

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.006.

刘彬, 罗青红, 丰德恩, 等. 中国北方地区植被春季光合物候对气候因素的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 237-242.

Liu Bin, Luo Qinghong, Feng Deen, et al. Responses of Vegetation Photosynthetic Phenology in Spring to Climate Factors in Northern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 237-242.

中国北方地区植被春季光合物候对气候因素的响应

刘彬^{1,2}, 罗青红³, 丰德恩⁴, 李成¹

(1.扬州大学 植物保护学院, 江苏 扬州 225009; 2.扬州大数据集团有限公司, 江苏 扬州 225100;
3.新疆林业科学院 造林治沙研究所, 乌鲁木齐 830063; 4.中国气象局 公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: [目的]探究植被春季光合物候(SOS)的时空变化趋势,揭示气候因素对其影响贡献,为区域植被固碳能力提升提供科学依据。[方法]以中国北方地区为例,基于日光诱导叶绿素荧光反演的总初级生产力数据(GOSIF-GPP)、气象数据等分析了该地区 2001—2020 年 SOS 的变化特征,并揭示了其对不同气候因素(如最低气温、最高气温、降水和太阳辐射)的响应差异。[结果](1) 中国北方地区 SOS 的平均值主要出现在第 105~150 天,较晚的 SOS 主要分布在青海和内蒙古中东部。(2) 2001—2020 年区域年平均 SOS 呈显著提前趋势($p<0.05$),变化幅度为 -0.31 d/a,且不同植被类型的 SOS 均呈显著提前趋势($p<0.05$)。(3) SOS 对 4 个气候因素呈负敏感性,特别是最高气温和最低气温是影响 SOS 变化的重要气候因素,反映了气温升高有利于中国北方大部分地区 SOS 提前。[结论]中国北方地区 SOS 变化具有异质性,且气温是影响 SOS 变化的主要因素。

关键词: 植被春季光合物候; 时空变化; 气候因素; 中国北方地区

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0237-06

Responses of Vegetation Photosynthetic Phenology in Spring to Climate Factors in Northern China

Liu Bin^{1,2}, Luo Qinghong³, Feng Deen⁴, Li Cheng¹

(1.School of Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2.Yangzhou Big Data Group Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225100, China; 3.Institute of Afforestation and Sand Control, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China; 4.CMA Public Meteorological Service Center, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to understand the spatiotemporal trends in vegetation photosynthetic phenology (SOS) in spring, to reveal the contribution of climate factors, and to provide a scientific basis for increasing carbon sequestration capacity of vegetation. [Methods] Northern China was taken as a case study. The changing characteristics of SOS from 2001 to 2020 in this region were analyzed based on the gross primary productivity data from solar-induced chlorophyll fluorescence (GOSIF-GPP) and meteorological data. Furthermore, the responses of different climate factors (e. g., minimum air temperature, maximum air temperature, precipitation, and solar radiation) on SOS were assessed. [Results] The mean value of SOS in northern China mainly occurred from the 105th day to the 150th day in a year, and the later SOS was mainly distributed in Qinghai and east-central Inner Mongolia. The regional mean SOS from 2001 to 2020 showed a significant advancing trend ($p<0.05$) with a magnitude of -0.31 d/a, and the SOS of all vegetation types showed a significant advancing trend ($p<0.05$). The SOS was negatively sensitive to four climate factors, especially the maximum and minimum air temperatures were important

收稿日期: 2024-01-09

修回日期: 2024-02-15

资助项目: 阿克苏河流域山水林田湖草沙系统治理项目(AKSSSX2022620); 江苏省科协青年科技人才托举工程项目(TJ-2023-032); 扬州大学人文社会科学研究资助项目(xjj2023-05); 扬州大学“青蓝工程”资助项目(2023)

第一作者: 刘彬(1990—), 男, 江苏扬州人, 硕士, 工程师, 研究方向为 3S 集成与气象应用。E-mail: liubin752@163.com

通信作者: 李成(1988—), 男, 江苏南京人, 博士, 副教授, 主要从事地气交换与气候变化研究。E-mail: licheng_nj@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

climate factors influencing the SOS changes, reflecting that warmer temperature was favorable to the advancing SOS in the most region of northern China. [Conclusion] The SOS changes in the northern China are heterogeneous, and air temperature is the main factor affecting SOS changes.

