

莎车巴旦姆物候期对气象条件的响应及花期预测模型

徐相明^{1,2} 顾品强^{1*} 陈丛敏³ 李钟霞³ 费 蕾¹

(¹上海市奉贤区气象局, 上海 201416; ²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; ³莎车县气象局, 新疆喀什 844700)

摘 要 利用莎车县农业气象试验站 2008—2013 年巴旦姆物候期和同期气象观测资料, 分析了巴旦姆物候期的变化特征以及气温、日照时数对物候期的影响。结果表明: 巴旦姆花期之前的物候期始日之间均呈正相关, 与花期之后的物候期始日的相关性大多较小, 花芽膨大早迟与休眠期、生长期天数分别呈极显著的正相关和负相关。以果实成熟期为界, 气温对之前、之后物候期间隔日数的影响分别为负相关和正相关, 日照时数与物候期间隔日数大多为正相关。果实成熟-叶变色始期间隔日数对平均最高气温以及花序出现-开花末期、叶变色始期-落叶末期间隔日数对日照时数存在明显的响应。当巴旦姆休眠期符合日平均气温 $-3.0 \sim -7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数满 30 d 后, 经过 17~28 d 将进入花芽萌动期。花芽萌动期、开花始期、叶变色始期和落叶末期的始日分别与首个候平均气温 $\geq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且候平均最高气温 $\geq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、春季候平均气温 $\geq 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且候平均最高气温 $\geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、秋季首个候平均气温 $\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且候平均最高气温 $\leq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和冬季首个候平均气温 $\leq 1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的候序一一对应。利用偏最小二乘法回归分析, 建立巴旦姆盛花期始日预测模型, 经过检验模型效果较好。

关键词 巴旦姆; 物候期; 气象条件; 相关分析; 花期预测模型

Response of phenophase to meteorological conditions and flowering forecast model on *Amygdalus communis* in Shache County, Xinjiang, China. XU Xiang-ming^{1,2}, GU Pin-qiang^{1*}, CHEN Cong-min³, LI Zhong-xia³, FEI Lei¹ (¹Fengxian District Meteorological Office, Shanghai 201416, China; ²State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ³Meteorological Bureau of Shache County, Kashi 844700, Xinjiang, China).

Abstract: Based on the phenophase data of *Amygdalus communis* and homochronous meteorological observation data at agrometeorological experimental station of Shache County during 2008–2013, the change characteristics of phenological period of *A. communis* and the effects of temperature and sunshine duration on them were analyzed. The results showed that before flowering, positive correlations existed among the first day of phenological phases, and after flowering, the correlations among the first day of phenological phases were mostly less. A significant positive correlation was observed between earlier bud flower swelling and the days of dormant period and growth period, and a significant negative correlation existed between later bud flower swelling and the days of dormant period and growth period. Before fruit maturation, there was negative correlation between temperature and the interval days of phenological period, and after fruit maturation, the correlations were mostly positive. But the correlation between sunshine duration and the interval days of phenological period was positive before and after fruit maturation. The interval days from fruit maturation to the beginning date of leaf colour change had evident response to the average maximum temperature, and the interval days from the emergence of inflorescence to the ending data of flowering, and from the beginning

中国气象局上海 2012 年中央财政“三农”气象服务专项[中气函(2012)357 号]和上海市奉贤区(社会类)科技发展基金项目(201324)资助
This work was supported by Shanghai Meteorological Service Projects for “Three Agriculture” from China Meteorological Administration in 2012 [China Meteorological Administration Letter (2012) No. 357] and the Science and Technology Development Fund Project (Social Class, 201324) of Fengxian District, Shanghai.

2015-05-25 Received, 2015-11-30 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gupinq2004@126.com

date of leaf colour change to the ending date of leaf fall, had obvious response to sunshine duration. When the dormant period exceeded 30 days and the average daily temperature met the rang from -3.0 to $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, *A. communis* would get into the flower swelling period after another 17–28 d. There were one-to-one correspondences between flower swelling, the beginning date of flowering, the beginning date of leaf colour change, the ending date of leaf fall, and the first pentad average temperature greater than or equal to $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ and pentad average maximum temperature greater than or equal to $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, pentad average temperature greater than or equal to $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ and pentad average maximum temperature greater than or equal to $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ in spring, the first pentad temperature less than or equal to $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and pentad average maximum temperature less than or equal to $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ in autumn, the first pentad average temperature less than or equal to $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ in winter, respectively. By using partial least squares regression analysis, the first day of flowering forecast model of *A. communis* was established with good prediction.

Key words: *Amygdalus communis*; phenophase; meteorological conditions; correlation analysis; flowering forecast model.

