DOI: 10.20103/j.stxb.202311142468

赵倚霈,刘建锋,王奇,黄睿智,孙婧依,聂稳,杨绍微.不同植被类型物候对冰冻事件的响应差异及其驱动力.生态学报,2024,44(15):6744-6757. Zhao Y P, Liu J F, Wang Q, Huang R Z, Sun J Y, Nie W, Yang S W.Differences in the response of different vegetation types to frost event and their driving forces. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15):6744-6757.

不同植被类型物候对冰冻事件的响应差异及其驱动力

赵倚霈1,刘建锋1,*,王 奇1,黄睿智2,孙婧依1,聂 稳2,杨绍微1

1 林木资源高效生产全国重点实验室,国家林业和草原局林木培育重点实验室,中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091 2 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所,北京 100091

摘要:全球气候变化导致极端气候发生频率和强度增加,探究植被对极端气候的响应与适应是评估区域植被脆弱性和制定适应 性经营策略的重要前提。以 2008 年中国南方极端冰冻事件为例,利用 2003—2009 年日光诱导叶绿素荧光(SIF)遥感数据提取 植被物候,探讨了极端冰冻事件对不同植被类型物候的影响,并采用地理探测器分析各环境因子及其交互作用对植被物候变化 的贡献度。结果表明:(1)极端冰冻事件导致植被生长季开始期(SOS)提前 2.96 d、生长季结束期(EOS)推迟 10.47 d 和生长季 长度(LOS)延长 12.79 d,其中常绿阔叶林物候变化趋势最大,而落叶阔叶林物候变化趋势最小。(2)研究区水热条件的空间分 异性影响了植被物候空间变化格局,如东南部水热条件充足区的物候变化趋势更明显,而西北部山区植被物候变化与整体变化 趋势相反,即呈现 SOS 推迟和 EOS 提前趋势。(3)降水、气温、相对湿度、土壤类型和植被类型是影响植被物候的主导因子,其 中气温和降水对植被 EOS 的解释力最高,分别为 0.6522 和 0.5280。(4)各因子交互作用结果均表现为双因子增强或非线性增 强效应,其中气候因子间的交互作用最强,而气候因子与土壤类型、植被类型、冰冻天数的交互效应次之。 关键词:极端冰冻事件;日光诱导叶绿素荧光;植被物候;地理探测器

Differences in the response of different vegetation types to frost event and their driving forces

ZHAO Yipei¹, LIU Jianfeng^{1,*}, WANG Qi¹, HUANG Ruizhi², SUN Jingyi¹, NIE Wen², YANG Shaowei¹

1 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Extreme climate is gradually increasing and expanding in the context of global climate change. Exploring how vegetation responds and adapts to extreme climate is crucial for assessing regional vegetation vulnerability and developing adaptive strategies. Taking the extreme frost event that occurred in southern China in 2008 as an example, this study used 2003—2009 sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF) remote sensing data to extract vegetation phenology, explored the impact of the disaster on phenology of different vegetation types, and analyzed the contribution of various environmental factors and their interactions to vegetation phenology changes by geographical detector. The results showed that: (1) the extreme frost event led to the start of growing season (SOS) advanced 2.96 days, the end of growing season (EOS) delayed 10.47 days, and the length of growing season (LOS) extended 12.79 days. Among all vegetation types, evergreen broadleaf forest presented the most significant changes in phenology while deciduous broadleaf forest displayed the smallest change. (2) The spatial heterogeneity of hydrothermal conditions affected the spatial patterns of vegetation phenology changes.. For example, the phenology change was more pronounced in the southeastern area WHERE hydrothermal CONDITIONS ARE

基金项目:十四五国家重点研发计划子课题(2022YFF130180101);国家自然科学基金面上项目(42071065)

收稿日期:2023-11-14; 网络出版日期:2024-05-27

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: Liujf@ caf.ac.cn

6745

SUFFICIENT, while that in the northwest mountainous area showed opposite to the overall change with delayed SOS and advanced EOS. (3) Precipitation, temperature, relative humidity, soil type, and vegetation type were the main factors influencing vegetation phenology. Among them, temperature and precipitation had the highest explanatory power for EOS, at 0.6522 and 0.5280 respectively. (4) The interaction results of each factor showed two-factor enhancement or nonlinear enhancement effects. Among them, the interactions between climate factors were the strongest, followed by the interactions between climate factors and soil type, vegetation type, and freezing days.

Key Words: extreme frost event; sun-induced chlorophyll fluorescence; vegetation phenology; geographical detector

植被在陆地生态系统物质循环和能量传递中发挥着重要作用^[1]。植被物候是植被受周期性气象条件影响而出现的年内周期性生长发育模式,是反映植被动态变化的重要指标^[2]。植被物候对气候变化的响应与适应是目前植被生态学研究的热点,特别是不同植被类型物候对气候变化的非对称性响应过程与潜在机理^[3-5]。物候作为植被最敏感且最易观察的自然特征^[3,6,7],探究其对极端气候事件的响应强度及驱动因素, 在指导植被保护与恢复等方面具有重要意义。