Keywords: vegetation photosynthetic phenology in spring; spatiotemporal change; climate factors; northern China

植被不仅是陆地生态系统的重要组成部分,也是气候变化的“指示器”,在全球变化研究中具有重要作用^[1]。作为描述植被生长过程中发生周期性变化的自然现象,植被物候通过调控生态系统水、热、碳交换过程,从而对生态系统功能产生重要影响^[2]。随着全球变暖的不断加剧,升温与降水模式的改变使植被物候发生了明显变化^[3];同时,物候变化也通过生物物理和生物化学等过程影响区域气候^[4]。在许多物候指标中,春季光合物候(SOS)被定义为植被生长季节的开始,是决定生长季长度的关键变量之一^[5]。因此,研究 SOS 的变化对揭示植被生长对气候变化的响应以及提高植被固碳能力具有重要意义。

与地面监测相比,应用卫星遥感数据可以将植被物候监测推向更长时间尺度和更大空间尺度。例如,一些研究利用归一化植被指数(NDVI)数据分析了不同区域植被春季绿度物候(SOS-G)的变化特征,但相关结果并不统一^[6-8]。具体而言,Schwartz 等^[9]发现北半球 SOS-G 呈现出提前趋势,这主要归因于气温的升高;虽然气温持续升高,但在青藏高原、北美、加拿大和西伯利亚部分地区 SOS-G 的提前趋势已经放缓甚至反转^[10-11]。另一方面,不同气候因素对 SOS-G 变化的影响也较为复杂。Piao 等^[12]发现最高气温(T_{\max})的升高对 SOS-G 有重要影响;但在青藏高原和中国温带草原,最低气温(T_{\min})对 SOS-G 的影响似乎更大^[13-14],同时降水(Pre)和太阳辐射(Rad)也会对干旱半干旱地区 SOS-G 变化产生不同程度的调控作用^[15]。近年来的研究表明,由于 NDVI 数据主要反映植被绿度信息,且易受到土壤、云等因素的影响,使其对 SOS 的监测结果存在一定的偏差^[16]。而日光诱导叶绿素荧光作为光合作用的直接探针,能对植物的生理状态做出快速响应,由日光诱导叶绿素荧光反演的总初级生产力数据(GOSIF-GPP)与植被光合作用的季节性变化关系密切,这为从春季光合作用开始时间的角度,监测 SOS 提供了新视角^[17-18],但目前有关 SOS 的变化特征以及 SOS 对多种不同气候因素的响应尚不明晰。

中国北方地区包括东北、西北和华北,总面积约占中国国土面积的 56.9%。近几十年来,该地区出现了明显的升温趋势,幅度超过了 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[19],对植被生长已产生了深远的影响^[20]。为此,本研究以中国北方地区

为例,基于 GOSIF-GPP 数据分析该地区 2001—2020 年 SOS 的变化特征,并揭示其对不同气候因素(如 T_{\min} , T_{\max} , Pre 和 Rad)的响应差异。相关研究结果对于提高植被固碳能力以及保障生态环境建设等具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

中国北方地区($97^{\circ}12'\text{E}$ — $135^{\circ}05'\text{E}$, $34^{\circ}34'\text{N}$ — $53^{\circ}33'\text{N}$)共有 9 个省、2 个直辖市、2 个自治区组成,面积为 $2.35\times 10^6\text{ km}^2$ 。研究区东部以平原为主,中西部分布有高原和盆地。在复杂的环流系统影响下,气候从东部的温带季风气候过渡到中西部的温带大陆性气候,包括寒温带、中温带、暖温带和高原区,具有夏暖冬冷的特点。虽然降水主要发生在夏季,但年降水量空间差异较大,从西部 50 mm 到东部 1 200 mm。由于气温、降水条件的不均衡,中国北方地区的中东部以森林、农田和草地为主,但西部以草地、沙漠和戈壁为主。