巴旦姆又名巴旦杏、巴旦木,学名扁桃(*Amygdalus communis*),属李亚科桃属,中型乔木或灌木,巴旦姆不仅营养价值很高,药用价值也很高^[1].巴旦姆耐瘠薄,可用于荒山造林,不仅有较高的经济效益,而且还起到很好的荒山绿化和水土保持效果.由于气候等多方面的原因,巴旦姆适宜种植范围较小,世界上主要生产地为美国加利福尼亚州,其产量占到全世界产量的 84%,以致加州众多生产巴旦姆的家庭农场成为国家地理标志的一部分^[2].巴旦姆在我国的分布也十分有限,位于新疆南疆的喀什莎车具有发展巴旦姆生产独特的自然条件,且栽培巴旦姆历史悠久,种植面积广,拥有“中国巴旦姆之乡”的美誉,巴旦姆生产已成为当地的支柱性产业.2007 年“莎车巴旦姆”获得国家地理标志产品保护^[3],2011 年莎车开始举办“巴旦姆花节”、“巴旦姆采摘节”等一系列特色农业旅游,2013 年种植规模扩大至 $6.67\times 10^4\text{ hm}^2$,并提出了“巴旦姆富民强县”的目标^[4].巴旦姆产量易受到当地气候波动的影响,如 2006、2008 年受低温冻害造成巴旦姆减产^[5-6].目前不少学者试图弄清气候条件对巴旦姆物候期及产量的影响,如仲卫松等^[7]对不同品种的巴旦姆花期及授粉率进行了初步观测;马鸿儒^[6]、吉春容等^[8]分别利用冬季平均气温、最低气温等因子研究了巴旦姆越冬期间发生冻害的气象指标.由于巴旦姆主产区地域偏僻,迄今对巴旦姆物候期及其与气候条件的关系和冬季休眠需冷量等方面的研究甚少,直接影响到巴旦姆品种的本地化筛选、引种、日常种植以及扩大引进种植地域和建立新型栽培模式^[4,9]等.本文重点分析 2008—2013 年巴旦姆物候期变化特征及其与气温、日照时数的响应关系,并建立巴旦姆开花盛期预报模型,以期对巴旦姆高效栽

培、趋利避害和休闲旅游提供理论和技术支持.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

莎车县地处昆仑山北坡、塔里木盆地南缘($37^{\circ}27'30''$ — $39^{\circ}0'15''\text{ N}$, $76^{\circ}1'57''$ — $77^{\circ}46'30''\text{ E}$),县境平均海拔 1231.2 m,南部山区的海拔较高,在 1800~4550 m^[10].该区属暖温带大陆性干旱气候,全年干旱少雨,光照强,冬季气温低,气温日较差大,常年(1981—2010 年)平均气温为 $11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均日照时数为 2891.4 h,年平均降水量为 53.9 mm^[11].莎车日平均气温稳定 ≥ 0 、 ≥ 5 、 ≥ 10 、 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初终日期、间隔日数及积温如表 1 所示,温度条件适合一年一熟至二年三熟耕作栽培和冬小麦、棉花、花生、玉米、温带水果等农作物生长.莎车属于叶尔羌河冲击平原,叶河从县境内穿流而过,果园灌溉用水可以得到保证,加上巴旦姆根系发达且具有旱生结构,有较强的抗旱性,在年降水量只有 40~50 mm 的地区也能正常生长,因此本文没有专门分析自然降水因子对巴旦姆生长发育的影响.

表 1 莎车 1981—2010 年各界限温度初终日期及积温
Table 1 Dates of start and end of different boundary temperature and accumulated temperature in Shache from 1981 to 2010

界限温度 Boundary temperature ($^{\circ}\text{C}$)	初日 Start date	终日 End date	间隔日数 Days from start to end	活动积温 Active accumulated temperature ($^{\circ}\text{C}$)	有效积温 Effective accumulated temperature ($^{\circ}\text{C}$)
≥ 0	02-13	11-29	289	4704.8	4704.8
≥ 5	03-06	11-12	251	4599.1	3355.9
≥ 10	03-22	10-23	215	4303.7	2192.1
≥ 20	05-06	09-09	126	2737.1	466.4

1.2 观测资料

巴旦姆物候期资料源于莎车县农业气象试验站 2008—2013 年固定地段处于盛果期的巴旦姆观测资料.物候期观测根据《农业气象观测规范》^[12]规定的物候标准和观测要求进行定时观测和记录.巴旦姆各物候期记录为达到各物候期标准的第一天(即始日),如开花始期指观测树上有一朵或同时几条花的花瓣开始完全开放的首日.气象资料取自莎车县气象局同期逐日平均气温、最高气温、最低气温、日照时数等地面气象要素观测资料.

1.3 数据处理

数据统计、图表绘制和相关分析在 Microsoft Excel 2003 软件中完成.模型建立采用偏最小二乘回归方法.

2 结果与分析

2.1 巴旦姆物候期变化特征

以落叶末期和花芽膨大分别作为进入休眠和解除休眠的物候标志,将巴旦姆划分为休眠期和生长期两个生育阶段,休眠期为落叶末期-花芽膨大,生长期为花芽膨大-落叶末期.2008—2013 年,巴旦姆休眠期为 11 月 23 日至次年 2 月 27 日,平均天数为 97 d,最短为 80 d(2009 年),最长为 108 d(2012 年);生长期为 2 月 28 日至 11 月 22 日,平均天数为

268 d,最短为 259 d(2012、2013 年),最长为 289 d(2009 年),休眠期、生长期的年最长天数与最短天数相差约 1 个月(表 2).

由表 2 可以看出,开花末期之前,巴旦姆各物候期之间呈一定的正相关,其相邻物候之间的相关性大多达显著或极显著水平,而与花期末期之后的物候期之间的相关性大多不显著.展叶期处在花期,且展叶始期与开花盛期大体一致(展叶略晚 1 d).芽膨大期和芽开放期与叶变色期、落叶期均存在弱的负相关,果实成熟期与其他各物候期之间的相关性均较弱,叶变色始期与落叶始期之间呈显著正相关,落叶始期比叶变色始期平均晚 2 d,落叶期持续时间(平均 30 d)长于叶变色期(平均 19 d).开花末期之前的各物候期早迟与生长期长短存在负相关,之后的各物候期早迟与生长期长短存在正相关,前者的相关性高于后者.巴旦姆花芽、叶芽膨大和花芽开放早迟与生长期长短分别呈极显著和显著的负相关,果实成熟早迟与生长期长短的相关性不大,叶全变色期、落叶末期的早迟与生长期长短呈不显著的正相关,说明巴旦姆休眠期与生长期长短存在负相关并呈现以年为生长周期的变化特征.

