

中国草地和欧洲木本植物返青期对气温和降水变化的响应：基于生存分析的研究

周彤¹ 曹入尹² 王少鹏¹ 陈晋³ 唐艳鸿^{1*}

¹北京大学城市与环境学院, 北京 100871; ²电子科技大学资源与环境学院, 成都 611731; ³北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要 长期以来, 气候与植物物候关系的研究大多基于线性模型, 但植物物候对气候变化的响应可能是非线性的。该文利用非线性模型——生存分析模型来分析时间序列中过去事件(气候因子)对目的变量(物候)的作用: 用生存分析模型分析了春季气温和降水量对内蒙古草地、青藏高原草甸和欧洲地区木本植物返青期的影响。其中, 内蒙古与青藏高原的物候信息来自遥感数据, 欧洲地区物候信息为实测数据。蒙特卡洛方法用于拟合模型参数。结果表明: 生存分析模型适合对上述不同研究对象的物候影响因素进行分析, 并能模拟非线性效应; 在内蒙古草地, 春季气温和降水对春季返青有很大的影响, 而青藏高原草甸和欧洲地区木本植物返青期对春季降水响应较小, 对春季气温变化的响应随Holdridge干燥度指数上升而下降; 在预测返青期时发现: 春季平均气温提高1 °C会导致上述地区返青期提前1–6天; 而春季气温与降水的增加会导致返青期发生明显的非线性变化, 这种非线性效应无法基于线性模型模拟出来。结果说明生存分析模型既能用于分析不同尺度下植物物候与气候的关系, 也能用于模型预测, 尤其适合探讨大幅度气候变化对物候的非线性影响。

关键词 气候变化; 草地; 物候; 生存分析法; 青藏高原

周彤, 曹入尹, 王少鹏, 陈晋, 唐艳鸿 (2018). 中国草地和欧洲地区木本植物返青期对气温和降水变化的响应: 基于生存分析的研究. 植物生态学报, 42, 526–538. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0305

Responses of green-up dates of grasslands in China and woody plants in Europe to air temperature and precipitation: Empirical evidences based on survival analysis

ZHOU Tong¹, CAO Ru-Yin², WANG Shao-Peng¹, CHEN Jin³, and TANG Yan-Hong^{1*}

¹College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; ²School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; and ³State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract

Aims Linear models have been widely used to examine the impacts of climatic factors on plant phenology, although the relationship between phenology and climate could be nonlinear. Based on survival analysis, robust nonlinear models were empirically developed to examine the phenological changes in relation to air temperature and precipitation for the grasslands in China and individual woody plants in Europe.

Methods Three datasets were used in our survival analysis: two datasets of the remotely-sensed vegetation phenology for grasslands in Nei Mongol grasslands and meadows in Qinghai-Xizang Plateau, and a dataset of the phenological observations of individual woody plants in Europe. Monte Carlo simulations were performed to estimate model parameters in our survival analysis.

Important findings The survival analysis appeared to be a powerful tool in modeling the nonlinear changes in green-up date (GUD) to the climatic factors. The analyses showed that both spring temperature and precipitation are significantly correlated with the GUD in the semi-arid grasslands in Nei Mongol. For Qinghai-Xizang Plateau and Europe, the spring temperature seemed highly correlated with GUD, while the correlation was weak with the higher Holdridge aridity index. The survival model predicted that the GUD in the three regions would be advanced by 1–6 days with an increase in temperature of 1 °C. A combined increase in spring temperature and precipitation would lead to nonlinear responses, suggesting the need for developing nonlinear models. Our empirical exercise in this study demonstrated that the survival analysis could offer an alternative tool for predicting plant phenology

收稿日期Received: 2017-11-21 接受日期Accepted: 2018-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(41601381). Supported by the National Natural Science Foundation of China (41601381).

* 通信作者Corresponding author (tangyh@pku.edu.cn)

under the changing climate.

Key words climate change; grassland; phenology; survival analysis; Qinghai-Xizang Plateau

Zhou T, Cao RY, Wang SP, Chen J, Tang YH (2018). Responses of green-up dates of grasslands in China and woody plants in Europe to air temperature and precipitation: Empirical evidences based on survival analysis. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 526–538. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0305

近100多年来, 气候变暖已对全球生态系统产生了巨大影响, 成为当前学科研究和社会舆论共同关注的热点问题。近年的研究结果表明, 植物物候与气候变暖有非常密切的关系, 许多研究探讨了各种气候要素对植物物候的影响, 如: 有研究发现, 欧洲植物的返青期受12月到2月平均气温的影响, 气温每上升1 °C, 返青期就会提前3天左右(Jochner *et al.*, 2016); 而温带和寒带森林返青期的年际波动与趋势则受可利用水分的影响(Forkel *et al.*, 2015); 亚马孙植物物候周期则由辐射和降水共同控制(Bradley *et al.*, 2011)。

但是, 这些物候影响因素分析普遍存在两个问题。首先, 分析通常基于线性模型, 如简单偏相关分析(Shen *et al.*, 2015a)或偏最小二乘等(Yu *et al.*, 2010), 这两种方法忽略了一个事实: 植物物候与气候因素之间并不一定满足线性假设, 如有研究表明青藏高原植物对升温与对降温的响应不一样(Wang *et al.*, 2014)。其次, 线性模型对气候变量所在时间段的取值范围十分敏感, 如果数据具有非线性, 不同时间段取值范围得到的分析结果就不一样。如过去在探讨温度敏感性时, 有的研究利用季前最大相关气温期间的气温(Shen *et al.*, 2014), 有的使用固定时间段的气温(Vitasse *et al.*, 2013), 不同方法导致不同研究得到的“气温敏感性”之间不具有可比性。因此, 线性模型在用于植物物候与气候因素关系研究时存在很大的局限。为了更好地描述和预测物候, 非常有必要应用非线性模型(Iler *et al.*, 2013; Sadras & Moran, 2013; Wang *et al.*, 2014)。目前, 基于非线性模型进行物候气候因素探究的研究仍处于起步阶段。

本文尝试利用生存分析模型来探讨植物物候与气候因子的关系。生存分析模型最初用于医学研究, 是针对事件不同时效的统计学模型(Allen *et al.*, 2014), 例如分析从病人接触治疗至出现某种结果(治愈、复发、失败或死亡等)所经历的时间, 从而了解该危险因素对疾病发病的影响(陈文和俞顺章, 1997)。类似地, 在物候研究中, 返青期前一段时间内的气温和

降水会影响“返青”这一事件的发生。生存分析模型还可以考察多种气候变量在不同时段对物候的影响, 在此基础上估算出逐日的物候事件发生概率, 以精确地理解各气候因子对物候期的影响强度(Diez *et al.*, 2014)。目前, 针对物候与气候因子之间关系的研究很少利用生存分析方法, 仅有两个尝试性研究, 分别以单一的森林植被(Xie *et al.*, 2015)和单一物种作为研究材料(Diez *et al.*, 2014)。因此目前针对生存分析能否有效地用于探索植物物候的尝试显然不足, 还需要从更多的角度或利用更多样的研究对象进行探讨。本文基于如下原因选择了我国草地生态系统和欧洲地区木本植物作为研究材料: 首先, 草地生态系统占全球陆地面积1/4或更多, 但还没有针对该类生态系统利用生存分析法进行物候与气候关系的研究; 其次, 相比于森林生态系统, 草地植被的物候似乎更容易受气候因素特别是降水的影响(李夏子等, 2013), 因此选用草地植被有利于考察模型的敏感程度; 而中国草原生态系统气候条件多样, 植被类型丰富, 更是考察多样条件下非线性模型的合适研究对象; 此外, 过去有很多利用线性模型对中国草原生态系统的物候研究(Shen *et al.*, 2011, 2015b; Ding *et al.*, 2013), 这些积累可用于比较对照。在数据选择方面, 由于目前还没有在类似气候条件下对大量的不同种类的单一物种进行生存分析的尝试, 而利用物种水平上的方法尝试和考察生存分析法的适用性又是不可或缺的, 因此我们选取广泛使用的PEP725物候数据集用于检验生存分析模型的适用性(Fu *et al.*, 2015; Jochner *et al.*, 2016)。

