



# 气候变暖背景下青藏高原草本植物物候变化空间换时间预测

李雪莹 朱文泉\* 李培先 谢志英 赵涔良

北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 北京师范大学地理科学学部, 遥感科学与工程研究院, 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875

**摘要** 气候变暖背景下的植物物候变化广受关注, 然而常用的植物物候变化预测模型未充分考虑植物对环境的适应性, 给预测结果带来了较大的不确定性。该文基于2002–2011年青藏高原10个站点的物候观测资料以及年平均气温数据, 对空间换时间模型预测车前(*Plantago asiatica*)和蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)各主要物候事件(展叶始期、开花始期和黄枯普遍期)变化的可行性及其在升温背景下的变化规律进行了分析。首先利用不同海拔高度的气温和物候事件分别与地理因子(经度、纬度和海拔)建立多元线性回归模型, 然后在此基础上剔除经度和纬度的影响, 单独考察海拔变化所引起的气温与植物物候变化, 最后以海拔高度作为桥梁来考察物候变化与温度变化的关系。结果表明, 采用各站点对应的海拔高度来模拟年平均气温空间差异的 $R^2$ 均大于0.89, 表明海拔梯度可以用来反映时间尺度下的年际温度变化; 车前和蒲公英各物候事件发生日期拟合值均与海拔高度变化关系显著,  $R^2$ 均大于0.70, 表明海拔变化是影响它们各物候事件变化的主要地理因子; 在物候事件发生日期拟合值和年平均气温拟合值的回归方程中,  $R^2$ 均大于0.93, 说明基于不同海拔高度模拟得到的年平均气温变化可以对时间尺度上车前和蒲公英的物候事件变化进行预测。空间换时间预测表明, 温度每升高1 °C, 车前展叶始期和开花始期分别提前5.1和5.4 d, 而黄枯普遍期推迟4.8 d; 蒲公英展叶始期和开花始期分别提前6.5和7.8 d, 而黄枯普遍期推迟6.7 d。

**关键词** 青藏高原; 气候变暖; 车前; 蒲公英; 空间换时间; 物候

李雪莹, 朱文泉, 李培先, 谢志英, 赵涔良 (2020). 气候变暖背景下青藏高原草本植物物候变化空间换时间预测. 植物生态学报, 44, 742–751. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0308

## Predicting phenology shifts of herbaceous plants on the Qinghai-Xizang Plateau under climate warming with the space-for-time method

LI Xue-Ying, ZHU Wen-Quan\*, LI Pei-Xian, XIE Zhi-Ying, and ZHAO Cen-Liang

State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; and Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

### Abstract

**Aims** To analyse the feasibility of space-for-time method in predicting phenology shifts of *Plantago asiatica* and *Taraxacum mongolicum* on the Qinghai-Xizang Plateau, as well as revealing the phenological changes of the two herbaceous plants under climate warming.

**Methods** The observed phenological data for *Plantago asiatica* and *Taraxacum mongolicum* from 10 sites on the Qinghai-Xizang Plateau during 2002–2011, as well as the meteorological data (i.e., daily mean air temperature) were collected. First, multiple linear regression models were built between geographic factors (longitude, latitude and altitude) and phenological events/annual mean temperature at different altitude gradients. Then, the longitude and latitude were kept to be unchanged, and the unary linear regression models between phenological events/annual mean temperature and altitude were built. Finally, the altitude was used as the “bridge” to indicate the relationship between the change of phenological events and the change of annual mean temperature.

**Important findings** The temperature decreased with the increasing altitude ( $R^2 > 0.89$ ,  $p < 0.05$ ), illustrating that changes of altitude gradients can be used to substitute for changes of annual mean temperature. The change in the

收稿日期Received: 2019-11-14 接受日期Accepted: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(41771047)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0606)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41771047), and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP)(2019QZKK0606).

\* 通信作者Corresponding author (zhuwq75@bnu.edu.cn)

simulated phenological events of the two herbaceous plants all showed a strong dependence on the change of altitude ( $R^2 > 0.70$ ,  $p < 0.05$ ), which contributed the most among the geographic factors. Strong dependences were observed between the simulated phenological events and the simulated annual mean temperature ( $R^2 > 0.93$ ,  $p < 0.05$ ), showing that phenological events could be predicted by the annual mean temperature with the space-for-time method. For *Plantago asiatica*, the first leaf date (FLD) and the first flowering date (FFD) occurred earlier with increasing annual mean temperature as 5.1 and 5.4 days per  $^{\circ}\text{C}$ , respectively, while the common leaf coloring date (LCD) occurred later as 4.8 days per  $^{\circ}\text{C}$ . The FLD and FFD of *Taraxacum mongolicum* advanced by 6.5 days and 7.8 days per  $^{\circ}\text{C}$  of increase in the mean annual temperature while the LCD delayed by 6.7 days per  $^{\circ}\text{C}$ .

**Key words** Qinghai-Xizang Plateau; climate warming; *Plantago asiatica*; *Taraxacum mongolicum*; space-for-time method; phenology

Li XY, Zhu WQ, Li PX, Xie ZY, Zhao CL (2020). Predicting phenology shifts of herbaceous plants on the Qinghai-Xizang Plateau under climate warming with the space-for-time method. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 742–751. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0308

自工业革命以来, 人类活动排放温室气体导致全球陆地和海洋表面温度上升约 $0.7\text{--}1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (IPCC, 2013)。21世纪温度上升速率比20世纪提高了约一倍 (Karl *et al.*, 2015), 且高纬度及高海拔地区的气温升幅更加明显 (李林等, 2002; Thomas *et al.*, 2004; Peñuelas *et al.*, 2013)。预计在21世纪末, 全球表面温度将在21世纪初温度基础上升高 $0.3\text{--}4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (IPCC, 2013)。许多研究证实气候变暖提前了植物的生物学春夏季 (Menzel & Fabian, 1999; Ahas *et al.*, 2002; 徐雨晴等, 2005; Wolkovich *et al.*, 2012), 延迟了生物学秋冬季 (张福春, 1995; Chmielewski & Rötzer, 2001; Steltzer & Post, 2009), 延长了整个植物生长季 (方修琦和余卫红, 2002; Piao *et al.*, 2006)。

为了了解植物物候在气候变暖背景下的变化趋势, 现有研究多采用植物物候统计 (静态) 模型和过程 (动态) 模型进行预测 (裴顺祥等, 2009)。虽然统计模型能够基于现有数据计算物候事件对温度变化的敏感度 (张学霞等, 2005; 徐韵佳等, 2017), 过程模型能够部分地从植物生理学角度解释物候与环境因子的内在联系 (范广洲和贾志军, 2010); 但它们在预测变暖情景下的物候变化时仍无法充分考虑植物对环境的适应性, 而植物对环境的适应会导致植物物候对温度变化的敏感性发生改变, 从而增加了植物物候预测的不确定性。