2.2 巴旦姆物候期与气象条件的响应关系

2.2.1 休眠期(落叶末期-花芽膨大)与气象条件的

表 2 巴旦姆物候期及与各物候期和生长期天数的相关系数
Table 2 Phenological periods of *Amygdalus communis* and their correlation coefficients with other phenological periods and days of growth period

物候期 Phenology period	平均日期 Average date	物候期 Phenology period															生长期 Growth period (d)
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
B	03-03	0.98 **															268
C	03-18	0.81	0.90 *														
D	03-20	0.70	0.82 *	0.97 **													
E	04-01	0.32	0.47	0.79	0.89 *												
F	04-06	0.31	0.43	0.75	0.83 *	0.96 **											
G	03-24	0.65	0.72	0.89 *	0.90 *	0.84 *	0.89 *										
H	03-27	0.56	0.65	0.86 *	0.90 *	0.90 *	0.94 **	0.99 **									
I	03-31	0.49	0.61	0.85 *	0.91 *	0.95 **	0.94 **	0.96 **	0.99 **								
J	04-10	0.25	0.36	0.70	0.80	0.96 **	0.97 **	0.79	0.87 *	0.89 *							
K	07-29	-0.06	-0.13	0.00	-0.04	0.06	0.26	0.04	0.07	-0.02	0.32						
L	10-23	-0.12	-0.06	0.06	0.24	0.36	0.14	-0.04	0.06	0.16	0.35	-0.23					
M	11-10	-0.48	-0.42	-0.24	-0.08	0.14	-0.02	-0.38	-0.26	-0.16	0.21	0.11	0.84 *				
N	10-25	-0.28	-0.19	-0.03	0.17	0.37	0.16	-0.08	0.03	0.14	0.37	-0.20	0.98 **	0.88 *			
O	11-23	-0.57	-0.63	-0.57	-0.46	-0.16	-0.04	-0.14	-0.09	-0.11	-0.02	0.08	0.03	0.02	0.11		
生长期 Growth period (d)		-0.97 **	-0.96 **	-0.82 *	-0.72	-0.34	-0.30	-0.57	-0.50	-0.45	-0.25	0.03	0.10	0.50	0.23	0.64	1.00

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below. A: 花芽膨大期 Flower swelling; B: 叶芽膨大期 Leaf bud swelling; C: 花芽开放期 Flower bud opening; D: 叶芽开放期 Leaf bud opening; E: 展叶始期 Beginning period of leaf expansion; F: 展叶盛期 Peak period of leaf expansion; G: 花序出现 Inflorescence emergence; H: 开花始期 Beginning date of flowering; I: 开花盛期 Peak period of flowering; J: 开花末期 End period of flowering; K: 果实成熟 Fruit ripening date; L: 叶变色始期 Beginning date of the leaf change colour; M: 叶全变色期 Leaves all changed color date; N: 落叶始期 Beginning date of leaf fall; O: 落叶末期 End period of leaf fall.

表 3 休眠期(落叶末期-花芽膨大)的气象条件
Table 3 Meteorological conditions of dormant period (end period of leaf fall to flower swelling)

年份 Year	上年落叶末期 End date of leaf fall over last year	花芽膨大期 Flower swelling	间隔日数 Interval days	平均气温 Average temperature (℃)	平均最高气温 Average max temperature (℃)	平均最低气温 Average min temperature (℃)	日照时数 Sunshine hours
2008	11-24	03-04	102	-5.4	0.4	-9.9	524.5
2009	11-24	02-12	80	-2.0	4.7	-7.0	433.1
2010	11-24	02-28	92	-1.9	4.4	-6.8	501.5
2011	11-20	02-25	97	-3.3	3.7	-8.8	607.3
2012	11-20	03-25	109	-4.0	1.6	-8.3	517.8
2013	11-24	03-06	102	-2.0	4.8	-7.6	558.8
平均 Average	11-24	02-28	97	-3.1	3.3	-8.1	523.8

表 4 休眠期(落叶末期-花芽膨大)各物候期与气象条件的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between phenology of dormant period (end period of leaf fall to flower swelling) and meteorological conditions

物候期 Phenological periods	上年落叶末期 End date of leaf fall over last year	花芽膨大期 Flower swelling	间隔日数 Interval days	平均气温 Average temperature	平均最高气温 Average max temperature	平均最低气温 Average min temperature	日照时数 Sunshine hours
花芽膨大期 Flower swelling	-0.57	-	-	-0.48	-0.55	-0.43	0.48
间隔日数 Interval days	-0.33	0.96 **	-	-0.58	-0.61	-0.58	0.56

的相关性 由表 3、表 4 可知,2008—2013 年,研究区巴旦姆休眠期平均开始于上年 11 月 24 日(在 11 月 20—28 日,极差 8 d),结束于当年 2 月 27 日(在 2 月 12 日至 3 月 10 日,极差 26 d),休眠期长短与落叶末期早迟呈弱的负相关,与花芽膨大期早迟呈极显著正相关;巴旦姆休眠期间平均气温在-2~-4℃,日照时数在 500~550 h,休眠期长短与期间的平均气温、最高气温、最低气温呈弱的负相关,与日照时数呈弱的正相关.由于花芽膨大期的年间波动明显大于落叶末期,花芽膨大期早迟大致决定休眠期长短.巴旦姆花芽膨大早迟与当年首次达到候平均气温 $\geq 4^{\circ}\text{C}$ ^[13]、候平均最高气温 $\geq 12^{\circ}\text{C}$ 的候序一致.

