

# 考虑滞后效应的气温胁迫下植被损失风险评估 ——以黑龙江省为例

付晨星<sup>1</sup>, 王雪梅<sup>1</sup>, 李特<sup>1</sup>, 孙贯芳<sup>2</sup>, 何晓玲<sup>3</sup>

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 对考虑滞后效应的气温胁迫下植被损失风险进行评估, 为制定区域适应性管理措施提供科学依据。[方法] 以黑龙江省为例, 基于周尺度归一化植被指数(NDVI)和温度数据, 提出了考虑滞后效应的气温胁迫下植被损失风险评估方法。对黑龙江省不同陆地生态系统的增温和降温胁迫风险概率进行量化。[结果] 生长季的植被与气温变化的关联密切, 分别在滞后9周与23周左右达到最敏感状态, 且具有较高的空间一致性。研究区的东部和西部是植被损失的高风险区域, 西北和中部地区的风险较低。平均气温每升温1℃, 风险概率增加了0.5%左右, 每降温1℃, 风险概率增加了0.70%左右。表明降温比升温对植被的影响更大。农田生态系统对气温胁迫的风险变化更显著, 森林生态系统最小。[结论] 黑龙江省东部与西部是植被损失风险的高风险区域, 降温比升温对植被的影响更大, 凸显了气候变化背景下综合评估滞后效应对植被健康管理的关键作用。

**关键词:** 气温胁迫; 滞后效应; 植被损失; 黑龙江省

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2025)03-0179-08

**中图分类号:** Q948.1, X17

**文献参数:** 付晨星, 王雪梅, 李特, 等. 考虑滞后效应的气温胁迫下植被损失风险评估[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 179-186. Fu Chenxing, Wang Xuemei, Li Te, et al. Vegetation loss risk assessment under temperature stress considering lag effects [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 179-186. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.013; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.013.

## Vegetation loss risk assessment under temperature stress considering lag effects —A case study in Heilongjiang Province

Fu Chenxing<sup>1</sup>, Wang Xuemei<sup>1</sup>, Li Te<sup>1</sup>, Sun Guanfang<sup>2</sup>, He Xiaoling<sup>3</sup>

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shanxi 712100, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The risk of vegetation loss under temperature stress considering lag effects was assessed to provide a scientific basis for formulating regional adaptive management measures. [Methods] Using Heilongjiang Province as an example, a risk assessment method for vegetation loss under temperature stress considering lag effects was proposed based on weekly normalized difference vegetation index (NDVI) and temperature data. Quantifying the probability of warming and cooling stress risk in different terrestrial ecosystems in Heilongjiang Province. were quantified. [Results] Vegetation during the growing season is closely associated with temperature changes, reaching the most sensitive state at approximately 9 and 23 weeks of lag, respectively, and with high spatial consistency. The eastern and western regions of the study area are high-risk regions for vegetation loss, whereas the northwestern and central regions have a lower risk. For every 1 °C increase in the average temperature, the risk probability increased by approximately 0.5%, and for every 1 °C decrease, the risk increased

收稿日期: 2024-12-09

修回日期: 2025-01-15

采用日期: 2025-01-16

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“干旱区森林生态系统胶体态磷运移过程及风险评估”(42107494); 杨凌职业技术学院2024年科技创新项目(ZK24-02); 陕西省2025年科技计划项目(2025JC-YBMS-643)

第一作者: 付晨星(1992—), 女(汉族), 山西省太原市人, 硕士, 工程师, 主要从事极端气候事件研究。Email: 455189442@qq.com。

通信作者: 何晓玲(1986—), 女(汉族), 甘肃省张掖市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email: xiaolinghe@nwfau.edu.cn。

by approximately 0.70%, indicating that cooling had a greater impact on vegetation than warming. The risk variation under temperature stress was higher in farmland ecosystems and lower in forest ecosystems. [Conclusion] The eastern and western regions of Heilongjiang Province are high-risk areas for vegetation loss, and cooling has a greater impact on vegetation than warming. This highlights the practical significance of comprehensively considering the lag effects of temperature stress to accurately assess vegetation health in the context of global climate change.

**Keywords: temperature stress; lag time; vegetation loss; Heilongjiang Province**

全球气候变暖对陆地生态系统的影响,已经引发了全球性关注。气温升高可能导致植物生理机能受损<sup>[1]</sup>,生态平衡失调<sup>[2]</sup>,从而对生物多样性、水土保持及全球碳循环产生深远影响<sup>[3]</sup>。另一方面,植被作为全球气候变化的指示器,不仅维持着地球的生物多样性,而且调节着大气中的二氧化碳水平,是维持地球生命系统的关键组成<sup>[4-5]</sup>。因此,评估和理解全球升温背景下植被对气候变化的响应以及在气温胁迫下植被损失的风险,对预测和减缓气候变化影响至关重要。

植被对环境变化的响应往往存在一定的时间滞后性,这种滞后效应可能导致植被对极端气候事件的响应被低估。在很多情况下,植被可能需要较长时间来展现出对环境变化的生理和生态响应<sup>[6-7]</sup>。例如,极端高温可能立即影响植物的光合作用,但植物生长和群落结构的变化可能要在随后的几个季节甚至几年后才显现<sup>[8]</sup>。此外,气温升高还可能通过改变土壤水分蒸发和植物蒸腾作用进一步影响植被状态,这些过程也可能具有滞后性。与此相反,极端低温也会显著影响植被多个生理过程<sup>[9]</sup>。例如,低温会降低植物体内酶的活性,从而使得代谢速度减慢导致生长速率下降<sup>[10]</sup>。尤其是在极端低温情况下,可能直接破坏植物细胞的结构,引起细胞死亡。然而,当前的研究更多的关注于升温状况,忽略了低温对植被的影响。因此,本研究同时关注了升温 and 降温胁迫下对植被生长的影响,以期全面评估和量化植被对不同气温的滞后效应及其损失的风险概率。