生态学中常用的另一种时间尺度下的预测方法是空间换时间模型 (Johnson & Miyanishi, 2008; Tierney *et al.*, 2010; Fitzpatrick *et al.*, 2011; Blois *et al.*, 2013), 它是将时间尺度下 (尤其是过去或未来) 无法观测到的变化过程转换到空间尺度下进行模拟或分析 (Blois *et al.*, 2013)。空间换时间模型有效弥

补了长期的物候观测数据缺乏问题; 同时, 利用空间梯度下一系列所选观测区域对时间轨迹下的变化进行模拟, 可以保障生境的相似性, 其数据结果本身也包含了植物对环境变化的适应性。然而, 空间换时间具有一定的应用条件 (Blois *et al.*, 2013): 首先, 时间因素导致的变化应是唯一的影响因子, 其他因素如突发事件等的干扰会降低模型预测精度; 其次, 模型更适合对拥有长时间尺度变化的现象进行观察; 最后, 要有足够的空间梯度差异来模拟时间尺度下的变化。

在空间换时间模型中, 利用海拔梯度模拟气温变化这一方法可以保障多种环境因子的相似性, 正逐渐成为近年来模拟气候变化的重要手段 (Koenig & Abegg, 1997; Beniston, 2003; Malhi *et al.*, 2010)。青藏高原地区绝大部分区域的海拔在 $2\,000\text{--}5\,500\text{ m}$ 之间, 由此引起不同海拔高度下的年平均气温变化范围在 $-10.0\text{--}10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间 (郑周涛, 2018), 因此具有足够的海拔跨度来模拟气候变暖趋势; 此外, 青藏高原草本植物的物候变化主要受温度影响 (丁明军等, 2011; 孔冬冬等, 2017), 且在空间上表现出明显的海拔梯度性 (Wang *et al.*, 2014b)。可见, 空间换时间模型在理论上适用于预测青藏高原草本植物物候在变暖背景下的变化趋势。

本文基于由海拔跨度大所带来的温度差异的青藏高原这一天然实验室, 以空间上海拔的变化来模拟时间上温度的变化, 以车前 (*Plantago asiatica*, PA) 和蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*, TM) 两个广布种为例, 分析空间换时间模型预测展叶始期、开花始期和黄枯普遍期变化的可行性, 并进一步揭示变暖背景下这两种草本植物的物候变化规律。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本文数据观测区域位于青藏高原东南部(88.88–102.97° E, 29.05–37.38° N)(图1), 海拔为2 840–4 180 m, 年平均气温在–2.1–9.8 °C之间, 研究区植物主要以灌木和多年生草本植物为主。车前和蒲公英均为多年生宿根草本植物(郭水良, 2002; 曹艳芳等, 2008), 在青藏高原东南部分布较广。

1.2 数据

1.2.1 物候观测数据

青藏高原植物物候观测数据源于国家气象局物候观测网, 共计26个地面物候观测站点, 其中12个站点同时包含车前和蒲公英至少10年(2002–2011年)的物候数据(图1)。本文利用展叶始期、开花始期以及黄枯普遍期这3个植物生长发育的关键物候事件

作为研究对象, 将植株开始展开小叶的日期定义为展叶始期, 将个别植株花瓣初次展开的日期定义为开花始期, 将所有植株中超过50%的绿色叶片变成黄色的日期定义为黄枯普遍期(Zhu *et al.*, 2018), 上述物候事件的发生日期均以年积日(day of year, DOY)的形式表示。实验数据的选取规则如下: 首先, 各站点至少包括相同年份连续10年的车前与蒲公英各物候观测数据; 其次, 利用残差法将异常数据去除(Schaber & Badeck, 2002), 最终得到10个符合规则的站点信息(表1), 同时计算得到2002–2011年间两种草本植物逐站点各物候事件的平均值及标准偏差, 以及总体数据分布箱式图(附件I–III)。

1.2.2 气象数据

青藏高原各站点气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 主要包括2002–2011年10个监

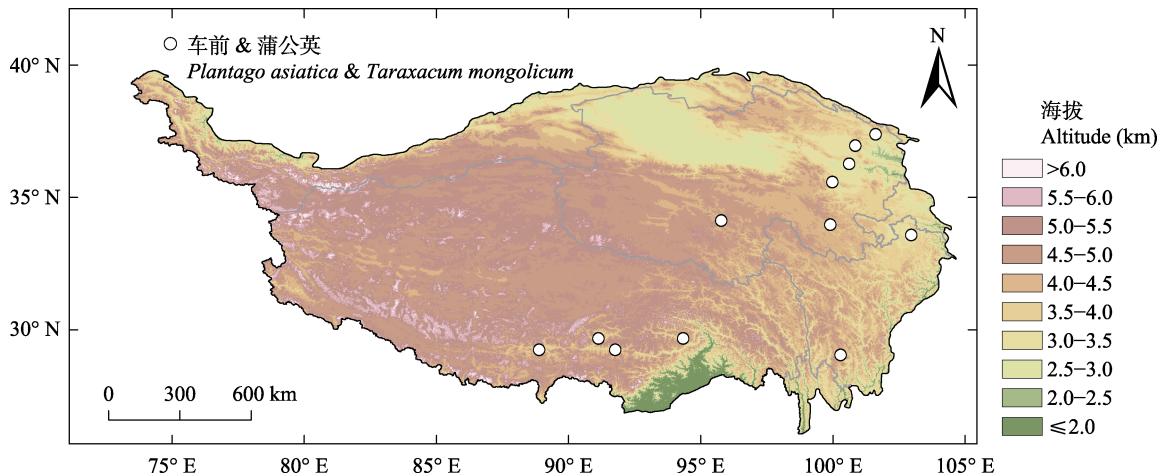


图1 青藏高原物候站点位置分布图。

Fig. 1 Distribution map of phenological sites across the Qinghai-Xizang Plateau.

表1 青藏高原车前和蒲公英物候站点信息

Table 1 Records from phenological sites of *Plantago asiatica* and *Taraxacum mongolicum* across the Qinghai-Xizang Plateau

站点 Site	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)	车前观测数据时间跨度 Time span of observed data for <i>P. asiatica</i>	蒲公英观测数据时间跨度 Time span of observed data for <i>T. mongolicum</i>
门源 Menyuan	101.62°	37.38°	2 850	1987–2011	2001–2011
海北牧试 Haibeimushi	100.85°	36.95°	3 140	1997–2011	1997–2011
共和 Gonghe	100.62°	36.27°	2 840	1991–2011	1991–2011
兴海 Xinghai	99.98°	35.58°	3 320	2000–2011	2000–2011
曲麻莱 Qumarlêb	95.78°	34.13°	4 180	1997–2011	1997–2011
甘德 Gadê	99.90°	33.97°	4 050	1990–2011	1990–2011
若尔盖 Zoigê	102.97°	33.58°	3 440	1983–2011	1983–2011
稻城 Daocheng	100.30°	29.05°	3 730	2002–2011	2002–2011
日喀则 Xigazê	88.88°	29.25°	3 840	2000–2011	2000–2011
泽当 Zêtang	91.77°	29.25°	3 550	2000–2011	2000–2011