本研究所用的数据如下:(1) GOSIF-GPP 数据来源于 <http://data.globalecology.unh.edu/>,空间分辨率为 0.05° ,时间分辨率为 8 d,时间从 2001 年到 2020 年;(2) 2000—2020 年中国北方 312 个气象站点逐月 T_{\min} , T_{\max} , Pre 和 Rad 数据,来源于国家气候中心;(3) 植被类型数据来源于中国科学院,由于农田受人类活动影响较强,在本研究中暂未考虑。因此研究区共包括 7 种植被类型,如落叶针叶林(DNF)、落叶阔叶林(DBF)、灌丛(Bush)、高山草甸(AM)、草甸(MEA)、坡草地(SG)、平原草地(PG)等。

1.2 研究方法

本研究采用动态阈值法从 GOSIF-GPP 数据中提取 SOS,首先通过自适应 Savitzky-Golay 滤波法对 GPP 数据进行平滑;然后,使用如下公式计算 GPP 的变化率:

$$\text{GPP}_r = \frac{\text{GPP}_t - \text{GPP}_{\min}}{\text{GPP}_{\max} - \text{GPP}_{\min}} \quad (1)$$

式中: GPP_r 为 GPP 变化率; GPP_t 为某一天 GPP 值; GPP_{\max} 和 GPP_{\min} 为 GPP 的最大值和最小值。参照已有研究^[18-19],我们将变化率超过 0.2 时的第一天,定义为 SOS。它的提取过程通过 TIMESAT 软件计算完成。

本研究采用一元线性回归方法计算 SOS 的变化趋势,公式如下:

$$\text{Trend} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times D_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n D_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: Trend 为 SOS 的变化趋势; D_i 为每一年 SOS 的日期; i 为年份。

考虑到气候因素对 SOS 的影响有累积效应, 通过使用偏相关分析方法确定不同气候因素的季前期长度^[17]。设定影响 SOS 的季前期时段从上一年的 11 月至当年 4 月, 以 SOS 和季前期 T_{\min} 的偏相关为例, 分别计算 SOS 与其所在月份前 0, 1, ..., 6 个月 T_{\min} 之间的偏相关系数, 同时排除相同时间范围的其他气候因素, 以这些相关系数绝对值的最大值所对应的月份为季前期长度。相应地, 可以获得各气候因素的最佳季前期长度。

在此基础上, 对 SOS 与季前期各气候因素之间进行多元回归分析。该方法在排除其他因素影响的同时, 检测各气候因素对 SOS 的影响。计算公式如下:

$$\text{SOS} = \alpha \times T_{\min} + \beta \times T_{\max} + \gamma \times \text{Pre} + \delta \times \text{Rad} + \theta \quad (3)$$

式中: SOS 为年 SOS 序列; α, β, γ 和 δ 分别为 4 个气候因素对 SOS 的回归系数; θ 为该公式的截距。进一步利用公式(3)计算 4 个气候因素的标准化回归系数。本研究将回归系数绝对值最大的气候因素确定为影响 SOS 变化的最重要因素。研究中显著性水平设置为 0.05。如果无法确定最重要的气候因素, 则标记为“None”。

2 结果与分析

2.1 中国北方地区 SOS 的空间分布

2001—2020 年中国北方地区 SOS 主要出现在一年中第 105~150 天(DOY), 平均为 130 DOY(图 1A)。在像元尺度上, 研究区约有 9.22% 的像元呈现出较早的 SOS(<105 DOY), 它们主要分布在陕西和山西; 而较晚的 SOS(>150 DOY) 主要分布在青海和内蒙古中东部, 约占研究区像元比例的 15.74%。中国北方地区 SOS 的标准差(SD)主要在 3~12 d(图 1B)。其中大部分像元(>88%) SOS 的 SD 小于 9 d, 仅有 3.45% 的像元 SD 较高(>12 d), 主要位于内蒙古东部。