通过对巴旦姆 2008—2013 年进入休眠期后满足不同界限温度(以 0.5℃为间隔单位)达到不同累积天数的出现日期与花芽膨大日期进行相关分析,发现日平均气温符合-3.0~-7.5℃出现天数满 30 d 的日期与花芽膨大期的相关性最好,两者的变化趋势一致(图 1),相关系数为 0.93($P<0.01$),该日期与花芽膨大期的间隔日数一般为 17~28 d.通过计算出该日期可推算当年巴旦姆花芽膨大早迟,究其原因可能是巴旦姆和大多数落叶果树一样具有自然休眠的习性,温度是影响果树休眠的最重要的气候参数,其冬季休眠解除需要经过一段时间的冷温条

件(称之为“需冷量”)才能顺利地过度到下一轮芽膨大、花器发育^[14-16].

2.2.2 巴旦姆生长期(花芽膨大-落叶末期)各物候期及与气象条件的响应关系 巴旦姆花序出现于 3 月下半月,花芽膨大-花序出现的间隔日数为 17~34 d(平均为 25 d).据统计,花芽膨大-花序出现期间,最高年与最低年的平均气温相差 8.3℃,受气温年间波动较大的影响,花芽膨大-花序出现的间隔日数的年间差异也较大,极差达 27 d(表 5).其间隔日数与花芽萌动早迟、期间的平均气温、最高气温、最低

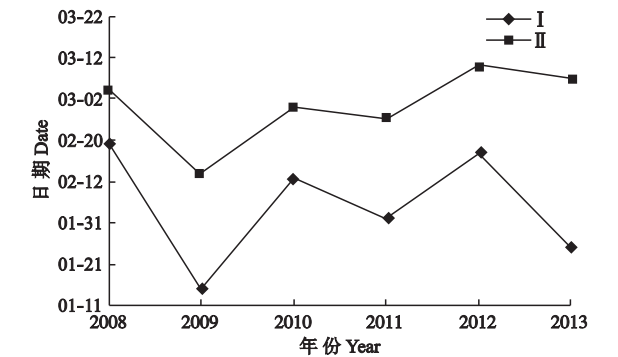


图 1 落叶后日平均气温符合-3.0~-7.5℃的累积天数满 30 d 的出现日期(简称冷温日期, I)和花芽膨大期(II)
Fig.1 Date of the full 30 days, the daily average temperature was consistent with the cumulative days at -3.0 to -7.5℃ (in the legend, referred to as “date of cold temperature”, I), and flower swelling period after leaf fall (II).

表 5 巴旦姆生长期各物候期间隔日数(y)与气象因子和前物候期(x)的线性回归分析
Table 5 Linear regression analysis of interval days of phenological period (y) and meteorological factors and pre-phenological period (x) on growth period of *Amygdalus communis*

时期 Period	气象因子或前物候期 Meteorological factors or pre-phenological period	范围 Range	线性回归方程 Linear regression equation	相关系数 Correlation coefficient
花芽膨大-花序出现 Flower swelling to inflorescence emergence	花芽膨大日期 Flower swelling date	02-12—03-10	$y = -0.5255x + 56.689$	-0.7204
	平均气温 Average temperature (℃)	4.9~13.2	$y = -1.5086x + 38.508$	-0.7058
	平均最高气温 Average max temperature (℃)	11.0~20.6	$y = -1.3393x + 46.361$	-0.6828
	平均最低气温 Average min temperature (℃)	-1.3~5.6	$y = -2.0188x + 30.616$	-0.7529
	日照时数 Sunshine hours	92.2~259.0	$y = 0.0609x + 15.208$	0.5740
花序出现-开花末期 Inflorescence emergence to end period of flowering	花序出现日期 Inflorescence emergence date	03-16—03-31	$y = -0.3210x + 43.742$	-0.5564
	平均气温 Average temperature (℃)	12.4~16.6	$y = -1.2051x + 34.207$	-0.4659
	平均最高气温 Average max temperature (℃)	19.1~23.9	$y = -1.2353x + 43.496$	-0.5190
	平均最低气温 Average min temperature (℃)	6.5~10.0	$y = -1.1954x + 26.297$	-0.4589
	日照时数 Sunshine hours	67.3~196.7	$y = 0.0702x + 8.0539$	0.8965 *
开花末期-果实成熟 End period of flowering to fruit ripening date	开花末期日期 End period of flowering date	04-05—04-18	$y = -0.4399x + 154.12$	-0.2773
	平均气温 Average temperature (℃)	21.2~23.8	$y = -1.8620x + 151.6$	-0.1997
	平均最高气温 Average max temperature (℃)	28.1~31.4	$y = -1.9152x + 166.52$	-0.2533
	平均最低气温 Average min temperature (℃)	15.0~17.0	$y = -0.2585x + 113.98$	-0.0245
	日照时数 Sunshine hours	853.7~1215.7	$y = 0.0367x + 72.738$	-0.0245
果实成熟-叶变色始期 Fruit ripening date to beginning date of the leaf change colour	果实成熟日期 Fruit ripening date	07-14—08-10	$y = -1.1229x + 324.84$	-0.9546 **
	平均气温 Average temperature (℃)	19.2~21.8	$y = 9.8823x - 110.62$	0.6649
	平均最高气温 Average max temperature (℃)	26.5~29.4	$y = 10.291x - 195.24$	0.9161 *
	平均最低气温 Average min temperature (℃)	12.5~14.8	$y = 2.6846x + 51.753$	0.1954
	日照时数 Sunshine hours	525.4~882.7	$y = 5.5307x + 42.011$	0.4294
叶变色始期-落叶末期 Beginning date of the leaf change colour to end period of leaf fall	叶变色始期日期 Beginning date of the leaf change colour	10-10—10-29	$y = -1.0041x + 328.55$	-0.9094 *
	平均气温 Average temperature (℃)	3.7~7.8	$y = 1.9889x + 18.999$	0.4389
	平均最高气温 Average maximum temperature (℃)	11.8~16.7	$y = 2.0287x + 2.3297$	0.5199
	平均最低气温 Average minimum temperature (℃)	-2.1~1.2	$y = 1.8497x + 31.203$	0.3459
	日照时数 Sunshine hours	137.5~353.6	$y = 0.0741x + 14.109$	0.9119 *