测站点的逐日平均气温数据和逐日降水数据。其中,海北牧试站缺乏逐日平均气温数据,本文使用最近气象站点海晏的气温数据代替以进行之后的计算分析。

### 1.3 方法

青藏高原温度的空间变化除主要受海拔高度的影响之外,还与地理位置(经度和纬度)尤其是纬度相关,因此不能简单地直接将不同海拔高度站点的温度与植物物候事件建立联系来开展空间换时间的物候变化预测。为了从局地环境中单独剥离出温度对植物物候变化的贡献,需要先建立不同海拔高度站点的地理因子与物候事件之间的回归模型,然后控制其他地理因子不变,仅让海拔高度发生变化来单独考察物候变化,以此代表变暖背景下的物候变化。Dai等(2014)、Wang等(2014a)和Zheng等(2016)均利用多元线性回归模型分别建立地理因子(经度、纬度、海拔)与春季物候事件、黄枯普遍期和温度的关系,并发现海拔与上述各物候事件和温度的关系均呈显著相关关系。因此,本研究首先利用不同海拔高度的温度和物候事件分别与地理因子(经度、纬度和海拔)建立多元线性回归模型,然后在此基础上剔除经度和纬度的影响,单独考察海拔高度变化所引起的温度与植物物候变化,最后以海拔高度作为桥梁来考察物候变化与温度变化的关系。

#### 1.3.1 海拔变化所引起的温度与植物物候变化模拟

对于海拔变化所引起的温度与植物物候变化模拟,这里以温度为例进行说明。对于年平均气温与地理因子(经度、纬度和海拔)之间的多元回归,本研究首先分别计算各个站点逐年(2002–2011年)的年平均气温;然后以年份为组,将每年10个站点的年平均气温与其经度、纬度和海拔高度开展多元线性回归,得到拟合曲线如公式(1)所示的10个年份的逐年回归方程:

$$y_n = a_n \times lon + b_n \times lat + c_n \times alt + d_n \quad (1)$$

式中, $lon$ 、 $lat$ 和 $alt$ 分别为各站点的经度、纬度和海拔高度; $y$ 为各站点的年平均气温; $a$ 、 $b$ 和 $c$ 分别为随经度、纬度和海拔变化的温度系数;下标 $n$ 代表某一年份; $d$ 为截距。

为了剔除经度和纬度的影响,单独考察海拔变化所引起的温度变化:对公式(1)中得到10个逐年回归方程,在 $lon$ 、 $lat$ 处分别带入所有站点的经度和纬度平均值, $alt$ 处带入各个站点的实际海拔高度,计

算10个站点在各自10个年份(2002–2011年)的年平均气温拟合值 $T$ (共有100条记录),并利用 $T$ 与各站点对应的海拔梯度 $alt$ 进行线性回归,得到一条拟合曲线如公式(2)所示:

$$T = e \times alt + f \quad (2)$$

式中, $f$ 为截距;回归系数 $e$ 即为青藏高原在平均状态下海拔每变化1 000 m时所引起的年平均气温变化。

海拔变化所引起的植物物候变化模拟与上述介绍的温度模拟方法类似。对于每一个物候事件,均可计算得到其10个站点在各自10个年份(2002–2011年)的物候事件拟合值 $P$ (每个物候事件各有100条记录)。

#### 1.3.2 物候对温度变化的响应程度计算

针对每一个物候事件(展叶始期、开花始期和黄枯普遍期)的拟合值 $P$ ,将其与年平均气温拟合值 $T$ 进行一元线性回归,得到一条拟合曲线如公式(3)所示:

$$P_i = g_i \times T + h_i \quad (3)$$

式中, $h_i$ 为某一物候事件 $i$ 的截距;回归系数 $g_i$ 即为某一物候事件 $i$ 在年平均气温每变化1 °C时所导致的物候事件变化天数。

#### 1.3.3 拟合结果精度检验方法

文中所有回归分析均采用 $F$ 检验方法进行显著性检验,若显著性概率 $p < 0.05$ ,则视为变化显著。为进一步检验模型准确性,将逐年多元回归公式下所有站点的物候事件拟合值与对应站点的物候事件观测值进行对比,计算均方根误差(Root Mean Square Error,  $RMSE$ )。

## 2 结果

### 2.1 温度与海拔的关系

2002–2011年各年份的年平均气温空间差异均与海拔梯度关系显著( $p < 0.05$ )(表2), $R^2$ 均大于0.89。海拔每升高1 000 m,年平均气温降低6.3–6.7 °C。控制经纬度不变,根据海拔梯度拟合的年平均气温与各站点的海拔关系显著( $R^2 = 0.98$ ):海拔每升高1 000 m,年平均气温降低6.5 °C(图2)。

### 2.2 物候与海拔的关系

除了车前2011年展叶始期和2003年黄枯普遍期外,车前和蒲公英所有物候事件均与海拔关系显著, $R^2$ 范围在0.70–1.00之间(表3)。两者春季物候事件发生日期的拟合值随海拔升高显著延迟,黄枯普遍期

表2 青藏高原年平均气温与海拔逐年回归分析建模结果

Table 2 Regression modeling results between mean annual air temperature and altitude across the Qinghai-Xizang Plateau

年份 Year	$R^2$	$a$ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$b$ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$c$ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$d$
2002	0.90*	-0.3	-1.1*	-0.006 7*	88.4
2003	0.90*	-0.2	-1.1*	-0.006 3*	83.8
2004	0.91*	-0.3	-1.1*	-0.006 3*	88.9
2005	0.91*	-0.3	-1.1*	-0.006 6*	91.3
2006	0.90*	-0.3	-1.1*	-0.006 4*	89.8
2007	0.91*	-0.3	-1.1*	-0.006 7*	95.8
2008	0.90*	-0.3	-1.1*	-0.006 7*	91.6
2009	0.90*	-0.3	-1.2*	-0.006 4*	92.8
2010	0.91*	-0.3	-1.1*	-0.006 7*	93.6
2011	0.89*	-0.3	-1.1	-0.006 3*	87.1

\*表示 $p < 0.05$ 。a、b、c和d分别表示经度、纬度、海拔的回归系数和截距。

\* indicates  $p < 0.05$ . a, b, c and d indicate the regression coefficients of longitude, latitude, altitude and intercept, respectively.

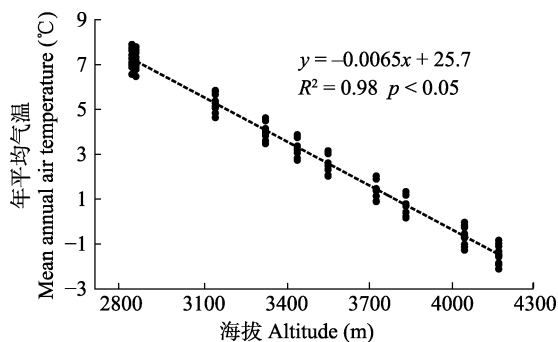


图2 青藏高原年平均气温拟合值与海拔回归分析结果。

Fig. 2 Regression results between fitted values of mean annual air temperature and altitudes across the Qinghai-Xizang Plateau.

