

# 甘肃陇东苹果春季生长对终霜冻变化的响应特征

王位泰<sup>1,2</sup>, 张天峰<sup>2</sup>, 蒲金涌<sup>3</sup>, 焦美龄<sup>2</sup>, 车向军<sup>2</sup> 黄 斌<sup>2</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 庆阳市气象局, 甘肃 西峰 745000; 3. 天水农业气象试验站, 甘肃 天水 741020)

**摘 要:** 使用位于黄土高原中部的甘肃西峰农业气象试验站苹果观测资料和当地平行气象资料, 分析了春季终霜冻和苹果生长发育对气候变暖的响应特征。结果表明: 1984 年以来, 春季终霜日期提前的气候趋势比较明显, 速率为  $3.2 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 终霜日地面最低温度表现为波动变化, 个别年份出现反常的重霜冻灾害; 终霜冻过程的持续日数表现出阶段性增加规律, 地面最低温度负积温在反常年份 2005—2006 年有增强变化; 1984 年以来苹果开花盛期以  $5.9 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$  的速率极显著提前, 1998 年以来提前趋势更加明显, 1998—2012 年平均开花盛期比 1984—1997 年提前 10 d。气候持续变暖, 苹果开花盛期提前的速率明显大于终霜日提前的速率, 表明苹果花蕾出现至开花盛期遭受春季终霜冻危害的气候风险在增大。

**关键词:** 春季; 终霜冻; 苹果生长; 响应特征

中图分类号: S661.101 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)04-0227-04

## The response characteristics of apple growth in spring to variation of latest frost in east Gansu Province

WANG Wei-tai<sup>1,2</sup>, ZHANG Tian-feng<sup>2</sup>, PU Jin-yong<sup>3</sup>, JIAO Mei-ling<sup>2</sup>, CHE Xiang-jun<sup>2</sup>, HUANG Bin<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration / Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of China Meteorological Administration / Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Meteorology Bureau of Qingyang City, Xifeng, Gansu 745000, China;

3. The Agro-meteorological Experiment Station of Tianshui, Tianshui, Gansu 741020, China)

**Abstract:** Based on the meteorological data and the experimental data of apple at Agro-meteorological Experiment Station of Xifeng which located in the middle part of Loess Plateau, the response characteristics of latest frost and apple growth in spring to climate warming were analyzed. The results showed that the date of latest frost advanced obviously in spring by 3.2 days every ten years. But the variation range of minimum temperature on ground surface in latest frost days became large and the abnormally serious frost disasters happened in a few years. The lasting days of latest forest process showed a periodic increase trend and the negative accumulated minimum temperature on ground surface increased in the abnormal years of 2005 and 2006. The full bloom stage of apple advanced by 5.9 days every ten years since 1984 at  $P < 0.001$  probability level, and it advanced even more remarkably after 1998. The full bloom stage during 1998 to 2012 was 10 days earlier than that during 1984 to 1997. Along with the development of climate warming, the advancing rate of full bloom stage was obviously more than that of latest forest date. Therefore, the risk of freezing injury during squaring to full bloom stage of apple was increasing.

**Keywords:** spring; latest frost; growth of apple; response characteristic

植物生物体蛋白质的结构对生态环境的下限温度敏感, 随着春季温度的升高, 植物在开花期生长过程加快, 如遇低温很易受到冻害<sup>[1]</sup>; 雅鲁藏布江中游流域初终霜冻的异常偏早或偏迟和各年代际变化对

气候变暖存在不同的响应特征<sup>[2]</sup>; 国外研究发现 20 世纪北欧的霜冻日数减少<sup>[3]</sup>, 加拿大也有类似事实<sup>[4]</sup>, 美国地区霜冻日数明显减少, 变率存在区域性差异<sup>[5]</sup>, 已有研究成果主要反映了春季霜冻指标和

