

气候变化对黄土高原苹果主产地物候期的影响

刘璐,王景红,柏秦凤,张维敏,张焘

(陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心,西安 710014)

摘要:【目的】黄土高原苹果产区是我国苹果种植面积和产量最大的地区,开展气候变化对苹果物候期的影响研究,可为应对气候变化和指导该地区苹果生产提供科学依据。【方法】选取万荣、洛川和西峰作为黄土高原苹果产区代表站,利用1994—2018年各地苹果芽开放期、展叶始期、始花期、可采成熟期、叶变色末期和落叶末期物候数据,分析不同物候期及生长阶段长度的变化趋势,并利用偏最小二乘回归法,从日尺度层面,分析气温和降水变化对各物候期的影响。【结果】近25年来,黄土高原苹果主产地气候呈暖湿变化特征,受其影响,春季物候期呈提前趋势,秋季物候期呈推迟趋势,果实生长发育期和果树生长季呈延长趋势。平均气温对春秋两季物候期均有显著影响,影响时段内气温每升高1℃,春季各物候期将提前2.20~4.15 d,秋季落叶期将推迟3.58~7.77 d;降水量主要影响秋季物候期,影响时段内降水量每变化1 mm,叶变色末期将提前0.07~0.40 d,落叶末期将推迟0.12~0.55 d。各主产地间,万荣受气候变化影响最大,其次是西峰和洛川。【结论】气温对物候期的影响大于降水,且气温主要影响春季物候期,而降水主要影响秋季物候期;各物候期中,芽开放期、展叶始期和始花期主要受气温影响,叶变色末期主要受降水影响,落叶末期受温度和降水共同影响,而可采成熟期与气温和降水均无显著相关关系。

关键词:苹果;黄土高原;物候期;气候变化;偏最小二乘回归法

中图分类号:S661.1

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2020)03-0330-09

Impact of climate changes on apple's phenophases in the main producing areas of the Loess Plateau in China

LIU Lu, WANG Jinghong, BAI Qinfeng, ZHANG Weimin, ZHANG Tao

(Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crops, Xi'an 710014, Shaanxi, China)

Abstract:【Objective】The apple producing area of the Loess Plateau is the largest apple growing and yielding area in China, and also the most significant area affected by climate changes. This article primarily analyzes the effect of climate changes on the apple's phenophase dates. The most important meteorological factors and the intensity of their influence on phenophase dates will be identified, which could potentially provide a theoretical basis for coping with the climate changes and guiding for fruit production in the region. 【Methods】Wanrong, Luochuan and Xifeng were selected as the observed stations of the apple producing areas in the Loess Plateau, representatively, and apple's phenology data and climate factors were collected from 3 stations during 1994—2018. Apple's phenology data included the bud break (BO), first leaf unfolding (LU), first flowering (FF), fruit maturing (FM), end of leaf color conversion (LC) and end of leaf fall (LF), and the length of fruit growing period (FG) and tree growing season (TG), and the climate factors included daily mean temperature and precipitation. The linear fitting method was used to analyze the interannual trends of climatic factors, phenophase dates and the two different growth stage lengths, and the partial least squares regression (PLS) was applied to identify the impacts of climate changes on different phenology events affected by the daily mean temperature and precipitation. 【Results】(1) Over the past 25 years, the annual average temperature of Wanrong, Luochuan and Xifeng consistently showed an upward trend. The heating degrees per 10 a were

收稿日期:2019-07-02 接受日期:2019-10-10

基金项目:陕西省气象局重点科研项目(2016Z2)

作者简介:刘璐,女,硕士,高级工程师,主要从事气候变化对果业影响研究。Tel:13772055200,E-mail:liululu128@163.com

0.86, 0.01 and 0.47 °C, respectively. The heating degrees per 10 a in spring (March-May) were 1.12, 0.29 and 0.83 °C, which were higher than the annual average temperature and other seasonal heating rates. Except for Wanrong's decreasing trend in summer and winter, the annual and seasonal precipitation increased, with annual precipitation increasing by 13.1 mm/10 a, 27.2 mm/10 a and 68.3 mm/10 a, respectively. (2) The phenophase dates in spring, autumn and the length of the two growth stages were gradually delayed, advanced and shortened from the eastern to the western region, and the spring phenophase dates showed an advance trend, the autumn phenophase dates showed a postponed trend, as well as the FG and TG showed an extended trend, generally. (3) The effect of mean temperature on the spring phenophase dates in the main apple planting areas of the Loess Plateau was significantly greater than that on the autumn dates, and it had negative effects on the spring phenophase dates and positive effects on the autumn phenophase dates. Among them, the influence period of the mean temperature on the phenophase dates in spring was concentrated from the beginning of January to the corresponding phenophase dates, a 1 °C increase during this period, and BO, LU and FF would be significantly advanced by 2.59 to 3.78 d, 2.20 to 3.03 d and 3.44 to 4.15 d, respectively; the effect of daily mean temperature on autumn phenophase dates was mainly reflected in LF, and the influencing periods were relatively shorter than those on spring phenophase dates, a 1 °C increase in the influencing time periods, which may delay 3.58 to 7.77 days in LF. (4) The effect of precipitation on the phenophase dates of apple was significantly less than that of mean temperature, and the influence characteristics were more complex. It was found that the precipitation only affected the phenophase dates of Wanrong and Xifeng apples, which mainly affected autumn phenophase dates, and a 1mm change during the critical period may induce an advancement of 0.07 to 0.40 days in LC and delay 0.12 to 0.55 day in LF. (5) Climate changes had the greatest impact on the development of apple industry in Wanrong, followed by Xifeng and Luochuan. 【Conclusion】 (1) The climate of the main apple growing areas in the Loess Plateau showed a characteristics of warm and humid change. (2) Temperature had a greater impact on phenophase dates than precipitation, and temperature mainly affected the spring phenophase dates, while the precipitation mainly affected the autumn phenophase dates. (3) In each phenology, phenophase dates in BO, LU and FF were mainly affected by temperature, LC was mainly affected by precipitation, and LF was affected by temperature and precipitation, while FM had no significant correlation with any period of temperature and precipitation. (4) Among the three main apple growing areas, growers in Wanrong and Xifeng production areas should pay more attention to orchard microclimate regulation and production technology improvement to cope with the adverse effects of climate changes on industrial development.