拟合值随海拔升高显著提前(图3)。海拔每升高1 000 m, 车前展叶始期和开花始期分别推迟33.9和36.0 d, 黄枯普遍期提前31.6 d; 蒲公英展叶始期和开花始期分别推迟42.9和51.6 d, 黄枯普遍期提前44.0 d。

各站点各物候事件拟合值与观测值对比结果(表4)表明: 车前展叶始期、开花始期以及黄枯普遍期拟合值与观测值的RMSE分别为5.7、6.7和5.4 d; 蒲公英展叶始期、开花始期以及黄枯普遍期拟合值与观测值的RMSE分别为6.8、7.0和7.0 d, 两者的开花始期RMSE均为最大。蒲公英各站点物候事件拟合值的RMSE略大于车前。

### 2.3 物候和温度的关系

车前和蒲公英春季物候事件的拟合值随温度升高显著提前( $p < 0.05$ ), 黄枯普遍期拟合值随温度升高显著延迟( $p < 0.05$ )(图4)。温度每升高1  $^{\circ}\text{C}$ , 车前展叶始期和开花始期分别提前5.1和5.4 d, 而黄枯普

遍期推迟4.8 d; 蒲公英展叶始期和开花始期分别提前6.5和7.8 d, 而黄枯普遍期推迟6.7 d。

## 3 讨论

### 3.1 空间换时间预测植物物候变化的可行性与适用范围

#### 3.1.1 空间换时间预测的可行性

空间换时间模型预测青藏高原草本植物物候变化具有可行性。首先, 采用各站点对应的海拔梯度来模拟年平均气温空间差异的精度较高且显著, 可以反映时间尺度下的年际温度变化; 其次, 除了车前2011年的展叶始期和2003年的黄枯普遍期外, 两者所有物候事件变化均与海拔高度变化关系显著( $p < 0.05$ ),  $R^2$ 在0.70–1.00之间, RMSE位于5.4–7.0 d之间, 说明海拔引起的温度梯度变化是车前和蒲公英物候事件空间变化的主导因素; 最后, 以海拔为桥梁, 建立物候事件和年平均气温拟合值的回归方程,  $R^2$ 均大于0.93, 两者显著相关( $p < 0.05$ ), 即基于不同海拔高度模拟得到的年平均气温可以对时间尺度上车前和蒲公英物候事件的变化进行预测。

除造成温度变化外, 海拔高度变化还会引起湿度、日照时间、风力以及大气压力等环境因子的变化(Körner, 2007), 但在青藏高原地区由海拔变化引起的众多变化因素中, 温度变化是影响植物物候变化的最主要环境因子(丁明军等, 2011)。需特别说明的是, 影响物候事件发生的最优时段通常被认为处在物候事件发生日期之前(Bolmgren *et al.*, 2013; Dai *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014a), 且越接近该物候事件出现期影响越大(陈效逖和张福春, 2001)。不同植物同一物候事件变化对于气温波动的最佳响应时段也存在种间差异(张学霞等, 2005; 黄文婕等, 2017; 徐韵佳等, 2017); 同一植物不同物候事件对于影响其变化的最佳时段的选取也各不相同(吴荣军等, 2009; 许格希等, 2014), 这使得影响车前和蒲公英不同物候事件最优时段的选取无法严格统一, 因此无法控制各物候事件的升温背景一致, 故本文均使用年平均气温拟合值作为植物生长的背景环境来预测各物候事件变化。

#### 3.1.2 空间换时间预测的优势

青藏高原环境相对恶劣, 物候地面观测数据难以长期连续获取。利用海拔变化造成的年平均气温空间差异来代替植物生长背景气温的年际变化, 可

表3 青藏高原车前和蒲公英各物候事件和地理因子回归分析建模结果  
Table 3 Regression modeling results between each phenological event of *Plantago asiatica* and *Taraxacum mongolicum* and geographic factors across the Qinghai-Xizang Plateau

年份 Year	车前展叶始期 FLD of <i>P. asiatica</i>					蒲公英展叶始期 FLD of <i>T. mongolicum</i>				
	$R^2$	$a$ (d·° <sup>-1</sup> )	$b$ (d·° <sup>-1</sup> )	$c$ (d·m <sup>-1</sup> )	$d$	$R^2$	$a$ (d·° <sup>-1</sup> )	$b$ (d·° <sup>-1</sup> )	$c$ (d·m <sup>-1</sup> )	$d$
2002	0.95*	1.1	6.3*	0.033 8*	-342.3	0.95*	1.2	6.2*	0.043 8*	-382.8
2003	0.98*	0.7	6.8*	0.036 2*	-318.3	1.00*	0.9*	6.3*	0.045 2*	-362.8
2004	0.95*	1.0	6.9*	0.036 7*	-355.0	0.92*	1.3	6.1*	0.041 2*	-383.3
2005	0.90*	1.0	5.9*	0.032 9*	-320.1	0.92*	1.7	6.1*	0.043 2*	-428.5
2006	0.96*	1.5*	6.7*	0.037 3*	-404.9	0.92*	2.0*	6.6*	0.044 2*	-470.6
2007	0.91*	1.6	5.9*	0.040 0*	-398.6	0.93*	1.9*	5.7*	0.047 8*	-448.9
2008	0.85*	1.5	5.0*	0.032 7*	-327.8	0.99*	1.4*	5.7*	0.045 0*	-380.9
2009	0.93*	1.6*	5.0*	0.032 9*	-340.4	0.91*	2.0*	4.3*	0.039 4*	-385.8
2010	0.83*	0.6	4.5*	0.030 5*	-212.2	0.85*	0.9	4.3*	0.041 5*	-274.2
2011	0.67	0.7	4.5*	0.025 1	-199.5	0.70*	0.9	4.3	0.037 3*	-254.7

年份 Year	车前开花始期 FFD of <i>P. asiatica</i>					蒲公英开花始期 FFD of <i>T. mongolicum</i>				
	$R^2$	$a$ (d·° <sup>-1</sup> )	$b$ (d·° <sup>-1</sup> )	$c$ (d·m <sup>-1</sup> )	$d$	$R^2$	$a$ (d·° <sup>-1</sup> )	$b$ (d·° <sup>-1</sup> )	$c$ (d·m <sup>-1</sup> )	$d$
2002	0.76*	-0.1	3.9*	0.023 2*	-45.1	0.88*	0.5	6.9*	0.047 9*	-306.5
2003	0.96*	0.9	5.3*	0.032 2*	-226.1	0.89*	0.9	6.5*	0.048 8*	-334.9
2004	0.95*	0.8	5.1*	0.029 8*	-198.4	0.88*	2.0	6.5*	-0.059 6*	-480.5
2005	0.92*	1.4*	3.9*	0.030 8*	-215.4	0.91*	1.7	6.2*	0.051 7*	-418.4
2006	0.95*	1.5*	4.7*	0.030 2*	-248.2	0.89*	2.3	5.7*	0.046 7*	-439.9
2007	0.96*	2.8*	2.8*	0.034 7*	-330.0	0.91*	2.1*	5.5*	0.054 8*	-440.4
2008	0.93*	2.2*	6.7*	0.054 7*	-475.7	0.98*	3.0*	4.9*	0.058 8*	-523.0
2009	0.83*	1.9	5.5*	0.044 6*	-367.8	0.94*	2.9*	3.7*	0.057 5*	-470.9
2010	0.73*	2.7	4.0	0.040 2*	-378.8	0.89*	1.6	4.8*	0.040 2*	-313.3
2011	0.77*	2.0	4.8*	0.037 5*	-328.6	0.83*	1.2	6.5*	0.049 6*	-360.7