气候变化规律<sup>[6-7]</sup>。

位于黄土高原中部的甘肃陇东黄土高原处于半湿润和半干旱过渡气候带,是气候变化敏感区域。近年来,部分研究揭示了该地域作物生育期对气候变化的响应<sup>[8-9]</sup>,蒲金涌等探讨了气候变暖对苹果春季发育期的影响<sup>[10]</sup>,但是对于气候变化背景下苹果春季发育期与终霜冻的响应规律及气候风险趋势特征的综合研究鲜有探讨。本文旨在将春季终霜冻与苹果对气候变暖的响应作为一个整体进行综合分析,把春季终霜冻与苹果的关键生长发育期结合起来,探讨二者对气候变暖响应的不同规律性和相互之间的关系,达到较客观地把握气候变暖对春季终霜冻和苹果生长发育的利弊影响及其气候风险趋势,为苹果生产趋利避害提供一定的科学依据。

## 1 资料来源与分析方法

### 1.1 资料来源

所用苹果 (*Malus pumila*) 发育期和生长基本资料为 1984—2012 年西峰国家一级农业气象试验站观测的试验田生长资料,均根据国家气象局颁布的《农业气象观测规范》<sup>[11]</sup> 规定要求进行观测;所用 1984—2012 年 4—5 月春季终霜冻气候资料均为紧邻试验地 2 m 处西峰国家基准气候站平行气象观测资料,苹果观测地段与气象观测场相距 1 km,属于相同气象观测环境。

### 1.2 分析方法

苹果发育期观测是植株出现  $\geq 50\%$  发育特征的发育普遍期。

使用的主要方法有一元回归、多项式系数滑动平均、气候趋势系数<sup>[12-13]</sup>等;有关图表用 Excel 2003 软件绘制和统计。

气候趋势系数:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (i - \bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}} \quad (1)$$

其中,  $n$  为样本资料的年数,  $x_i$  为第  $i$  年要素值,  $\bar{x}$  为样本平均值,  $\bar{i} = (n + 1)/2$ ,  $r$  的正(负)值表示该要素在  $n$  年内的线性增加(降低)趋势,用于定量分析气候趋势变化强弱的时间分布特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 终霜冻的变化趋势分析

2.1.1 终霜日期变化 计算得到 1984—2012 年终霜日期的气候趋势系数值为  $-0.4131$ ,终霜日期逐年变化为提前趋势 ( $P < 0.05$ ),变化速率为提前  $3.2 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ,表明春季终霜期随气候变暖提前结束的可能性为  $80\%$ ,推迟或出现在平均日期的可能性仍有  $20\%$ 。统计得到,当地终霜日期距平逐年变化的 3 次曲线回归方程(见图 1)为:

$$y = -0.0013x^3 + 0.0375x^2 - 0.3142x + 1.9867 \quad (R^2 = 0.0677, P < 0.20) \quad (2)$$

说明终霜日期距平为波动变化的趋势。有些年份如 1990、1991、1994、1995、2003、2004 年终霜日明显推迟,2004 年甚至比平均日推迟了 14 d,这是气候总体变暖背景下发生的终霜日期阶段性推迟的变化特点,应重视甘肃陇东地区苹果花蕾及花期遭遇冻害的不利影响因素。

2.1.2 终霜日强度 为客观揭示终霜冻日强度的变化规律,从 1984—2012 年终霜冻日地面最低温度的逐年变化分析得到(图 1),终霜日地面最低温度趋势表现为波动变化,但应注意 1996 年和 2005 年终霜日地面最低温度降至  $-3.7^\circ\text{C}$  和  $-3.5^\circ\text{C}$ 。在气候变暖大背景下应注意防御反常年份的强终霜冻灾害影响。