Key words: Apple; The Loess Plateau; Phenophase; Climate change; Partial least squares regression

植物物候是指植物受环境因素影响而出现的以年为周期的自然现象^[1-2],大量研究表明,气候变化对植物物候的影响非常显著^[3-7],而对农作物而言,物候期的变化不仅会改变作物的生长周期,同时还会改变作物在生长过程中对光、温、水资源及其他营养物质的吸收和利用,进而对作物产量和品质产生影响^[8-12]。因此开展气候变化对农作物物候的影响研究,对评估气候变化对农作物的生长、发育、分布与适应有着重要意义。

苹果是我国重要农作物之一,在我国果业生产

中占有举足轻重的地位^[13]。黄土高原苹果产区是我国苹果四大产区中,种植面积和产量最大的地区,同时也是受气候变化影响最显著的地区。研究发现,1961年以来,该地区年平均气温每10 a增加0.31 °C,气候变暖强度高于全国平均水平^[14],气候变化已成为该地区重大环境问题之一,并对苹果产业发展带来巨大挑战^[15]。

目前国外学者已开展了关于气候变化对苹果物候期影响的相关研究,Wolfe等^[16]、Chmielewski等^[17]和Grabs等^[18]研究发现,受气候变暖影响,美国

东北部地区、德国以及南非苹果均呈显著提前趋势,且花期提前与春季温度间存在显著负相关关系。国内科研工作者对甘肃平凉及西峰1971—2008年的苹果物候变化趋势,以及春季地温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温与物候期的关系开展过相关研究^[19-21],还没有针对黄土高原或全国其他地区苹果物候期的变化特征,以及各物候期对气温及降水等气候要素的响应的相关报道。此外,国内对气候变化对农作物物候期的影响研究,其方法主要为旬、月、季气候要素与物候期发生日期的时间序列的相关性分析^[22-24],该方法虽然简单易行,但因为作物物候期的发生日期并不一定由前期完整旬、月气候因子所驱动,所以误差较大^[25]。鉴于此,笔者拟从扩大研究地区和改进研究方法两方面,开展气候变化对黄土高原苹果主产地物候期的影响研究,分析该地区气候要素和物候期变化特征,明确气候变化对各物候期的关键影响时段和影响强度,以期为指导该地区苹果产业科学应对气候变化,提供理论依据。

1 资料和方法

1.1 研究区域概况

黄土高原苹果产区位于我国中西部地区,是全国四大苹果产区中唯一一个全部符合苹果生长七项气候指标的优生区,经过几十年的集中发展,已

经成为我国也是世界上规模最大的苹果优势产区^[26]。本研究综合产业规模、气候条件、生产水平以及物候期资料等因素,在东部、中部和西部选取万荣、洛川和西峰作为黄土高原苹果主产地代表站,开展相关研究。

1.2 研究数据及处理

以各主产地种植面积最大,种植时间最长的红富士苹果为研究对象,选取洛川和西峰1994—2018年、万荣1996—2018年芽开放期(叶芽)、展叶始期、始花期、可采成熟期、叶变色末期和落叶末期为指示物候期;并根据苹果生育特点,增加果实生长发育期和果树生长季进行研究。其中,果实生长发育期指苹果花子房授精后到苹果成熟期(因苹果花期时长约7 d左右,故子房授精时间定为始花期后8 d);果树生长季指展叶始期至叶变色末期^[22]。物候期数据来源于洛川、西峰和万荣县气象局农业气象观测记录,观测地点为气象局附近生产水平和规模具有代表性的果园,其果园地理及栽植模式详见表1。此外,将逐年物候期出现日期转化为日序(DOY),以得到其时间序列,用于计算。