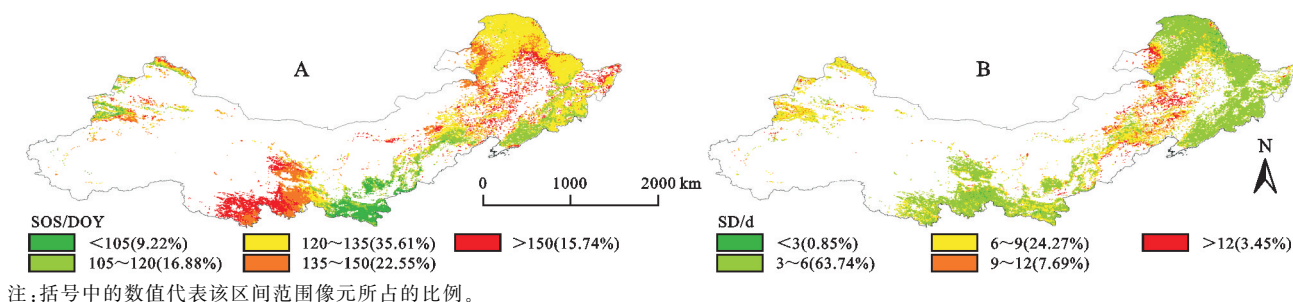


图 1 中国北方地区 SOS 平均值和 SD 的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of mean value and SD of SOS in northern China

中国北方地区不同植被类型 SOS 平均值和 SD 的统计结果, 见表 1。DBF 和 SG 有较早的 SOS(<120 DOY), 但 AM 的 SOS 较迟(>140 DOY)。SOS 在 DNF, AM 和 MEA 中具有较低的 SD(<3 d), 但在 Bush 中 SD 较高(>3.5 d)。

表 1 不同植被类型 SOS 的平均值、SD 和变化趋势

Table 1 Mean value, SD and trend of SOS in different vegetation types

植被类型	平均值/ DOY	SD/d	变化趋势/ (d · a ⁻¹)
DNF	127.94	2.85	-0.25
DBF	119.75	3.04	-0.28
Bush	128.90	3.51	-0.43
AM	145.23	2.94	-0.30
MEA	139.40	2.71	-0.31
SG	105.91	3.28	-0.30
PG	132.55	3.29	-0.34

注: 下划线数字代表变化趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

2.2 中国北方地区 SOS 的变化趋势

2001—2020 年中国北方地区年平均 SOS 呈显著提前趋势($p<0.05$), 为 -0.31 d/a(图 2)。对于像元尺度而言, 研究区 SOS 的变化趋势在 $-5.28 \sim 2.26$ d/a(图 3A), 近 88.82% 的像元表现出提前趋势, 其中约有 32.82% 的像元通过了显著性检验($p<0.05$), 主要分布在陕西、山西和内蒙古的东北部地区(图 3B)。

中国北方地区不同植被类型 SOS 的变化趋势结果, 见表 1。研究区所有植被类型 SOS 都呈显著提前趋势($p<0.05$), 其中 Bush 和 PG 的 SOS 提前趋势超过 -0.34 d/a; 而 DNF 和 DBF 的 SOS 提前趋势较小, 在 -0.28 d/a 以下。

2.3 中国北方地区 SOS 对气候因素的敏感性

如图 4A 所示, 研究区约有 63.70% 的像元 SOS 对 T_{\min} 呈负敏感性, 其中敏感性小于 -5 d/°C 的像元占比为 23.32%, 主要分布在西北地区南部、内蒙古东北部、黑龙江北部、东北南部、新疆北部(图 4A)。与 T_{\min} 相似, 研究区约有 54.87% 的像元 SOS 对 T_{\max} 呈负敏感性, 其中

敏感性小于 $-5\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 的像元占比为 16.86%，主要分布在内蒙古东北部、黑龙江北部、新疆部分地区(图 4B)。这些结果表明,季前期气温(包括 T_{\min} 和 T_{\max})的升高有利于中国北方大部分地区 SOS 提前。

对于 Pre 和 Rad 而言,分别有 63.35%,73.12% 的像元与 SOS 之间呈负敏感性(图 4C—D)。其中 SOS 对 Pre 呈负敏感性的像元主要集中在京津冀、内蒙古中北部和东北南部地区(图 4C),而 SOS 对 Rad 呈负敏感性的像元分布在西北地区南部、内蒙古东北部、京津冀以及新疆部分地区(图 4D)。