随着遥感技术的发展,遥感数据为分析森林动态变化提供了必要的时空信息,被广泛应用于森林动态检测中^[8-9]。目前,大量的研究基于遥感数据分析植被物候空间变化格局及其限制因素。如丛楠等^[10]基于归一化植被指数分析北半球中高纬度地区植被 SOS 对气候变化的响应,发现温度是影响植被 SOS 的主要限制因素;Mo 等^[11]基于归一化植被指数评估极端气候事件对中国温带植被 SOS 的影响,发现植被 SOS 主要受极端温度事件限制。以上研究均使用遥感卫星衍生的植被指数(VIs)来评估气候变化对植被物候的影响,但以 "绿度"表征植被"潜在光合作用"的 VIs 无法直接探测植被"实际光合作用",因此在探究植被生理性状的季节性变化的研究中存在偏差^[12]。此外,利用 VIs 提取的 SOS 经常受季前降雪的影响而导致结论不准确^[13]。相较于 VIs,基于植物生理信息的日光诱导叶绿素荧光(SIF)信号能够实时、灵敏地追踪植被动态,在模拟植被物候方面具有机理优势^[12,14]。自 2010 年起,多种传感器已获得全球尺度的 SIF 数据,其中基于 OCO-2 的 COSIF 数据集具有更高的时空分辨率,提取植被物候更具优势^[15]。因此,COSIF 数据为探究植被物候时空变 化趋势提供了可靠的数据支撑^[16]。

目前,关于植被物候变化的研究多集中在秋冬季增温或者干旱导致物候变化等方面,如渐进式升温导致的 SOS 提前和 EOS 推迟^[2,17,18],以及干旱导致的植被 SOS 延迟和 EOS 提前^[19-20]。陶泽兴等^[21]基于中国物 候网观测数据探究了 1980—2018 年中国东部 8 个站点的 162 种木本植物的 SOS 受季前温度影响的变化情况,结果表明季前温度与植物的 SOS 呈负相关,且亚热带地区植物 SOS 早于温带地区,因此升温越早的地区,植物 SOS 开始时间越早。王焕炯等^[22]基于 1963—2018 年西安植物园的 39 种木本植物 SOS 分析了气候变化 对植物 SOS 的影响,发现相对于正常年,木本植物 SOS 在偏暖年提前,在偏冷年推迟。此外,Xie 等^[19]基于 2001—2012 年的遥感物候数据分析了环境因子对美国新英格兰地区的落叶林 EOS 的影响,发现低温、霜冻和高温等胁迫通常导致植被 EOS 提前,而中度干旱延迟 EOS。He 等^[20]分析了极端高温、暴雨和极端干旱对中 国干旱山区不同生物群落 SOS 的影响,发现升温导致植被 SOS 普遍提前,而干旱导致 SOS 推迟,且不同海拔高度的植被反应存在差异。然而,目前关于植被物候对冰冻灾害的响应研究较少,特别是对南方鲜见的冰冻 事件。

2008年1月初,中国南方地区发生了有记录以来受灾面积最大、持续时间最长的冰冻灾害,导致受灾区森林植被破坏严重^[23-24],多种生态过程发生巨大改变^[25]。因此,本研究以此次冰冻事件为例,结合 2003—2009年 SIF 和各环境因子数据,探究 2008 年极端冰冻事件对受灾区不同植被类型物候的影响,并利用地理探测器识别物候变化的关键驱动因子,以及因子间交互作用对植被物候的影响。研究结果有助于理解不同植被 类型对异常天气事件的响应差别,也可为类似事件中植被保护与植被修复提供一定的科学参考。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

本研究参考丁一汇等^[26]基于 2008 年初中国南方冰冻灾害的研究结果,选择湖南省、湖北省、江西省、安徽省和河南省作为研究区(24°52′—36°16′ N,108°46′—118°44′ E),总面积约为 87.12 万 km²(图1)。该地区 主要处于亚热带季风气候区,气候温暖湿润,年平均气温在 15—18℃,年降水量在 1000—1800mm。研究区地 形复杂,包括山地、丘陵和平原等多种类型。森林植被分布广泛,是中国的重要森林分布区之一,主要类型包 括针叶林、阔叶林和针阔混交林等,以针阔混交林占比最大,占总森林面积的 45%以上。

1.2 数据来源与预处理

本研究所使用的数据如表1所示。其中,SIF数据选择2003—2009年时间分辨率为8d,空间分辨率为



图 1 研究区植被覆盖类型、海拔、温度、降水量及其插值气象站点分布图

Fig.1 Map of the distribution of vegetation cover types, elevation, temperature, precipitation and their interpolated meteorological stations in the study area

44 卷

0.05°的全球 GOSIF 数据集(http://data.globalecology.unh.edu/data/GOSIF_v2/)^[27]。气候数据为国家气象信息中心 2008 年 1—2 月位于研究区的气象站点的日平均气温、日平均降水量、月平均相对湿度和月平均气压数据(https://data.cma.cn/),其中,月和日气候数据分别选用 218 和 246 个气象站点,采用专业气象插值软件Anusplin 4.2,使用三变量薄盘光滑样条函数,设置协变量为海拔,样条次数为 2,以及平滑方法为最小化广义交叉验证 GCV 法,插值获得空间分辨率为 1km 的日和月尺度的栅格数据。气候区划数据由中国国家气象局于 1978 年利用 1951—1970 年的气候资料编绘获得(http://www.gisrs.cn/)。植被类型数据来源于 2003—2009 年 MODIS 500m 分辨率的土地覆盖分类产品(MCD12Q1)(https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod12.php),并对图层叠加,获得 2003—2009 年植被类型未变化的区域,用于植被物候分析。土壤类型数据来源于 1995 年全国土壤普查办公室编制并出版的《1:100 万中华人民共和国土壤图》,按照土纲划分为 10 类(http://www.resdc.cn)。地形数据来源于 90m 分辨率的 SRTM DEM 地形数据(https://www.gscloud.cn/),并使用 AreGIS 10.2 提取 DEM 获得高程、坡度和坡向。人口密度(POP)和国内生产总值(GDP)数据来源于 2005 年中国人口和 GDP 空间分布公里网格数据集(https://www.resdc.cn/)。所有数据均依据受灾区域矢量 边界裁剪获得,并使用克里金法插值到 1km 空间分辨率。