物候期(x)为距离上年 12 月 31 日的天数 Phenology period (x) was the number of days from December 31st last year.

气温均呈负相关,与日照时数呈正相关,即花芽萌动早(晚)、气温偏低(高)、日照时数增多(减少),间隔日数相应延长(缩短).日平均气温 $\geq 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数及活动积温与花芽膨大-花序出现的间隔日数相关性高于其他各界限温度,说明花芽膨大-花序出现期间比较适宜的日平均气温 $\geq 7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $< 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时花芽膨大-花序出现的间隔日数延长,如 2009 和 2011 年日平均气温 $\geq 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数及活动积温分别少于 10 d、100 $^{\circ}\text{C}$,为最少的两年,其间隔日数偏长,均超过 30 d.

开花末期大多结束于 4 月上旬后期至中旬,花期(花序出现-开花末期)一般持续 11~21 d(平均为 17 d).其花期持续日数与气温呈不显著的负相关,与 Bernad 等^[17]认为低温可延长巴旦杏花期相一致;花期持续日数与日照时数呈显著正相关,与花序出现早迟呈负相关,表明花期日照时数多,花序出现早,花期出现延长趋势,开花授粉相对充分,对适时举办巴旦姆花节也有利.开花始期与当年春季侯平均气温 $\geq 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、侯平均最高气温 $\geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的候序相一致,花期的平均气温范围为 13~16 $^{\circ}\text{C}$,最高气温

为 21~24 $^{\circ}\text{C}$,与傅玮东等^[18]提出的花期适宜日平均气温基本吻合.

果实成熟于 7 月下半月至 8 月上旬,开花末期-果实成熟期的间隔日数为 100~124 d(平均为 110 d),其间隔日数与开花末期早晚、期间的气温、日照时数相关性均不大,说明开花末期、气温、日照时数年间变化对果实成熟期长短的影响不敏感.研究表明,随日平均气温 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活动积温增加、日最高气温 $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数增多,果实成熟期缩短^[19].研究区巴旦姆开花末期-果实成熟期较为适宜的日平均气温在 22~24 $^{\circ}\text{C}$.巴旦姆果实成熟期间正值莎车一年中气温最高、日照资源最丰富的时期,其温度、光照条件分布能满足果实发育的需求,对果实营养成分积累和果实开裂、晾干有利^[20],在这个阶段通过加强水肥管理,可提高花芽分化数量和质量,有利稳产高产^[21].

叶变色始期大多出现在 10 月下旬,果实成熟期-叶变色始期的间隔日数为 71~104 d(平均为 86 d),其间隔日数与果实成熟早迟、期间的平均最高

表 6 巴旦姆开花盛期气象预测因子及模型拟合效果
Table 6 Meteorological forecasting factor and fitting effect of the model of peak period of flowering on *Amygdalus communis*

年份 Year	预测因子 Predictive factor				Y 计算值 Calculated value of Y	Y 实测值 Measured value of Y	误差 Error (d)	拟合情况 Fitting
	X_1 (℃)	X_2 (℃)	X_3 (d)	X_4 (℃)				
2008	-9.5	1.8	90	171.8	18	18	0	准确 Accurate
2009	-3.8	4.1	82	196.5	10	10	0	准确 Accurate
2010	-2.8	5.2	82	187.9	12	11	1	准确 Accurate
2011	-8.5	3.0	94	126.3	23	23	0	准确 Accurate
2012	-9.2	0.6	98	79.4	21	21	0	准确 Accurate
2013	-5.2	3.2	85	201.4	14	14	0	准确 Accurate
2014 *	-3.9	3.8	89	133.1	16	18	-2	准确 Accurate

X_1 : 1 月平均气温 Average temperature in January; X_2 : 2 月下旬平均气温 Average temperature in last ten-day of February; X_3 : 上年 12 月 1 日至 3 月 15 日平均气温 ≤ 4 ℃ 的日数 Days of average temperature ≤ 4 ℃ from last December 1st to March 15th; X_4 : 上年 12 月 1 日至 3 月 15 日 ≥ 0 ℃ 活动积温 Active accumulative temperature by the average temperature ≥ 0 ℃ from last December 1st to March 15th; Y: 开花盛期距 3 月 15 日的日序 Date for peak period of flowering to March 15th. * 作为检验年份 As the year of inspection

气温分别呈极显著负相关和显著正相关,与平均气温、日照时数呈不显著的正相关,与平均最低气温的相关性较小.表明果实成熟期提早(延迟)、平均最高气温高(低),果实成熟期-叶变色始期间隔日数延长(缩短).叶变色始期与当年秋季首个侯平均气温 ≤ 10 ℃、侯平均最高气温 ≤ 18 ℃ 的候序相一致.