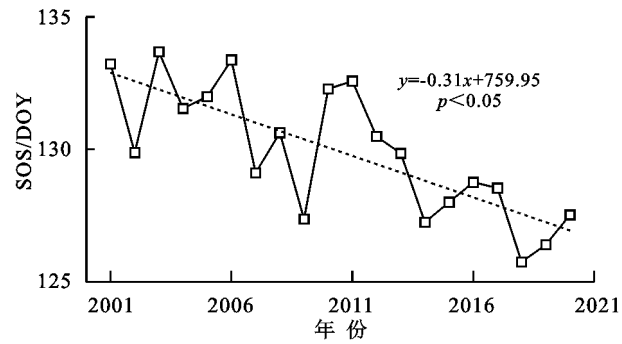


图 2 中国北方地区 SOS 变化曲线
Fig. 2 Changes of SOS in northern China

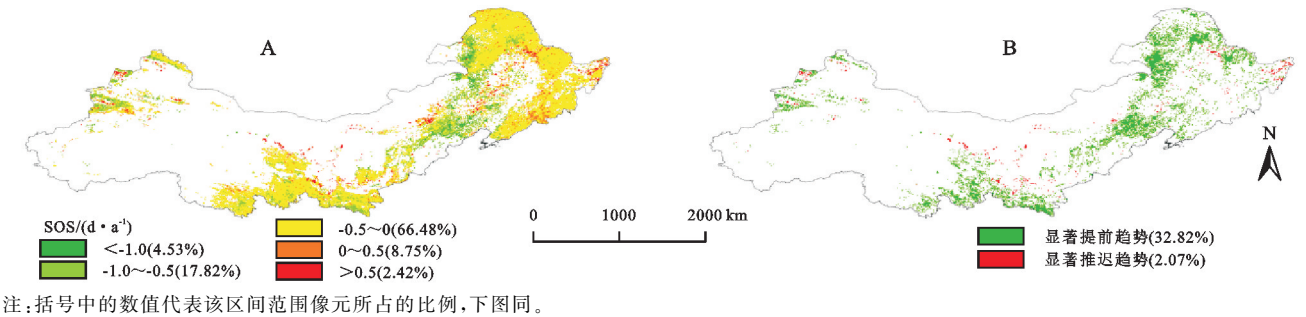


图 3 中国北方地区 SOS 变化趋势的空间分布
Fig. 3 Changes of SOS and spatial distributions of SOS trends in northern China