已有研究<sup>[11-12]</sup>结果表明,在降水稀少和纬度较高的地区,气温是影响植被生长的关键因素。Wang等<sup>[13]</sup>的研究发现,相较于湿润地区的植被,半干旱地区的植被对降水的响应时间更快。落叶阔叶林对气温的响应滞后期约为1个月,随着滞后时间的增加,相关性系数也随之增大<sup>[14]</sup>。但这些研究多关注于月尺度上的植被与气温变化,事实上,不同类型的植被对气温的滞后时间存在差异,其表现可能会在旬尺度、周尺度,甚至是日尺度。因此,如何在更精细的时间尺度上刻画植被对气温变化的滞后效应,依然面临挑战。基于此,本研究选择中国纬度最高的黑

龙江省,该区不仅年内温差极大,而且其丰富的各类生态系统为研究对气温的响应提供良好的条件。尤其是黑龙江省作为中国最大的商品粮基地,气温变化对植被损失的风险评估显得尤为迫切和重要<sup>[15]</sup>。为此,本研究开发一种考虑气温滞后效应的植被损失风险评估模型。主要通过采用高分辨率的气候和植被数据,构建一个能够综合评估升温 and 降温胁迫下植被损失风险模型,以期生态、农业和风险管理等相关部门提供有效工具和科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黑龙江省位于中国东北地区,是中国最北、纬度最高的省份,总面积 $4.73 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,省会是哈尔滨市。黑龙江省属于寒温带与温带大陆性季风气候,春季低温干旱,夏季温热多雨,秋季易涝早霜,冬季寒冷漫长,无霜期短,全省气候的地域性差异显著。年平均气温在 $-4 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,平均降水量大于500 mm,从南到北是中温和寒温带,且具有明显的季风性特征。省内植被类型多样,森林和农田生态系统所占比例较高<sup>[16]</sup>。此外,黑龙江省地处世界四大黑土地之一,耕地面积全国第一<sup>[17]</sup>。研究气温变化对植被的影响,是保障农业生产和产量的关键。

### 1.2 数据来源

日最大气温数据来自 The Climate Prediction Center (CPC)的 Global Unified Temperature(<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globaltemp.html>),空间分辨率为 $0.5^\circ$ ,日尺度。网格化每日归一化差异植被指数(NDVI)来自 AVHRR 归一化差异植被指数(NDVI)第5版的 NOAA 气候数据记录(<https://www.ncei.noaa.gov>),空间分辨率为 $0.05^\circ$ 。为了更好地匹配 NDVI 数据,我们将气温数据插值到 $0.05^\circ$ 分辨率上。此外,考虑到年内植被生长的物候期,本研究只选取了生长季的数据(每年第15~39周的 NDVI)。生态系统划分数据来自 Resource and Environmental Science Data Platform 的 2020 年的 1 km 分辨率(<https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=131>)。研究数据时间段为 2002—2022 年。

### 1.3 研究方法

为了综合考虑升温 and 降温对植被的影响,分别逐像元的计算气温和 NDVI 在不同滞后时间尺度下的 Spearman 相关性。筛选出每个像元的最大和最小相关性系数,并将该相关性系数对应的时间尺度分别视为正负相关时期的最佳滞后时间。进一步地采用 copula 函数来联合两时期最佳滞后时间的气温与 NDVI 变量。copula 函数是一种灵活的表示多元联合分布的方法,不受随机变量的边际分布或联合分布函数类型的限制,从而避免关于线性或潜在概率分布的假设<sup>[18-19]</sup>。

$$F(x_1, x_2) = C(u, v) \quad (1)$$

式中:  $C$  表示 copula 函数的累积分布函数;  $u, v$  分别表示随机变量  $x_1$  和  $x_2$  的边缘分布函数。

进一步地采用核函数来拟合边缘分布[公式(2)]。考虑到不同类型 copula 函数的特性以及本研究主要关注的是降温 and 升温对植被损失的风险情况。分别采用 Clayton[公式(3)]和 Gaussian copula 函数[公式(4)]来拟合联合概率分布。

$$\widehat{f_h}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (2)$$

式中:  $x_1, x_2 \dots x_n$  是来自未知分布的随机样本;  $n$  表示样本大小;  $K$  为核平滑函数;  $h$  表示窗宽<sup>[20]</sup>。

$$C_\theta(u, v) = \max\left[\left(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1\right)^{-\frac{1}{\theta}}, 0\right], \quad \theta \in (0, +\infty) \quad (3)$$

$$C(u, v, \theta) = \int_{-\infty}^{\phi^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\phi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \exp\left\{-\frac{s^2 - 2\theta st + t^2}{2(1-\theta^2)}\right\} ds dt, \quad [\theta \in (-1, 1)] \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为 copula 函数的参数,通过最大似然估计得到;  $s, t$  分别为二维正态分布中两个随机变量的积分。

基于构造的两种 Copula 函数的联合分布,便可以采用贝叶斯条件概率的方式来评估气温胁迫下的植被损失风险的条件概率。本研究基于百分位数的形式设定了气温和植被的组合情景。考虑到组合情景的数量和结果太多且具有一定规律性,我们在这里只关注降温到 40, 30, 20, 10 百分位以下时,植被损失到 40, 10 百分位以下的情景。为了更好地比较,升温分别对应的是 60, 70, 80, 90 百分位以上情景。在这种情况下,可以分别计算出降温[公式(5)]和升温[公式(6)]组合情景下气温和植被的条件概率  $P$  可分别表示为:

$$P(Y \leq y | X \leq x) = \frac{C(u, v)}{u} \quad (5)$$

$$P(Y \leq y | X > x) = \frac{v - C(u, v)}{1 - u} \quad (6)$$

式中:  $X, Y$  分别表示气温变量和植被响应变量;  $x, y$  分别为设定的气温和植被阈值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NDVI对气温的滞后效应