落叶末期均出现在 11 月下旬,落叶末期最早年与最晚年相差 8 d,是巴旦姆所有物候期中年间差异最小的一个物候期.叶变色始期-落叶末期的间隔日数为 25~33 d(平均为 28 d),其间隔日数与叶变色始期早迟呈显著负相关,与期间的日照时数呈显著正相关,与气温存在弱的正相关,表明日照时数偏多,叶片延迟脱落,间隔日数延长;叶变色始期早,间隔日数延长.落叶末期与当年冬季侯平均气温首个 ≤ 1.9 ℃ 的候序比较一致,最迟于 11 月底前巴旦姆进入冬季休眠期.

2.3 巴旦姆开花盛期的气象预测

2.3.1 开花盛期预报模型的建立 开花盛期作为巴旦姆生产、观光农业中最重要的物候期之一,一直为政府相关部门和果农所关注,较早预知开花盛期有着重要的农学意义和应用价值.本文选取 2008—2013 年逐日(年、月、旬)气温、日照时数以及平均气温各值出现日数和不同界限温度的初、终期及间隔日数等作为预报因子;然后分别计算各预报因子与开花盛期的相关性,选择相关性达显著水平而因子之间相对独立、且具有一定物理意义和提前量(3 月 15 日之前)的要素作为预报因子.经过筛选,开花盛期预报模型选入的预报因子分别为:1 月平均气温(℃, X_1)、2 月下旬平均气温(℃, X_2)、上年 12 月 1 日至 3 月 15 日平均气温 ≤ 4 ℃ 的日数(d, X_3)、上年 12 月 1 日至 3 月 15 日 ≥ 0 ℃ 活动积温(℃, X_4).将

巴旦姆开花盛期作为预报对象(用 Y 表示,距 3 月 15 日的日序),采用偏最小二乘回归方法建立巴旦姆盛花期预报方程:

$$Y = -157.457 - 0.201X_1 + 1.966X_2 + 1.717X_3 + 0.09X_4 \quad (R=0.962, P<0.05)$$

2.3.2 模拟效果的检验 由表 6 可见,巴旦姆开花盛期实况值与模拟值比较接近.若取绝对误差 ≤ 2 d 为准确、3~4 d 为基本准确、 ≥ 5 d 为不准确,则研究期间的样本检验准确率达到 100%.将 2014 年莎车县气象观测资料代入预报模型计算,得到巴旦姆开花盛期为 3 月 31 日,与实况值(4 月 2 日)相差 2 d,评价准确.表明预测模型可以较好地模拟巴旦姆开花盛期出现时段,其预报值可以为巴旦姆花期管理和以花为媒的休闲旅游提供决策依据,但由于巴旦姆物候观测资料序列较短和存在物候观测人为误差等因素,需在今后工作中对预报模型进一步修正和完善.

3 讨 论

巴旦姆物候对环境因子的响应离不开植物固有的遗传特性.开花末期之前的各物候期(芽萌动、芽开放、展叶和开花)之间呈一定的正相关,与生长期长短存在负相关,而与花期之后的物候期之间大多呈不显著的负相关;在花期之后的各物候期,其相邻物候期之间相关性大多较小,与生长期长短存在不显著的正相关.花芽膨大既是巴旦姆休眠的结束,又是一年生长的开始,是决定休眠期、生长期及其长短的重要物候,其花芽膨大早迟与休眠期、生长期长短分别呈极显著的正相关和负相关.展叶始期与开花盛期大体一致(展叶始期略晚 1 d),果实成熟、叶变色始期的早迟与果实成熟-叶变色始期、叶变色始

期-落叶末期的间隔日数分别存在显著负相关,表明巴旦姆物候存在自然休眠期、生理状态(解除休眠)等生态适应性以及对光周期、气候变化的响应^[22]等变化特征。

巴旦姆物候早迟、生长期和休眠期长短与气象条件有较好的响应关系。休眠期长短、花芽膨大期、花芽膨大-花序出现的间隔日数与温度呈不显著的负相关,与日照时数呈不显著的正相关,花芽萌动期一般出现在首个候平均气温 $\geq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、候平均最高气温 $\geq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的候;花芽膨大-花序出现期间比较适宜的日平均气温为高于 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$;花期长短与温度呈不显著的负相关,与日照时数呈显著正相关,开花始期出现于春季候平均气温 $\geq 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、候最高平均气温 $\geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的候。说明巴旦姆从休眠解除到开花,温度偏高,物候相应提早,反之温度偏低,物候相应延迟;日照时数偏多,物候期大多延迟或延长,开花时间适当延长对提高坐果率有利。开花末期-果实成熟的间隔日数、果实成熟早迟与温度、日照时数的相关性均较小,说明在莎车巴旦姆果实发育阶段的温度、光照条件及其分布能满足果实发育的要求,期间日平均气温 $22\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 比较适宜果实发育成熟,日最高气温 $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日数、平均气温 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温偏多,开花末期-果实成熟的间隔日数缩短。果实成熟-叶变色始期的间隔日数与平均最高气温呈显著正相关,与平均气温、日照时数呈不显著的正相关,表明最高气温偏高,日照时数多,其间隔日数相应延长,叶变色始期与秋季首个候平均气温 $\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、候最高平均气温 $\leq 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的候序相一致。叶变色始期-落叶末期的间隔日数与日照时数呈显著正相关,与温度呈不显著的正相关,这与温度对果实成熟之前各物候期的间隔日数的影响均为负相关有所不同,反映出叶变色始期-落叶末期的间隔日数长短受到日照时数、温度季节变化因素的影响,落叶末期与冬季候平均气温首个 $\leq 1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的候序相一致。