	Table 1	Environmental factor indicators			
因子类型	代码	指标	单位		
Factor type	Code	Target	Unit		
气候因子 Climatic factor	X1	2008年1月总降水量	mm		
	X2	2008年1月平均气温	$^{\circ}$		
	X3	2008年1月平均相对湿度	%		
	X4	2008年1月平均气压	$\times 10^2 Pa$		
	X5	气候区	-		
地形因子 Topographic factor	X6	高程	m		
	X7	坡向	(°)		
	X8	坡度	(°)		
植被因子 Vegetation factor	X9	植被类型	-		
土壤因子 Soil factor	X10	土壤类型	-		
冰冻天数 Freezing days	X11	冰冻天数	d		
人为因子 Anthropogenic factor	X12	POP	λ/km^2		
	X13	GDP	万元/km ²		

表1 环境因子指标

2 研究方法

2.1 冰冻天数确定

选取覆盖研究区及其周围区域的 2008 年 1—2 月日均温和日降水量气象站点数据。设定日平均气温 ≤1℃,且日降水量>0mm 为1个冰冻日^[28],将冰冻日栅格叠加,获得研究区的冰冻天数分布数据(图 2)。

2.2 植被物候提取

首先对 2003—2009 年中每年 46 张 GOSIF 数据进行时间序列重建。运用多项式次数为 3、滑动窗口大小 为 9 的 Savitzky-Golay 滤波法平滑时序曲线。基于目前已开发的几种提取植被物候的方法,采用简单有效的 动态阈值法从重建的 GOSIF 时间序列中提取植被物候^[29—31]。综合地面物候观测资料及以往研究者对阈值 的设定^[32—33],以 0.2 作为阈值,选取常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林和混交林 4 种植被类型作为研究对 象(图 1),提取 SOS、EOS 和 LOS,公式如下:

$$SOS = SIF_{min1} + (SIF_{max} - SIF_{min1}) \times thd$$
(1)

$$EOS = SIF_{min2} + (SIF_{max} - SIF_{min2}) \times thd$$
(2)

(3)

LOS=EOS-SOS

式中,SIF_{max}为一年中 SIF 最大值,SIF_{min1}为一年中第1 天到SIF_{max}范围内的最小值,SIF_{min2}为SIF_{max}到一年最后 一天范围内的最小值,thd 为阈值。

为了对比灾后物候变化情况,将 2003—2007 年共 5 年的植被物候求均值,作为物候基准值。计算基准值 与 2008 和 2009 年相应物候参数的差值,分别记为 ΔSOS、ΔEOS 和 ΔLOS,作为判断植被灾后的物候变化依 据,公式如下:

$$Phe_{baseline} = \frac{1}{5} \sum_{n=2003}^{2007} Phe_n$$
(4)

$$\Delta \operatorname{Phe}_{m} = \operatorname{Phe}_{m} - \operatorname{Phe}_{\operatorname{baseline}}$$
(5)

式中, Phe_{baseline} 为正常年份的物候基准值, Phe_n 为 n 年 的植被物候信息(n = 2003 - 2007), Phe_m 和分别为 m 年的植被物候信息及其差值(m = 2008 和 2009), 当 Δ Phe_m < 0 时,表示物候提前或缩短, Δ Phe_m > 0 时表 示物候推迟或延长。



图 2 研究区冰冻天数及其对应的插值气象站点分布图 Fig.2 Number of freezing days and distribution map of its corresponding interpolated meteorological stations in the study area

2.3 地理探测器

地理探测器通过考虑和量化空间因素之间的非线性关系、尺度效应和交互作用等因素,探测空间分异性, 并结合 q 统计理论对地理特征进行客观定量的分层分析,在揭示地理现象背后的本质规律和机制方面应用较 为广泛,模型原理参考文献^[34]。

因子探测器用于探测各因子对植被物候的空间分异的解释力。用 q 值度量,q 值越大,说明因子对物候的解释力越强,表达式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{n} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}}$$
(6)

式中,q为环境因子对植被物候的解释力,值域为[0,1];h为变量 Y或各因子 X的分层; N_h 和 N分别为层 h和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h和全区的 Y值的方差;SSW 和 SST 分别为层内方差之和和区域总方差。

交互探测器用于识别环境因子间的相互作用,评估各因子之间的交互作用对因变量 Y 的解释力强弱。通过比较单因子 q 值、双因子 q 值之和及双因子交互后的 q 值,判断因子交互作用对植被物候的影响是增强或者减弱。

3 结果与分析

3.1 研究区植被物候时空格局

2008 年冰冻灾害导致研究区植被 SOS 提前、EOS 推迟和 LOS 延长(图 3)。整体上,SOS 提前(2.96±7.27)d(平均值±标准差,下同),且提前区域主要集中于东南部;SOS 推迟区域主要集中在西北部山区,植被 类型以落叶阔叶林为主,且推迟 0—5d;ΔSOS 集中在-5—0d(数字前负号表示物候期提前或缩短,没有负号表 示推迟或延长),占 ΔSOS 总体的 50% 以上,且以混交林和落叶阔叶林为主,二者分别占其整体的 55.5% 和 57.0%。

植被 EOS 总体表现为推迟,且平均推迟(10.47±9.79)d,而提前区域主要集中在西北部山区,且提前 0— 5d(图 3)。ΔEOS 集中在>10d,且以混交林和常绿阔叶林为主,二者分别占其整体的 46.1%和 87.6%;落叶阔 叶林的 ΔEOS 集中分布于-5-5d,占其总体的 71.6%。