年份 Year	车前黄枯普遍期 LCD of <i>P. asiatica</i>					蒲公英黄枯普遍期 LCD of <i>T. mongolicum</i>				
	$R^2$	$a$ (d·° <sup>-1</sup> )	$b$ (d·° <sup>-1</sup> )	$c$ (d·m <sup>-1</sup> )	$d$	$R^2$	$a$ (d·° <sup>-1</sup> )	$b$ (d·° <sup>-1</sup> )	$c$ (d·m <sup>-1</sup> )	$d$
2002	0.82*	-2.7*	-4.0*	-0.035 8*	803.2	0.80*	-2.3	-4.7*	-0.048 1*	825.3
2003	0.55	-1.7	-2.9	-0.028 4	646.4	0.74*	-3.2	-2.9	-0.041 7*	847.7
2004	0.79*	-1.3	-3.1*	-0.020 5*	593.3	0.71*	-2.7	-3.2	-0.035 3*	781.8
2005	0.87*	-1.2	-4.4*	-0.031 6*	666.8	0.86*	-1.9*	-4.4*	-0.042 9*	769.7
2006	0.84*	-1.0	-3.8*	-0.026 6*	596.2	0.91*	-2.0*	-3.9*	-0.043 6*	762.4
2007	0.90*	-1.9*	-4.1*	-0.034 8*	729.8	0.89*	-2.4*	-4.4*	-0.048 7*	836.1
2008	0.79*	-2.5*	-1.8	-0.029 5*	693.2	0.78*	-3.0*	-1.7	-0.039 6*	775.7
2009	0.96*	-2.7*	-3.1*	-0.031 2*	763.4	0.90*	-2.6*	-4.2*	-0.044 4*	831.6
2010	0.91*	-3.6*	-2.6	-0.040 3*	874.7	0.93*	-3.8*	-3.0*	-0.048 3*	935.5
2011	0.91*	-2.5*	-4.0*	-0.038 6*	801.5	0.95*	-3.4*	-5.2*	-0.047 4*	961.1

\*表示 $p < 0.05$ 。a、b、c和d分别表示经度、纬度、海拔的回归系数和截距。  
\* indicates  $p < 0.05$ . a, b, c and d indicate the regression coefficients of longitude, latitude, altitude and intercept, respectively. FFD, first flowering date; FLD, first leaf date; LCD, the common leaf coloring date.

以将时间(年际变化)尺度上缺乏的物候观测数据映射到空间尺度下对应的海拔梯度环境中进行弥补,这是空间换时间模型相较于统计模型和过程模型的优势之一。此外,利用空间梯度下一系列所选观测区域在时间轨迹下的变化进行模拟,可以使数据结果包含植物对气温变化的适应性。然而本实验结果中,车前和蒲公英各物候事件随温度变化呈线性变化趋势,并未体现出对温度变化的敏感性。其可能

原因是车前和蒲公英广泛分布于不同气候和地形条件,而本文数据观测区域的海拔范围为2 840–4 180 m,能够表征的年平均气温变化范围仅在-2.1–7.9℃,这一年平均气温范围可能还不足以体现出车前和蒲公英物候事件变化对于气温波动的敏感性。另外,不少研究发现,升温背景下草本植物可以通过改变相邻物候事件的提前或延迟幅度的差异来调节物候期长度(Jiang *et al.*, 2016),以最大程度保障自



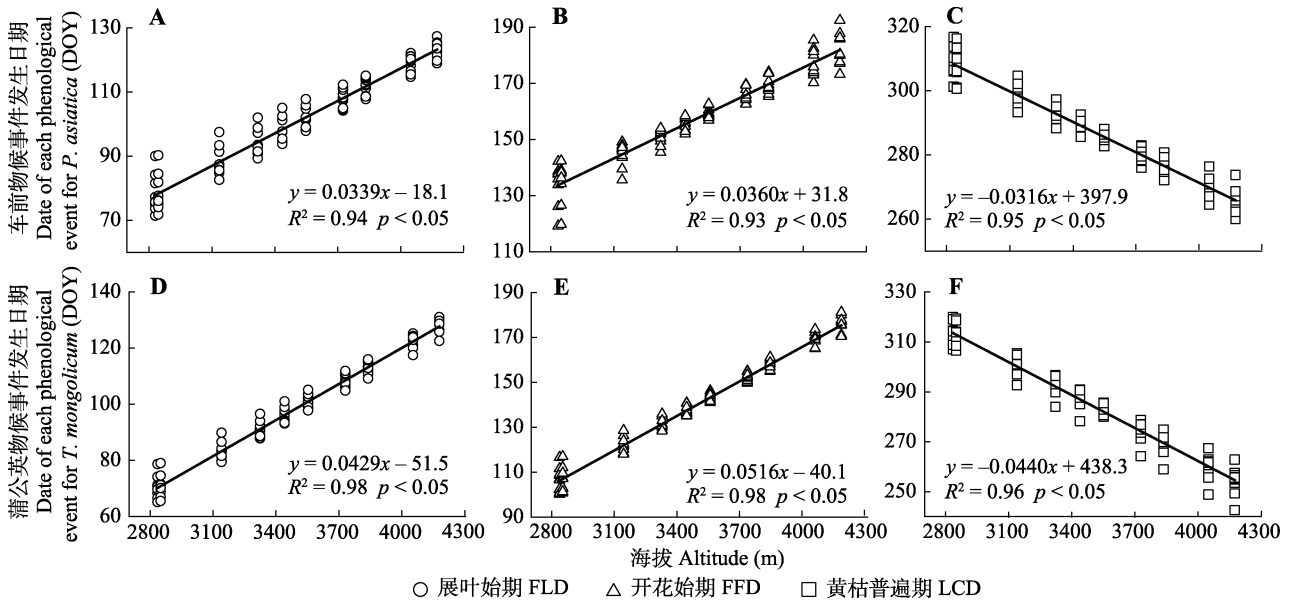


图3 青藏高原车前(A–C)和蒲公英(D–F)展叶始期、开花始期和黄枯普遍期拟合值与海拔的回归结果。  
Fig. 3 Regression results between fitted values of the first leaf date (FLD), first flowering date (FFD) and the common leaf coloring date (LCD) of *Plantago asiatica* (A–C) and *Taraxacum mongolicum* (D–F) and altitudes across the Qinghai-Xizang Plateau.