本文利用上述研究材料进行生存分析, 通过描述并预测植物物候对气候因子的响应, 以探讨生存分析模型在实例中的应用。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

内蒙古草原和青藏高原草甸总面积广阔, 气候多样。内蒙古自治区属温带大陆性气候, 由东北向西南, 水分表现为递减趋势, 热量则为递增趋势(牛

建明, 2001)。青藏高原范围更加辽阔, 海拔跨度大(100–8 846 m), 该区域气候从东南部暖湿气候转变为西北部冷干气候, 形成了独特的自然环境格局与丰富多样的植被类型(孙鸿烈等, 2012)。欧洲地区气候普遍比较湿润, 年降水量为550–1 200 mm, 年平均气温为5–12 °C, 植被类型则以森林为主(Richard等, 2011)。

1.2 欧洲地区木本植物物候与气候数据

欧洲地区的物候数据取自PEP725数据集(<http://www.pep725.eu/>), 选取时间为1950–2009年。根据该数据, 返青期定义为第一个叶柄出现的日期。该地区的气象数据为日均格网数据, 来自European Climate Assessment & Dataset项目中的E-OBS数据集(<http://eca.knmi.nl/>)。该数据集包含了1950年以来, 25°–75° N, 40° W–75° E范围内0.25° × 0.25°的日平均气温与降水量数据(Haylock *et al.*, 2008)。我们依据PEP725实测物候站点所在的地理坐标, 程序搜索到该植株所处的格网位置, 从而获取气温与降水量数据。在挑选欧洲地区的数据点时, 我们选择了物候记录时间长度大于50年、气象数据完整、且2009年存在物候记录的107株植株(表1), 分布于德国境内的33个点(图1)。

1.3 内蒙古与青藏高原的物候与气候数据

由于全球普遍缺乏草原植物物候的长期观测数据, 本研究利用了1982–2009年的GIMMS (Global Inventory Monitoring and Modeling Studies)归一化差分植被指数(NDVI)时间序列数据反演得到草原植被的返青期。基于NOAA-AVHRR卫星观测, GIMMS生成了15天最大NDVI值合成的8 km × 8 km NDVI数据。我们首先对该数据进行了雪盖数据识别和去除(Wang *et al.*, 2017), 由于冬季NDVI最大值应为土壤NDVI, 我们将冬季(12月至次年2月)的NDVI值统

一用冬季最大值代替, 以消除融雪对返青期数据提取带来的影响。第二步采用已经在时间数据处理中广泛应用的迭代Savitzky-Golay滤波对NDVI进行了去噪处理(Chen *et al.*, 2004)。第3步是用样条差值法得到每日NDVI值, 再利用20%阈值法求取每个地点的多年平均物候时间(White *et al.*, 2009), 目前阈值法已经成为提取物候信息的典型方法。最后, 我们用CCSM-P方法提取了每年的物候信息, CCSM-P方法已经在内蒙古锡林郭勒盟地区得到了较好验证(Chen *et al.*, 2016)。草原与草甸的划分则依据中国西部环境与生态科学数据中心发布的1:100万中国植被图(中国科学院中国植被图编辑委员会, 2001)。

内蒙古与青藏高原的气象数据来自中国气象科学数据共享服务网, 数据来源于各省、市、自治区气候资料处理部门逐月上报的《地面气象记录月报表》的信息化资料。数据集包括1982–2009年各个气象站点的每日气温与降水量, 然后依据植被类型挑选位于内蒙古草原、青藏高原草甸地区的气象站点, 并剔除气象数据有所缺失的站点。我们采用了站点的每日气温与降水量数据用于下一步分析。最终本研究利用了内蒙古地区的12个站点以及青藏高原草甸地区41个站点的数据资料(图1)。

1.4 数据分析

为了分析返青期与季前气候变量的关系, 我们首先需要构建生存分析模型, 然后利用生存分析模型表达二者的关系。生存分析模型中包括以下几个重要概念:

1)生存时间, 它指从某起点开始到被观测对象出现终点事件为止所经历的时间, 研究中为春季开始日(模型中采用3月1日)至返青期的时间, 记为 T 。

2)生存函数: 又称累积生存率, 记作 $S(t)$ 。

$S(t) = p(T > t)$ 其中 T 为生存时间, $S(t)$ 指个体生存时间(模型中为返青时间)长于 t 的概率。也可以表达为:

$$S(t) = \frac{\text{过了}t\text{时刻仍存活(未返青)的个数}}{\text{观察开始时的总个数}} \quad (1)$$

3)风险函数(Hazard function): 记作 $h(t)$, 用于测量一定年龄的个体是否容易死亡(模型中为返青)。

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)\Delta t}{\Delta t} \quad (2)$$

表1 欧洲研究区木本植物物种

Table 1 List of woody plant species in European database

| 属 Genus | 物种 Species | 植株数 Plant No. |
|----------------------|--|---------------|
| 七叶树属 <i>Aesculus</i> | 欧洲七叶树 <i>Aesculus hippocastanum</i> | 31 |
| 桤木属 <i>Alnus</i> | <i>Alnus glutinosa</i> | 4 |
| 桦木属 <i>Betula</i> | 垂枝桦 <i>Betula pendula</i> | 19 |
| 山毛榉属 <i>Fagus</i> | <i>Fagus sylvatica</i> | 16 |
| 栎属 <i>Quercus</i> | 夏栎 <i>Quercus robur</i> | 16 |
| 梣属 <i>Fraxinus</i> | 欧梣 <i>Fraxinus excelsior</i> | 9 |
| 茶藨子属 <i>Ribes</i> | <i>Ribes grossularia</i> | 12 |