气象数据选取各地逐日日平均气温和日降水量,作为代表气候变化的气候要素开展研究,该数据取自各地气象局的实测值,来源于国家气象信息中心。

表1 黄土高原苹果主产区研究站点地理及栽植模式

Table 1 The geographic information and cultivation mode of the study stations in the Loess Plateau in China

产地 Planting area	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude/m	树龄 Tree age/a	砧木 Rootstock	灌溉条件 Irrigation condition
万荣 Wanrong	110°50'	35°24'	589.6	32	山定子 <i>Malus baccata</i>	灌渠水 Channel water
洛川 Luochuan	109°50'	35°82'	1159.8	36	新疆野苹果 <i>Malus sieversii</i>	无 No
西峰 Xifeng	107°63'	35°73'	1421.0	34	新疆野苹果 <i>Malus sieversii</i>	无 No

1.3 研究方法

本研究采用线性拟合方法分析各地气候要素、物候期和生长阶段的年际变化趋势,并利用偏最小二乘回归法(Partial Least Squares regression, PLS)对苹果物候期发生时间与逐日气象要素进行相关分析。该方法对自变量高度相关或自变量数目显著高于因变量的情况下特别适用,并已在德国樱桃等作物物候期对气候变化的响应研究中得到了很好的应用^[27-29]。PLS分析主要产生变量重要性值VIP和标准化模型系数2个结果,其中

VIP值反映自变量变化对因变量(物候期)影响的显著性,一般以0.8作为显著性的判定标准;标准化模型系数则表明影响的方向,正标准化模型系数代表气象因子升高会推迟物候期,负标准化模型系数则表明气象因子升高对物候期有提前作用。在本研究中,自变量为逐日日平均气温或日降水量,其起止时间为所分析的物候期平均出现月后的第一个月份的初日,至平均出现月当月的终日,因变量为物候期的发生日期。本研究PLS的数据分析均在R语言中进行。

2 结果与分析

2.1 气候要素空间分布特征及变化趋势

1994—2018年,黄土高原苹果主产地年、季平均气温由东向西呈逐步降低的分布特征,万荣年平均气温最高,为13.3℃,洛川和西峰年平均气温较接近,分别为10.4℃和9.1℃;三地年平均降水量分别为490、597、537 mm,且洛川各季降水量均显著大于万荣和西峰(图1)。25年来,万荣、洛川和西峰年平均气温均呈上升趋势,升温速率分别为每10 a升

高0.86($p < 0.001$)、0.01、0.47℃($p < 0.01$),且春季(3—5月)升温速率分别达每10 a升高1.12、($p < 0.001$)、0.29、0.83℃($p < 0.01$),大于年平均气温和其他季节升温速率。各地间,万荣和西峰年、季平均气温均为升高趋势,而洛川夏季和冬季平均气温为降低趋势(未通过显著性检验);降水量除万荣夏季和冬季为减少趋势外,各地年、季降水量均为增加趋势,其中三地年降水增加速率分别为每10 a增加13.1、27.2、68.3 mm($p < 0.05$)。总体上,黄土高原苹果主产地气候呈现出暖湿变化特征。

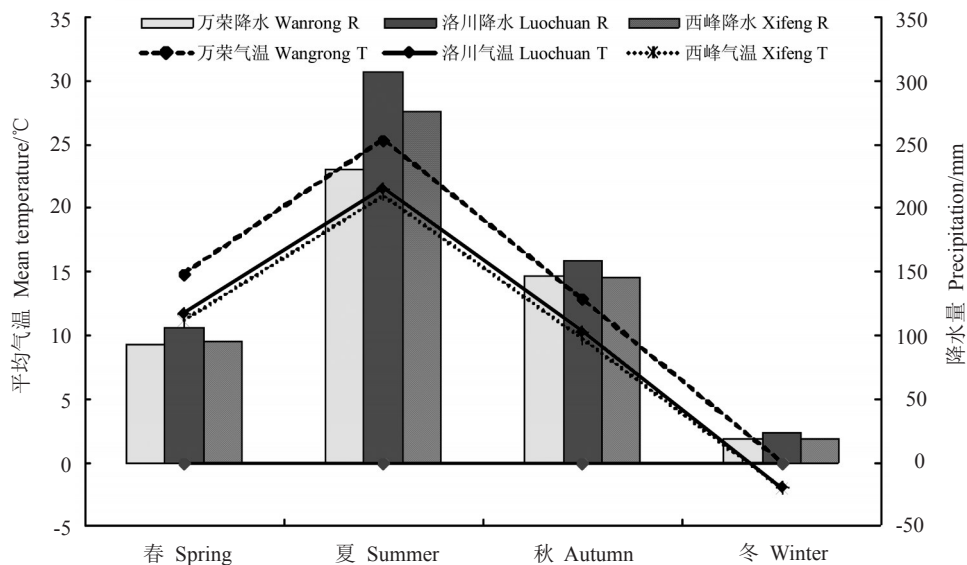


图1 黄土高原苹果主产地各季节平均气温和降水量分布情况

Fig. 1 Mean temperature and total precipitation in different seasons of the main apple planting areas in the Loess Plateau in China

