

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.02.001

吕爱丽,霍治国,杨建莹.晋南地区不同海拔高度典型木本植物物候特征及其对气候变化的响应[J].中国农业气象,2020,41(2):65-75

# 晋南地区不同海拔高度典型木本植物物候特征及其对气候变化的响应\*

吕爱丽<sup>1,2</sup>, 霍治国<sup>2,3\*\*</sup>, 杨建莹<sup>2</sup>

(1.山西省临汾市气象局, 临汾 041000; 2.中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

**摘要:** 基于 1983–2016 年临汾市不同海拔高度上 3 个农业气象观测站 (尧都区、隰县、安泽县) 的 6 种典型木本植物物候期和温度的观测资料, 统计分析其变化特征及相互影响。结果表明: (1) 研究区年及四季气温整体呈上升趋势, 尧都区增温幅度最大, 春季增温极显著; 月平均气温除隰县个别月份略有下降外, 大多以增温趋势为主, 其中 3 月增温极显著 ( $P < 0.01$ ), 是年平均气温升高的主要因素。(2) 研究区内木本植物物候期最早和最晚平均相差 1~2 个月, 物候期变化呈现较强的区域性特征, 尧都区和安泽的木本植物春季物候期提前, 秋季物候期推迟, 植物生长季延长; 隰县木本植物春季物候期推迟, 秋季物候期提前, 植物生长季呈缩短趋势。(3) 木本植物展叶始期对年、春季及展叶前 1~2 个月的平均气温响应显著, 随着气温升高, 木本植物展叶始期表现为一致提前趋势; 木本植物落叶末期在尧都区和安泽县随着气温的升高表现为明显的推迟趋势, 受年、秋季及落叶前 1 个月的平均气温影响显著, 在隰县随气温的升高表现为普遍提前趋势, 受年均气温变化影响显著; 随着气温升高尧都区和安泽县的木本植物生长季延长, 隰县木本植物生长季变化不明显。说明晋南地区不同海拔高度的气温及其变化趋势存在较大差异; 各代表站典型木本植物的物候期和生长季对气候变化的响应不同。

**关键词:** 物候变化; 木本植物; 物候; 温度变化; 合欢; 悬铃木; 毛白杨; 核桃; 刺槐; 旱柳

## Phenological Characteristics of Representative Woody Plants at Different Altitude Sites in Jinnan Region and Their Response to Climate Change

LV Ai-li<sup>1,2</sup>, HUO Zhi-guo<sup>2,3</sup>, YANG Jian-ying<sup>2</sup>

(1. Shanxi Linfen Weather Bureau, Linfen 041000, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather(LASW), Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 3. Collaborative Innovation Center of Meteorological Disaster Forecast, Early-Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science &amp; Technology, Nanjing 210044)

**Abstract:** Based on the phenological observations of six woody plant species in three stations in the period of 1983–2016, characteristics of phenology and temperature and their relationship were studied in different period. The results showed that: (1) both annual and seasonal temperature increased significantly during the study period. The warming trend was more obvious in the lower altitude areas such as Yudu, especially in Spring. Monthly temperature also increased in most areas except Xixian. Monthly temperature had increased more obvious in March, resulting increased yearly temperature. (2) Variations of phenological phase up to 1–2 months were observed in different areas

\* 收稿日期: 2019-07-24      \*\* 通讯作者霍治国, E-mail: huozg@cma.gov.cn

基金项目: 重大自然灾害监测预警与防范重点专项 (2017YFC1502801); 中国气象科学研究院科技发展基金项目 (2018KJ012)

第一作者联系方式: 吕爱丽, E-mail: lvaili1@163.com

and for different plants. The phenological stage happened earlier (later) in spring and ended later (earlier) in fall, leading to longer (shorter) growth stage, in Yudu and Anze (Xixian) with lower (higher) altitude. (3) The start of leaf-out had been occurring earlier in spring corresponding to higher yearly and spring average temperature, and the higher temperature a month before for all woody plant. End of leaf fall had been postponed in response to the higher yearly and fall temperature, and the temperature a month ago in Yudu and Anze but not in Xixian, where the plants were located in the highest land in three stations. The study showed the obverse variation of temperature change in three different stations. The responses of woody plants to climate change were different.

**Key words:** Phenophase change; Woody plants; Phenophase; Temperature change; *Albizia julibrissin* Durazz; *Platanus orientalis*; *Populus tomentosa*; *Prunus armeniaca*; *Robinia hispida* Linn; *Salix matsudana*

物候是指植物长期适应环境条件影响而出现的以年为周期的自然现象<sup>[1-2]</sup>, 自然物候是记录全球环境变化最直接和最有效的依据<sup>[3]</sup>, 物候变化不仅反映了当时当地的气候和环境状态, 而且还反映了过去一段时间内气候条件的积累对生物和非生物的综合影响<sup>[4]</sup>, 自然物候作为指示气候变化的重要指标<sup>[2]</sup>, 还可用来指示季节变化及生态系统对环境变化的响应和适应<sup>[5]</sup>, 因而也被视为大自然的“语言”<sup>[1]</sup>和全球气候变化的“诊断指纹”<sup>[6]</sup>, 因此, 全球气候变暖背景下, 物候对气候变化的响应研究已成为物候学关注的焦点<sup>[7-11]</sup>。

IPCC 第五次评估报告指出<sup>[12]</sup>, 近百年来全球地表温度明显上升, 中国的陆地升温幅度高于全球平均水平, 《中国气候变化蓝皮书》称, 中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区, 1951–2017 年, 中国地表年平均气温呈显著上升趋势, 升温率为  $0.24^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ , 而近 20a 是 20 世纪初以来的最暖时期, 升温趋势十分明显。大量研究表明, 随着气候变暖, 植物的物候期发生了明显变化, 持续升温使中国大部分地区木本植物的春季物候期提前, 秋季物候期推迟, 生长季呈延长趋势<sup>[13-23]</sup>; 国际物候园观测资料表明, 北美、欧洲、地中海等地的木本植物物候期也出现了类同的自然现象<sup>[24-27]</sup>。随着气候变暖, 全球及中国的木本植物物候表现为协同变化的特征, 同时存在区域差异, 在春季物候期普遍提前的情况下, 中国西南地区东部、长江中下游地区<sup>[3]</sup>及科尔沁沙地<sup>[11]</sup>也有春季物候期推迟的现象, 同时, 李强等<sup>[28]</sup>研究认为黄土高原植被物候生长季始期有 71.71% 的区域呈提前趋势, 26.29% 的区域有推迟趋势, 生长季末期有 38.73% 的区域具有提前趋势, 61.27% 的区域有推迟趋势, 由此可见, 不同地区木本植物物候随气候变化存