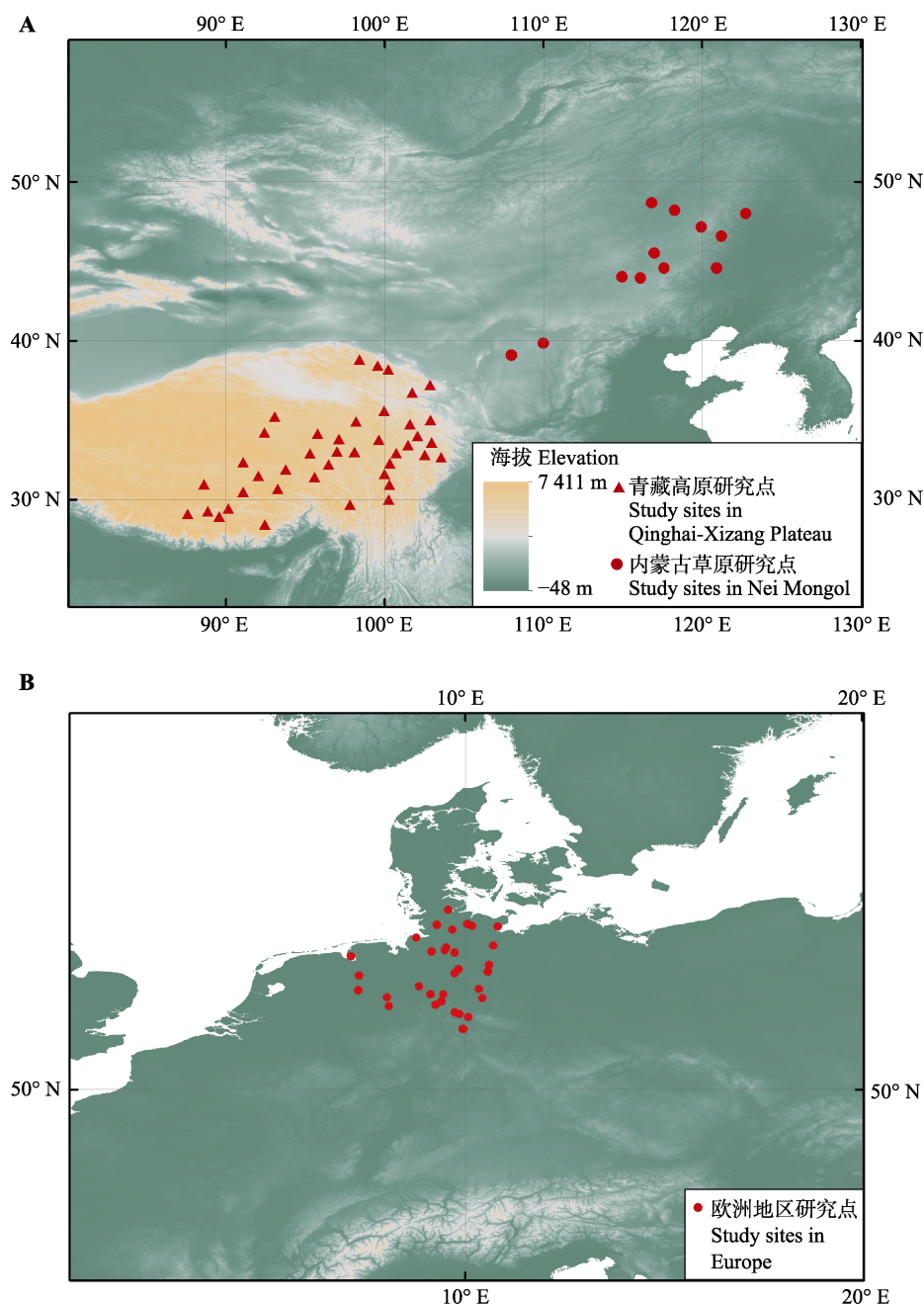


图1 中国与欧洲的研究点分布。**A**图中三角形表示位于青藏高原的气象站点, 圆点表示位于内蒙古的气象站点。**B**图中圆点表示欧洲地区木本植物物候观测点。

Fig. 1 Spatial distribution of study sites in China (**A**) and Europe (**B**). The triangles/dots in (**A**) are the distributions of meteorological stations in Qinghai-Xizang Plateau and in Nei Mongol, respectively. The points in (**B**) indicate the locations of phenological observation sites for woody plants in Europe.

其中, P 为年龄是 t 的个体在区间 $(t, t + \Delta t)$ 中死亡(返青)。

4)生存函数与风险函数的关系: 生存函数可以用风险函数来表达, 个体生存时间长于 t 的生存函数形式为:

$$S(t) = e^{\left(-\int_0^t h(u) du\right)} \quad (3)$$

其中, $h(u)$ 为风险函数。

由于在我们的研究中气温与降水量每天都在发生变化, 不能用传统的生存分析模型推导出模型中的各个参数, 而是要结合蒙特卡洛方法, 通过大量抽样过程获得相应参数的拟合值(Diez *et al.*, 2014)。由于物候过程可以利用非齐次泊松过程来模拟, 我们将物候发生的概率与返青期前气温与降水影响因

子结合起来,重新构建了生存分析中的风险函数 $h(t)$ 。

物候事件发生过程可满足非齐次泊松过程的定义,定义如下:

计数过程 $\{X(t), t \geq 0\}$ 为具有强度函数 $\lambda(t)$ 非齐次泊松过程,若它满足下列条件:

- (1) $X(0) = 0$;
- (2) $X(t)$ 是独立增量过程;
- (3) $X(t)$ 满足下列两式:

$$P\{X(t+h) - X(t) = 1\} = \lambda(t)h + o(h) \quad (4)$$

$$P\{X(t+h) - X(t) \geq 2\} = o(h) \quad (5)$$

则为非齐次泊松过程。其中,计数过程 $N(t)$ 在 $(t, t+s)$ 内 ($s > 0$),事件A发生的次数 $N(t+s) - N(t)$ 不仅与时间差有关,而且与时间段的起始时间有关。其中 $\lambda(t)$ 称作强度函数。

根据非齐次泊松过程强度函数 $\lambda(t)$,可得到在 $(0, s)$ 内,非齐次泊松过程平均值为:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (6)$$

在返青期前,物候事件始终未发生,那么依据非齐次泊松过程,物候事件在 $(0, t)$ 内发生0次的概率 P_0 为

$$P_0 = e^{-\Lambda(t)} \quad (7)$$

可以看到,公式(7)中的概率 P_0 与公式(4)中生存函数 $S(t)$ 形式一致,即在生存分析中风险函数 $h(t)$ 可看作物候发生过程所满足的泊松分布中的强度函数 $\lambda(t)$ 。

为了构建包含气温与降水因子的风险函数,我们借鉴了随时间变化的COX比例风险模型。COX比例风险模型用于不知道生存时间的函数分布类型,又要分析多个相关因素对生存时间的影响时,比例风险模型的基本结构(Cox, 1972)为:

$$h(t) = h_0(t)g(t) \quad (8)$$

其中, $h_0(t)$ 被称为基准风险率,即在时点 t ,协变量取值全为0时的风险率,是仅与时间 t 有关的任意非负函数。在本文中,规定基准风险函数为逻辑斯蒂函数。植被物候的返青过程中,未知的生物、非生物要素对返青概率的影响可以用逻辑斯蒂曲线来描述,其过程呈S形:包括指数增长时期的迅速返青,随后逐渐增加变慢,达到全面返青后增长速度趋于0。所以基准风险函数形式为:

$$h_0(t) = \frac{p_1}{1 + e^{\left(\frac{2.2}{p_3}\right)(p_2 - t)}} \quad (9)$$

式中, p_1 为函数的渐近线(最大值), p_2 为控制曲线的转折点位置, p_3 为量化曲线增长速度的参数。

$g(t)$ 为危险率,在研究中采用了线性函数形式,即:

$$g(t) = P \times Precip(t) + T \times Temp(t) \quad (10)$$

其中, $Precip(t)$ 为春季每日的累计降水量, $Temp(t)$ 为春季每日平均气温。 P 为降水量的影响系数, T 为气温的影响系数。我们利用OpenBUGS (v3.2.3)软件进行蒙特卡洛过程的模型构建与数值模拟。

研究中,为了研究各生态系统可利用水的情况,我们使用了Holdridge干燥度指数(HAI)作为考察植物可利用水的指标之一(周广胜和张新时, 1996; 孟猛等, 2004),定义为环境温度与年降水量的比值,即可能蒸散量与年降水量的比率,计算公式如下:

$$HAI = \frac{58.93 \times \sum temperature}{365 \times P} \quad (11)$$

式中, $temperature$ 为日平均气温,时间范围为全年。日平均气温小于 0°C 的不予计算,大于 30°C 的按 30°C 计算, P 为年降水量(mm)。

2 结果

2.1 春季气温和降水对返青期的影响

我们首先利用生存分析法考察了各个研究点中气候因子与返青期年际变化的关系。其中, P 用于描述其他条件不变情况下,春季降水对返青期的影响程度, T 描述春季气温对返青期的影响程度, P 和 T 的绝对值越高说明降水或气温的影响越大,正值代表增加气温或降水将使返青期提前,负值则代表会造成返青期的延后。

春季降水对返青期的影响程度 P 的统计分布在3个地区之间存在显著差异(图2)。整体而言,内蒙古草原的 P 值最高(平均值: 0.011 , 标准偏差: 0.009),青藏高原草甸次之(0.0015 ± 0.0020),欧洲地区木本植物则最低(-0.00062 ± 0.0003),甚至部分木本植物个体的 P 出现负值,即降水增加会导致返青期的延迟。 P 在3个典型生态系统内的空间变异性也存在差异,内蒙古草原的空间差异最大,各研究点之间 P 的差别即标准差也最大,青藏高原草甸内部差异相对而言较小,而不同地理位置的欧洲树木之间