2.2 苹果物候期及生长阶段长度分布特征及变化趋势

如表2所示,黄土高原苹果主产地芽开放期、展叶始期、始花期、可采成熟期、叶变色末期和落叶末期分别集中在86~92 d、91~98 d、99~110 d、281~292 d、304~319 d和325~331 d。各物候期中,叶变色末期在各地间的差异最大,达15 d;芽开放期和落叶末期的差异最小,为6 d。各主产地间,万荣苹果春季物候期出现最早,可采成熟期和叶变色末期出现最晚,所以果实生长发育期和果树生长季最长,分别达186 d和228 d;西峰春季物候期出现最晚,可采成熟期和叶变色末期出现最早,所以果实生长发育期和果树生长季长度最短,为165 d和206 d。总体上,黄土高原苹果春季物候期、秋季物候期和主要生长

阶段长度由东部产区向西部产区逐渐推迟、提前和缩短。

由图2可见,黄土高原苹果主产地各物候期和主要生长阶段变化趋势略有不同,整体上,春季物候期整体呈提前趋势,秋季物候期呈推迟趋势,果实生长发育期和果树生长季呈延长趋势。春季物候期中,始花期呈整体提前趋势,平均每10 a提前天数由大到小分别为西峰(-4.29 d, $p < 0.05$)、万荣(-2.70 d)和洛川(-2.35 d);秋季物候期中,落叶末期在三地均呈推迟趋势,推迟速率从大到小依次为万荣、洛川和西峰。受关键物候期变化趋势影响,各主产地中,万荣和西峰的果实生长发育期和果树生长季均呈延长趋势,而洛川果实生长发育期呈延长趋势,果树生长季呈缩短趋势。

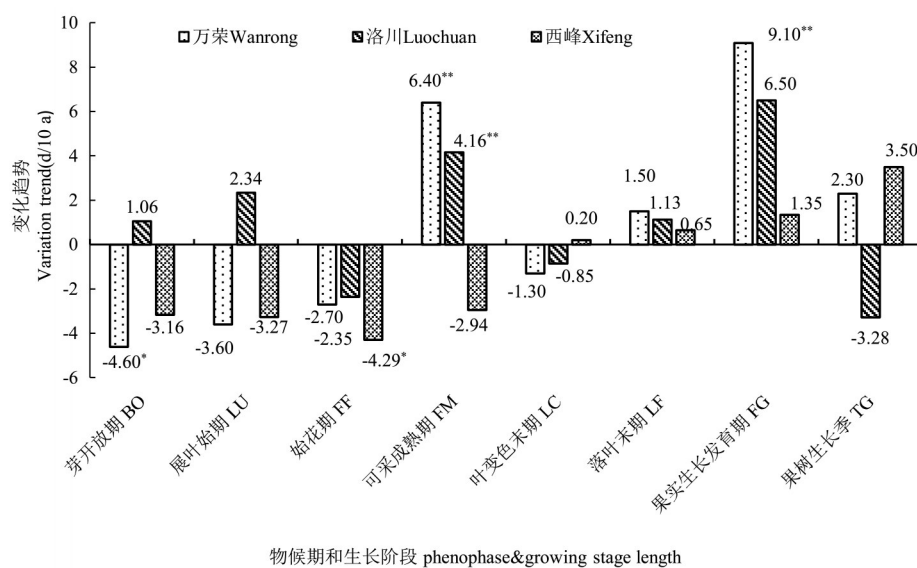
表2 黄土高原苹果主产地各物候期平均出现时间及生长阶段长度

Table 2 Average date of different phenophases and length of the two growth stages in the main apple planting areas in the Loess Plateau in China

产地 Planting area	芽开放期 BO(DOY)	展叶始期 LU(DOY)	始花期 FF(DOY)	可采成熟期 FM(DOY)	叶变色末期 LC(DOY)	落叶末期 LF(DOY)	果实生长发育期 FG/d	果树生长季 TG/d
万荣 Wanrong	86	91	99	292	319	328	186	228
洛川 Luochuan	88	93	107	283	308	331	169	214
西峰 Xifeng	92	98	110	281	304	325	165	206

注:BO、LU、FF、FM、LC、LF、FG 和 TG 分别代表芽开放期、展叶始期、始花期、可采成熟期、叶变色末期、落叶末期、果实生长发育期和果树生长季。

Note: BO, LU, FF, FM, LC, LF, FG and TG represent buds opening, first leaf unfolding, first flowering, fruit maturing, end of leaf coloring, end of leaf fall, the length of fruit growing period and the length of tree growing season, respectively.



物候期和生长阶段 phenophase&growing stage length

*和**分别代表 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 。下同。

* and ** indicate significant difference at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. The same below.