在较大差异。

临汾地处山西南部, 大体轮廓呈“凹”字形分布, 中部为临汾盆地, 西部是吕梁山脉, 东部由北向南为太岳山、中条山, 海拔高度从最低处的 385.1m 到最高处 2346.8m, 境内有山地、丘陵、盆地三大地形单元, 地形结构复杂, 气候垂直变化较大, 存在明显的区域小气候特征, 对植物物候期产生较大影响, 到目前为止, 针对气候变化对该地区木本植物物候的影响虽有研究, 但精细化程度不高, 仅有文献对尧都区的合欢进行了分析<sup>[20]</sup>, 不能代表区域内不同地形特征, 因此, 地方性的物候研究有待广泛开展。本研究分析了近 34a 临汾市不同海拔高度代表性木本植物物候和气候变化特征及物候对气候变化的响应, 以揭示全球气候变暖背景下, 区域气候变化对木本植物物候的影响, 为当地的经济发展和生态环境建设提供理论依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

依据观测时间长、连续性好、代表性强的原则, 选取临汾市境内不同海拔高度的 3 个 (尧都区、安泽县和隰县) 农业气象观测站 1983–2016 年木本植物物候观测数据 (其中悬铃木为 1988–2016 年), 木本植物为当地较常见、分布广泛且发育正常的 6 种植物 (表 1), 每个地区 2 种, 可代表不同海拔、不同地形植物物候期特征, 其中隰县观测树种旱柳于 2011 年从气象局西坡观测场西 60m 处更换至气象局东坡观测场东北 60m 处, 坡向改变, 海拔高度和树龄无变化, 观测树种刺槐位置未变, 1997 年后更换观测对象, 树龄偏少 20a 左右。气象资料来源于临汾市气象局数据库, 选取资料为当地同期地面逐日平均气温、最高气温和最低气温, 气象观测站点位置均未改变, 气象报表数据均通过审核。

表 1 观测站点及植物种类

Table 1 Observation stations and representative plant species

区域 Zone	站点 Station	物种 Species	物候资料 Phenological data period	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	海拔高度 (m) Altitude (m)
临汾盆地 Linfen basin	尧都区 Yaoduqu	合欢 <i>Albizia julibrissin</i> Durazz	1983–2016	111°29' 38"	36°03' 41"	449.5
		悬铃木 <i>Suspended Suzuk</i>	1988–2016			
太岳山 Taiyue mountain	安泽 Anze	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	1983–2016	112°14' 45"	36°09' 46"	860.1
		核桃 <i>Prunus armeniac</i>	1983–2016			
吕梁山 Lvliang mountain	隰县 Xixian	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	1983–2016	110°56' 49"	36°42' 09"	1052.7
		刺槐 <i>Robinia hispida</i> Linn	1983–2016			

## 1.2 数据处理与研究方法

物候观测数据均采用 Julian 日换算法, 将逐年各物候期出现日转换成距 1 月 1 日的实际天数, 得到各物候的时间序列。

物候及温度变化趋势均采用一元线性回归法计算其变化率, 即

$$y=kx+b \quad (1)$$

式中,  $y$  为物候期或温度值,  $x$  为年,  $k$  为倾向率。将  $k$  值扩大了 10 倍, 即每 10a 的变化值。

采用 SPSS 分析植物物候期与温度变化的相关关系。

四季划分采用气象划分法, 以 3–5 月为春季, 6–8 月为夏季, 9–11 月为秋季, 12 月–翌年 2 月为冬季。

## 2 结果与分析

### 2.1 各站点不同时间尺度的平均气温变化趋势分析

#### 2.1.1 年平均气温

对 1983–2016 年尧都区、安泽县和隰县气温观测数据分析可知 (表 2), 海拔相对较低的尧都区气温明显高于隰县和安泽县, 年均气温偏高 3℃ 以上, 安泽县和隰县年平均气温相近, 但隰县的低温高于安泽县, 高温则低于安泽县。

1983–2016 年尧都区、安泽县、隰县年平均气温、

年平均最高气温和年平均最低气温均表现为上升趋势 (图 1), 与全球气温变化趋势一致<sup>[7]</sup>, 其中海拔相对较低的尧都区增温幅度最大, 年平均增温率为  $0.728^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$  ( $P<0.01$ ), 低温 ( $0.990^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,  $P<0.01$ ) 增长率大于高温 ( $0.554^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,  $P<0.01$ ); 安泽县增温幅度小于尧都区, 高温极显著增加 ( $0.447^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,  $P<0.01$ ), 平均气温和最低气温变化趋势不明显; 隰县年增温幅度最小, 高温显著增加 ( $0.333^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,  $P<0.05$ ), 平均气温和最低气温变化趋势不明显。可见, 受地形影响, 随海拔升高, 增温幅度逐渐降低, 且低海拔地区低温增幅大于高温, 高海拔地区高温增幅大于低温。

#### 2.1.2 四季平均气温

由图 2 可见, 各站点四季平均气温存在明显差异, 其中夏季气温最高, 春季气温略高于秋季, 冬季气温最低, 并且海拔相对较低的尧都区四季气温明显高于隰县和安泽县, 其中冬季温差最大, 偏高幅度平均在 3.7~3.9℃。由 1983–2016 年各季平均气温的线性变化趋势可知, 近年来, 尧都区、隰县、安泽县四季平均气温均呈上升趋势, 其中尧都区升温幅度最大, 四季平均气温升幅均通过 0.01 水平的显著性检验, 春季升温最多, 线性变化率为  $1.014^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ; 安泽升温幅度次之, 春季平均气温升

表 2 三站 1983–2016 年年气温数据统计 (℃)

Table 2 Statistics of annual temperature in the three sites from 1983 to 2016 (℃)

站点 Station	平均 Average	平均最高 Average maximum	平均最低 Average minimum	极端最高 Extreme maximum	极端最低 Extreme minimum
尧都区 Yaoduqu	13.3	19.7	8.1	42.3	-19.0
隰县 Xixian	9.7	16.7	4.2	38.5	-24.2
安泽县 Anzexian	9.5	17.4	3.3	38.7	-26.6