一般来说,植被的生长受气候变化和环境因素的共同作用。尤其是对于纬度较高地区的植被,其受气温的作用相对更加显著<sup>[21]</sup>。植被对气温的滞后时间不同,其对气温的敏感性也将存在差异,特别是在植被的生长季时期<sup>[22]</sup>。图 1a 显示了在不同周时间尺度下黑龙江的植被与气温变化的相关系数变化。可以看出分别在 9 周与 23 周达到最大正相关( $r = 0.56, p < 0.01$ )和最小负相关( $r = -0.57, p < 0.01$ )。图 1b 和图 1c 详细展示了滞后 9 周和 23 周黑龙江省的气温与 NDVI 的变化。在正相关时期,随着气温的上升与降低,NDVI 也呈现同步且稳定的变化趋势。负相关时期呈现相反的变化。相较于气温的变化而言,NDVI 在 2014 年前后的变化差异较大,2014 年开始有明显的增加。

在空间尺度上,正负相关性两时期(图 2a 和 2b)几乎所有的像元在 0.05 水平上表现显著。两时期在空间上具有相似分布特征,在黑龙江省的中部区域具有较低的(不考虑相关性的方向)相关性。在西部和东部区域具有较高的(不考虑相关性方向)相关性。然而,它们在滞后时间上的差异更为明显。其中,在正相关时期(图 2c),大多数的滞后时间集中在 10 周以内。在负相关时期(图 2d),大多数的滞后时间大于 20 周。进一步地,NDVI 与气温之间的强敏感性是构建双变量 Copula 函数的基础,而相关性的正负直接影响不同气温胁迫下植被损失风险的结果。

### 2.2 不同程度气温胁迫下植被损失的风险概率

考虑到风险的复杂性与随机性<sup>[23]</sup>,分别针对正负相关两个时期,不同气温胁迫下造成不同程度植被损失的风险概率进行了详细的分析。在正相关时期,展示了随着气温的降低,对植被损失的风险概率变化(图 3)。可以看出,随着气温降低程度的加剧,导致植被损失在 40 百分位处的风险概率呈现显著的增加趋势,色度逐渐加深。另一方面,当植被损失程度在 10 百分位处时,随着气温胁迫的加剧,尽管风险概率也呈现增加趋势,但明显低于 40 百分位处的概率。整体上来说,在正相关时期,不同情景下的风险概率空间分布表现出高度的一致性。其中,在黑龙江省的东部与西部地区,往往具有较高的概率值,在黑龙江西北和中部地区的概率值较低。