图2 黄土高原苹果主产地物候期和生长阶段变化趋势

Fig. 2 Linear trends of phenophases and length of the two growth stages of the main apple planting areas in the Loess Plateau in China

2.3 气候要素对苹果物候期的影响

2.3.1 平均气温对苹果物候期的影响特征 如图3所示,平均气温对西峰春季物候期较秋季物候期的影响时段明显清晰和连续。以展叶始期和可采成熟期为例,图3-A中,1月5日至4月2日(展叶始期平均出现日期)间,标准化模型系数大都为负且VIP值高于0.8,表明此时段温度升高使苹果展叶始期提前,虽然此时段内包含一段VIP值为正且高于0.8的时期,但因其影响时间较短,且经计算,整段时间内平均气温与展叶始期呈显著负相关关系,故本研究将1月5日至4月2日作为气温变化对西峰展叶始期具有负影响的关键影响时段;从图3-C中可见,气温

对可采成熟期的影响时段较分散,呈正影响和负影响的时段频繁交替出现,且经计算,各时段内平均气温与可采成熟期的发生时间的相关性均不能通过显著性水为0.05的检验,故本研究认为西峰的气温变化对可采成熟期没有显著影响。利用上述方法,计算得到日平均气温对各主产地各物候期的影响特征(表3)。

如表3所示,平均气温对黄土高原苹果主产地春季物候期的影响显著大于对秋季物候期的影响,且对春季物候期均呈负影响,对秋季物候期均呈正影响。其中,平均气温对春季物候期的影响时段集中于1月初至相应物候期发生前,该时段平均气温

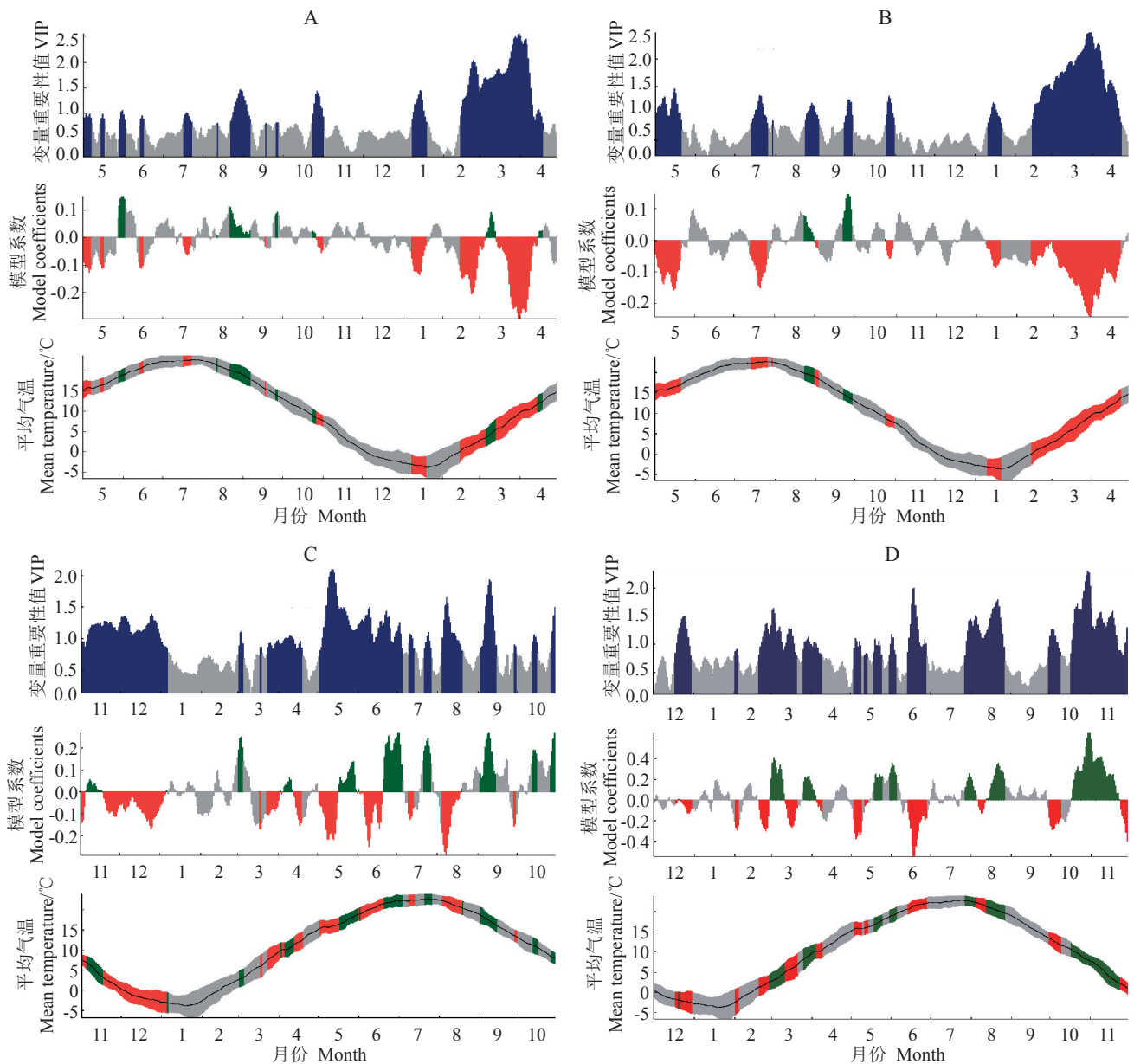


图3 西峰展叶始期(A)、始花期(B)、可采成熟期(C)和落叶末期(D)与平均气温PLS回归分析
 Fig. 3 Results of PLS regression correlating LU(A), FF(B), FM(C) and LF(D) for apple at Xifeng with daily mean temperatures