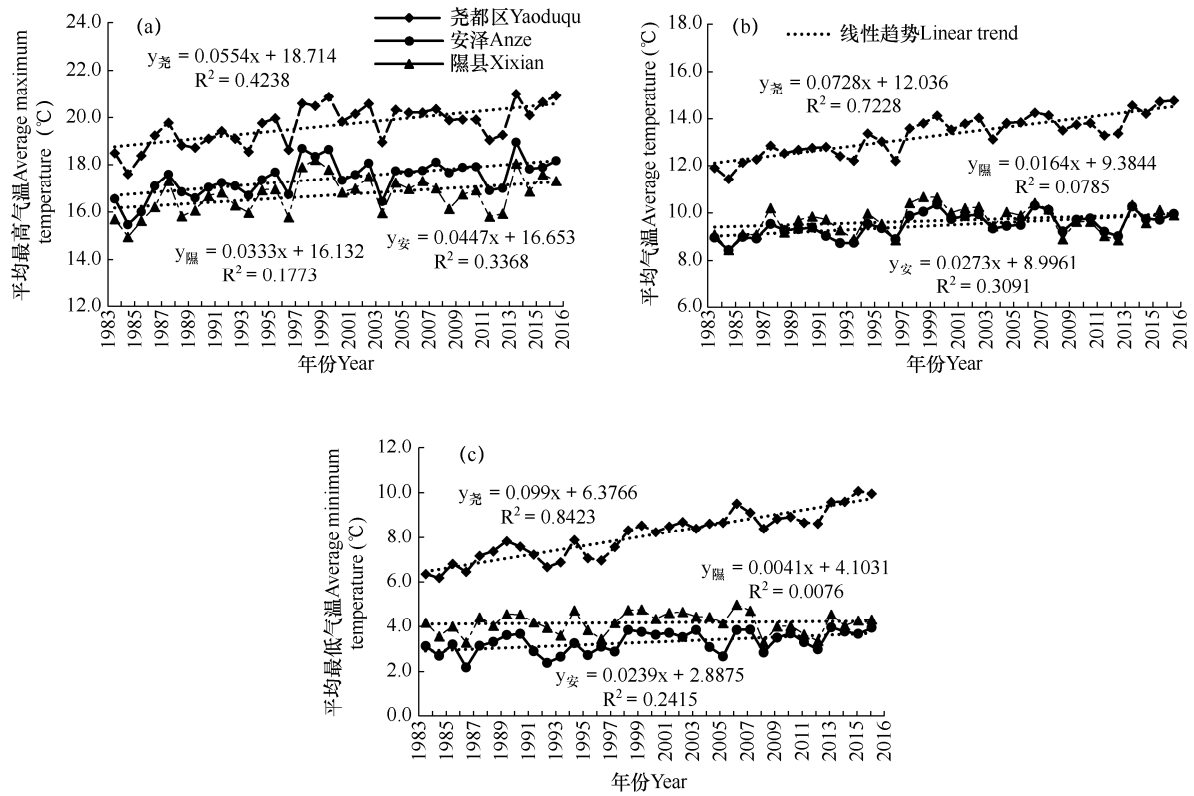


图 1 1983–2016 年三站点年平均气温变化趋势

Fig. 1 Change trends of the annual mean temperature in three sites from 1983 to 2016

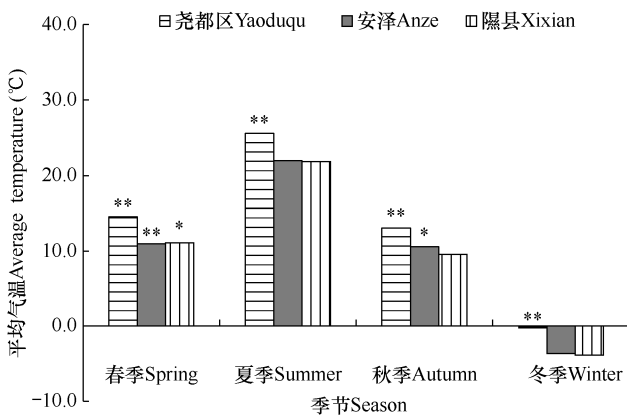


图 2 1983–2016 年三站点四季平均气温对比分析

Fig. 2 Comparison of seasonal average temperature in three sites from 1983 to 2016

注：\*、\*\*分别表示该站点季平均气温线性变化趋势通过 0.05 水平和 0.01 水平显著性检验。

Note: \*,\*\* indicates that the significance of linear trend of seasonal temperature at each site test through 0.05 level and 0.01 level, respectively.

幅通过 0.01 水平的显著性检验，线性变化率为  $0.354^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ，秋季平均气温升幅通过 0.05 水平的显

著性检验，线性变化率为  $0.305^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ；隰县升温趋势最弱，仅春季平均气温升幅通过 0.05 水平的显著性检验，线性变化率为  $0.361^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。可见，研究区春季气温升温突出，尧都区升温趋势最显著。

2.1.3 月平均气温

由表 3 可知，尧都区各月气温变化趋势一致，月平均气温、月平均最高和最低气温均呈上升趋势，其中平均气温、平均最低气温变化尤其明显，除 1 月外，其它月份变化倾向率均达极显著水平 ( $P < 0.01$ )，平均最高气温变化倾向率 3–6 月达极显著水平 ( $P < 0.01$ )，升温最明显的是 3 月，升幅为  $1.461^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ；安泽县除 1 月、5 月平均最低气温略有下降外，其余月份气温均上升，但升温趋势明显低于尧都区，仅 3 月平均气温、平均最高气温和 6 月平均最高气温变化倾向率达极显著水平 ( $P < 0.01$ )，升温最高的 3 月，平均气温升幅为  $0.839^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ；隰县气温变幅较大，5、8、9 及 12 月的平均气温，9 月平均最高气温，1、4、5、6 月及 12 月平均最低气温呈下降趋势，5 月平均最低气温下降率达显著水平 ( $P < 0.05$ )，其余月份气温呈上升趋势，3 月升温明显，

表 3 1983–2016 年三站点月气温数据平均值的线性倾向率 (°C·10a<sup>-1</sup>)