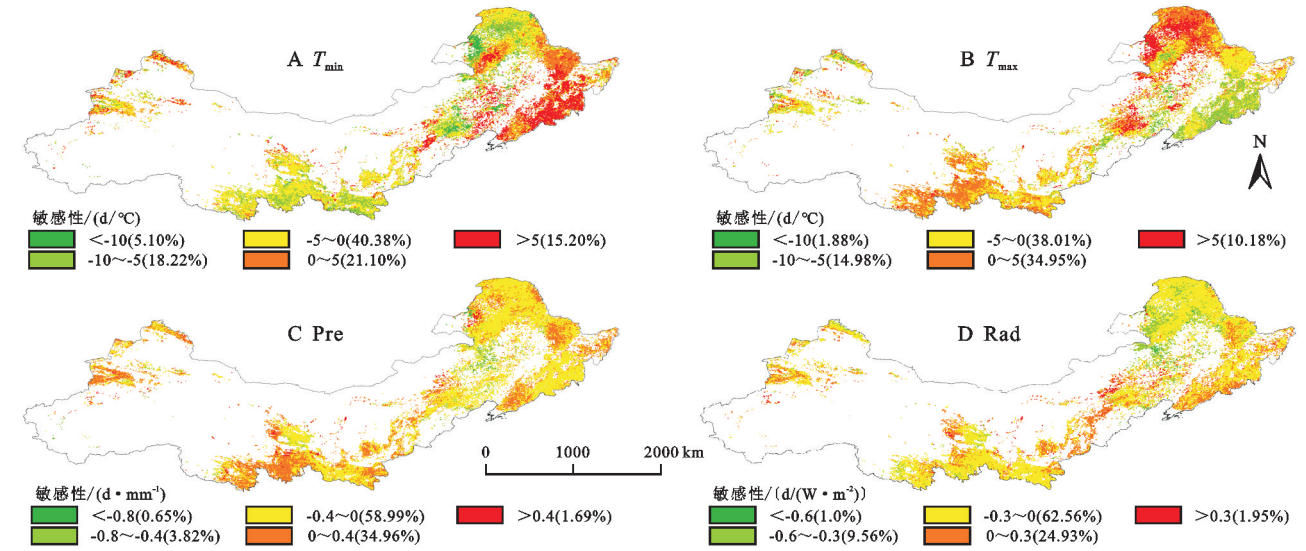


图 4 中国北方地区 SOS 对气候因素的敏感性
Fig. 4 Sensitivity of SOS to climate factors in northern China

2.4 中国北方地区 SOS 变化的重要气候因素

根据最大标准化回归系数和显著性水平,进一步确定影响 SOS 变化的最重要气候因素,如图 5 所示。在 4 个气候因素中,气温是最重要的因素,约占研究区像元比例的 44.44%。其中 T_{\min} 和 T_{\max} 是最重要因素的像元占比分别为 21.80%,22.64%,特别是在新疆、黑龙江北部和内蒙古东北部地区 SOS 主要受 T_{\max} 的影响。除气温外,研究区约有 13.82% 的像元 SOS 主要受 Rad 的影响,但在内蒙古东部和北部地区 Pre 是影响 SOS 的最重要因素,占比约为 4.69%。

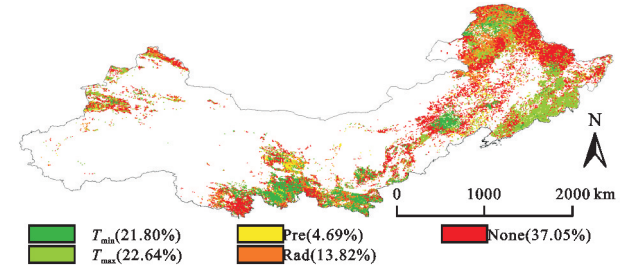


图 5 中国北方地区 SOS 变化的重要气候因素分布
Fig. 5 Distribution of important climate factors for SOS change in northern China

由表 2 可知,气温是中国北方地区不同植被类型

SOS变化最重要的气候因素,其次是 Rad,但 Pre 的影响力较弱。在气温中, T_{\max} 对 DNF, DBF, Bush, MEA 和 PG 的 SOS 影响相对较大,而 T_{\min} 对 AM, SG 的 SOS 影响较大。

表2 不同植被类型 SOS 变化的重要气候因素所占比例

植被类型	T_{\min}	T_{\max}	Pre	Rad	None
DNF	12.36	22.92	1.16	30.04	33.52
DBF	17.70	41.88	2.28	6.80	31.34
Bush	24.33	24.60	6.06	4.81	40.20
AM	41.82	7.35	6.28	13.16	31.39
MEA	13.76	16.07	6.77	18.27	45.13
SG	28.04	14.64	4.66	12.07	40.59
PG	18.26	20.76	8.47	9.79	42.72

3 讨论

中国北方地区 SOS 的空间分布存在较大差异,较晚的 SOS 主要分布在高海拔和干旱地区(如青海和内蒙古中东部等区域),这是因为在较高海拔的地方,春季气温较低^[21];而在干旱地区水分受限,发芽和叶片生长通常缓慢,导致 SOS 延迟。反之,较早的 SOS 主要出现在温暖湿润的区域^[22]。

本研究发现中国北方地区 SOS 有明显的提前趋势($p < 0.05$),这与之前北半球大部分地区基于 NDVI 数据的 SOS-G 结果相似,但变化幅度存在差异。特别是中国北方地区 SOS 的提前幅度(-0.31 d/a)大于新疆^[23](-0.19 d/a)、中国温带^[24](-0.18 d/a)和欧亚大陆中东部^[25](-0.2 d/a)。这种差异可能与不同地区的自然环境、研究时段和研究数据等有关,但同时也间接反映了中国北方地区是全球变化背景下植被-气候相互作用的敏感区^[26]。