每上升1℃,芽开放期、展叶始期和始花期将依次显著提前2.59~3.78 d、2.20~3.03 d和3.44~4.15 d。日平均气温对秋季物候期的影响主要体现在落叶末期,对各地叶变色末期均无显著影响,且仅对万荣苹果可采成熟期有影响。日平均气温对落叶末期的关键影响时段,较对春季物候期的影响时段短且分散,关键影响时段内平均气温每上升1℃,万荣、洛川和西峰的落叶末期将显著推迟3.58、7.77、4.03 d。

2.3.2 降水量对苹果物候期的影响特征 降水量对黄土高原苹果主产地各物候期的影响数量较气温明

显减少,且影响特征较气温复杂。分析发现,在各主产地间,降水量仅对万荣芽开放期、始花期、叶变色末期和落叶末期,以及西峰的叶变色末期和落叶末期有显著影响,对洛川各物候期均无显著影响。以万荣为例,上年12月29日至当年1月26日降水量与芽开放期呈显著负相关关系,期间降水量每增加1 mm,芽开放期将提前0.51 d;3月12日至4月5日降水量与始花期呈显著正相关关系,期间降水量每增加1 mm,始花期将推迟0.20 d;2月1日至3月17日降水量与叶变色末期呈显著负相关关系,期间降水量每增加1 mm,叶变色末期将提前0.40 d;5月14日

表3 黄土高原苹果主产地平均气温对苹果物候期的关键影响时段和相关系数

Table 3 The influencing time periods and the correlation coefficient of daily average temperature on apple phenological dates in the main apple planting areas in the Loess Plateau in China

	万荣 Wanrong		洛川 Luochuan		西峰 Xifeng	
	影响时段 The influencing time periods	相关系数 The correlation coefficient	影响时段 The influencing time periods	相关系数 The correlation coefficient	影响时段 The influencing time periods	相关系数 The correlation coefficient
芽开放期 BO	12月31日—3月26日 Dec. 31 to Mar. 26	-3.78**	-	-	1月5日—4月2日 Jan. 5 to Apr. 2	-3.44**
展叶始期 FU	1月7日—4月1日 Jan. 7 to Apr. 1	-3.63**	1月7日—4月2日 Jan. 7 to Apr. 2	-2.20*	1月8日—4月8日 Jan. 8 to Apr. 8	-3.52**
始花期 FF	1月11日—4月9日 Jan. 11 to Apr. 9	-2.59**	1月16日—4月14日 Jan. 16 to Apr. 14	-3.03**	1月11日—4月20日 Jan. 11 to Apr. 20	-4.15**
可采成熟期 FM	9月8日—10月19日 Sept. 8 to Oct. 19	4.21**	-	-	-	-
叶变色末期 LC	-	-	-	-	-	-
落叶末期 LF	11月3日—11月24日 Nov. 3 to Nov. 24	3.58*	9月1日—10月6日 Sept. 1 to Oct. 6	7.77*	10月17日—11月21日 Oct. 17 to Nov. 21	4.03*

注:-. 平均气温对该物候期无显著影响。

Note:-. Temperature has no significant effect on apple phenological dates.

至7月19日降水量与落叶末期呈显著正相关关系,期间降水量每增加1 mm,落叶末期将推迟0.12 d。降水量对西峰叶变色末期(4月3日—5月21日, $-0.07 \text{ d} \cdot \text{mm}^{-1}$)和落叶末期(3月6日—6月12日, $0.55 \text{ d} \cdot \text{mm}^{-1}$)的影响特征与万荣基本一致。

3 讨 论

近25年来,黄土高原苹果主产地气温升高、降水增多,在该气候变化背景下,各主产地各物候期变化趋势略有不同,整体上春季物候期呈提前趋势,秋季物候期呈推迟趋势,果实生长发育期和果树生长季呈延长趋势。其中,始花期和落叶末期变化趋势最为一致,平均分别为每10 a提前3.11 d和推迟1.09 d,这与全国以及黄土高原落叶果树物候期变化趋势基本一致^[25,30],但小于前人对甘肃苹果始花期和落叶期的变化趋势的研究结果(4.7、2.0 d)^[19-21],其原因主要与研究时段气候要素变化,尤其是降水量呈增多的变化趋势有关。

气温和降水要素对黄土高原苹果各物候期的影响存在明显差异。平均气温对各物候期的影响时段均为物候期前临近的一整段时间,且与春季物候期均呈负相关关系,与秋季物候期均呈正相关关系,这与前人的研究结论大致相同^[19-21,25],但本研究发现平均气温影响春季物候期的影响时段集中于1月初至相应物候期发生前,显著长于前人的研究结果,这主要与研究对象、样本时段和研究方法不同