Table 3 Linear trend rate of monthly average value of daily temperature data in 1983–2016 (°C·10y<sup>-1</sup>)

站点 Station	项目 Item	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.
尧都区 Yaoduqu	平均 Average	0.451	0.887**	1.460**	0.790**	0.791**	0.796**	0.517**	0.402 <sup>†</sup>	0.538**	0.806**	0.712**	0.582**
	最高 Maximum	0.240	0.641	1.544**	0.762**	0.785**	0.767**	0.402	0.124	0.136	0.523 <sup>†</sup>	0.349	0.379
	最低 Minimum	0.374 <sup>†</sup>	1.206**	1.492**	1.029**	0.978**	0.972**	0.787**	0.735**	0.943**	1.127**	1.105**	0.773**
安泽 Anze	平均 Average	0.084	0.623	0.839**	0.131	0.091	0.189	0.137	0.054	0.213	0.391 <sup>†</sup>	0.312	0.211
	最高 Maximum	0.347	0.698	1.391**	0.420	0.423	0.596**	0.182	0.153	0.131	0.554 <sup>†</sup>	0.237	0.235
	最低 Minimum	-0.098	0.638	0.401	0.074	-0.158	0.012	0.381 <sup>†</sup>	0.227	0.477	0.378	0.366	0.171
隰县 Xixian	平均 Average	0.001	0.431	0.877**	0.225	-0.020	0.191	0.056	-0.051	-0.007	0.141	0.128	-0.005
	最高 Maximum	0.242	0.693	1.260**	0.394	0.207	0.443 <sup>†</sup>	0.069	0.000	-0.069	0.402	0.169	0.187
	最低 Minimum	-0.160	0.253	0.490 <sup>†</sup>	-0.039	-0.338 <sup>†</sup>	-0.073	0.081	0.045	0.177	0.045	0.143	-0.138

注：<sup>†</sup>、\*\*分别表示 P<0.05、P<0.01。下同。

Note: <sup>†</sup> is P<0.05, \*\* is P<0.01. The same as below.

平均气温、平均最高气温变化倾向率达极显著水平 (P<0.01)，平均最低气温变化倾向率达显著水平 (P<0.05)，平均气温升幅为 0.877°C·10a<sup>-1</sup>。可见，低海拔地区，各月升温趋势一致，升温明显，且低温升幅普遍大于高温；随着海拔递增，升温趋势减弱，高海拔地区个别月份出现了降温趋势，且高温升温率普遍大于低温；全年 3 月升温幅度最大，升温趋势显著。

## 2.2 各代表站木本植物物候期、生长季及变化趋势

### 2.2.1 物候期

由表 4 可以看出，研究区内木本植物春季物候期在 3–7 月，秋季物候期在 9–12 月。春季物候期最早的毛白杨，开花始期平均日出现在 3 月中旬末，

由于毛白杨花芽所需温度低于叶芽，开花始期比展叶始期平均提前 25d，展叶较早的是旱柳，展叶始期在 4 月上旬，比展叶期较晚的合欢、刺槐和核桃提前 20d 左右，合欢的花期在 6 月初–7 月上旬，开花时间最晚，持续时间最长，花期达 1 个月左右。木本植物秋季物候期始期集中在 9 月下旬末–10 月上旬，发生较早的核桃、毛白杨、刺槐和旱柳叶变色始期平均日出现在 9 月 26–27 日，平均日相差 1d 左右；落叶末期集中在 10 月下旬末–11 月上旬初，前后相差在 10d 以内，悬铃木落叶末期最晚，平均在 12 月上旬，其中 2015–2016 年整个冬季悬铃木果实宿存，树叶干枯未落。可见，木本植物物候期存在较大差异。

表 4 1983–2016 年研究区典型木本植物平均物候期 (悬铃木为 1988–2016 年)

Table 4 Mean phenology date of typical woody plants in the study area from 1983 to 2016 (Platanus orientalis is in 1988–2016)

物候期 Phenophases	尧都区 Yaoduqu		安泽 Anze		隰县 Xixian	
	合欢	悬铃木	毛白杨	核桃	刺槐	旱柳
	<i>Albizia julibrissin</i> Durazz	<i>Platanus orientalis</i>	<i>Populus tomentosa</i>	<i>Prunus armeniac</i>	<i>Robinia hispida</i> Linn	<i>Salix matsudana</i>
展叶始期 First leaf spreading	04–24	04–09	04–14	04–21	04–26	04–03
展叶末期 Full leaf spreading	04–30	04–16	04–18	04–29	05–01	04–07
开花始期 First blooming	06–02	04–14	03–19	04–25	05–11	04–12
开花盛期 Full blooming	06–11	04–21	03–24	04–30	05–14	04–16
开花末期 Terminal blooming	07–10	04–29	03–29	05–03	05–20	04–20
叶变色始期 First leaf coloring	10–08	10–13	09–27	09–26	09–27	09–26
叶变色末期 Full leaf coloring	10–25	11–09	10–06	10–07	10–16	10–06
落叶始期 Fallen start	10–05	10–16	10–11	10–11	10–04	10–09
落叶末期 Fallen conclusion	11–04	12–09	10–26	10–23	10–30	11–02

2.2.2 物候期变化趋势

由表 5 物候期变化倾向率可知, 尧都和安泽地区木本植物春季物候期提前, 秋季物候期普遍推迟, 春季的变化率普遍大于秋季, 其中悬铃木的变化趋势最显著, 落叶末期变化率最大, 推迟速率为  $17\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ; 隰县的木本植物春季物候期推迟,

秋季物候期提前, 花期到落叶始期变化趋势显著, 其中早柳的叶变色期变化率最大, 提前速率为  $13\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ; 展叶始期和落叶末期变化趋势均不明显, 可见, 同一地点的木本植物物候期变化趋势基本一致, 不同海拔高度木本植物物候期变化趋势存在明显的差异。

表 5 1983–2016 年木本植物物候期线性变化率 ( $\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ )

Table 5 The linear trend rate of the typical woody plant's phenology in 1983–2016( $\text{d}\cdot 10\text{y}^{-1}$ )