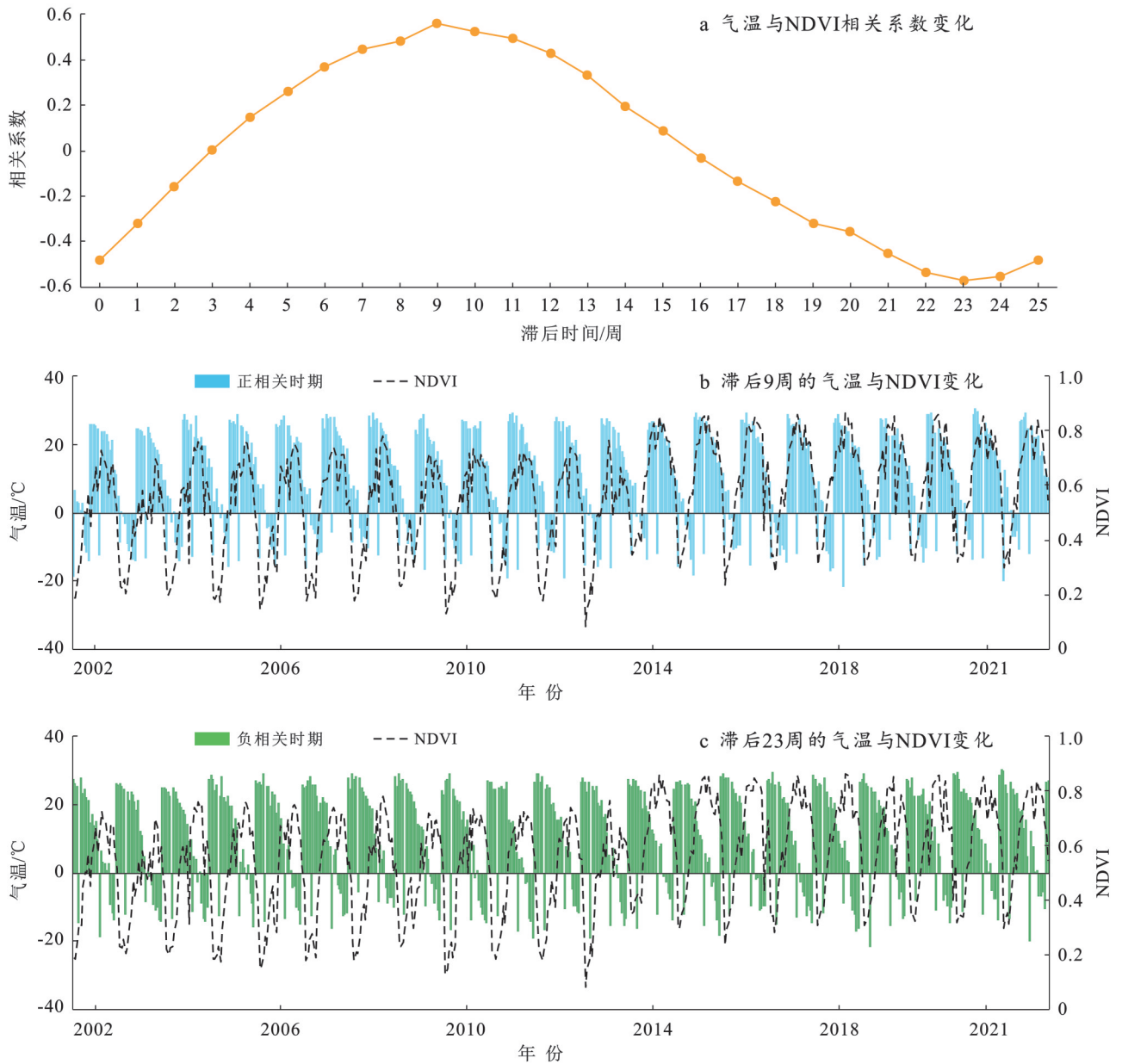


图 1 不同滞后时间下 NDVI 与气温的相关系数 (a) 及其在最值尺度下的 NDVI (b) 与气温 (c) 变化

Fig.1 Correlation coefficients between NDVI and temperature at different lag times (a), along with changes in NDVI (b) and temperature (c) at extreme values

在负相关时期,我们同样讨论了升温对植被损失的风险概率变化(图4)。与正相关时期的结果相似,随着气温胁迫程度的加剧,植被损失的风险概率呈现增加趋势变化,且在植被损失程度越高时,其风险概率有所降低。此外,不同情景下的风险概率值在空间上也高度相似,与图2a和图2b的空间变化相似。这说明在植被对气温变化越敏感的地区,其遭受气温胁迫时的损失风险越大。进一步地比较两时期的风险概率时发现,降温对植被的影响要大于升温,且随着气温胁迫的加剧,其影响程度也越发明显。尤其是在降温到10百分位和升温到90百分位时,植被损失程度在10百分位处的风险概率平均差

异达到11%。降温时黑龙江东部和西部的风险概率值大于50%。因此,该区域的植被生长状况受气温影响显著,需要加大对该地区的关注和气温胁迫的预防。

### 2.3 升温和降温变化对植被损失的风险概率

尽管图3—4详细展示了不同情景下的植被损失风险,但对于政府和民众而言,可能更关心气温的具体幅度变化对植被的影响。因此,本研究进一步地量化每个像元内,在均值气温变化的基础上,升温和降温1~4℃时,植被损失在40百分位的风险变化(图5)。每升温1℃,平均风险概率增加0.50%,每降温1℃,风险降低0.70%左右。表明降温比升温对植被的影