有关。降水量对物候期的影响时段大多为物候期发生前相隔较长的一段时间,尤其是对秋季物候期,其影响时段集中在春季或夏季,且降水对春季或秋季不同物候期的影响关系不统一,这在前人的研究中鲜有报道,这可能与不同时期降水对果树生长,进而对苹果叶片生理进程的影响不同有关,但其影响机制还有待深入研究。

气候变化对黄土高原各苹果主产地物候期的影响程度不同。其中万荣苹果物候期与平均气温和降水量的相关关系最高,尤其是与降水量变化的相关程度,显著高于洛川和西峰,说明气候变化对万荣苹果生长影响最大,其次是西峰,最后是洛川。这一方面可能与各地气候条件不同有关,另一方面也可能与各地生产管理方式对果树生长发育的影响有关^[31]。鉴于气候变化对各地物候期的影响程度的不同,万荣和西峰产区相较于洛川,更应重视果园小气候调节以及生产管理技术改进等工作,以应对气候变化对产业发展的不利影响。此外,鉴于气候变化对黄土高原苹果物候期的影响,建议各地新建果园通过适当提高果园海拔、加大果园生草等物理方式,以减轻气候变暖对苹果物候期,尤其是开花期的影响,从而降低苹果花期冻害的风险,同时,各地应加大早、中熟等不同熟制苹果品种的种植面积,以提高对热量资源的利用效率,更加科学有效地应对气候变暖对苹果产业的影响。

本研究利用偏最小二乘回归法,对日尺度气候

数据与苹果物候期进行了相关分析,明确了气候变化背景下,平均气温和降水量对各主产地苹果物候期的影响特征,在时间精度上较国内大部分相关研究有所提升,可为开展气候变化对其他地区和作物物候期的影响研究,提供技术参考。

4 结 论

近25年来,黄土高原苹果主产地气候呈暖湿发展趋势,春季物候期大体呈提前趋势,秋季物候期呈推迟趋势,果实生长发育期和果树生长季呈延长趋势。平均气温对物候期的影响大于降水对物候期的影响,且气温对春季物候期的影响较大,而降水对秋季物候期的较大。各物候期中,芽开放期、展叶始期和始花期主要受气温影响,叶变色末期主要受降水影响,落叶末期受温度和降水共同影响,而可采成熟期与气温和降水均无显著相关关系。气候变化对三个主产地苹果物候期的影响程度,从大到小依次为万荣西峰和洛川。

参考文献 References:

- [1] 罗国春. 果树词典[M]. 北京:中国农业出版社,2007.
LUO Guochun. Fruit tree dictionary [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007.
- [2] 邓晨晖,白红英,翟丹平,高山,黄晓月,孟清,贺映娜. 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 Chenhui, BAI Hongying, ZHAI Danping, GAO Shan, HUANG Xiaoyue, MENG Qing, HE Yingna. 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.
- [3] 陆佩玲,于强,贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2006,26(3): 923-929.
LU Peiling, YU Qiang, HE Qingtang. Responses of plant phenology to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 923-929.
- [4] 王连喜,陈怀亮,李琪,余卫东. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报, 2010,30(2): 447-454.
WANG Lianxi, CHEN Huailiang, LI Qi, YU Weidong. Research advances in plant phenology and climate[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(2): 447-454.
- [5] 丁抗抗,高庆先,李辑. 我国植物物候变化及对气候变化的响应综述[J]. 安徽农业科学, 2010,38(14): 7414-7417.
DING Kangkang, GAO Qingxian, LI Ji. Review on the plant phenology changes in China and the responses to the climate changes[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38 (14): 7414-7417.
- [6] 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 Rongshuo, FU Di. The pace of climate change and its impacts on phenology in eastern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018,42(4): 729-740.
- [7] 郑景云,葛全胜,郝志新,仲舒颖,马翔. 过去150年长三角地区的春季物候变化[J]. 地理学报, 2012,67(1): 45-52.
ZHENG Jingyun, GE Quansheng, HAO Zhixin, ZHONG Shuying, MA Xiang. Changes of spring phenology in Yangtze River Delta Region in the past 150 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(1): 45-52.
- [8] TAO F L, YOKOZAWA M, XU Y L, HAYASHI Y, ZHANG Z. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 138: 82-92.
- [9] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015,38(1): 80-94.
ZHOU Guangsheng. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2015,38(1): 80-94.
- [10] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015,26(1): 1-11.
GUO Jianping. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015,26(1): 1-11.
- [11] 唐国平,李秀彬, FISCHER G T, SYLVIA P. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 地理学报, 2000,55(2): 129-138.
TANG Guoping, LI Xiubin, FISCHER G T, SYLVIA P. Climate change and its impacts on China's agriculture [J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(2): 129-138.
- [12] 刘玉洁,陈巧敏,葛全胜,戴君虎. 气候变化背景下1981~2010中国小麦物候变化时空分异[J]. 中国科学:地球科学, 2018,48(7): 888-898.
LIU Yujie, CHEN Qiaomin, GE Quansheng, DAI Junhu. Spatio-temporal differentiation of changes in wheat phenology in China under climate change from 1981 to 2010[J]. Science China Earth Sciences, 2018,48(7): 888-898.
- [13] 程存刚,赵德英. 新形势下我国苹果产业的发展定位与趋势[J]. 中国果树, 2018(1): 1-7.
CHENG Cungang, ZHAO Deying. Development orientation and trend of the apple industry under the new situation [J]. China Fruits, 2018(1): 1-7.
- [14] 晏利斌. 1961-2014年黄土高原气温和降水变化趋势[J]. 地球环境学报, 2015,6(5): 276-282.
YAN Libin. Characteristics of temperature and precipitation on the Loess Plateau from 1961 to 2014[J]. Journal of Earth Environment, 2015,6(5): 276-282.
- [15] GUO L, WANG J H, LI M J, LIU L, XU J C, CHENG J M, GANG C C, YU Q, CHEN J, PENG C H, LUEDELING E. Dis-