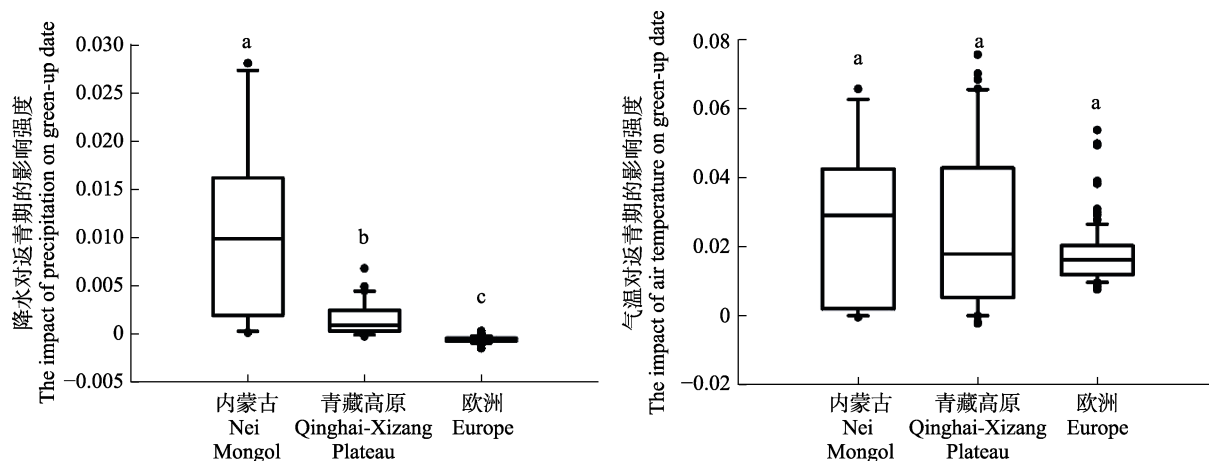


图2 春季降水与气温对内蒙古草原、青藏高原草甸和欧洲地区木本植物返青期的影响。每一方框的上下横线分别表示样本统计量的四分位值即75%和25%的位点, 框内中央横线是中位数, 上下端短横线分别是统计量的90%和10%的位点, 圆点表示统计分布的特异最大或最小值。

Fig. 2 The changes in model coefficients of green-up date with spring precipitation and air temperature for the grasslands in Nei Mongol, meadows in Qinghai-Xizang Plateau, and woody plants in Europe. In these boxplots, the top and bottom values of the bars indicate the 25th and 75th percentiles, respectively; the black line within the box indicates the median; whiskers below and above the box indicate the 10th and 90th percentiles; and points indicate outliers. Letters on top of the whiskers are the results of an analysis of variance: different letters indicate statistically significant difference between the mean values ($p < 0.01$, t -test).

的空间差异就更小。

春季气温对返青期的影响程度 T 在3个生态系统之间的差异相对较小, 尤其青藏高原草甸和内蒙古草原二者很接近(内蒙古: 0.027 ± 0.022 , 青藏高原: 0.026 ± 0.024), 但气温对草原生态系统返青期的影响有较大的空间异质性。在欧洲, 除了少数植株外, T 值比上述草原和草甸要低得多(0.018 ± 0.008)。

一般而言, 较之湿润生态系统, 干旱生态系统的降水对返青期有更强的影响, 但是植物可利用水并不只是由降水量决定, 还受一些其他要素, 尤其是气温的影响(孟猛等, 2004)。所以, 考察降水对返青期的影响时, 有必要考虑植物可利用水而不仅仅是降水的情况。

图3展示了3个生态系统 HAI 值的统计分布。内蒙古草原 HAI 值最高, 并且具有较大的空间变异性(1.72 ± 0.26)。青藏草原草甸仅有部分数据点具有较高的 HAI 值(0.610 ± 0.118), 大部分区域 HAI 值低, 即气候较为湿润。欧洲地区的 HAI 值普遍较低, 并且内部变化范围较小(0.740 ± 0.0075)。

为探讨不同干燥条件下降水和气温影响返青期的情况, 我们考察了降水和温度对返青期的影响因子(P 和 T)与 HAI 值的相关关系(图4)。

根据温度对返青期的影响因子 T 我们发现, 气温的影响程度与 HAI 值的关系更密切。随环境条件

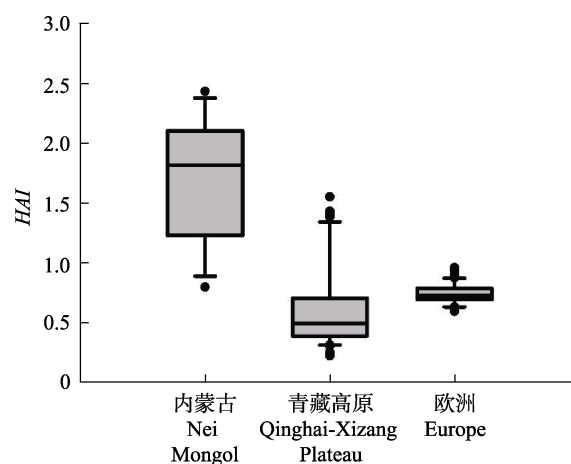


图3 内蒙古草原、青藏高原草甸和欧洲地区木本植物的Holdridge干燥度指数(HAI)的分布统计特征。统计变量的说明参见图2。

Fig. 3 Boxplots of the Holdridge aridity index (HAI) for the grasslands of Nei Mongol, meadows in Qinghai-Xizang Plateau, and woody plants in Europe. See Fig. 2 for explanations of the symbols.

趋于干旱, 欧洲地区木本植物和青藏高原草甸的返青期对气温的响应程度都逐渐降低。但在青藏高原草甸, 达到一定干燥程度后, 气温影响随干燥度的变化逐渐平缓。通过图4可见, 在青藏高原草甸, 当 HAI 值高于1时, 气温对返青期的影响基本不再随降水量发生变化, 即在干旱度达到一定条件时, 气温可能对返青期基本没有影响, 此时返青期可能主要依赖降水调控。青藏高原草甸 $HAI > 1$ 的站点春季