响更大。

此外,对比概率的空间分布可以发现,升温和降温对植被影响最大的区域是研究区的东西两侧,最

小的区域是西北和中部区域。这些与前面的研究结论高度一致,也印证了本研究结果的准确性和可靠性。

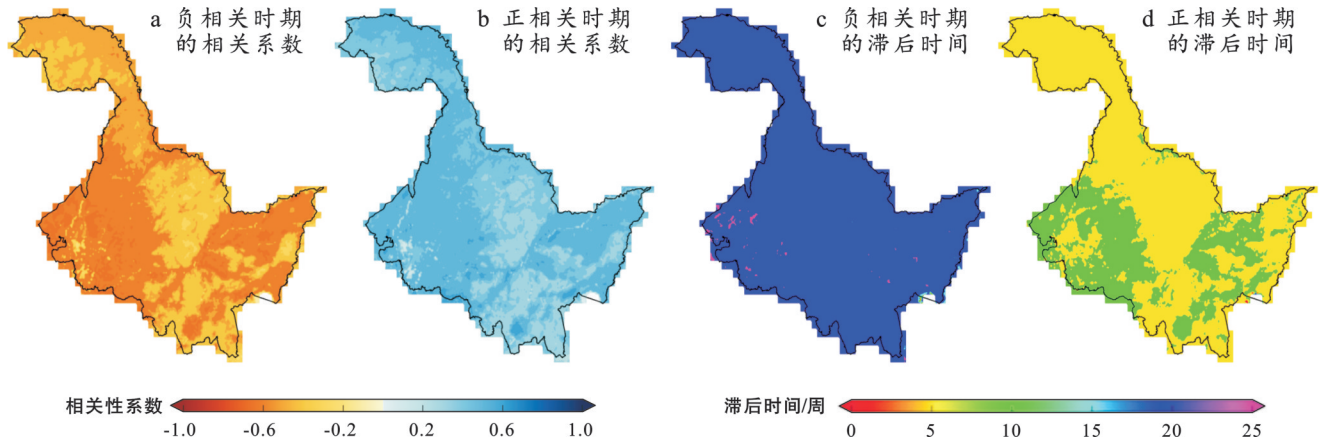
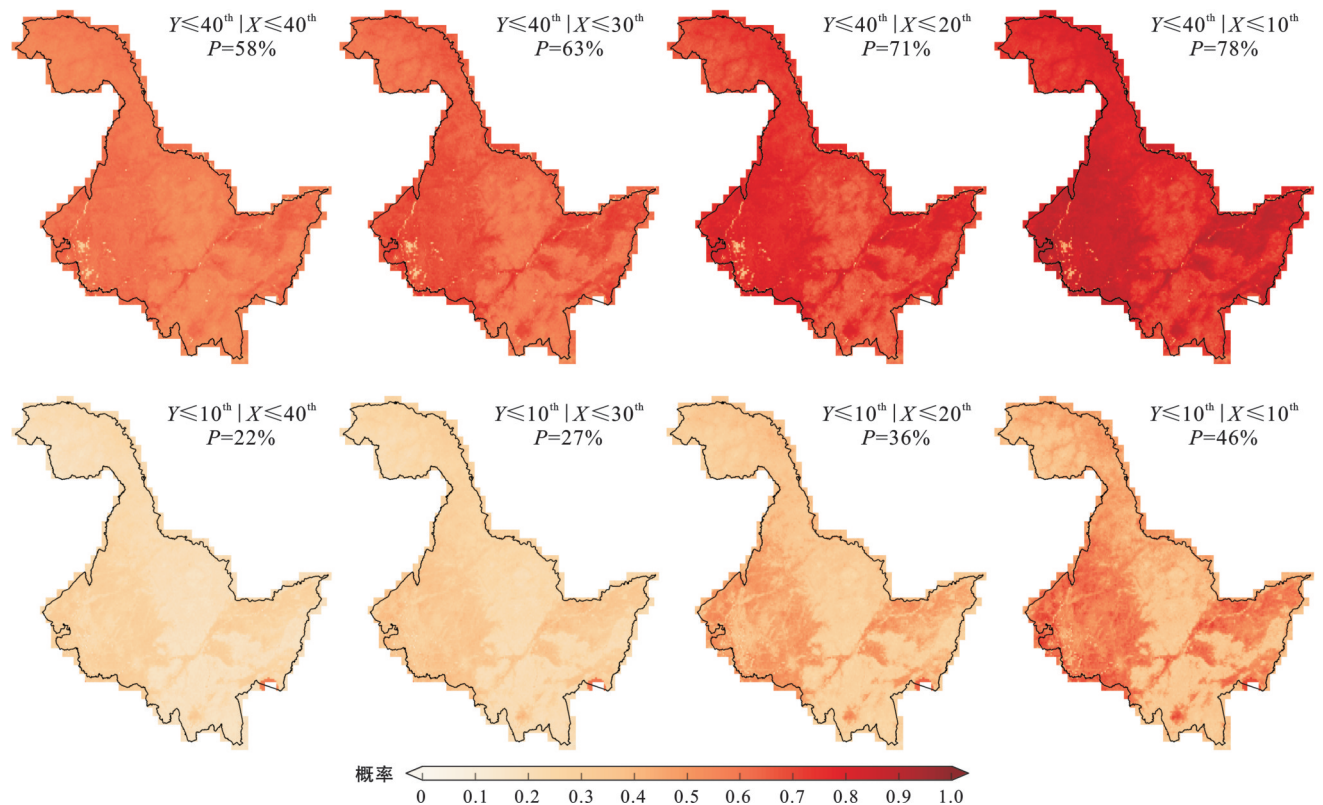


图2 NDVI与气温的相关性及其滞后时间的空间变化

Fig.2 Correlation coefficients between NDVI and temperature under periods of positive (a, c) and negative correlation (b, d) and their spatial variation in lag time



注: X, Y 分别表示气温和 NDVI; P 表示平均的风险概率值; th 表示百分位数。

图3 正相关性时期不同程度气温胁迫下不同程度植被损失的风险概率变化  
Fig.3 Risk probability changes causing different levels of vegetation loss under different levels of temperature stress during positive correlation period

另一方面,本研究分别对农田、森林、草地和湿地生态系统进行了风险分析(图6)。剩余类型生态系统的像元总数只占研究区总像元个数的5%左右,因此本研究未考虑。在两种情景下可以发现,不同生态系统对气温胁迫的损失风险差异明显,且具

有高度相似的规律性。其中,对气温变化影响从大到小的排序为:农田>湿地>草地>森林。各生态系统的风险概率变化以线性的方式递增。与此同时,这也说明农田对气温胁迫的具有较低的抵抗力,森林的抵抗力最高。