植被 LOS 整体表现为延长,且平均延长(12.79±13.72)d,而缩短区域主要集中在西北部山区,且缩短 0— 5d(图 3)。ΔLOS 集中在>10d,超过总体变化的 50%,其中以混交林和常绿阔叶林为主,分别占其整体的 57.0%和 84.3%;落叶阔叶林 ΔEOS 集中分布于-5—5d,占其总体的 62.3%。

2009 年研究区植被 ΔSOS、 Δ EOS 和 ΔLOS 平均变化值分别为 0.87d、0.24d 和 0.62d,物候无明显延长或推迟趋势,其中 ΔSOS、 Δ EOS 和 ΔLOS 集中在 – 5—5d,且各植被的 ΔSOS、 Δ EOS 和 ΔLOS 分别超过总体水平的 50%(图 4),故可认为 2009 年植被基本恢复正常。







3.2 单因子影响探测

为揭示各环境因子对植被物候的空间动态变化的贡献度,采用单因子探测器对影响因子进行探测,获得 各因子的解释力 q 值。如图 5 所示,气温和降水对植被物候变化的贡献度最大,并且在植被 EOS 和 LOS 中尤 为明显。其次分别为土壤类型和植被类型,此外气候区、冰冻天数和海拔同样对植被物候有较大影响。

3.3 因子交互探测

交互探测结果表明,双因子交互的影响力呈现增强或非线性增强(图 6)。气温、降水量、植被类型和土壤





类型等因子间的交互作用对植被物候有显著影响(表 2),而气候因子间的交互效果最显著,如气温与降水量 交互作用对 SOS 的影响最大(q=0.411),气温与相对湿度交互作用对 EOS 的影响最大(q=0.701),气温和降 水量交互作用对 LOS 的影响最大(q=0.646)。

表 2 及	双因子交互作用下对植被物候变化的影响力排序
-------	-----------------------

	Table 2 Ranking the influence of the two-factor interaction on vegetation phenology
物候 Phenology	各因子交互作用下影响力排序(前6位因子) Ranking of the influence under the interaction of each factor (top 6 factors)
SOS	$X1 \cap X2(0.411) > X1 \cap X11(0.394) > X2 \cap X11(0.378) > X2 \cap X4(0.377) > X1 \cap X3(0.369) > X2 \cap X3(0.367)$
EOS	$X2 \cap X3(0.701) > X2 \cap X1(0.691) > X2 \cap X9(0.687) > X2 \cap X13(0.686) > X2 \cap X4(0.681) > X2 \cap X11(0.679)$
LOS	$X1 \cap X2(0.646) > X2 \cap X3(0.639) > X2 \cap X4(0.628) > X2 \cap X11(0.626) > X2 \cap X9(0.624) > X2 \cap X10(0.608)$

3.4 因子风险探测

选择对植被物候贡献度最大的六个因子进行风险探测。降水、气温、相对湿度与植被 SOS 的变化呈负相关,而与植被 EOS 和 LOS 变化呈正相关(图 7)。如表 3、4 所示,常绿阔叶林物候变化程度最大,而落叶阔叶林物候变化程度最小;当冰冻天数为 1—6d 时,对植被 SOS、EOS 和 LOS 产生显著影响,其均值分别达到

0

X1 X2 X3

X4 X5

X6

 \mathbf{X} 环境因子 Environmental factors

 $\mathbf{X8}$ **X**9 X10 X11 X12 X13

0.8 0.8 SOS EOS 0.7 0.7 0.6 0.6 0.5 0.5 0.4 0.4 0.3 0.3 ns 0.2 0.2 0.1 0.1 ns 0 0 X13 X12 X4 X12 X X X4 X5 X6 X X8 8 X10 X13 X X3 X5 X6 X $\mathbf{X8}$ 6X X10 X11 X X11 X1 р 0.8 LOS 环境因子 Environmental factors 0.7 0.6 0.5 0.4 □ 因子探测结果显著 (P<0.05) 因子探测结果不显著 (P>0.05) 0.3 0.2 0.1 ns

74.07d、336.73d 和 262.67d;当冰冻天数增加到 16—21d 时,对植被物候变化产生的影响反而最小。

图 5 植被不同物候期的单因子探测结果

Fig.5 Single-factor detection results for different phenological stages in vegetation

***: P<0.001; **: P<0.01; *: P<0.05; ns, P>0.05

表 3	环境因子导致植被物候变化最大的分布范围

Table 3 Distribution range of the largest vegetation phenology changes due to environmental factors

因子	SOS		EOS		LOS	
Parameters	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
降水 Precipitation	99.9—111mm	82.06	78.4—84.1mm	324.57	69—78.4mm	237.23
气温 Temperature	5.09—7.17°C	75.55	5.14—7.17℃	338.21	5.14—7.17℃	262.65
相对湿度 Relative humidity	80.1%-81.8%	82.81	80.1%-81.8%	320.63	80.1%-81.8%	237.84
土壤类型 Soil type	半水成土	84.16	半水成土	321.00	半水成土	237.71
植被类型 Vegetation type	常绿阔叶林	83.29	常绿阔叶林	327.87	常绿阔叶林	243.71
冰冻天数 Freezing days	1—6d	74.07	1—6d	336.73	1—6d	262.67

表 4 环境因子导致植被物候变化最小的分布范围

Table 4 D	Distribution range of 1	minimal vegetation	phenological	changes	due to	environmental	factors
-----------	-------------------------	--------------------	--------------	---------	--------	---------------	---------