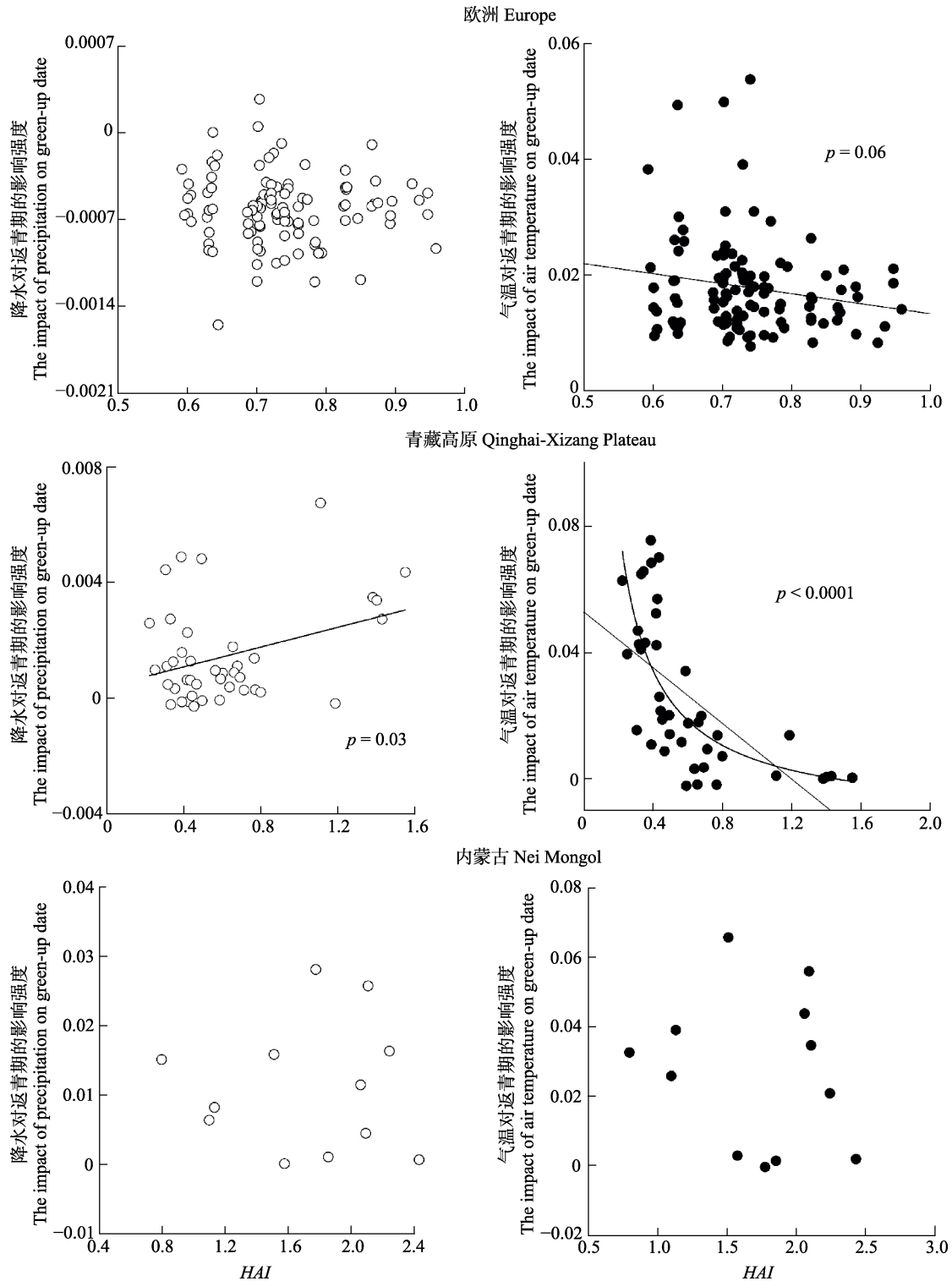


图4 内蒙古草原、青藏高原草甸和欧洲地区木本植物降水与气温对返青期的影响强度与Holdridge干燥度指数(HAI)的关系。
Fig. 4 The changes in the model coefficient of precipitation and temperature with the Holdridge aridity index (HAI) for the grasslands of Nei Mongol, meadows in Qinghai-Xizang Plateau, and woody plants in Europe.

(3月1日–6月1日)平均降水量为33.1 mm (所有地区春季平均降水量为 (82.4 ± 43.5) mm), 因此可以推测在青藏高原草甸, 当春季降水量小于33 mm时, 返青时间将更加依赖于降水, 而气温几乎不起作

用。在青藏高原草甸, 我们利用非线性模型对二者关系进行了拟合, 拟合满足 $p < 0.0001$, 拟合公式为:

$$T = -0.013 + 0.019 / HAI \quad (12)$$

返青期对降水的响应(P)在青藏高原草甸与HAI

有较好的相关关系,即在HAI值更高、更加干旱的研究样点,降水对返青期影响程度也越高。

2.2 利用生存分析模型预测返青期

生存分析法的特点之一在于:因变量和自变量可以是非线性关系,因为物候与气温、降水等环境要素的关系不一定是直线的,这种非线性特征有利于对物候变化做出更精准的预测。在2009年气候条件的基础上,我们预测了不同升温、水分增加情景下返青期的变化。其中,升温为在研究时间段(3月1日起至返青期)内每天平均气温均上升同样幅度,降水增加则为研究时段第一天增加一场降水,之后春季降水累计值均在原基础上增加同样幅度。

针对气温上升的情况,本研究利用基于生存分析法获得的返青期描述模型对假设的3种情景进行了模拟,即升温1℃、2℃、3℃的情景(图5)。3

种情景下,春季气温的上升在3个生态系统的大部分空间点上带来了返青期的提前。在同样增温幅度下,欧洲地区木本植物返青期提前量更多(+1℃:提前 (5.66 ± 2.68) d; +2℃:提前 (10.50 ± 5.01) d; +3℃:提前 (14.06 ± 6.78) d)。在内蒙古草原,3种增温情景下返青期的提前量都是最少的(+1℃:提前 (0.92 ± 1.08) d; +2℃:提前 (2.33 ± 1.92) d; +3℃:提前 (4.17 ± 2.69) d)。青藏高原草甸在增温情况下返青期提前量在二者之间(+1℃:提前 (3.56 ± 2.67) d; +2℃:提前 (7.29 ± 5.08) d; +3℃:提前 (10.88 ± 7.30) d)。

我们拟合了各个站点在研究时间内的降水量变化情况,在3个地区均有70%以上的站点降水量在近几十年逐渐增加。对于降水增加的站点,在内蒙古、青藏高原和欧洲地区多年降水增加量分别是

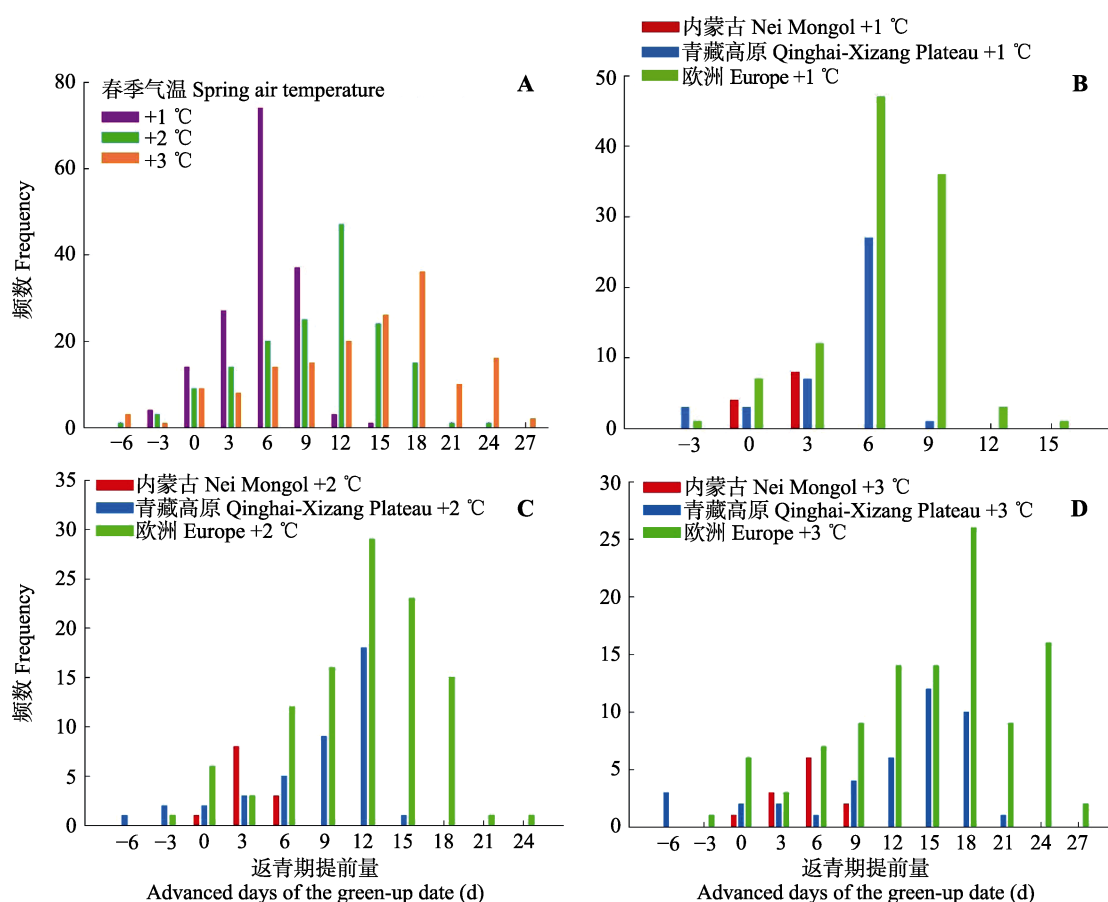


图5 在春季气温上升的3种情境下(+1、+2、+3℃)所研究生态系统返青期的变化。负值为返青期延后,正值为返青期提前。A,升温1、2和3℃情况下所有研究点返青期变化量的频数。B、C、D分别为升温1、2和3℃时各个生态系统返青期变化量的频数。

Fig. 5 Predicted changes of green-up date under the three scenarios of elevated spring-temperature at 1, 2 and 3 °C for the target areas. Negative and positive dates indicate the delayed and advanced days of the green-up date, respectively. **A**, Predicted changes under all the three temperature scenarios. **B**, **C**, **D**, Predicted changes for each target area with the temperature increase of 1, 2 and 3 °C, respectively.