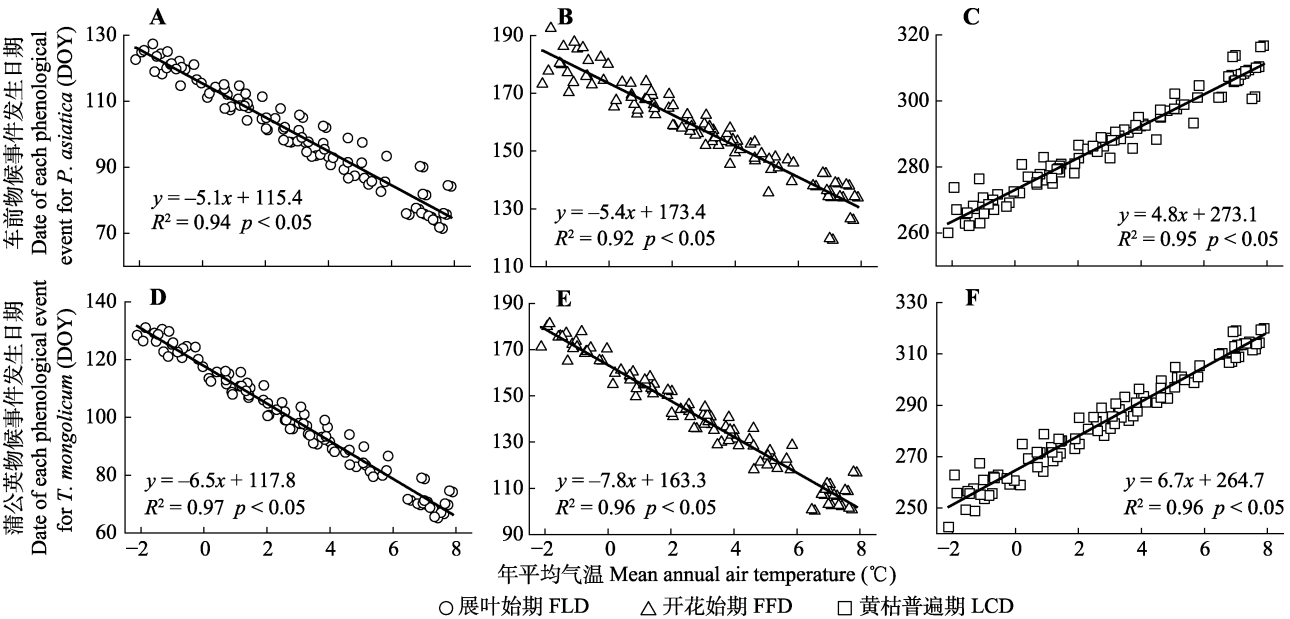


图4 青藏高原车前(A–C)和蒲公英(D–F)展叶始期、开花始期和黄枯普遍期拟合值与年平均气温拟合值的回归结果。  
Fig. 4 Regression results between fitted values of the first leaf date (FLD), first flowering date (FFD) and the common leaf coloring date (LCD) of *Plantago asiatica* (A–C) and *Taraxacum mongolicum* (D–F) and fitted values of mean annual air temperature across the Qinghai-Xizang Plateau.

表4 青藏高原车前和蒲公英所有站点及年份各物候事件拟合值与观测值的均方根误差

Table 4 Root Mean Square Error (RMSE) values of each phenological event in all sites and years of *Plantago asiatica* and *Taraxacum mongolicum* across the Qinghai-Xizang Plateau

物候事件 Phenological event	车前均方根误差 RMSE value of <i>P. asiatica</i> (d)	蒲公英均方根误差 RMSE value of <i>T. mongolicum</i> (d)
展叶始期 FLD	5.7	6.8
开花始期 FFD	6.7	7.0
黄枯普遍期 LCD	5.4	7.0

FFD, first flowering date; FLD, first leaf date; LCD, the common leaf coloring date.

身存活率和结实率, 因此猜测其环境适应性可能更多地以物候期长度变化的形式体现(Wang *et al.*, 2014b; Cui *et al.*, 2017)。

### 3.1.3 空间换时间预测的适用范围

用空间梯度变化带来的气温差异表征时间尺度上的气温变化时, 某一地理因子(如海拔)需为植物物候事件变化的主导因素, 所以空间换时间模型并非适用于所有物候事件。果熟末期与地理因子尤其

是海拔高度不存在显著相关性(附件IV), 其与物种生理结构特征以及自身对环境的调节方式有关(Sherry *et al.*, 2007; 赵俊斌等, 2009)。青藏高原海拔变化对草本植物生殖生长期的影响普遍具有物种特异性(Wang *et al.*, 2014b), 但生殖生长期两侧物候事件(即开花始期与果熟末期)的时间变化不会显著影响整个生殖阶段的持续时间, 即开花始期与果熟末期随温度的变化趋于同步。通过对本研究的开花始期与果熟末期数据进行线性相关分析, 发现除2010年车前果熟末期外, 两种草本植物果熟末期与开花始期的变化均呈显著正相关关系(附件V)。由此说明这两种草本植物的果熟末期主要是由其生理特征决定, 而与海拔等地理因子的关系微弱, 因此不适合用空间换时间模型来对其变化进行预测。

### 3.2 变暖背景下蒲公英和车前的物候变化

本研究发现, 年平均气温每增加1 °C, 车前展叶始期和开花始期分别提前5.1和5.4 d, 黄枯普遍期延迟4.8 d; 蒲公英展叶始期和开花始期分别提前6.5和7.8 d, 黄枯普遍期延迟6.7 d。Zhu等(2018)发现平均前期温度升高1 °C, 车前的展叶始期和开花始期分别提前4.8和3.2 d, 黄枯普遍期延迟4.8 d; 蒲公英的展叶始期和开花始期要早出现2.3和1.9 d, 黄枯普遍期则推迟9.1 d; 祁如英和赵隆香(2013)对分布于青海地区2 480–4 180 m范围内10个站点的车前萌动期和黄枯普遍期进行了研究, 发现绝大部地区车前萌动期随1–3月平均气温升高1 °C提前1.0–11.0 d, 黄枯普遍期随1–9月平均气温升高1 °C推迟2.0–10.0 d; 而陈海莲和柳静(2019)发现, 海拔位于3 500 m处的河南县车前黄枯普遍期随8–9月平均气温升高1 °C推迟13.0 d。青藏高原地区地形地貌复杂, 不同站点的局部气候环境差异较大, 这造成了除温度外其他影响因素的波动, 导致相同升温背景下同种植物物候事件发生日期的变化不同; 此外, 当前青藏高原地区基于车前和蒲公英不同物候事件研究中的地面观测数据来源、观测年份以及用来计算相同物候事件平均气温变化背景的时段也存在差异。

**致谢** 感谢国家气象局提供物候观测数据。

### 参考文献

Ahas R, Aasa A, Menzel A, Fedotova VG, Scheifinger H (2002). Changes in European spring phenology. *International Journal of Climatology*, 22, 1727–1738.