因子	SOS]	EOS		LOS	
Parameters	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	
降水 Precipitation	10.7—23.7mm	100.72	10.7—23.7mm	286.41	10.7—23.7mm	185.68	
气温 Temperature	-3.34—-1.43℃	100.26	-3.34—-1.42℃	284.32	-3.34—-1.42℃	184.08	
相对湿度 Relative humidity	68%-73.4%	98.75	68%-73.4%	286.02	68%-73.4%	187.27	
土壤类型 Soil type	半淋溶土	99.91	半淋溶土	280.27	半淋溶土	180.36	
植被类型 Vegetation type	落叶阔叶林	95.93	落叶阔叶林	293.30	落叶阔叶林	197.37	
冰冻天数 Freezing days	16—21d	93.56	16—21d	300.99	16—21d	207.43	





Fig.6 Interaction factor detection results for different phenological stages in vegetation

http://www.ecologica.cn



Fig.7 Factor risk detection results for different phenological periods in vegetation

4 讨论

4.1 不同植被类型物候变化的差异

本研究发现冰冻灾害对植被物候产生了较大影响且不同植被类型间存在较大差异,其中落叶阔叶林物候 变化趋势最小,而常绿阔叶林物候变化趋势最大。相关研究已证实本次极端冰冻灾害对森林植被的破坏以折 冠、折干和倒伏等机械性损伤为主^[35-36],其中,由于常绿树木具有多分枝和大树冠,因此树冠受损最严重;并 且由于常绿树木在冬季仍然保持较为旺盛的生命活动,因而对冰冻的抗性较低^[37-38],受冰冻灾害损伤最明 显。树叶是树木最重要的光合作用器官,冰冻灾害主要通过影响树木叶片生理特征改变森林植被物候。休眠 作为植物在不利气候条件下进化出的一种适应性的保护机制,需要植物长时间暴露于低温环境中才能恢复生 长^[39]。然而当树叶被冰冻完全破坏时,树木必须通过调动多年储备的非结构性碳水化合物和营养物质来重 建新叶片以应对严重的碳库失衡,因此导致其被迫提前结束休眠^[40],而使 SOS 提前。此外相关研究表明,冰 冻对分别由土壤和外树皮保护的根和茎的损伤较小,而对树叶的损伤最大^[41-42],导致树叶枯萎甚至脱落,因 而包含大量常绿树种的常绿阔叶林和混交林受到的影响较大。为了构建新叶片,树木将重新分配体内储存的 非结构性碳水化合物^[40],导致叶片营养物质浓度降低和新萌发的叶片数量及其面积减少,影响植物的光合作 用和生产力^[43],而植物可通过推迟 EOS 的方式弥补生长亏损^[44],从而改变其物候。而落叶阔叶林和针叶林 由于落叶或者叶片较小,冰冻对其叶片损伤较小,因此物候变化相对较小。因此植被通过提前 SOS 和推迟 EOS 来补偿生长亏损以应对极端冰冻灾害的方式,最终导致了 LOS 延长。

物候变化的外在因素可归因于水热条件的影响^[45]。积雪在土壤和植被上的聚集或融化可以直接改变植 被生长发育的水热条件,进而改变植被物候^[46]。研究表明,冬季积雪作为土壤与低温大气的隔离层,通过隔 绝外界冷空气和太阳辐射、降低土壤水分蒸散发和热量散失等方式保持土壤水热条件,使土壤温度高于气 温^[2]。因此在早春气温上升到 0℃前,土壤温度就提前促进了植被根系活动,导致植被 SOS 提前。此外,降水 增加是导致森林植被 EOS 推迟的主要因素,且在干旱半干旱区更加明显^[47]。由于植被 SOS 提前增加了生态 系统水分蒸散发,降低土壤水分^[48],而融雪以土壤水的形式为植被生长提供充足水分,缓解水分胁迫,使得植被 EOS 推迟。然而,植被不同生长阶段对冰冻灾害的响应存在差异。Rubio-Cuadrado 等^[42]对宾夕法尼亚州 受春季冰冻影响的落叶树种物候进行分析发现,叶片通过延迟衰老来补偿展叶期的推迟,使得植被 SOS 和 EOS 均推迟,这与本文结论存在一定差异。这主要是因为不同时期的冰冻灾害对植被物候的影响不同,而早 春冰冻对植被破坏性更强。有研究表明,随着温带植物进入休眠期,抗寒能力迅速增强,而当植物开始发育时,抗寒能力逐渐减弱,植物组织变得特别脆弱^[49],因此冰冻对处于展叶期的植被破坏最显著^[43],导致与休眠期植被的物候变化趋势不同。此外,植被应对冰冻灾害的最大化资源获取和避免冻害之间的权衡同样可能 引起其物 候变化^[50]。如通过减少不必要的能量消耗,保证自身资源最大化利用^[40],其中糖槭(Acer saccharum)的提早落叶机制本质上是对低温胁迫的自我保护^[49]。

本研究发现不同森林植被类型的物候在灾后次年基本恢复正常,这与已有研究结论基本一致。如Vitasse 等^[51]发现受霜冻影响的3种阔叶栎属(*Quercus*)植物能在两年内完全恢复,D'Andrea 等^[52]则发现霜冻减少的 树木碳储量能在第二年恢复到正常水平。这表明植被对极端气候灾害具有一定弹性,能在灾后快速恢复,但 由于灾害强度、植物生长阶段、林龄和植被类型等的差异^[53],可能会对其恢复时间产生影响,如灾害频率和强 度的增加,将延长植被恢复时间^[42]。