落叶果树都有自然休眠的习性^[14-16],巴旦姆也不例外。落叶末期至花芽萌动(休眠期)不同时期的温度高低对休眠终止的影响存在差别,花芽膨大期与落叶末期-花芽膨大前 25 d 、花芽膨大前 $10\sim 15\text{ d}$ 的平均气温的影响关系刚好相反,前者为负相关,后者为正相关。说明巴旦姆休眠过程的终止是渐进的、需满足一定的低温量,且在经历一段暖温期后才开始花芽萌动。本研究结果显示,巴旦姆进入休眠(落叶末期)后,日平均气温符合 $-3.0\sim -7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的累计天数满 30 d ,即达到一定的冷温条件后,一般间隔

$17\sim 28\text{ d}$ 进入花芽膨大期,但 2013 年例外,休眠期间日均气温符合 $-3.0\sim -7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的累计天数少于 30 d ,只有 24 d ,并没有满足一定的冷温条件,若以其日均气温符合 $-3.0\sim -7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的最晚出现日期推算,间隔 41 d 后巴旦姆开始花芽膨大,休眠期历时最长,出现花芽膨大不整齐、坐果率低、生理性障碍等不良影响,而这些特征与落叶类果树低温需冷量不能满足时所表现出的症状一致^[14,16]。考虑到新疆喀什地区位于南疆盆地,属暖温带大陆性干旱气候,冬季(12 月至次年 2 月)平均气温为 $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温大多低于 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,通常在落叶类果树上所采用的 $7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下或 $0\sim 7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需冷量模型^[14-16]不适合冬季较寒冷地区巴旦姆需冷量的评价,目前尚没有学者进行过类似内容的研究报道,日均气温符合 $-3.0\sim -7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温日数是否为巴旦姆解除休眠所需的低温需冷量评价指标尚无法确定其准确性和适用性,有待在巴旦姆栽培的实践中进一步验证。

本研究基于 $2008\sim 2013$ 年巴旦姆物候观测资料,分析温度、日照时数等气象因子对巴旦姆休眠期、生长期及物候期间隔日数的影响,为巴旦姆产业发展和制定高效栽培技术提供了科学决策依据。有研究表明,目前莎车栽培的巴旦姆品种遇冬季日最低气温 $\leq -18\sim -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且持续 2 d 以上时,会发生轻度到重度不等的低温冻害,造成枝条抽干、花芽褐变、花器损伤、幼果脱落,确保休眠期安全越冬和避免花期低温、大风等对开花坐果的影响是促进巴旦姆持续健康高效发展的关键^[5-6,8,23]。莎车巴旦姆休眠期极端最低气温与平均气温呈正相关(相关系数为 0.7999 , $n=30$, $P<0.01$),说明巴旦姆休眠期间平均气温低,极端最低气温也低,休眠期相应延长,增加低温冻害风险,如 2008 年巴旦姆休眠期的平均气温为 $-5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,休眠期极端最低气温为 $-24.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,均为 $2008\sim 2013$ 年最低值,造成当年巴旦姆遭受严重冻害而基本绝收,但调查巴旦姆 2008 年冻害灾情发现,种植在大型水体旁、山脚南坡一带的巴旦姆冻害程度偏轻。因此,在巴旦姆品种引进时,应选择能够抵抗 $-20\sim -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冻害的优良品种^[24],开展巴旦姆冬季冻害精细化风险区划,以及构建防护林带,并合理规划在具有小气候增温效应的区域种植巴旦姆,遇极端低温天气通过烟熏、灌水等方法提高果园温度,以减轻低温冻害。针对莎车巴旦姆花期温度低、日照时数少(主要由沙尘暴、大风、浮尘等天气侵袭引起)对开花坐果的不利影响,选择花期相对较晚的品种避免或减轻温度偏低、日照时数不足对

巴旦姆开花、坐果的负面影响;同时,开展巴旦姆盛花期预测,一是科学指导花期生产管理,必要时采取在早春树干涂白和树冠喷白延迟萌芽和开花^[25]等措施调节花期,以提高坐果数和坐果率,二是确定与花期物候有关的观光农业展会时间,为发展休闲旅游提供相关服务。

参考文献

[1] Xinjiang Station, Chinese Weather Net (中国天气网新疆站). *Amygdalus communis* L. in Xinjiang [EB/OL]. (2013-04-02) [2014-12-20]. <http://www.weather.com.cn/xinjiang/xjsy/tqyw/2088677.shtml> (in Chinese)

[2] Shi W (史 玮). Visit Family Farm in California, USA [EB/OL]. (2013-04-10) [2014-12-20]. <http://www.bjqnw.com/2013/0410/565725.html> (in Chinese)

[3] Xie Y-M (谢咏梅). Building the country's largest almond production and processing base in Shache County. *Xinjiang Forestry* (新疆林业), 2007(6): 10 (in Chinese)

[4] He J-M (何建木), Xiao X-F (肖雪锋). Study on planting and management countermeasures of almond industry in Shache. *Journal of Kashi Teacher's College* (喀什师范学院学报), 2013, 34(5): 28-35 (in Chinese)