物候期 Phenophases	尧都区 Yaoduqu		安泽 Anze		隰县 Xixian	
	合欢 <i>Albizia julibrissin Durazz</i>	悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	核桃 <i>Prunus armeniac</i>	刺槐 <i>Robinia hispida Linn</i>	早柳 <i>Salix matsudana</i>
展叶始期 First leaf spreading	-3.297**	-4.468**	-1.994*	-1.302*	+0.066	+0.739
展叶末期 Full leaf spreading	-4.012**	-3.852**	-1.867*	-1.502*	+1.015	+1.079
开花始期 First blooming	-5.152**	-5.468**	-1.589	-1.346	+1.934	+2.830**
开花盛期 Full blooming	-3.847**	-4.985**	-2.975**	-1.441*	+2.448*	+3.474**
开花末期 Terminal blooming	-2.286	-5.128**	-4.170**	-1.665*	+2.680*	+4.032**
叶变色始期 First leaf coloring	-0.726	+1.030	+1.045	-2.113	-10.406**	-12.850**
叶变色末期 Full leaf coloring	-0.403	+2.739	+3.248*	-0.223	-4.018**	-12.069**
落叶始期 Fallen start	+1.661	+6.951**	+2.029	-0.711	-9.300**	-6.875**
落叶末期 Fallen conclusion	+0.191	+17.079**	+1.374	+0.617	-0.585	-1.745

注: “+”表示物候期推迟, “-”表示物候期提前。

Note: “+” is delay and “-” is advance of the phenophase.

2.2.3 植物生长季及其变化趋势

将展叶始期(春季第一个物候期)–落叶末期(秋季最后一个物候期)作为木本植物生长季。统计结果表明, 研究区内木本植物生长季平均天数表现为悬铃木(244d) > 早柳(213d) > 毛白杨(195d) > 合欢(194d) > 核桃(187d) > 刺槐(185d), 可见, 木本植物生长季长度相差较大, 最长达 2 个月左右。

由图 3 可知, 尧都和安泽地区的木本植物生长季表现为一致的延长趋势, 其中悬铃木的生长季表现极显著延长 ( $P < 0.01$ ), 线性变化率为  $22\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ , 合欢、毛白杨和核桃的生长季延长趋势显著 ( $P < 0.05$ ), 线性变化率为  $2\sim 4\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ , 隰县的木本植物生长季总体表现为缩短趋势, 变化趋势不明显, 刺槐的生长季出现了先缩短, 后延长的趋势, 拐点在 2002 年。可见, 植物生长季长度变化与海拔高度存在一定关系。

2.3 各站点木本植物物候对气温变化的响应

2.3.1 春季第一个物候期的响应

温度是影响植物物候期早晚的关键气象因子<sup>[15,28]</sup>, 对代表站木本植物展叶始期与不同时段平

均气温作相关分析。由表 6 可知, 木本植物的展叶始期与前期月平均气温表现为一致的负相关, 即随着温度升高, 春季物候期提前, 展叶始期早晚受物候期当月及前 1~2 个月平均气温影响显著, 植物物候始期与 3 月平均气温相关性最好, 其中悬铃木、合欢、核桃、毛白杨的相关系数均通过 0.01 水平的显著性检验, 相关系数在  $-0.637\sim -0.472$ , 展叶始期较早的早柳与 2 月平均气温极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 展叶期较晚的合欢和核桃与 4 月平均气温极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 刺槐的物候期对温度变化反映不敏感。就季节和年尺度而言, 木本植物展叶始期随春季及年均气温的升高呈提前趋势, 受春季气温影响极显著, 除刺槐外, 均达极显著相关水平, 相关系数在  $-0.682\sim -0.493$ ; 木本植物展叶始期与年平均气温的相关性稍弱, 合欢和悬铃木表现为极显著相关。可见, 研究区木本植物展叶始期对气温变化响应一致, 但响应程度存在较大差别。

2.3.2 秋季最后一个物候期的响应

进一步对木本植物落叶末期与平均气温作相关分析, 由表 7 可知, 随着前期气温升高, 木本植物落叶末期普遍呈推迟趋势, 其中悬铃木、毛白杨、

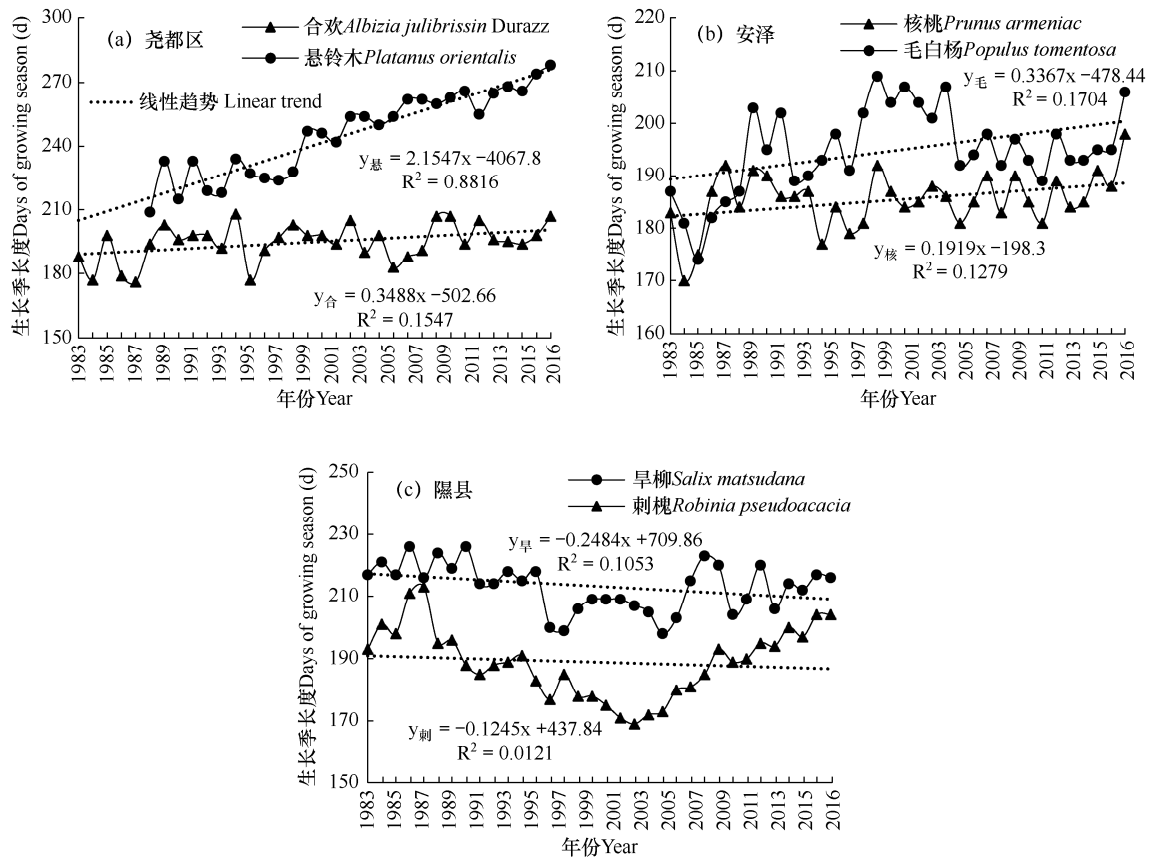


图 3 1983–2016 年各站木本植物生长季的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of growing season days of the typical woody plants at three sites from 1983 to 2016