- Beniston M (2003). Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, 59, 5–31.
- Blois JL, Williams JW, Fitzpatrick MC, Jackson ST, Ferrier S (2013). Space can substitute for time in predicting climate-change effects on biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 9374–9379.
- Bolmgren K, Vanhoenacker D, Miller-Rushing AJ (2013). One man, 73 years, and 25 species. Evaluating phenological responses using a lifelong study of first flowering dates. *International Journal of Biometeorology*, 57, 367–375.
- Cao YF, Wu RF, Yan WX (2008). Variation characteristics of *Plantago* phenology and its response to climate change. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, (6), 8–9, 31. [曹艳芳, 吴瑞芬, 闫伟雄 (2008). 车前草物候变化特征及对气候变化的响应. 内蒙古气象, (6), 8–9, 31.]
- Chen HL, Liu J (2019). Response of phenological period of *Plantago* to climate change in grassland henanin county in Qinghai Province. *Qinghai Prataculture*, 28(3), 39–43. [陈海莲, 柳静 (2019). 青海省河南县草地车前物候期对气候变化的响应. 青海草业, 28(3), 39–43.]
- Chen XQ, Zhang FC (2001). Spring phonological change in Beijing in the last 50 years and its response to the climatic changes. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 22(1), 2–6. [陈效述, 张福春 (2001). 近50年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应. 中国农业气象, 22(1), 2–6.]
- Chmielewski FM, Rötzer T (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101–112.
- Cui S, Meng F, Suonan J, Wang Q, Li B, Liu P, Renzeng W, Lv W, Jiang L, Zhang L, Li X, Li Y, Zhang Z, Luo C, Tsechoe D, Wang S (2017). Responses of phenology and seed production of annual *Koenigia islandica* to warming in a desertified alpine meadow. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 376–384.
- Dai JH, Wang HJ, Ge QS (2013). Multiple phenological responses to climate change among 42 plant species in Xi'an, China. *International Journal of Biometeorology*, 57, 749–758.
- Dai JH, Wang HJ, Ge QS (2014). The spatial pattern of leaf phenology and its response to climate change in China. *International Journal of Biometeorology*, 58, 521–528.
- Ding MJ, Zhang YL, Liu LS, Wang ZF (2011). Spatiotemporal changes of commencement of vegetation regreening and its response to climate change on Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 7, 317–323. [丁明军, 张镔铨, 刘林山, 王兆锋 (2011). 青藏高原植物返青期变化及其对气候变化的响应. 气候变化研究进展, 7, 317–323.]
- Fan GZ, Jia ZJ (2010). Study advances on plant phenology. *Arid Meteorology*, 28, 250–255. [范广洲, 贾志军 (2010). 植物物候研究进展. 干旱气象, 28, 250–255.]
- Fang XQ, Yu WH (2002). Progress in the studies on the phenological responding to global warming. *Advance in Earth Sciences*, 17, 714–719. [方修琦, 余卫红 (2002).

DOI: 10.17521/cjpe.2019.0308



- 物候对全球变暖响应的研究综述. 地球科学进展, 17, 714–719.]
- Fitzpatrick MC, Sanders NJ, Ferrier S, Longino JT, Weiser MD, Dunn R (2011). Forecasting the future of biodiversity: a test of single- and multi-species models for ants in North America. *Ecography*, 34, 836–847.
- Guo SL (2002). Advances in ecology and evolutionary biology of the genus *Plantago*. *Chinese Bulletin of Botany*, 19, 567–574. [郭水良 (2002). 车前属(*Plantago* L.)植物生态与进化生物学研究进展. 植物学通报, 19, 567–574.]
- Huang WJ, Ge QS, Dai JH, Wang HJ (2017). Sensitivity of first flowering dates to temperature change for typical woody plants in Guiyang City, China. *Progress in Geography*, 36, 1015–1024. [黄文婕, 葛全胜, 戴君虎, 王焕炯 (2017). 贵阳木本植物始花期对温度变化的敏感度. 地理科学进展, 36, 1015–1024.]
- IPCC (2013). Summary for policymakers//Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 3–29.
- Jiang LL, Wang SP, Meng FD, Duan JC, Niu HS, Xu GP, Zhu XX, Zhang ZH, Luo CY, Cui SJ, Li YM, Li XE, Wang Q, Zhou Y, Bao XY, Li YN, Dorji T, Piao SL, Ciais P, Peñuelas J, Du MY, Zhao XQ, Zhao L, Zhang FW, Wang GJ (2016). Relatively stable response of fruiting stage to warming and cooling relative to other phenological events. *Ecology*, 97, 1961–1969.
- Johnson EA, Miyanishi K (2008). Testing the assumptions of chronosequences in succession. *Ecology Letters*, 11, 419–431.
- Karl TR, Arguez A, Huang B, Lawrimore JH, McMahon JR, Menne MJ, Peterson TC, Vose RS, Zhang HM (2015). Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science*, 348, 1469–1472.
- Koenig U, Abegg B (1997). Impacts of climate change on winter tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism*, 5, 46–58.
- Kong DD, Zhang Q, Huang WL, Gu XH (2017). Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors. *Acta Geographica Sinica*, 72, 39–52. [孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉 (2017). 1982–2013年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. 地理学报, 72, 39–52.]
- Körner C (2007). The use of “altitude” in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22, 569–574.
- Li L, Wang ZY, Qin NS, Wang QC (2002). Climate change and its impact on desertization around Qinghai Lake. *Plateau Meteorology*, 21, 59–65. [李林, 王振宇, 秦宁生, 汪青春 (2002). 环青海湖地区气候变化及其对荒漠化的影响. 高原气象, 21, 59–65.]
- Malhi Y, Silman M, Salinas N, Bush M, Meir P, Saatchi S (2010). Introduction: elevation gradients in the tropics: laboratories for ecosystem ecology and global change research. *Global Change Biology*, 16, 3171–3175.
- Menzel A, Fabian P (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*, 397, 659.
- Pei SX, Guo QS, Xin XB, Hong M, Kang Y (2009). Research on plant phenological responses to climate change abroad. *World Forestry Research*, 22(6), 31–37. [裴顺祥, 郭泉水, 辛学兵, 洪明, 康义 (2009). 国外植物物候对气候变化响应的研究进展. 世界林业研究, 22(6), 31–37.]
- Peñuelas J, Sardans J, Estiarte M, Ogaya R, Carnicer J, Coll M, Barbeta A, Rivas-Ubach A, Llusà J, Garbalsky M, Filella I, Jump AS (2013). Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere. *Global Change Biology*, 19, 2303–2338.
- Piao SL, Fang JY, Zhou LM, Ciais P, Zhu B (2006). Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 12, 672–685.
- Qi RY, Zhao LX (2013). Response of plantain phenology to climate change in Qinghai. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 41, 3025–3026, 3028. [祁如英, 赵隆香 (2013). 青海车前草物候对气候变化的响应研究. 安徽农业科学, 41, 3025–3026, 3028.]
- Schaber J, Badeck FW (2002). Evaluation of methods for the combination of phenological time series and outlier detection. *Tree Physiology*, 22, 973–982.
- Sherry RA, Zhou X, Gu S, Arnone JA, Schimel DS, Verburg PS, Wallace LL, Luo YQ (2007). Divergence of reproductive phenology under climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 198–202.
- Steltzer H, Post E (2009). Seasons and life cycles. *Science*, 324, 886–887.
- Thomas CD, Cameron A, Green RE, Bakkenes M, Beaumont LJ, Collingham YC, Erasmus BFN, de Siqueira MF, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, van Jaarsveld AS, Midgley GF, Miles L, Ortega-Huerta MA, Townsend Peterson A, Phillips OL, Williams SE (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145–148.
- Tierney JE, Russell JM, Eggermont H, Hopmans EC, Verschuren D, Sinninghe Damsté JS (2010). Environmental controls on branched tetraether lipid distributions in tropical East African lake sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 4902–4918.
- Wang HJ, Dai JH, Zheng JY, Ge QS (2014a). Temperature sensitivity of plant phenology in temperate and subtropical regions of China from 1850 to 2009. *International Journal of Climatology*, 35, 913–922.
- Wang SP, Wang CS, Duan JC, Zhu XX, Xu GP, Luo CY, Zhang ZH, Meng FD, Li YN, Du MY (2014b). Timing and duration of phenological sequences of alpine plants along an elevation gradient on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 220–228.
- Wolkovich EM, Cook BI, Allen JM, Crimmins TM, Betancourt JL, Travers SE, Pau S, Regetz J, Davies TJ, Kraft NJB, Ault TR, Bolmgren K, Mazer SJ, McCabe GJ, McGill BJ, Parmesan C, Salamin N, Schwartz MD, Cleland EE (2012). Warming experiments underpredict plant phenological