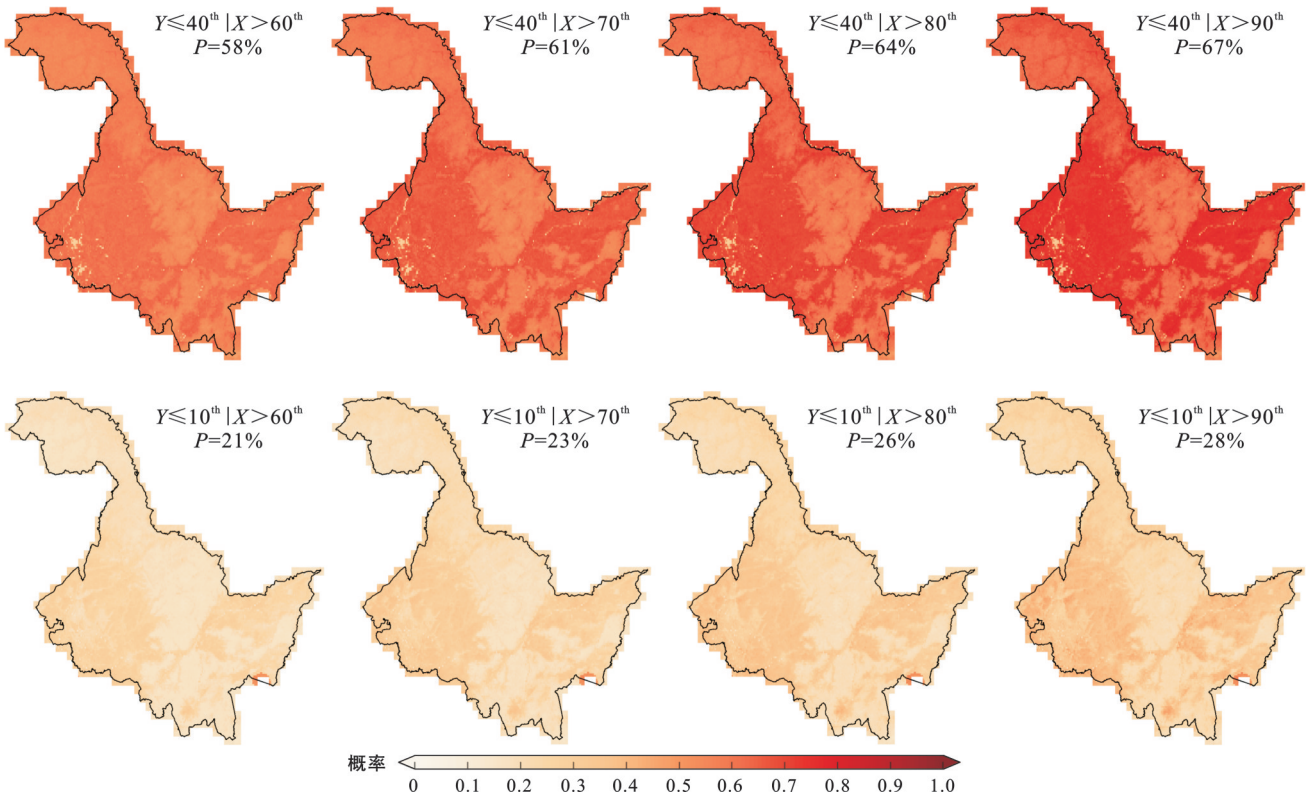


图 4 负相关性时期不同程度气温胁迫下不同程度植被损失的风险概率变化

Fig.4 Risk probabilities changes of vegetation loss at various degrees of vegetation loss under different temperature stresses during negative correlation periods

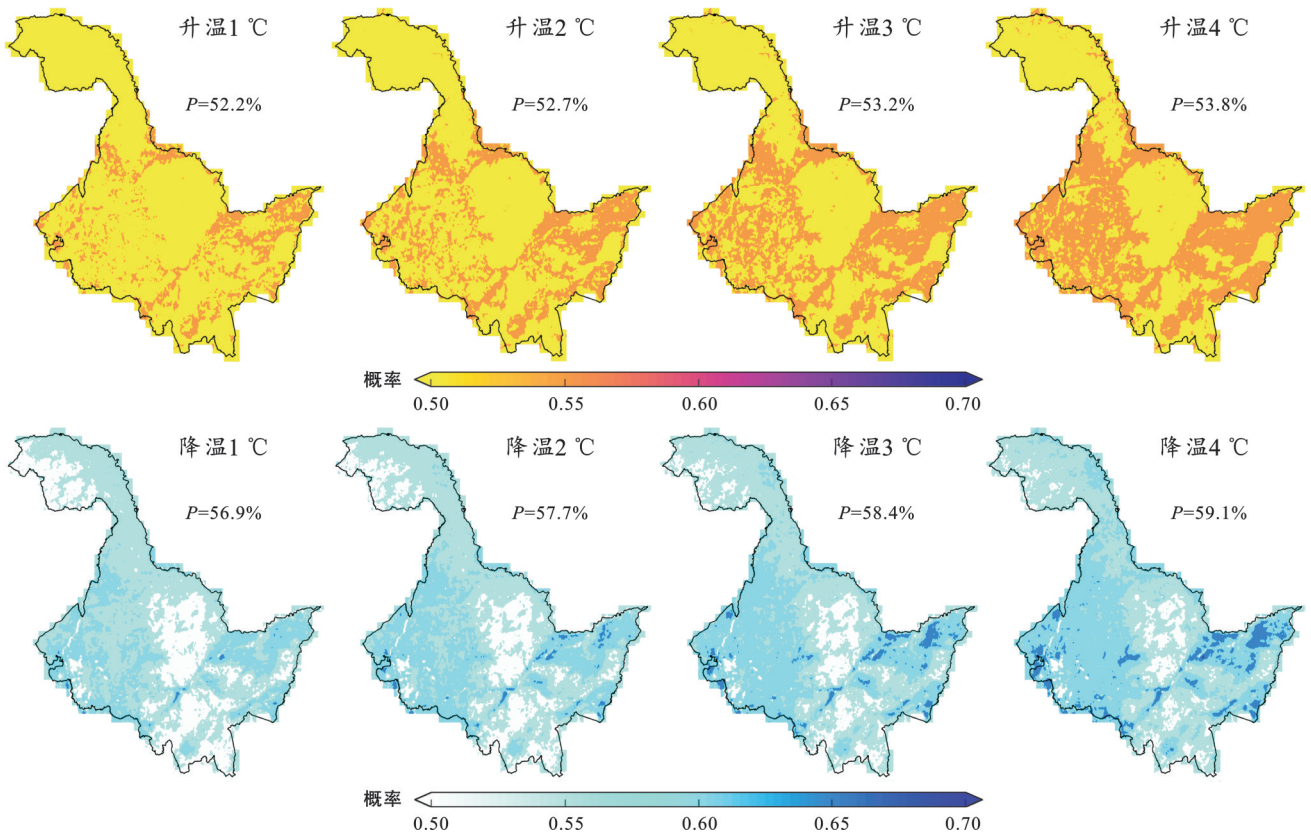


图 5 相较于平均气温升温和降温 1~4 °C 时, 植被损失低于 40 百分位时的风险变化

Fig.5 Risk changes at 40th percentile of vegetation loss for warming and cooling 1~4 °C compared to average temperatures