气温被认为是 SOS 变化的主要影响因素,这在以往的研究中已有报道^[27],但与以往研究不同,本研究进一步比较了 T_{\min} 和 T_{\max} 对中国北方地区 SOS 的影响,发现 T_{\max} 的影响略强于 T_{\min} ^[28-29]。一方面,返青期前 T_{\max} 高于 T_{\min} ,能更有效满足触发叶片萌发的温度要求;并且由于植物光合作用发生在白天,因此 T_{\max} 对植物碳固定和能量捕获的作用更大,从而对 SOS 产生重要影响。但同时 T_{\min} 的升高可以降低春季冻害的风险,改变土壤解冻的频率和强度,进而也会使 SOS 提前。考虑到气候变化背景下 T_{\min} 比 T_{\max} 的升高速率更快^[30],今后还需要通过控制试验,进一步理解 T_{\min} 和 T_{\max} 对不同类型植被 SOS 的影响机制。此外,Pre 是影响干旱和半干旱地区 SOS 的重要因素,这是因为根部周围的水分可用性通常会限制植被的生长^[29]。

需要说明的是,本研究目前主要分析了中国北方地区 SOS 对气候因素的响应,考虑到非气候因素(如大气 CO_2 浓度和氮沉降)也会影响 SOS 的变化,因此今后有必要进一步分析区域 SOS 对非气候因素的响应,从而更好地理解 SOS 的变化机制。

4 结论

(1) 2001—2020 年中国北方地区 SOS 平均值主要出现在第 105~150 天,年平均 SOS 呈显著提前趋势($p < 0.05$),变化幅度为 -0.31 d/a。

(2) 不同植被类型的 SOS 存在明显差异,其中 AM 的 SOS 出现最晚,但各植被类型的 SOS 均表现出不同程度的提前趋势($p < 0.05$)。

(3) 研究区大多数像元 SOS 与 4 个气候因素之间存在负敏感性,其中 T_{\max} 是 SOS 变化的最重要气候因素,其次是 T_{\min} ,二者约占研究区像元比例的 44.44%。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Zhang Y R, Zhang J, Xia J Y, et al. Effects of vegetation phenology on ecosystem water use efficiency in a semiarid region of northern China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022,13:945582.
- [3] 张晶,郝芳华,吴兆飞,等.植被物候对极端气候响应及机制[J].*地理学报*,2023,78(9):2241-2255.
Zhang J, Hao F H, Wu Z F, et al. Response of vegetation phenology to extreme climate and its mechanism [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023,78(9):2241-2255.
- [4] Xu X Y, Riley W J, Koven C D, et al. Earlier leaf-out warms air in the north [J]. *Nature Climate Change*, 2020,10(4):370-375.
- [5] 李佳,唐志光,邓刚,等.2001—2020 年青藏高原草地物候变化遥感监测[J].*水土保持研究*,2023,30(4):265-274.
Li J, Tang Z G, Deng G, et al. Remote sensing monitoring of grassland phenological changes in the Qinghai-Tibetan Plateau during 2001—2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(4):265-274.
- [6] Shen X J, Liu B H, Xue Z S, et al. Spatiotemporal variation in vegetation spring phenology and its response to climate change in freshwater marshes of Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,666:1169-1177.
- [7] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010,107(51):22151-22156.
- [8] Zhang Q, Kong D D, Shi P J, et al. Vegetation phenology on the Qinghai-Tibetan Plateau and its response to climate change (1982—2013) [J]. *Agricultural and*