- responses to climate change. *Nature*, 485, 494–497.
- Wu RJ, Zheng YF, Zhao GQ, Wang M (2009). Spring phenophase changes of dominant plants in Zhengzhou and their responses to air temperature change. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1049–1054. [吴荣军, 郑有飞, 赵国强, 王敏 (2009). 郑州主要植物春季物候变化及其对气温变化的响应. 生态学杂志, 28, 1049–1054.]
- Xu GX, Luo SX, Guo QS, Pei SX, Shi ZM, Zhu L, Zhu NN (2014). Responses of leaf unfolding and flowering to climate change in 12 tropical evergreen broadleaf tree species in Jianfengling, Hainan Island. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 585–598. [许格希, 罗水兴, 郭泉水, 裴顺祥, 史作民, 朱莉, 朱妮妮 (2014). 海南岛尖峰岭12种热带常绿阔叶乔木展叶期与开花期对气候变化的响应. 植物生态学报, 38, 585–598.]
- Xu YJ, Zhong SY, Dai JH, Tao ZX, Wang HJ (2017). Changes in flowering phenology of plants and their model simulation in Mudanjiang, China. *Geographical Research*, 36, 779–789. [徐韵佳, 仲舒颖, 戴君虎, 陶泽兴, 王焕炯 (2017). 1978–2014年牡丹江地区植物花期变化及模型模拟. 地理研究, 36, 779–789.]
- Xu YQ, Lu PL, Yu Q (2005). Response of tree phenology to climate change for recent 50 years in Beijing. *Geographical Research*, 24, 412–420. [徐雨晴, 陆佩玲, 于强 (2005). 近50年北京树木物候对气候变化的响应. 地理研究, 24, 412–420.]
- Zhang FC (1995). Effects of global warming on plant phenological events in China. *Acta Geographica Sinica*, 50, 402–410. [张福春 (1995). 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. 地理学报, 50, 402–410.]
- Zhang XX, Ge QS, Zheng JY, Zhang FC (2005). Responses of spring phenology to climate changes in Beijing in last 150 years. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 26, 263–267. [张学霞, 葛全胜, 郑景云, 张福春 (2005). 近150年北京春季物候对气候变化的响应. 中国农业气象, 26, 263–267.]
- Zhao JB, Zhang YP, Song FQ, Xu ZF, Xiao YL (2009). A comparison of the phenological characteristics of introduced plant species in the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden. *Bulletin of Botany*, 44, 464–472. [赵俊斌, 张一平, 宋富强, 许再富, 肖云来 (2009). 西双版纳热带植物园引种植物物候特征比较. 植物学报, 44, 464–472.]
- Zheng ZT (2018). *Responses of Net Primary Productivity to Green-Up Dynamics in the Alpine Grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau*. PhD dissertation, Beijing Normal University, Beijing. 7–29. [郑周涛 (2018). 青藏高原草地返青期对净初级生产力的调控作用研究. 博士学位论文, 北京师范大学, 北京. 7–29.]
- Zheng ZT, Zhu WQ, Chen GS, Jiang N, Fan DQ, Zhang DH (2016). Continuous but diverse advancement of spring-summer phenology in response to climate warming across the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 194–202.
- Zhu WQ, Zheng ZT, Jiang N, Zhang DH (2018). A comparative analysis of the spatio-temporal variation in the phenologies of two herbaceous species and associated climatic driving factors on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 177–184.

责任编辑: 张扬建 编辑: 赵航

#### 附件I 青藏高原车前逐站点物候事件多年平均值和标准偏差

#### Appendix I Multi-year mean values and standard deviations of each phenological event for *Plantago asiatica* at each site across the Qinghai-Xizang Plateau

<http://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2019.0308-A1.pdf>

#### 附件II 青藏高原蒲公英逐站点物候事件多年平均值和标准偏差

#### Appendix II Multi-year mean values and standard deviations of each phenological event for *Taraxacum mongolicum* at each site across the Qinghai-Xizang Plateau

<http://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2019.0308-A2.pdf>

#### 附件III 青藏高原车前与蒲公英各物候事件箱式图

#### Appendix III Box plots of each phenological event for *Plantago asiatica* and *Taraxacum mongolicum* across the Qinghai-Xizang Plateau

<http://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2019.0308-A3.pdf>

#### 附件IV 青藏高原车前和蒲公英果熟末期和地理因子回归分析建模结果

#### Appendix IV Regression modeling results between the end of fruit ripening dates (FRD) and geographic factors for *Plantago asiatica* and *Taraxacum mongolicum* across the Qinghai-Xizang Plateau

<http://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2019.0308-A4.pdf>

#### 附件V 青藏高原车前和蒲公英果熟末期与开花始期回归分析建模结果

#### Appendix V Regression modeling results between the end of fruit ripening dates and the first flowering dates for *Plantago asiatica* and *Taraxacum mongolicum* across the Qinghai-Xizang Plateau

<http://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2019.0308-A5.pdf>

DOI: 10.17521/cjpe.2019.0308