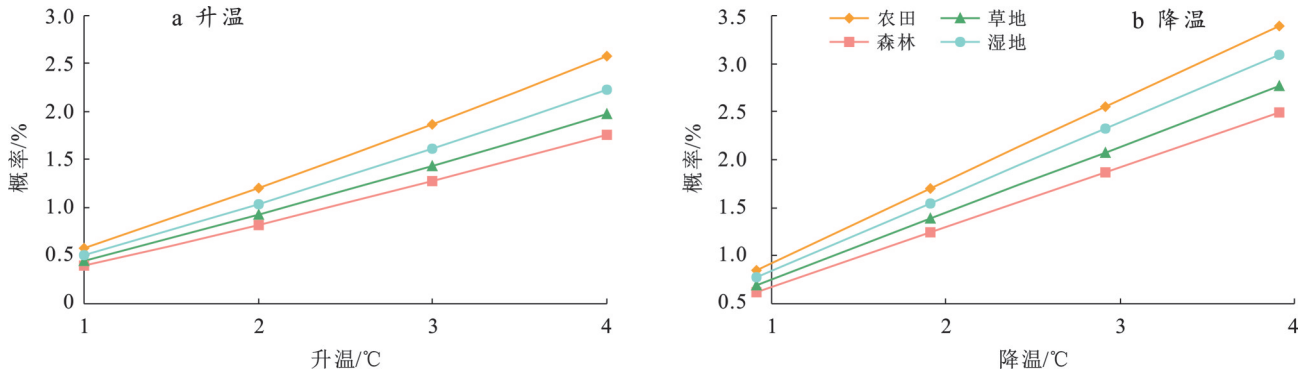


图6 升温(a)和降温(b)1~4 °C时,不同生态系统植被损失低于40百分位时的风险变化

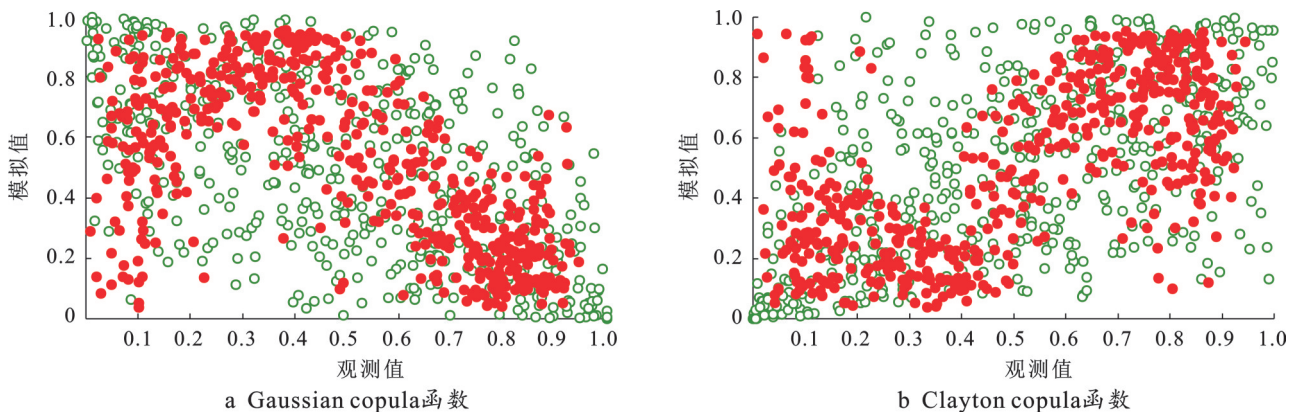
Fig.6 Risk changes at 40 th percentile of vegetation loss of different ecosystems under 1~4 °C warming (a) and cooling (b)

已有研究<sup>[24]</sup>表明,农田生态系统往往具有较低的固碳能力和生物多样性,在面对极端气候事件时,其恢复能力也相对较弱。相比之下,森林系统因具有较高的固碳能力和更丰富的生物多样性。在应对气候变化,特别是在气候和水资源调节等方面具有更强的适应性,因而面临的风险也相对较小。这一差异不仅揭示了不同生态系统在应对未来气候变化时的脆弱性,也强调在提出气候变化适应性等措施或策略时需要考虑不同生态系统的特性。

2.4 风险评估框架的可靠性和限制

有关植被风险评估的方式很多,但大多是基于一种确定性和单一情景的方法。相比于其他自然变量,如土壤水、径流、地下水等,其变化严重依赖于降水或气温的单方面变化。比如,降水越少、气温越高往往会造成上述变量的减少,从而加剧风险<sup>[25-26]</sup>。但是对于植被而言,可以根据环境变化来调节自身的状态,从而适应自然环境的演变。为此,本研究提出

一种升温 and 降温变化对植被损失的风险概率评估模型,可以精确地量化出任意气温胁迫下造成某一度植被损失的风险概率。本研究进一步随机选择一个像元(123.875°E, 46.375°N),分别对两个时期的NDVI和植被应用 Gaussian and Calyton copula 对该框架的可靠性进行评估(图7)。可以看到大多数的观测数据和模拟数据的分布状况较一致,即在正(负)相关时期,模拟点的变化也呈现正(负)相关。更重要是,根据 copula 函数的特性,可以看出 Calyton copula 函数具有更为敏感的下尾特征,因此可以更好地捕捉降温情景下植被的损失情况(图7b)。然而,本研究也存在一些局限性。首先,尽管针对不同的情景选择了不同的 copula 函数。但 copula 模型本身所固有的不确定性也会影响并传递至风险概率的评估<sup>[27]</sup>。其次,仅关注气温对植被的影响,未充分考虑其他环境因素。因此,未来研究可考虑更多的环境因子以及更适宜的方法。