(14.7 ± 9.1) mm (28年)、(26.8 ± 15.3) mm (28年)和(17.1 ± 8.7) mm (约55年)。因此, 为模拟在各个地区未来数十年内的降水变动以观测降水量变化可能带来的影响, 我们模拟了增加10、20 和30 mm春季降水情况下返青期的变化(图6)。结果显示, 在降水增加时, 大部分空间点的返青期提前了, 但也有部分空间点出现了返青期延后的现象, 这些点基本都位于欧洲。总体上, 欧洲地区木本植物返青期会因为降水增加而推迟(+10 mm: 推迟(3.59 ± 1.68) d; +20 mm: 推迟(6.55 ± 3.18) d; +30 mm: 推迟(9.26 ± 4.54) d)。而青藏和内蒙古草原都会因降水增加使返青期大幅度提前, 其中内蒙古草原返青期提前量比较均一(+10 mm: 提前(5.83 ± 4.61) d; +20 mm: 提前(11.67 ± 7.43) d; +30 mm: 提前(15.92 ± 8.43) d), 而青藏高原草甸返青期提前量差别较大(+10 mm: 提前(7.95 ± 16.14) d; +20 mm: 提前(11.63 ± 20.08) d;

+30 mm: 提前(13.95 ± 21.57) d)。

2.3 简单线性模型与生存分析模型的比较分析

过去有很多研究指出, 在中纬度地区, 植物的春季物候主要受气温控制, 因而在探究物候与环境要素的关系时, 常常采用线性模型分析物候与气温之间的相关关系。如利用返青期与一定时间内的气温之间的线性关系求取气温敏感性。而要利用线性模型, 首先需要对气候变量进行定义。目前, 对气候变量的定义方式主要有以下两种, 以气温为例: (1)指定物候期前1–3个月作为有效气候区间, 区间内的平均气温为气温变量(Menzel *et al.*, 2006; Vitasse *et al.*, 2013); (2)求返青期与返青期前不同时间段内平均气温的相关性, 相关性最高的时间段内的平均气温为气温变量(Fu *et al.*, 2015)。本研究将利用第二种方法计算气温敏感性。

为计算气温敏感性, 我们首先计算了每个站点

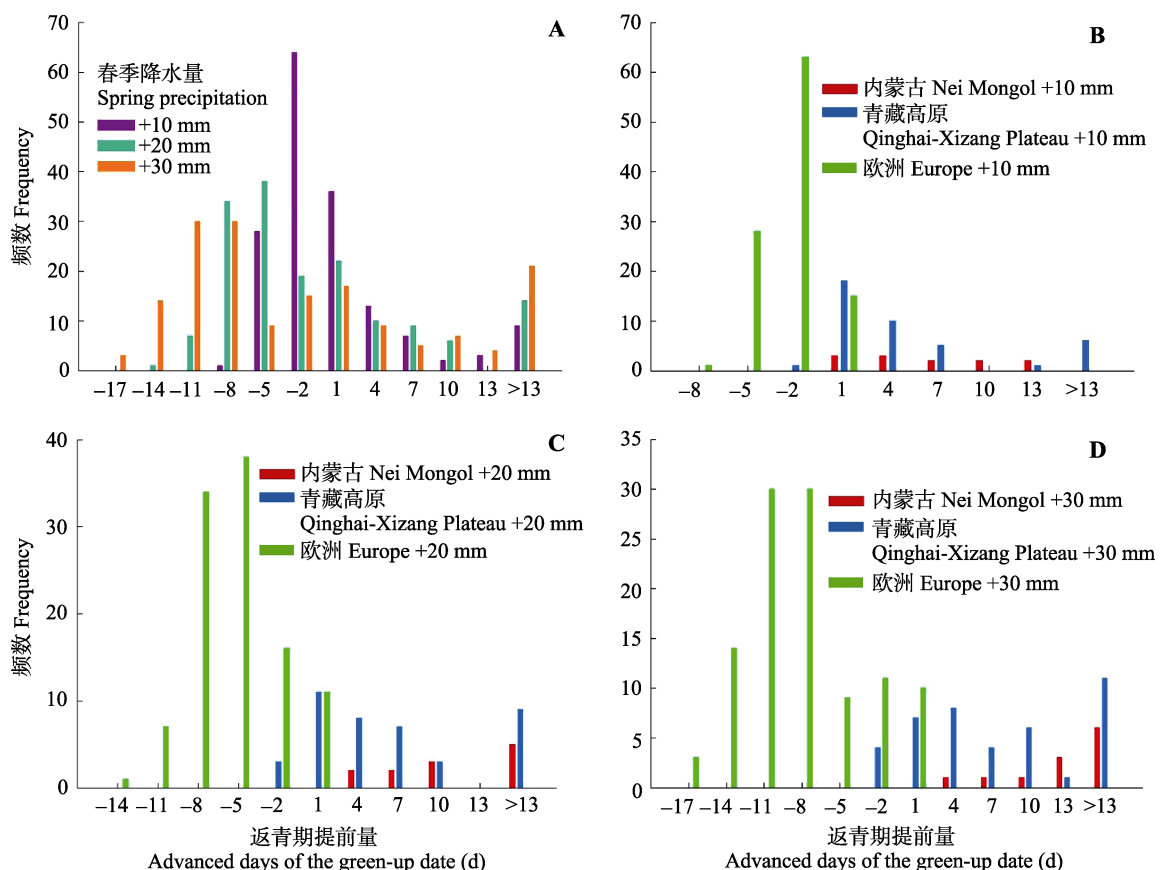


图6 在3种春季降水增加的情景下(+10、+20、+30 mm)所研究生态系统返青期的变化情况。负值表示返青期延后, 正值表示返青期提前。**A**, 增水10、20和30 mm情况下所有研究点返青期变化量的频数。**B**、**C**、**D**分别为增水10、20和30 mm时各个生态系统返青期变化量的频数。

Fig. 6 Predicted changes of green-up date under the three scenarios of elevated spring-precipitation at 10, 20 and 30 mm among each target area. Negative and positive dates indicate the delayed and advanced days of the green-up date, respectively. **A**, Predicted changes for all the three precipitation scenarios. **B**, **C**, **D**, Predicted changes for each target area with the precipitation increase at 10, 20 and 30 mm, respectively.

返青期前28–119天的平均气温(以7天为步长), 然后利用线性相关法求与返青期相关系数绝对值最大的一段时间, 将该时间段作为当地的季前时间段。在季前时间段内, 线性回归法中返青期与平均气温的回归系数即为气温敏感性。

与生存分析的结果类似, 欧洲地区的气温敏感性最强(-4.40 ± 1.14 d·°C⁻¹), 其次是青藏高原(-1.87 ± 2.12 d·°C⁻¹), 内蒙古地区最弱(-0.13 ± 1.89 d·°C⁻¹)。青藏高原内部也具有较大的差异, 而欧洲相对比较均一(图7)。

与线性模型相比, 生存分析法具有非线性的特征, 即当气候变量发生变化时, 返青期并不会随之发生线性改变。由表2可见, 升温时, 线性模型计算得到的返青期提前天数会线性变化。但生存分析法中, 返青期提前量与升温幅度并不是线性的, 例如在内蒙古地区, 季前气温提高1 °C时返青期平均提前0.92 d, 但升温2 °C时返青期提前2.33 d, 即从提升1 °C到提升2 °C时, 平均返青期实际上提前了约1.41 d, 大于升温1 °C时提前的0.92 d。

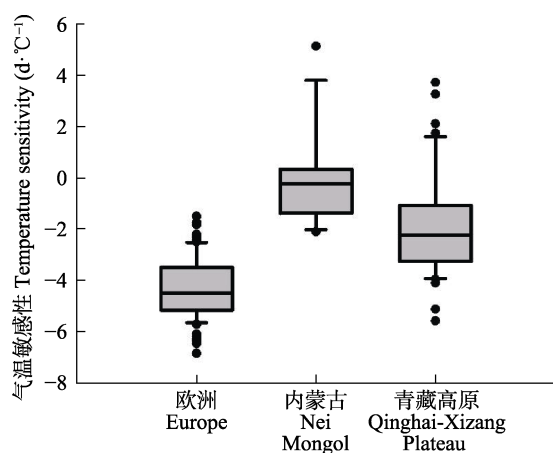


图7 利用线性回归模型计算的3个地区返青期气温敏感性。统计变量的说明参见图2。

Fig. 7 Boxplots of temperature sensitivity of green-up date from linear regression models for the three cases of the study. See Fig. 2 for explanations of the symbols.