- tribution margins as natural laboratories to infer species' flowering responses to climate warming and implications for frost risk [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 299-307.
- [16] WOLFE D W, SCHWARTZ M D, LAKSO A N, OTSUKI Y, POOL P M. Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 49: 303-309.
- [17] CHMIELEWSKI F M, MULLER A, BRUNS S. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and fields crops in Germany, 1961- 2000[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121:69-78.
- [18] GRABS S, CRAPARO A. Advance of apple and pear tree full bloom dates in response to climate change in the southwestern Cape, South Africa: 1973-2009[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151:406-413.
- [19] 樊晓春, 王位泰, 杨晓华, 吴颖娟. 六盘山东西两侧苹果物候期对气候变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 50-54.
FAN Xiaochun, WANG Weitai, YANG Xiaohua, WU Yingjuan. Phenological response of apple on the east & west side of Liupan Mountain to climate change[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 50-54.
- [20] 蒲金涌, 姚小英, 姚晓红, 许彦平, 王位泰. 气候变暖对甘肃黄土高原苹果物候期及生长的影响[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(2):181-183.
PU Jinyong, YAO Xiaoying, YAO Xiaohong, XU Yanping, WANG Weitai. Impacts of climate warming on phenological period and growth of apple tree in Loess Plateau of Gansu province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(2): 181-183.
- [21] 杨小利, 江广胜. 陇东黄土高原典型站苹果生长对气候变化的响应[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(1): 74-77.
YANG Xiaoli, JIANG Guangsheng. Responses of apple trees growth to climate change in typical stations of Longdong loess plateau[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(1): 74-77.
- [22] 高祺, 陈静, 阎访, 赵卫亮. 河北省草本植物物候特征及其对气候变暖的响应[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 600-605.
GAO Qi, CHEN Jing, YAN Fang, ZHAO Weiliang. Phenological characteristics of herbaceous plants in Hebei Province and their responses to climate warming[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(3): 600-605 .
- [23] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年. 民勤荒漠植被对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1210-1218.
CHANG Zhaofeng, HAN Fugui, ZHONG Shengnian. Responses of vegetations in Minqin desert area to climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1210-1218.
- [24] 白洁, 葛全胜, 戴君虎. 贵阳木本植物物候对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 2009, 28(6):1606-1614.
BAI Jie, GE Quansheng, DAI Junhu. Response of woody plant phenophases to climate change for recent 30 years in Guiyang [J]. *Geographical Research*, 2009, 28(6):1606-1614.
- [25] 陈效迷, 庞程, 徐琳, 李静, 张晴华, 尉杨平. 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 Xiaoci, PANG Cheng, XU Lin, LI Jing, ZHANG Qinghua, WEI Yangping. Spatiotemporal response of *Salix matsudana*'s phenophases to climate change in China's temperate zone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3625-3635.
- [26] 张宏. 黄土高原是我国优质苹果核心产区之我见[J]. *中国果树*, 2019(1): 114-116.
ZHANG Hong. My opinion on the Loess Plateau as the core production area of high quality apple in China[J]. *China Fruits*, 2019 (1): 114-116.
- [27] GUO L, DAI J, RANJITKAR S, XU J, LUEDELING E. Response of chestnut phenology in China to climate variation and change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 180: 164-172.
- [28] YU H, LUEDELING E, XU J. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the national academy of sciences USA*, 2010, 107: 22515-22516.
- [29] LUEDELING E, KUNZ A, BLANKE M M. Identification of chilling and heat requirements of cherry trees-a statistical approach[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57: 679-689.
- [30] 雷俊, 姚玉璧, 孙润, 郭继平, 牛海洋. 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 Jun, YAO Yubi, SUN Run, GUO Jiping, NIU Haiyang. 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.
- [31] 梅立新, 李会科. 渭北旱地果园生草小气候效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 187-192.
MEI Lixin, LI Huike. Effects of interplanting different herbage on microclimate in apple orchards in the area of Weibei plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 187-192.