注:红点和绿圈分别表示观测和模拟的结果。

图7 气温和NDVI的观测组合与分别使用 Gaussian copula(a)和 Clayton copula(b)模拟随机变量的比较

Fig.7 Comparison of observed combinations of air temperature and NDVI with simulated random variables using Gaussian (a) and Clayton copula (b)

3 结论

(1) 滞后效应在植被受损风险中扮演关键角色,

其滞后时间不同,植被对气温的敏感性及其损失风险也不同。在滞后9周与23周左右分别与气温达到最大正相关与最小负相关的状态。黑龙江省的相关

性与风险损失情况具有相似的空间分布,东部与西部是植被对气温响应最敏感的区域,也是损失的高风险区域。

(2) 升温与降温胁迫下的风险变化表明,降温比升温对植被的影响更为显著。不同的生态系统对气温胁迫的风险概率表现不同,农田生态系统对气温胁迫的抵抗力较低,森林生态系统较高。

(3) 强调在全球气候变化背景下,综合考虑气温胁迫的滞后效应对于精确评估植被受损具有重要的现实意义。此外,未来的研究应当更深入地探索不同植被间的相互作用及其对气候适应性的内在机制,以便更全面地理解和预测植被对气温胁迫的响应。

### 参考文献 (References)

- [1] Khan M I R, Asgher M, Khan N A. Rising temperature in the changing environment: A serious threat to plants [J]. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 2013,1(1):25.
- [2] Jia Guanyu, Hu Wenmin, Zhang Bin, et al. Assessing impacts of the ecological retreat project on water conservation in the Yellow River basin [J]. *Science of The Total Environment*, 2022,828:154483.
- [3] Hoover D L, Hajek O L, Smith M D, et al. Compound hydroclimatic extremes in a semi-arid grassland: Drought, deluge, and the carbon cycle [J]. *Global Change Biology*, 2022,28(8):2611-2621.
- [4] Rani G, Kaur J, Kumar A, et al. Ecosystem health and dynamics: An indicator of global climate change [J]. *Contemporary environmental issues and challenges in era of climate change*, 2020:1-32.
- [5] National Research Council Committee on Global Change Research. *Global Environmental change: Research Pathways for the Next Decade* [M]. Washington, D. C. National Academy Press, 1999
- [6] Becklin K M, Anderson J T, Gerhart L M, et al. Examining plant physiological responses to climate change through an evolutionary lens [J]. *Plant Physiology*, 2016,172(2):635-649.
- [7] Gillison A N. Plant functional indicators of vegetation response to climate change, past present and future: I. Trends, emerging hypotheses and plant functional modality [J]. *Flora*, 2019,254:12-30.
- [8] De Boeck H J, Dreesen F E, Janssens I A, et al. Whole-system responses of experimental plant communities to climate extremes imposed in different seasons [J]. *New Phytologist*, 2011,189(3):806-817.
- [9] Reyer C P O, Leuzinger S, Rammig A, et al. A plant's perspective of extremes: Terrestrial plant responses to changing climatic variability [J]. *Global Change Biology*, 2013,19(1):75-89.
- [10] Bhattacharya A. Effect of low temperature stress on photosynthesis and allied traits: A review [J]. *Physiological processes in plants under low temperature stress*, 2022: 199-297.
- [11] Fu Y H, Piao Shilong, Zhao Hongfang, et al. Unexpected role of winter precipitation in determining heat requirement for spring vegetation green-up at northern middle and high latitudes [J]. *Global Change Biology*, 2014,20(12):3743-3755.
- [12] Zhao Lin, Dai Aiguo, Dong Bo. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982 - 2013 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249:198-209.
- [13] Wang Lu, Huang Shengzhi, Huang Qiang, et al. Vegetation vulnerability and resistance to hydrometeorological stresses in water-and energy-limited watersheds based on a Bayesian framework [J]. *Catena*, 2021,196: 104879.
- [14] 卢乔倩,江涛,柳丹丽,等.中国不同植被覆盖类型 NDVI对气温和降水的响应特征[J].*生态环境学报*, 2020,29(1):23-34.  
Lu Qiaoqian, Jiang Tao, Liu Danli, et al. The response characteristics of NDVI with different vegetation cover types to temperature and precipitation in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29 (1) : 23-34.
- [15] Zhou Liqing, Cheng Yeqing. Spatio-temporal pattern and its driving factors of grain production in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 30(3), 491-501.
- [16] 刘智源,李继红.2000—2020年黑龙江省植被时空变化对气候因子响应[J].*森林工程*,2024,40(1):85-97.  
Liu Zhiyuan, Li Jihong. Responses of temporal and spatial changes of vegetation to climate factors in Heilongjiang Province from 2000 to 2020 [J]. *Forest Engineering*, 2024,40(1):85-97.
- [17] 潘大海,姜峰,刘伟卓.浅谈黑龙江省粮食生产能力及保障措施[J].*现代农业研究*,2018(5):11-13.  
Pan Dahai, Jiang Feng, Liu Weizhuo. On the grain production capacity and safeguard measures of Heilongjiang province [J]. *Modern Agriculture Research*, 2018(5) : 11-13.
- [18] Sklar M. Fonctions de repartition a n dimensions et leurs marges [J]. *Annales de l'ISUP*. 1959,8(3):229-231.
- [19] Nelsen R B. *An Introduction to Copulas* [M]. Cham: Springer New York, 2006.