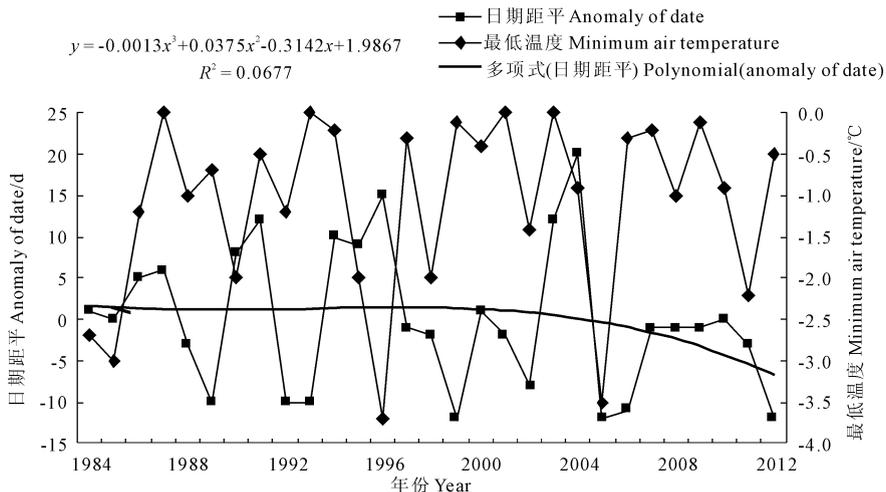


图 1 终霜日期距平与最低温度逐年变化曲线

Fig. 1 Variation curve of anomaly of latest frost date and minimum air temperature from 1984 to 2012

2.1.3 终霜过程持续日数和负积温的变化 对春季终霜冻的分析如果只关注终霜日期与地面最低温度尚不能较好地反映春季终霜冻害对苹果生长发育的不利影响,每一年终霜过程持续的天数和冻害的程度是不相同的,以终霜期的早晚、霜冻持续日数和期间负积温来综合评价终霜冻害程度相对比较客观准确。如图2所示,终霜冻持续日数的线性趋势未能通过显著性检验,但仍表现有一定的线性增加趋势,应重视由于终霜冻过程持续日数的增加可能造成对苹果冻害的加重影响问题。

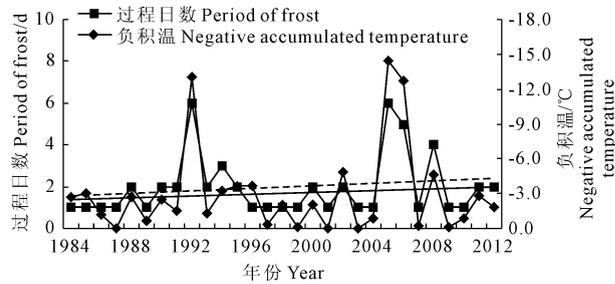


图2 西峰终霜过程日数与负积温变化曲线

Fig.2 Variation curve of latest frost period and negative accumulated temperature in Xifeng

终霜冻过程地面最低温度负积温逐年变化曲线其线性趋势不能通过显著性检验,但仍表现出一定的增加趋势,应特别注意气候变暖大背景下的强终霜冻极端气候事件即反常年份的异常冻害影响,

2005—2006年连续2a发生的终霜冻过程,持续5~6d,且负积温达到-12.7~-14.4°C·d,距离苹果盛花期2~6d,与苹果初花期相迭加,实地调查发现:苹果花蕊受冻明显,后期落果率明显增大;而此前仅有1992年和1994年出现过单年型终霜过程日数2~6d,负积温-7.0~-13.0°C·d的年份,近年来这种连续出现,且持续日数长、负积温绝对值大的反常终霜冻过程对苹果的冻害影响作用应引起高度重视。