- Forest Meteorology, 2018, 248: 408-417.
- [9] Schwartz M D, Ahas R, Aasa A. Onset of spring starting earlier across the northern Hemisphere[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 343-351.
- [10] Wang X H, Piao S L, Xu X T, et al. Has the advancing onset of spring vegetation green-up slowed down or changed abruptly over the last three decades[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(6): 621-631.
- [11] Wang X F, Xiao J F, Li X, et al. No trends in spring and autumn phenology during the global warming hiatus[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2389.
- [12] Piao S L, Tan J G, Chen A P, et al. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6911.
- [13] Shen M G, Piao S L, Chen X Q, et al. Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 3057D3066.
- [14] Shen X J, Liu B H, Henderson M, et al. Asymmetric effects of daytime and nighttime warming on spring phenology in the temperate grasslands of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 240-249.
- [15] 杨梅焕, 靳小燕, 王涛. 毛乌素沙地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 242-249.
- Yang M H, Jin X Y, Wang T. Vegetation phenology change of Mu Us sandy land and its response to climate change[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 242-249.
- [16] 周蕾, 迟永刚, 刘啸添, 等. 日光诱导叶绿素荧光对亚热带常绿针叶林物候的追踪[J]. *生态学报*, 2020, 40(12): 4114-4125.
- Zhou L, Chi Y G, Liu X T, et al. Land surface phenology tracked by remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence in subtropical evergreen coniferous forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12): 4114-4125.
- [17] 任培鑫, 李鹏, 彭长辉, 等. 洞庭湖流域植被光合物候的时空变化及其对气候变化的响应[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(3): 319-330.
- Ren P X, Li P, Peng C H, et al. Temporal and spatial variation of vegetation photosynthetic phenology in Dongting Lake basin and its response to climate change[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(3): 319-330.
- [18] Fang J, Li X, Xiao J F, et al. Vegetation photosynthetic phenology dataset in northern terrestrial ecosystems[J]. *Scientific Data*, 2023, 10: 300.
- [19] Wen K M, Ren G Y, Li J, et al. Recent surface air temperature change over mainland China based on an urbanization-bias adjusted dataset [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(10): 2691-2705.
- [20] 赵心睿, 刘冀, 杨少康, 等. 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[J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3744-3755.
- Zhao X R, Liu J, Yang S K, et al. Spatio-temporal variations of typical woodland and grassland phenology and its response to meteorological factors in Northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3744-3755.
- [21] Mei L, Bao G, Tong S Q, et al. Elevation-dependent response of spring phenology to climate and its legacy effect on vegetation growth in the mountains of northwest Mongolia[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107640.
- [22] Muffler L, Beierkuhnlein C, Aas G, et al. Distribution ranges and spring phenology explain late frost sensitivity in 170 woody plants from the Northern Hemisphere[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(9): 1061-1071.
- [23] Li C, Wang R H, Cui X F, et al. Responses of vegetation spring phenology to climatic factors in Xinjiang, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107286.
- [24] Fu Y H, Zhou X C, Li X X, et al. Decreasing control of precipitation on grassland spring phenology in temperate China[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(2): 490-499.
- [25] Jin H X, Jönsson A M, Olsson C, et al. New satellite-based estimates show significant trends in spring phenology and complex sensitivities to temperature and precipitation at northern European latitudes [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2019, 63(6): 763-775.
- [26] 韩士杰, 袁志友, 方运霆, 等. 中国北方森林和草地生态系统碳氮耦合循环与碳源汇效应研究[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(12): 128-130.
- Han S J, Yuan Z Y, Fang Y T, et al. Coupling of carbon and nitrogen, source and sink of carbon in forest and grassland ecosystems of Northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(12): 128-130.
- [27] Lin S Z, Wang H J, Ge Q S, et al. Effects of chilling on heat requirement of spring phenology vary between years[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 312: 108718.
- [28] Yuan M X, Wang L C, Lin A W, et al. Variations in land surface phenology and their response to climate change in Yangtze River Basin during 1982—2015[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(3): 1659-1674.
- [29] Zhang R R, Qi J Y, Leng S, et al. Long-term vegetation phenology changes and responses to pre-season temperature and precipitation in Northern China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1396.
- [30] Fu Y H, Liu Y J, De Boeck H J, et al. Three times greater weight of daytime than of night-time temperature on leaf unfolding phenology in temperate trees[J]. *The New Phytologist*, 2016, 212(3): 590-597.