表 6 各站点木本植物展叶始期（第一个物候期）与不同时段平均气温的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between the leaf opening date (the first phenology) of each woody plants and temperature during different periods

站点	物种	1 月	2 月	3 月	4 月	春季	年
Station	Species	January	February	March	April	Spring	Year
尧都区 Yaoduqu	合欢 <i>Albizia julibrissin</i> Durazz	-0.225	-0.153	-0.472**	-0.523**	-0.566**	-0.562**
	悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	-0.366	-0.130	-0.636**	-0.353	-0.624**	-0.700**
安泽 Anze	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	-0.068	-0.419*	-0.637**	-0.249	-0.577**	-0.431*
	核桃 <i>Prunus armeniaca</i>	-0.072	-0.378*	-0.625**	-0.456**	-0.682**	-0.408*
隰县 Xixian	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	-0.129	-0.453**	-0.354*	-0.123	-0.493**	-0.384*
	刺槐 <i>Robinia hispfa</i> Linn	-0.162	-0.054	0.020	-0.219	-0.164	-0.220

核桃的落叶末期与前 1 个月平均气温极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数在 0.497~0.612, 合欢、旱柳和刺槐的落叶末期与前期气温相关不显著。

就季节尺度和年尺度而言, 研究区木本植物落叶末期随秋季气温升高呈普遍推迟趋势, 悬铃木、毛白杨和核桃的落叶末期与秋季的平均气温极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数在 0.497~0.612; 随年均气温的升高, 尧都区和安泽的木本植落叶末期均表

现为推迟趋势, 隰县木本植物落叶末期表现为提前趋势, 悬铃木和旱柳的落叶末期与年均气温极显著相关, 相关系数分别为 0.748 和 -0.520, 毛白杨和刺槐的落叶末期与年均气温显著相关, 相关系数分别为 0.343 和 -0.401, 可见, 木本植物的落叶末期随气温变化趋势存在明显的区域性特征, 隰县木本植物落叶末期表现为提前趋势, 这可能与隰县气温变化或树龄、坡向改变等多因素有关, 有待进一步研究。

表 7 各站点木本植物落叶末期（最后一个物候期）与不同时段平均气温的相关系数

Table 7 Correlation coefficient between deciduous date (the last phenology) of each woody plants and mean temperature during different periods

站点 Station	物种 Species	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	秋季 Autumn	年 Year
尧都区 Yaoduqu	合欢 <i>Albizia julibrissin</i> Durazz	0.104	0.011	-0.068	-0.081	0.063	0.048
	悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	0.269	0.268	0.497**	0.373*	0.525**	0.748**
安泽 Anze	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	0.036	0.612**	0.321	0.272	0.567**	0.343*
	核桃 <i>Prunus armeniac</i>	-0.059	0.503**	0.418	0.243	0.513**	0.130
隰县 Xixian	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	-0.195	-0.301	0.142	0.012	0.079	-0.520**
	刺槐 <i>Robinia hispida</i> Linn	-0.106	-0.192	0.177	-0.049	-0.047	-0.401*

2.3.3 生长季长度的响应

由表 8 可知，悬铃木、合欢、毛白杨、核桃的生长季长度随气温升高呈延长趋势；旱柳和刺槐的生长季长度随气温升高则表现为缩短趋势，其中悬铃木生长季对气温变化响应最敏感，除冬季 (P<0.05) 外，相关性均达极显著水平 (P<0.01)，

其次是毛白杨，除夏季外，与年及其它季节平均气温达极显著和显著相关水平，合欢生长季与年及夏季均温显著相关，核桃生长季与年及秋季均温显著相关，旱柳生长季与春季均温显著相关，可见，随着气温升高，研究区木本植物生长季变化存在一定差异。

表 8 木本植物生长季与不同时段平均气温的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between growth season days of each woody plants and mean temperature during different periods

物种 Species	合欢 <i>Albizia julibrissin</i> Durazz	悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	核桃 <i>Prunus armeniac</i>	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	刺槐 <i>Robinia hispida</i> Linn
年 Year	0.399*	0.813**	0.538**	0.387*	-0.317	-0.320
春 Spring	0.312	0.787**	0.419*	0.297	-0.383*	-0.266
夏 Summer	0.399*	0.528**	0.160	-0.033	-0.248	-0.282
秋 Autumn	0.238	0.613**	0.357*	0.426*	0.005	-0.054
冬 Winter	0.324	0.453*	0.390*	0.260	-0.211	-0.271

3 结论与讨论

3.1 讨论

(1) 随着全球气候变化，研究区植物物候响应敏感，且二者表现出协同变化的特征，在气候变暖背景下，汾河河谷及太岳山一带的木本植物，春季物候期提前，秋季物候期推迟，生长季呈延长趋势，与国内大部分研究结果一致<sup>[29-32]</sup>，吕梁山区的木本植物，春季物候期推迟，秋季物候期提前，李强等<sup>[28]</sup>在研究黄土高原植物物候变化特征时有相同的结论。物候变化是多种气候要素综合作用的结果，研究认为，温度是影响植物物候的最重要气候因素<sup>[29, 33]</sup>，升温可改变植物的休眠时间<sup>[34]</sup>，低温、短日照是落叶植物叶片萎蔫的主要影响因子<sup>[35]</sup>，地处吕梁山区的隰县，4-6 月平均最低气温、8-9 月平均气温、9 月平均最高气温均出现下降趋势，其中 5 月平均最