4.2 植被物候变化的环境驱动力

气候因子是影响研究区域植被物候变化的最重要因素,其中温度和降水是导致物候变化的决定性气候因 素[46]。相关研究证实,气候因子与植被物候具有显著相关性,植被物候主要受温度和降水的共同调控[54],且 在湿润和半湿润地区,植被物候对气温变化的敏感性大于降水^[55],这与本研究结论基本一致。研究区植被物 候变化存在明显的空间分异性(图1),这可能与研究区水热条件的空间分异性有关。灾后植被 SOS 提前和 EOS 推迟的区域主要集中在研究区水热条件较好的东南部,该区域常绿林物候主要受生长季前1--3个月的 降水量影响,且随纬度降低,影响逐渐增强^[56-57]。极端降水和极端低温可能导致植被 SOS 和 EOS 提前或推 迟, 而极端低温推迟 SOS 主要发生在早春和晚春霜冻两个时期^[57], 对处于休眠期的植被主要表现为刺激植被 提前结束休眠。值得注意的是,本研究中植被 SOS 推迟和 EOS 提前的区域主要集中在研究区西北部的鄂西 和豫西山地。相关研究发现,低海拔地区植被生长主要受极端降水影响,而高海拔地区植被生长受极端降水 和低温事件的交互影响^[58],且山地生态系统对水热条件的变化特别敏感^[20,59],因此极端冰冻事件对山区植 被的破坏性更强且更复杂,可能导致植被不可逆的损伤,从而使其植被物候变化趋势与低海拔地区存在显著 差异。此外,根据单因子探测器和交互探测器结果表明,环境因子对 EOS 的解释力显著大于 SOS。这可能是 因为极端冰冻对处于休眠期的植被的影响相对较小,且植被 SOS 对冰冻灾害的应激响应更加强烈,使得灾害 对其 SOS 的影响较小,而对当年的植被生长发育过程具有较大影响。此外,植被物候对极端气候具有显著的 积累效应^[60-61], 而 EOS 相对于 SOS 具有更长积累时间和更多积累量,因此导致了环境因素对 EOS 的解释力 更高。

土壤为植被生长提供所需的水分和养分,是影响植被生长发育的另一重要因素^[62]。研究区土壤类型主要为淋溶土、半淋溶土、初育土和铁铝土(图1),其中植被物候变化最小区域的土壤类型主要为半淋溶土。这是由于不同土壤类型的水分利用效率不同^[63]。半淋溶土具有良好的水分保持特性,为植被生长提供必要的水分,保持植被结构和功能的稳定。冰冻天数同样对植被物候产生一定的影响。研究表明,冰冻为冬季休眠状态下的植被提前复苏提供冷却积温^[64],促进植被打破休眠,导致 SOS 提前,而冰冻天数和强度的增加可以减缓植被枯黄的速度^[65],这与本研究结论一致。根据地理探测器中的风险探测器结果,研究区冰冻天数主要由水热条件决定,其中东南部的水热条件较好,使得该区域冰冻天数最少(1—6d),冰冻灾害对植被的影响相对较小,因此其植被 SOS 提前可能受到良好水热条件的促进。但随着冰冻日的增加,当达到 16—21d 时,物候变化程度反而最小。这可能是冰冻诱导植被对胁迫产生抗性的结果,使其通过调节自身生理活动,逐渐适应冰冻灾害^[42],但当冰冻灾害持续,植被将遭到不可逆的损伤。

森林植被物候变化是各环境因子间复杂的相互作用的结果^[1]。本研究发现各因子间的交互呈现双因子 增强或非线性增强,这表明各因子对植被物候的影响并非简单的独立或叠加效果,而存在着复杂的关系,尤其 是气温与降水量的交互作用最显著。这与 Li 等^[66]发现祁连山月平均气温和降水的交互作用对区域植被物 候的影响更强的结论一致,尤其是冬季气候变化为植被早期发育提供能量积累,且该季节的植被生理功能将 影响植被的整个生长发育过程,使得冬季气候因子对植被物候影响更显著。本研究发现植被和土壤类型与气 候因子的交互作用同样呈现出较高的贡献度,可能是因为不同植被类型和土壤条件的存在差异,不同植被可 以从有限的环境中获得的资源量不同,即受环境异质性的影响。因此综合不同环境因子对植被物候的影响进 行分析,可以更好地了解和预测植被的生长发育情况,从而为制定相应的保护和管理策略提供依据^[62]。

5 结论

本研究以 2008 年南方冰冻灾害为例,探究其对植被物候的影响,并结合地理探测器对其驱动机制进行分 析,发现冰冻灾害对研究区域内植被物候产生了较大影响,整体导致植被 SOS 提前,EOS 推迟,LOS 延长;但 不同森林植被的物候变化存在差异,如常绿阔叶林物候变化趋势最大,而落叶阔叶林物候变化趋势最小。气 候因子是影响植被物候变化的主要因素,其次为土壤类型、植被类型和冰冻天数。各因子交互作用均表现为 增强效应,但气候因子间交互效果最显著,特别是降水与气温的交互作用对植被物候的影响最大。本研究从 宏观尺度探索了南方少有的冰冻事件对不同植被物候的影响,在今后的研究中可尝试在林分水平上探讨不同 植被结构与多样性对极端气候的耐受范围及其弹性的贡献机制。

参考文献(References):

