping M, Du L T. Autumn phenology and its covariation with climate, spring phenology and annual peak growth on the mongolian plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 298-299: 108312.
- [28] 曳水琪. 物候变化对北半球不同植被类型生态系统生产力的影响 [D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [29] Xie Y Y, Wang X J, Wilson A M, Silander Jr J A. Predicting autumn phenology: how deciduous tree species respond to weather stressors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250-251: 127-137.
- [30] Zhang W, Wang L C, Xiang F F, Qin W M, Jiang W X. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105892.
- [31] Lin S Z, Wang H J, Ge Q S, Hu Z. Effects of chilling on heat requirement of spring phenology vary between years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 312: 108718.
- [32] 胡植, 王焕炯, 戴君虎, 葛全胜. 利用控制实验研究植物物候对气候变化的响应综述. *生态学报*, 2021, 41(23): 9119-9129.
- [33] 陶泽兴, 葛全胜, 戴君虎, 王焕炯. 1980—2018 年中国东部主要木本植物展叶始期的温度相关时段变化. *生态学报*, 2020, 40(21): 7777-7789.
- [34] 周磊, 何洪林, 张黎, 孙晓敏, 石培礼, 任小丽, 于贵瑞. 基于数码相机图像的西藏当雄高寒草地群落物候模拟. *植物生态学报*, 2012, 36(11): 1125-1135.
- [35] 李润东, 田文东, 于海群, 李鑫豪, 靳川, 刘鹏, 查天山, 田赉. 基于数字影像的北京松山森林物候模拟及其与气象因子的关系. *林业科学*, 2022, 58(01): 89-97.
- [36] Vitasse Y, Lenz A, Körner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 541.
- [37] 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.
- [38] Shi C G, Sun G, Zhang H X, Xiao B, Ze B, Zhang N N, Wu N. Effects of warming on chlorophyll degradation and carbohydrate accumulation of alpine herbaceous species during plant senescence on the Tibetan Plateau. *PLoS One*, 2014, 9(9): e107874.
- [39] 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(09): 3701-3712.
- [40] Gepstein S, Thimann K V. Changes in the abscisic acid content of oat leaves during senescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1980, 77(4): 2050-2053.