表2 升温1、2和3 °C下内蒙古、青藏高原和欧洲地区返青期提前天数的平均值(从3月1日起每天比2009年升温1、2和3 °C)

Table 2 The mean advanced days of green-up date for the two grasslands in Nei Mongol and the Qinghai-Xizang Plateau, and woody plants in Europe under three warming scenarios: elevated spring temperature at +1, +2 and +3 °C for each day as compared with the days from March 1st, 2009.

| 升温情景 Warming scenarios (°C) | 内蒙古 Nei Mongol | | | 青藏高原 Qinghai-Xizang Plateau | | | 欧洲 Europe | | |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------|-----------------------------|--------------------------|----------|----------------------------|--------------------------|----------|
| | 生存分析法 Survival analysis | 线性回归法 Linear analysis | <i>p</i> | 生存分析法 Survival analysis | 线性回归法 Linear analysis | <i>p</i> | 生存分析法 Survival analysis | 线性回归法 Linear analysis | <i>p</i> |
| +1 | 0.92 | 0.13 | 0.04 | 3.56 | 1.87 | <0.001 | 5.66 | 4.47 | <0.001 |
| +2 | 2.33 | 0.26 | 0.01 | 7.29 | 3.74 | <0.001 | 10.5 | 8.94 | <0.001 |
| +3 | 4.17 | 0.39 | <0.01 | 10.88 | 5.61 | <0.001 | 14.06 | 13.41 | <0.001 |

3 讨论和结论

3.1 不同生态系统的返青期对气候因子的响应

本文利用生存分析法针对不同来源的返青期物候信息(时间序列遥感影像提取的植被物候信息、实际观测物候信息)与气候之间的关系进行了研究, 并且模拟了不同的升温和增水情境下返青期的可能变化。

我们发现, 在内蒙古草原与青藏高原草甸, 降水增加都对返青期有明显的提前作用。气温对返青期的控制在欧洲地区和青藏高原草甸均比较明显, 但二者在降水变化下的响应有很大差别, 降水对欧洲地区木本植物的返青期影响较小。

尽管气温对返青期的作用在欧洲更为明显, 研究中也发现降水增加在欧洲可能会造成返青期的推迟。可能的原因是: 木本植物的根际系统相比于草本植物更深, 因而可以获得土壤深处的水分, 因而降水对欧洲地区木本植物返青期影响较小(Sarmiento & Monasterio, 1983)。另外, 降水增加推迟欧洲地区木本植物返青期可能是由于降水的间接作用。例如, 降水较少的年份可能会有更多的晴天, 因此提高了日间的辐射和日间与夜间的气温, 从而影响返青期; 此外, 晴天增加会进一步提高冠层气温, 从而提高分生组织的温度。研究表明, 返青期过程与分生组织的关系更密切(Grace *et al.*, 1989)。因此在欧洲地区, 降水增加有可能通过间接作用导致返青期的推迟。

我们在内蒙古草原和青藏高原草甸的物候数据来自于遥感估算。遥感物候定义并不与实地观测物候完全一致, 尽管遥感物候已经广泛应用于全球物候研究中, 但遥感物候与实测物候之间的一致性还需要验证。最近在北美收集的物候观测站点的数码照片数据(<https://phenocam.sr.unh.edu/webcam/>)可能有助于这一问题的进一步解决。

3.2 线性模型与生存分析模型的方法比较

与线性模型相比,生存分析法用于研究物候变化时具有以下优点。

1)在2.3中我们指出,利用线性模型进行返青期与季前气温的模拟时,若指定有效气候区间,则会忽略不同地区之间的差异。实际上,位于不同气候区域的不同植被类型,对返青期有效的季前区间存在较大的差异。相同区间的气温可能并不对所有植物都有效,也不能反映出真实的气温敏感性。因而,目前在线性回归模型中,研究者通常采取与物候时间序列相关性最强的一段平均气温区间作为季前区间(Mazer *et al.*, 2013; Fu *et al.*, 2015)。但最近有研究指出,季前区间的范围极有可能影响气温敏感性(Güsewell *et al.*, 2017)。因此,在对比不同地区的植被气温敏感性时,不同的季前区间会导致气温敏感性计算过程中所采用的时间范围不同,对不同时间范围内返青期对气温的响应程度在直接比较时会出现问题。

相比之下,生存分析法则无需指定季前气温区间。在模型中由于基准风险函数的存在,在对返青期影响较小的时间区域,气候对返青期发生概率的影响很小。并且,生存分析法中表达气温对返青期影响的参数(T)可以在不同地区直接进行对比,不需要考虑存在不同时间段的问题。

2)由表1可见,生存分析模型中,返青期对升温情景的响应是非线性的,并且生存分析中包含了一个逻辑斯蒂形式的基准风险函数(公式(9)),它模拟了随时间变化的其他未知变量对返青期的影响。基准风险函数可以视为线性回归的截距,但线性回归的截距仅为一个常数,而逻辑斯蒂函数是刻画生物体生长和种群增长的一个经典模型(练健生和江海声, 1995)。因此本文使用的生存分析模型比线性模型具有更合理的生物学基础。

3)生存分析法的另一优点在于,它是一个逐日的模型(Diez *et al.*, 2014),因而不同时间点上发生的升温 and 降水情况对物候的影响有所不同。在现实情况下,返青期前不同时间段的气候变化对返青期的影响存在差异,但在线性模型中,由于采用的是返青期与平均气温的回归,季前区间内每一天气温变化的效果是同质的,这与返青期的生理学过程并不一致。尤其对春季降水而言,距离返青期越近的降水事件对返青期的影响会更大。

生存分析法可用于进一步模拟每天气候变量对返青期的影响。比如,相同幅度春季降水量的增加可能对应着不同情景,如在刚进入春季时增加降水,或在更晚的时候增加降水,或者增加多场较弱的降水。这些情景对于线性模型是无差异的(因为总春季降水量变化相同),但生存分析法可针对不同情形做出不同的预测。

最后需要说明的是,与传统统计学方法不同,利用蒙特卡洛方法模拟得到的生存分析法模型需要用方差信息准则评估模型绩效,无法与线性回归模型常用的拟合优度检验值进行直接对比。因此,要进一步探讨生存分析模型拟合的结果,仍需更深入的探究。

3.3 结论

本研究结果表明,作为一种非线性模型,生存分析法可用于分析植物物候与气候因子的关系,同时能很好地体现植物返青期随气温、降水的非线性变化。例如在内蒙古地区的研究点,利用生存分析法得到升温1 °C的情况下返青期约提前0.92 d,而从升温1 °C增加到升温2 °C时,返青期约提前1.41 d。我们发现生存分析法对于遥感反演返青期、实测返青期、格网气候数据和实测气候数据都有较好的适用性,而且便于在不同生态系统之间进行比较。

致谢 北京大学“985工程”(2010–2020年)建设项目(7101100143)支持本研究; PEP725项目提供物候数据; EU-FP6的ENSEMBLES项目(<http://ensembles-eu.metoffice.com>)和ECA&D项目(<http://www.ecad.eu>)提供相关数据,一并致谢。

参考文献

- Allen JM, Terres MA, Katsuki T, Iwamoto K, Kobori H, Higuchi H, Primack RB, Wilson AM, Gelfand A, Silander JA (2014). Modeling daily flowering probabilities: Expected impact of climate change on Japanese cherry phenology. *Global Change Biology*, 20, 1251–1263.
- Bradley AV, Gerard FF, Barbier N, Weedon GP, Anderson LO, Huntingford C, Aragão LEOC, Zelazowski P, Arai E (2011). Relationships between phenology, radiation and precipitation in the Amazon region. *Global Change Biology*, 17, 2245–2260.
- Chen J, Jönsson P, Tamura M, Gu Z, Matsushita B, Eklundh L (2004). A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91, 332–344.