- [1] Seidl R, Thom D, Kautz M, Martin-Benito D, Peltoniemi M, Vacchiano G, Wild J, Ascoli D, Petr M, Honkaniemi J, Lexer M J, Trotsiuk V, Mairota P, Svoboda M, Fabrika M, Nagel T A, Reyer C P O. Forest disturbances under climate change. Nature Climate Change, 2017, 7: 395-402.
- [2] Piao S L, Liu Q, Chen A P, Janssens I A, Fu Y S, Dai J H, Liu L L, Lian X, Shen M G, Zhu X L. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. Global Change Biology, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [3] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. 生态学报, 2006, 26(3): 923-929.
- [4] 余振,孙鹏森,刘世荣.中国东部南北样带主要植被类型物候期的变化.植物生态学报,2010,34(3):316-329.
- [5] 贾文雄,赵珍,俎佳星,陈京华,王洁,丁丹.祁连山不同植被类型的物候变化及其对气候的响应.生态学报,2016,36(23):7826-7840.
- [6] Li Y, Zhang W, Schwalm C R, Gentine P, Smith W K, Ciais P, Kimball J S, Gazol A, Kannenberg S A, Chen A P, Piao S L, Liu H Y, Chen D L, Wu X C. Widespread spring phenology effects on drought recovery of Northern Hemisphere ecosystems. Nature Climate Change, 2023, 13: 182-188.
- [7] Liu Q, Fu Y H, Liu Y W, Janssens I A, Piao S L. Simulating the onset of spring vegetation growth across the Northern Hemisphere. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1342-1356.
- [8] Vijith H, Dodge-Wan D. Applicability of MODIS land cover and Enhanced Vegetation Index (EVI) for the assessment of spatial and temporal changes in strength of vegetation in tropical rainforest region of Borneo. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, 18: 100311.
- [9] 饶品增,王义成,王芳.三江源植被覆盖区 NDVI 变化及影响因素分析.草地学报,2021,29(3):572-582.
- [10] 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(2): 125-135.
- [11] Mo Y H, Zhang X, Liu Z C, Zhang J, Hao F H, Fu Y S. Effects of climate extremes on spring phenology of temperate vegetation in China. Remote Sensing, 2023, 15(3): 686.
- [12] 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(4):345-354.
- [13] Delbart N, Kergoat L, Le Toan T, Lhermitte J, Picard G. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(1): 26-38.
- [14] 章钊颖, 王松寒, 邱博, 宋练, 张永光. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展. 遥感学报, 2019, 23(1): 37-52.
- [15] Geng G P, Yang R, Liu L Z. Downscaled solar-induced chlorophyll fluorescence has great potential for monitoring the response of vegetation to drought in the Yellow River Basin, China: insights from an extreme event. Ecological Indicators, 2022, 138: 108801.
- [16] 刘啸添,周蕾,石浩,王绍强,迟永刚.基于多种遥感植被指数、叶绿素荧光与 CO2 通量数据的温带针阔混交林物候特征对比分析.生态

学报,2018,38(10):3482-3494.

- [17] Fu Y H, Piao S L, Op de Beeck M, Cong N, Zhao H F, Zhang Y, Menzel A, Janssens I A. Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(11): 1255-1263.
- [18] 李荣平,周广胜,张慧玲.植物物候研究进展.应用生态学报,2006,17(3):3541-3544.
- [19] Xie Y Y, Wang X J, Jr Silander J A. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(44): 13585-13590.
- [20] He Z B, Du J, Chen L F, Zhu X, Lin P F, Zhao M M, Fang S. Impacts of recent climate extremes on spring phenology in arid-mountain ecosystems in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260/261: 31-40.
- [21] 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.
- [22] 王焕炯,陶泽兴,葛全胜. 气候波动对西安 39 种木本植物展叶始期及其积温需求的影响. 植物生态学报, 2019, 43(10): 877-888.
- [23] Zhou B Z, Gu L H, Ding Y H, Shao L, Wu Z M, Yang X S, Li C Z, Li Z C, Wang X M, Cao Y H, Zeng B S, Yu M K, Wang M Y, Wang S K, Sun H G, Duan A G, An Y F, Wang X, Kong W J. The great 2008 Chinese ice storm: its socioeconomic-ecological impact and sustainability lessons learned. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(1): 47-60.
- [24] 骆土寿,张国平,吴仲民,翁启杰,罗鑫华,张娜,肖以华,曾繁助,王旭,余伟盛,赵霞.雨雪冰冻灾害对广东杨东山十二度水保护区 常绿与落叶混交林凋落物的影响.林业科学,2008,44(11):177-183.
- [25] Zhao H B, Li Z J, Zhou G Y, Qiu Z J, Wu Z M. Aboveground biomass allometric models for evergreen broad-leaved forest damaged by a serious ice storm in southern China. Forests, 2020, 11(3): 320.
- [26] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,张锦.中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系.气象学报,2008,66 (5):808-825.
- [27] Li X, Xiao J F. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data. Remote Sensing, 2019, 11(5): 517.
- [28] 王凌,高歌,张强,孙家民,王遵娅,张勇,赵珊珊,陈鲜艳,陈峪,王有民,陈丽娟,高辉.2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害 分析 I.气候特征与影响评估.气象,2008,34(4):95-100.
- [29] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11(2); 217-234.
- [30] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C, Huete A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.
- [31] Broich M, Huete A, Paget M, Ma X L, Tulbure M, Coupe N R, Evans B, Beringer J, Devadas R, Davies K, Held A. A spatially explicit land surface phenology data product for science, monitoring and natural resources management applications. Environmental Modelling & Software, 2015, 64(C): 191-204.
- [32] 马新萍, 白红英, 贺映娜, 秦进. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例. 地理科学, 2015, 35 (12): 1616-1621.
- [33] 刘玲玲,刘良云,胡勇. 1982—2006 年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1433-1442.
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [35] 吴可可,彭少麟,陈蕾伊,徐雅雯,朱丽蓉,林真光.南方森林雨雪冰冻灾害的特征.生态学杂志,2011,30(3):611-620.
- [36] 苏志尧,刘刚,区余端,戴朝晖,李镇魁.车八岭山地常绿阔叶林冰灾后林木受损的生态学评估.植物生态学报,2010,34(2):213-222.
- [37] Manion P D, Griffin D H, Rubin B D. Ice damage impacts on the health of the northern New York State forest. The Forestry Chronicle, 2001, 77 (4); 619-625.
- [38] 朱丽蓉. 南岭森林对雨雪冰冻灾害的受损、恢复响应与快速恢复研究[D]. 广州: 中山大学, 2014.
- [39] Ding J H, Nilsson O. Molecular regulation of phenology in trees-because the seasons they are a-changin'. Current Opinion in Plant Biology, 2016, 29: 73-79.
- [40] D'Andrea E, Rezaie N, Battistelli A, Gavrichkova O, Kuhlmann I, Matteucci G, Moscatello S, Proietti S, Scartazza A, Trumbore S, Muhr J. Winter's bite: beech trees survive complete defoliation due to spring late-frost damage by mobilizing old C reserves. The New Phytologist, 2019, 224(2): 625-631.
- [41] Ambroise V, Legay S, Guerriero G, Hausman J F, Cuypers A, Sergeant K. The roots of plant frost hardiness and tolerance. Plant and Cell Physiology, 2020, 61(1): 3-20.
- [42] Rubio-Cuadrado Á, Camarero J J, Rodríguez-Calcerrada J, Perea R, Gómez C, Montes F, Gil L. Impact of successive spring frosts on leaf phenology and radial growth in three deciduous tree species with contrasting climate requirements in central Spain. Tree Physiology, 2021, 41(12):