低气温显著下降，赵桂香等<sup>[36]</sup>研究表明山西夏季为变冷趋势，因此，生长季气温降低对隰县植物物候变化产生了不同影响。

(2) 本研究结果尧都区合欢展叶期显著提前与李燕等<sup>[20]</sup>展叶期推迟的结果略有出入，主要是选取的时间段不同。观测资料表明，2004 年以后尧都区气温大幅升高，其中 2005-2016 年年均气温比 1982-2004 年年均气温增加了 1.11℃，气温升高导致物候期提前这一结论与大多研究结果一致<sup>[4-5, 17-19]</sup>。

(3) 隰县木本植物春季物候期推迟，秋季物候期提前，生长季表现为不显著的缩短趋势，虽然与国内一些研究结果不同<sup>[13-15, 29]</sup>，但也有相同的研究结论<sup>[3, 11, 28]</sup>，这可能与隰县个别月份气温降低有一定关系。同时对观测数据分析表明，隰县观测树旱柳 2011 年更换位置后，春季物候期推迟了 5~10d，叶



变色期提前了7~12d,刺槐1997年更换观测树后春季物候期推迟了2~7d,秋季物候期提前了5~22d,由此可知,木本植物生长位置、朝向、树龄对植物物候和生长季也可能产生较大影响。

(4)自然物候是气象、水文、土壤、自然环境等综合因素影响的反映<sup>[1]</sup>,本研究仅从温度变化对物候的影响进行了探讨,缺乏其它因素对物候期影响的分析,也没有考虑植物本身的生物学特性差异,今后将进一步研究。

### 3.2 结论

(1)1983-2016年研究区气温整体呈上升趋势,受地形影响处于临汾盆地的尧都区平均气温与升温幅度均大于东西山区的安泽和隰县,且低海拔地区的低温增幅大于高温,高海拔地区的高温增幅大于低温。各季平均气温总体呈上升趋势,春季升温极显著,夏季升温幅度最小。尧都区及安泽各月增温趋势一致,隰县个别月份出现降温趋势,其中3月增温趋势极显著,是拉动年平均气温升高的主要因素。

(2)研究区内木本植物物候期和生长季存在较大差异,相同物候期早晚相差1~2个月,尧都和安泽地区木本植物春季物候期提前,秋季物候期推迟,植物生长季呈延长趋势;隰县木本植物春季物候期普遍推迟,秋季物候期普遍提前,生长季变化趋势不显著。

(3)随温度升高,研究区木本植物春季物候期普遍提前,物候始期受年、春季及物候期前1~2个月的平均气温影响明显,其中3月气温极显著升高,对木本植物物候始期显著提前起到关键作用。植物落叶末期在尧都区和安泽的植物随着温度升高,物候期推迟,并且受年、秋季及物候期前1个月的气温影响显著;在隰县的植物落叶末期表现为提前趋势,受年平均气温影响显著。

(4)木本植物生长季长度随温度变化表现出明显的区域性特征,随气温升高,尧都和安泽地区木本植物生长季呈延长趋势,隰县木本植物生长季表现为不显著的缩短趋势,不同品种的植物对同一时期气温变化响应不同。

### 参考文献 References

[1]竺可桢,宛敏渭.物候学(增订版)[M].北京:科学出版社,1980:1-131.  
Zhu K Z,Wan M W.Phenology(updated edition)[M].Beijing:

Science Press,1980:1-131.(in Chinese)  
[2]张福春.物候[M].北京:气象出版社,1985:6-8,47-80.  
Zhang F C.Phenology[M].Beijing:China Meteorology Press,1985:6-8,47-80.(in Chinese)  
[3]郑景云,葛全胜,赵会霞.近40年中国植物物候对气候变化的响应[J].中国农业气象,2003,24(1):28-32.  
Zheng J Y,Ge Q S,Zhao H X.Changes of plant phenological period and response to climate change for the last 40 years in China[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2003,24(1):28-32.(in Chinese)  
[4]高祺,廖启龙,岳艳霞.河北省木本植物物候期变化特征及其对气候变暖的响应[J].中国农业气象,2011,32(1):17-22.  
Gao Q,Miao Q L,Yue Y X.Phenology change for woody plants and its responses to climate warming in Hebei Province[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2011,32(1):17-22.(in Chinese)  
[5]徐韵佳,戴君虎,王焕炯,等.1985-2012年哈尔滨自然历主要物候期变动特征及对温度变化的响应[J].地理研究,2015,34(9):1662-1674.  
Xu Y J,Dai J H,Wang H J,et al.Variations of main phenophases of natural calendar and analysis of responses to climate in Harbin in 1985-2012[J].Geographical Research,2015,34(9):1662-1674.(in Chinese)  
[6]Root T L,Price T,Hall K R,et al.Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J].Nature,2003,421(6918):57-60.  
[7]丁一汇,王会军.近百年中国气候变化科学问题的新认识[J].科学通报,2016,61(10):1029-1041.  
Ding Y H,Wang H J.Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China[J].Science Bulletin,2016,61(10):1029-1041.(in Chinese)  
[8]翟佳,袁凤辉,吴家兵.植物物候变化研究进展[J].生态学杂志,2015,34(11):3237-3243.  
Zhai J,Yuan F H,Wu J B.Research progress on vegetation phenological changes[J].Chinese Journal of Ecology,2015,34(11):3237-3243.(in Chinese)  
[9]邓晨晖,白红英,高山,等.1964-2015年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应[J].地理学报,2018,73(5):917-931.  
Deng C H,Bai H Y,Gao S,et al.Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qinling Mountains region during 1964-2015[J].Acta Geographica Sinica,2018,