- Chen J, Rao Y, Shen M, Wang C, Zhou Y, Ma L, Tang Y, Yang X (2016). A simple method for detecting phenological change from time series of vegetation index. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 54, 3436–3449.
- Chen W, Yu SZ (1997). Comparison of the Cox Model and log-linear models in analysing survival data. *Chinese Journal of Health Statistics*, 14, 18–20. [陈文, 俞顺章 (1997). Cox回归模型与对数线性回归模型在生存分析中应用的比较. *中国卫生统计*, 14, 18–20.]
- Cox DR (1972). Regression models and life-tables. *Biometrical Journal*, 34, 187.
- Diez JM, Ibanez I, Silander Jr JA, Primack R, Higuchi H, Kobori H, Sen A, James TY (2014). Beyond seasonal climate: Statistical estimation of phenological responses to weather. *Ecological Applications*, 24, 1793–1802.
- Ding M, Zhang Y, Sun X, Liu L, Wang Z, Bai W (2013). Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009. *Chinese Science Bulletin*, 58, 396–405.
- Forkel M, Migliavacca M, Thonicke K, Reichstein M, Schaphoff S, Weber U, Carvalhais N (2015). Codominant water control on global interannual variability and trends in land surface phenology and greenness. *Global Change Biology*, 21, 3414–3435.
- Fu YH, Zhao H, Piao S, Peaucelle M, Peng S, Zhou G, Ciais P, Huang M, Menzel A, Peñuelas J, Song Y, Vitasse Y, Zeng Z, Janssens IA (2015). Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526, 104–107.
- Grace J, Allen SJ, Wilson C (1989). Climate and the meristem temperatures of plant communities near the tree-line. *Oecologia*, 79, 198–204.
- Güsewell S, Furrer R, Gehrig R, Pietragalla B (2017). Changes in temperature sensitivity of spring phenology with recent climate warming in Switzerland are related to shifts of the pre-season. *Global Change Biology*, 23, 5189–5202.
- Haylock MR, Hofstra N, Klein Tank AMG, Klok EJ, Jones PD, New M (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*, 113, D20119. DOI: 10.1029/2008JD010201.
- Iler AM, Hoyer TT, Inouye DW, Schmidt NM (2013). Long-term trends mask variation in the direction and magnitude of short-term phenological shifts. *American Journal of Botany*, 100, 1398–1406.
- Jochner S, Sparks TH, Laube J, Menzel A (2016). Can we detect a nonlinear response to temperature in European plant phenology? *International Journal of Biometeorology*, 60, 1551–1561.
- Li XZ, Han GD, Guo CY (2013). Impacts of climate change on dominant pasture growing season in central Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 4146–4155. [李夏子, 韩国栋, 郭春燕 (2013). 气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响. *生态学报*, 33, 4146–4155.]
- Lian JS, Jiang HS (1995). The ecological meaning and its identification of the Logistic population growth model. *Supplement to the Journal of Sun Yatsen University*, (3), 160–164. [练健生, 江海声 (1995). Logistic种群增长模型参数的生态学意义及其辨识——南湾野生猕猴种群的应用. *中山大学学报论丛*, (3), 160–164.]
- Mazer SJ, Travers SE, Cook BI, Davies TJ, Bolmgren K, Kraft NJB, Salamin N, Inouye DW (2013). Flowering date of taxonomic families predicts phenological sensitivity to temperature: Implications for forecasting the effects of climate change on unstudied taxa. *American Journal of Botany*, 100, 1381–1397.
- Meng M, Ni J, Zhang ZG (2004). Aridity index and its applications in geo-ecological study. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 853–861. [孟猛, 倪健, 张治国 (2004). 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. *植物生态学报*, 28, 853–861.]
- Menzel A, Sparks TH, Estrella N, Koch E, Aasa A, Ahas R, Alm-Kübler K, Bissolli P, Braslavská O, Briede A, Chmielewski FM, Crepinsek Z, Curnel Y, Dahl Å, Defila C, Donnelly A, Filella Y, Jatzak K, Måge F, Mestre A, Nordli Ø, Peñuelas J, Pirinen P, Remišová V, Scheffinger H, Striz M, Susnik A, van Vliet AJH, Wielgolaski F, Zach S, Züst A (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12, 1969–1976.
- Niu JM (2001). Impacts prediction of climatic change on distribution and production of grassland in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 9, 277–282. [牛建明 (2001). 气候变化对内蒙古草原分布和生产力影响的预测研究. *草地学报*, 9, 277–282.]
- Richard P, Liu HY, Yin Y (2011). Conservation of biodiversity under impact of human activities: Vegetation evolution in Central Europe and its implication. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 584–588. [Richard P, 刘鸿雁, 印轶 (2011). 人类活动影响下的生物多样性保护: 中欧的植被演化及其启示. *生态学杂志*, 30, 584–588.]
- Sadras VO, Moran MA (2013). Nonlinear effects of elevated temperature on grapevine phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 107–115.
- Sarmiento G, Monasterio M (1983). *Life Forms and Phenology: Tropical Savannas*. Elsevier, Amsterdam. 79–104.
- Shen M, Cong N, Cao R (2015a). Temperature sensitivity as an explanation of the latitudinal pattern of green-up date trend in Northern Hemisphere vegetation during 1982–2008. *International Journal of Climatology*, 35, 3707–3712.
- Shen M, Piao S, Cong N, Zhang G, Janssens IA (2015b). Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 21, 3647–3656.

- Shen M, Tang Y, Chen J, Yang X, Wang C, Cui X, Yang Y, Han L, Li L, Du J, Zhang G, Cong N (2014). Earlier-season vegetation has greater temperature sensitivity of spring phenology in Northern Hemisphere. *POLS ONE*, 9, e88178. DOI: 10.1371/journal.pone.0088178.
- Shen M, Tang Y, Chen J, Zhu X, Zheng Y (2011). Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1711–1722.
- Sun HL, Zheng D, Yao TD, Zhang YL (2012). Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 67, 3–12. [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨 (2012). 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 67, 3–12.]
- The Editorial Committee of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences (2001). *1:1000000 Vegetation Atlas of China*. Science Press, Beijing. [中国科学院中国植被图编辑委员会 (2001). 1:1000000中国植被图集. 科学出版社, 北京]
- Vitasse Y, Hoch G, Randin CF, Lenz A, Kollas C, Scheepens JF, Koerner C (2013). Elevational adaptation and plasticity in seedling phenology of temperate deciduous tree species. *Oecologia*, 171, 663–678.
- Wang C, Chen J, Wu J, Tang Y, Shi P, Black TA, Zhu K (2017). A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 196, 1–12.
- Wang SP, Meng FD, Duan JC, Wang YF, Cui XY, Piao SL, Niu HS, Xu GP, Luo CY, Zhang ZH, Zhu XX, Shen MG, Li YN, Du MY, Tang YH, Zhao XQ, Ciais P, Kimball B, Penuelas J, Janssens IA, Cui SJ, Zhao L, Zhang FW (2014). Asymmetric sensitivity of first flowering date to warming and cooling in alpine plants. *Ecology*, 95, 3387–3398.
- White MA, de Beurs KM, Didan K, Inouye DW, Richardson AD, Jensen OP, O'Keefe J, Zhang G, Nemani RR, van Leeuwen WJD, Brown JF, de Wit A, Schaepman M, Lin X, Dettinger M, Bailey AS, Kimball J, Schwartz MD, Baldocchi DD, Lee JT, Lauenroth WK (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Global Change Biology*, 15, 2335–2359.
- Xie Y, Ahmed KF, Allen JM, Wilson AM, Silander JA (2015). Green-up of deciduous forest communities of northeastern North America in response to climate variation and climate change. *Landscape Ecology*, 30, 109–123.
- Yu H, Luedeling E, Xu J (2010). 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*, 107, 22151–22156.
- Zhou GS, Zhang XS (1996). Study on climate-vegetation classification for global change in China. *Acta Botanica Sinica*, 38, 8–17. [周广胜, 张新时 (1996). 全球变化的中国气候-植被分类研究. *植物学报*, 38, 8–17.]

责任编辑: 陈吉泉 责任编辑: 王 葳



扫码加入读者圈
听语音, 看问答