2279-2292.

- [43] Hufkens K, Friedl M A, Keenan T F, Sonnentag O, Bailey A, O'Keefe J, Richardson A D. Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2365-2377.
- [44] Zohner C M, Rockinger A, Renner S S. Increased autumn productivity permits temperate trees to compensate for spring frost damage. The New Phytologist, 2019, 221(2): 789-795.
- [45] Clinton N, Yu L, Fu H H, He C H, Gong P. Global-scale associations of vegetation phenology with rainfall and temperature at a high spatiotemporal resolution. Remote Sensing, 2014, 6(8): 7320-7338.
- [46] Liu Y T, Zhou W, Gao S, Ma X L, Yan K. Phenological responses to snow seasonality in the Qilian Mountains is a function of both elevation and vegetation types. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3629.
- [47] 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.
- [48] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z, Zhou P, Liu X D, Xiao Y, Sun G, Scott D F, Zhou S, Han L S, Su Y X. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. Nature Communications, 2015, 6: 5918.
- [49] Chamberlain C J, Cook B I, García de Cortázar-Atauri I, Wolkovich E M. Rethinking false spring risk. Global Change Biology, 2019, 25(7): 2209-2220.
- [50] Saxe H, Cannell M G R, Johnsen Ø, Ryan M G, Vourlitis G. Tree and forest functioning in response to global warming. The New Phytologist, 2001, 149(3): 369-399.
- [51] Vitasse Y, Bottero A, Cailleret M, Bigler C, Fonti P, Gessler A, Lévesque M, Rohner B, Weber P, Rigling A, Wohlgemuth T. Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3781-3792.
- [52] D'Andrea E, Scartazza A, Battistelli A, Collalti A, Proietti S, Rezaie N, Matteucci G, Moscatello S. Unravelling resilience mechanisms in forests: role of non-structural carbohydrates in responding to extreme weather events. Tree Physiology, 2021, 41(10): 1808-1818.
- [53] 朱丽蓉,周婷,陈宝明,彭少麟.南方森林对雨雪冰冻灾害的受损与恢复响应的树龄依赖.中国科学:生命科学,2014,44(3):280-288.
- [54] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520-3531.
- [55] Ma X L, Zhu X L, Xie Q Y, Jin J X, Zhou Y K, Luo Y P, Liu Y X, Tian J Q, Zhao Y H. Monitoring nature's calendar from space: emerging topics in land surface phenology and associated opportunities for science applications. Global Change Biology, 2022, 28(24): 7186-7204.
- [56] Li X X, Fu Y H, Chen S Z, Xiao J F, Yin G D, Li X, Zhang X, Geng X J, Wu Z F, Zhou X C, Tang J, Hao F H. Increasing importance of precipitation in spring phenology with decreasing latitudes in subtropical forest area in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 304/ 305: 108427.
- [57] 张晶,郝芳华,吴兆飞,李明蔚,张璇,付永硕. 植被物候对极端气候响应及机制. 地理学报, 2023, 78(9): 2241-2255.
- [58] 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东. 不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被 NPP 的影响.环境科学, 2024, 45(1): 275-286.
- [59] Verrall B, Pickering C M. Alpine vegetation in the context of climate change: a global review of past research and future directions. The Science of the Total Environment, 2020, 748: 141344.
- [60] Zeng Z Q, Wu W X, Ge Q S, Li Z L, Wang X Y, Zhou Y, Zhang Z T, Li Y M, Huang H, Liu G X, Peñuelas J. Legacy effects of spring phenology on vegetation growth under preseason meteorological drought in the Northern Hemisphere. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 310: 108630.
- [61] Wen Y Y, Liu X P, Xin Q C, Wu J, Xu X C, Pei F S, Li X, Du G M, Cai Y L, Lin K, Yang J, Wang Y P. Cumulative effects of climatic factors on terrestrial vegetation growth. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2019, 124(4): 789-806.
- [62] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 陶帅, 徐新良. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776.
- [63] Nicholson S, Farrar T. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(2): 107-120.
- [64] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [65] Deng G R, Zhang H Y, Yang L B, Zhao J J, Guo X Y, Ying H, Wu R H, Guo D. Estimating frost during growing season and its impact on the velocity of vegetation greenup and withering in Northeast China. Remote Sensing, 2020, 12(9): 1355.
- [66] Li C, Zou Y Y, He J F, Zhang W, Gao L L, Zhuang D F. Response of vegetation phenology to the interaction of temperature and precipitation changes in Qilian Mountains. Remote Sensing, 2022, 14(5): 1248.