- 73(5):917-931.(in Chinese)
- [10] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe[J]. *Nature*, 1999, 397(6721):659-659.
- [11] 杨丽萍, 代海燕, 陈素华, 等. 气候变化对科尔沁沙地木本植物物候期的影响[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(3):518-523.  
Yang L P, Dai H Y, Chen S H, et al. Effects of climate change on phenophase of woody plants in the Horqin Sandy Land[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(3):518-523.(in Chinese)
- [12] 秦大河, Thomas S, 等. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1):1-6.  
Qin D H, Thomas S, et al. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1):1-6.(in Chinese)
- [13] 雷俊, 齐晓声, 张红兵, 等. 半干旱区典型木本植物春季物候与气候要素的关系[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(10):1852-1860.  
Lei J, Qi X S, Zhang H B, et al. Relationship between typical woody plants spring phenophases and climate factors in semi-arid region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(10):1852-1860.(in Chinese)
- [14] 吴荣军, 郑有飞, 赵国强, 等. 郑州主要植物春季物候变化及其对气温变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(6):1049-1054.  
Wu R J, Zheng Y F, Zhao G Q, et al. Spring phenophase changes of dominant plants in Zhengzhou and their responses to air temperature change[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6):1049-1054.(in Chinese)
- [15] 藏海佳, 李星玉, 李俊, 等. 山东地区木本植物春季物候对气候变化的响应[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(2):167-173.  
Zang H J, Li X Y, Li J, et al. Responses of woody plants spring phenology to climate changes in Shandong[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(2):167-173.(in Chinese)
- [16] 普宗朝, 张山清. 气候变化对新疆核桃种植气候适宜性的影响[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(4):267-279.  
Pu Z C, Zhang S Q. Impact of climate change on walnut-planting climatic suitability in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(4):267-279.(in Chinese)
- [17] 陈效述, 庞程, 徐琳, 等. 中国温带旱柳物候期对气候变化的时空响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(11):3625-3635.  
Chen X Q, Pang C, Xu L, et al. Spatiotemporal response of *Salix matsudana's* phenophases to climate change in China's temperate zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11):3625-3635.(in Chinese)
- [18] 黄珍珠, 李春梅, 翟志宏, 等. 广东省自然物候对气候变暖的响应[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6):991-996.  
Huang Z Z, Li C M, Zhai Z H, et al. Impacts of climate warming on phenophases in Guangdong[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6):991-996.(in Chinese)
- [19] 李瑞英, 孙东宝, 江晓东. 鲁西南木本植物物候期对气候变暖的响应[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(2):135-140.  
Li R Y, Sun D B, Jiang X D. Response of typical woody plants phenology to climate warming in southwestern Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(2):135-140.(in Chinese)
- [20] 李燕, 王志伟, 张建玲. 气候变暖对山西南部典型植物物候的影响[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(2):178-184.  
Li Y, Wang Z W, Zhang J L. Effect of climate warming on phenophase of representative plants in Southern Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(2):178-184.(in Chinese)
- [21] 雷俊, 姚玉璧, 孙润, 等. 黄土高原半干旱区物候变化特征及其对气候变暖的响应[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(1):1-8.  
Lei J, Yao Y B, Sun R, et al. Phenological variation and its response to climate warming in semi-arid region of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(1):1-8.(in Chinese)
- [22] 常兆丰, 王强强, 韩福贵, 等. 民勤荒漠区不同生活型植物物候响应气候变暖的差异[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(9):1921-1929.  
Chang Z F, Wang Q Q, Han F G, et al. Phenological responses of different life form plants in Minqin desert area to climate warming[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(9):1921-1929.(in Chinese)
- [23] 蔡榕硕, 付迪. 全球变暖背景下中国东部气候变迁及其对物候的影响[J]. *大气科学*, 2018, 42(4):729-740.  
Cai R S, Fu D. The pace of climate change and its impacts on phenology in eastern China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(4):729-740.(in Chinese)
- [24] Schwartz M D, Reiter B E. Changes in North American spring[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(8):929-932.
- [25] Menzel A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO[J]. *Climatic Change*, 2003, 57(3):243-263.

- [26] Penuelas J, Filella L. Herbaria century record of increasing eutrophication in Spanish terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(4): 427-433.
- [27] 邓晨晖, 白红英, 翟丹平, 等. 气候变化背景下 1964-2015 年秦岭植物物候变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(23): 7882-7893.  
Deng C H, Bai H Y, Zhai D P, et al. Variation in plant phenology in the Qinling Mountains from 1964-2015 in the context of climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7882-7893. (in Chinese)
- [28] 李强, 张翀, 任志远. 近 15 年黄土高原植被物候时空变化特征分析[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(22): 4352-4365.  
Li Q, Zhang C, Ren Z Y. Analysis of temporal and spatial variation of vegetation phenology in the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(22): 4352-4365. (in Chinese)
- [29] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响[J]. *地理学报*, 1995, 50(5): 402-409.  
Zhang F C. Effects of global warming on plant phenological events in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(5): 402-409. (in Chinese)
- [30] 白洁, 葛全胜, 戴君虎, 等. 西安木本植物物候与气候要素的关系[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(11): 1274-1282.  
Bai J, Ge Q S, Dai J H, et al. Relationship between woody plants phenology and climate factors in Xi'an, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(11): 1274-1282. (in Chinese)
- [31] 仲舒颖, 郑景云, 葛全胜. 1962-2007 年北京地区木本植物秋季物候动态[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2352-2356.  
Zhong S Y, Zheng J Y, Ge Q S. Dynamics of autumn phenophase of woody plants in Beijing region in 1962-2007 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2352-2356. (in Chinese)
- [32] 范广洲, 刘雅星, 赖欣. 中国木本植物物候变化特征分析[J]. *气象科学*, 2012, 32(1): 68-73.  
Fan G Z, Liu Y X, Lai X. Analysis of woody plants phenology variation characteristics in China[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(1): 68-73. (in Chinese)
- [33] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 等. 植物物候与气候研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(2): 447-454.  
Wang L X, Chen H L, Li Q, et al. Research advances in plant phenology and climate[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 447-454. (in Chinese)
- [34] 李荣平, 周广胜, 张慧玲. 植物物候研究进展[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 541-544.  
Li R P, Zhou G S, Zhang H L. Research advances in plant phenology[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 541-544. (in Chinese)
- [35] 杨扬, 罗贤, 李荣平, 等. 气象要素对植物物候影响及驱动机制研究进展[J]. *气象与环境科学*, 2016, 32(5): 154-159.  
Yang Y, Luo X, Li R P, et al. A review of the effect of meteorological factors on plant phenology and its driving mechanisms[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(5): 154-159. (in Chinese)
- [36] 赵桂香, 赵彩萍, 李新生, 等. 近 47a 来山西省气候变化分析[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(3): 500-503.  
Zhao G X, Zhao C P, Li X S, et al. Analysis climate change in Shanxi province 47 years[J]. *Arid Zone Research*, 2006, 23(3): 500-503. (in Chinese)