[5] Zhang Q (张 强), Qin H-X (秦海霞), Li J-M (李金明), et al. *Amygdalus communis* L. damage causes and countermeasures in Shache County of 2006. *Xinjiang Forestry* (新疆林业), 2007(6): 41-42 (in Chinese)

[6] Ma H-R (马鸿儒). *Amygdalus communis* L. Winter Freezing Index and Risk Analysis in Shache County. Master Thesis. Urmqi: Xinjiang Normal University, 2011 (in Chinese)

[7] Zhong W-S (仲卫松), Ai H-T-S-M-Y (艾海提司马义). Analysis of fine varieties of *Amygdalus communis* L. flowering phenology observation and preliminary report of pollination test. *Xinjiang Forestry* (新疆林业), 1978(4): 28-32 (in Chinese)

[8] Ji C-R (吉春容), Zou C (邹 陈), Chen C-M (陈丛敏), et al. Meteorological indexes of freeze injury on *Amygdalus communis* L. in winter. *Meteorological Science and Technology* (气象科技), 2013, 41(1): 202-206 (in Chinese)

[9] Han H-W (韩宏伟), Wang J-Y (王建友), Li Y (李 勇), et al. Introduction and cultivation American main cultivated almond varieties in Xinjiang area of Kashi. *Journal of Central South University of Forestry and Technology* (中南林业科技大学学报), 2014, 34(10): 32-38 (in Chinese)

[10] Man S-E-S-B-T (满苏尔·沙比提), Ai K-B-E-A-E-K (阿克拜尔·艾尔肯), Di L-X-T-S-M-Y (迪里夏提·司马义). Analysis on climatic change and its causes in Shache County in recent 50 years. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2009, 26(5): 621-627 (in Chinese)

[11] Huang F-Z (黄富致), Wang D (王 东), Xu X-M (徐相明). Temperature, precipitation, sunshine characteristics of climate change of the Shache County between 1961 to 2010 year. *Desert and Oasis Meteorology* (沙漠与绿洲气象), 2013, 7(suppl.): 52-55 (in Chinese)

[12] China National Meteorological Administration (国家气象局). *Agricultural Meteorological Observation Criterion*

(Volume I): *Natural Phenology Fascicle*. Beijing: China Meteorological Press, 1993 (in Chinese)

[13] Wei X-Y (魏小亚), Ma Z-P (马忠萍), Liu C-J (刘春容). Analysis of wild almond planting climatic conditions in Yumin County. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2010(20): 301-303 (in Chinese)

[14] Chen H (陈 湖), Zhang X-S (张新生). Progress in research on dormancy of deciduous fruits//China Horticultural Society (中国园艺学会), ed. *The Second National Symposium Proceedings of Facilities Fruit Tree*. Beijing: China Horticultural Society, 2005: 21-30 (in Chinese)

[15] Wang X-D (王孝娣), Wang H-B (王海峨), Gao D-S (高东升), et al. Relationships between reactive oxygen metabolism and endodormancy release of peach bud under short-term heating. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, 21(11): 2749-2754 (in Chinese)

[16] Fu L-Z (付立中), Shen H-L (申海林), Zou L-R (邹利人), et al. Research progress of natural dormancy of deciduous fruit trees. *Northern Fruits* (北方果树), 2014(4): 1-3 (in Chinese)

[17] Bernad D, Socjas R. Characterization of some self-compatible almonds. II. Flower phenology and morphology. *Hortscience*, 1995, 30: 321-324

[18] Fu W-D (傅玮东), Yu S-L (喻树龙), Han Y (韩 勇), et al. Xinjiang almond and meteorological service. *Xinjiang Meteorological* (新疆气象), 2002, 25(6): 38-40 (in Chinese)

[19] Wang L-X (王连喜), Chen H-L (陈怀亮), Li Q (李琪), et al. Research advances in plant phenology and climate. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, 30(2): 447-454 (in Chinese)

[20] Ma Y (马 勇), He L-Y (何柳莹), Han W-L (韩文利), et al. Cultivation technology of almond in Xinjiang Korla area. *Inner Mongolia Forestry* (内蒙古林业), 2009(7): 17 (in Chinese)

[21] Zhu J-L (朱京琳). *Xinjiang Almond*. Urmqi: Xinjiang People's Publishing House, 1983 (in Chinese)

[22] Li R-P (李荣平), Zhou G-S (周广胜), Zhang H-L (张慧玲). Research advances in plant phenology. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, 17(3): 541-544 (in Chinese)

[23] Wang S (王 森), Xie B-X (谢碧霞), Du H-Y (杜红岩), et al. Study on coldness resistance of flower in almond. *Nonwood Forest Research* (经济林研究), 2007, 25(2): 19-22 (in Chinese)

[24] Han H-W (韩宏伟), Wang J-Y (王建友), Li Y (李 勇), et al. Experimental study on selection of Almond cultivars introduced from abroad. *Xinjiang Agricultural Sciences* (新疆农业科学), 2014, 51(10): 1830-1839 (in Chinese)

[25] Chen C-M (陈丛敏), Liu L-H (刘力宏), Wang D (王 东), et al. Analysis of meteorological indexes of freeze injury on *Amygdalus communis* L. in spring. *Desert and Oasis Meteorology* (沙漠与绿洲气象), 2014, 8(1): 57-60 (in Chinese)

作者简介 徐相明,男,1984年生,硕士研究生,工程师。主要从事气候变化及预报服务研究。E-mail: 237991915@qq.com

责任编辑 杨 弘