2.2 苹果春季生育期对气候变暖及终霜冻的响应

2.2.1 对气温变暖的响应 为减少年际气温波动造成的影响,以各年代的平均值进行分析。经统计,分析期内20世纪80年代、90年代和2001—2010年的3—5月平均气温分别为9.8°C、9.9°C和11.4°C,显然2001—2010年春季平均气温明显变暖,分别比上世纪的80年代、90年代偏高1.6°C和1.5°C,相应地苹果春季主要发育期的变化见表1。由表1可见,苹果春季发育期对气温变暖的响应是有差异的,与20世纪80年代和90年代比较,2001—2010年苹果叶芽开绽、展叶盛期和开花盛期平均提前了9~12d;花芽膨大与花芽开绽期提前14~15d,花蕾出现提前9~10d;花芽膨大和花芽开绽比前一发育期加快1~2d,表明对气候变暖的响应特征是加快了生育进程,而叶芽开放和花蕾花序出现增加了1~5d,发育出现迟缓变化。

表1 1984—2010年各年代的苹果春季发育期

Table 1 Phenological period of apple in spring from 1984 to 2010

发育期 Phenological period	1984—1990		1991—2000			2001—2010		
	起始日 (M-d) Starting date	期间日数 Days of period /d	起始日 (M-d) Starting date	期间日数 Days of period /d	与80年代差 D-value between 1990's and 1980's /d	起始日 (M-d) Starting date	期间日数 Days of period /d	与80年代差 D-value between 1990's and 1980's /d
叶芽膨大 Leaf-bud expanding	04-03		04-03			03-21		
花芽膨大 Flower-bud expanding	04-09	6	04-09	6	0	03-26	5	-1
叶芽开绽 Leaf-bud bursting	04-10	1	04-10	1	0	03-28	2	1
花芽开绽 Flower-bud bursting	04-16	6	04-15	5	-1	04-01	4	-2
花蕾出现 Flower-bud appearing	04-18	2	04-17	2	0	04-08	7	5
展叶盛期 Leaf spreading	04-20	2	04-19	2	0	04-10	2	0
开花盛期 Flowering	05-02	12	04-29	10	-2	04-21	11	-1

2.2.2 对终霜冻变化的响应 随着春季温度的升高,苹果冬眠转入萌动生长,临近苹果花芽开绽期,生长过程加快,这时有机物质不仅消耗于呼吸过程,更大量的是消耗于生长过程,表征为细胞浓度持续下降,如遇低温很易受到冻害<sup>[1]</sup>,因此,苹果的花芽

~花蕾出现~开花盛期对终霜冻更敏感。

由1984—2012年苹果开花盛期距平序列计算得到,苹果开花盛期的气候趋势系数为-0.6043(P<0.001),表明在对气候变暖的响应上苹果开花盛期提前的线性变化趋势远比终霜期提前变化的气候

趋势系数( $-0.4131, P < 0.05$ )显著。

由 1984—2012 年苹果开花盛期逐年变化曲线(图 3)得到

$$y_{\text{盛花期}} = -0.5936x + 36659 \quad (3)$$

式中,  $y$  为盛花期日数(4月1日赋值为 1),  $x$  为年序数,  $R^2 = 0.4491, P < 0.001$ 。说明每 10 a 开花盛期提前 5.9 d; 特别值得注意的是从 1998 年开始, 随着气候变暖苹果开花盛期显著提前, 1984—1997 年平均开花盛期为 5 月 2 日, 比总样本平均日期迟 5 d, 最终期为 5 月 8 日, 14 年中仅有 1993 年提前 4 d, 而其余 13 a 均推迟出现; 而 1998—2012 年平均开花盛期为 4 月 22 日, 与 1984—1997 年平均开花盛期比较提前了 10 d, 比总样本平均日期提前 5 d, 15 年中仅 2003、2010 和 2011 年推迟 1~3 d。

由终霜期的气候趋势系数分析、逐年变化曲线(图 3)和 3 次曲线回归方程(1)揭示出, 终霜期表现为提前变化趋势的同时存在规律性波动, 值得注意的是在波动上升阶段, 终霜期出现推迟变化, 与苹果开花盛期极显著的线性提前变化趋势相比较, 这种对气候变暖响应的趋势差异表明苹果春季遭受终霜冻危害在阶段性年份存在相对增大的气候风险。

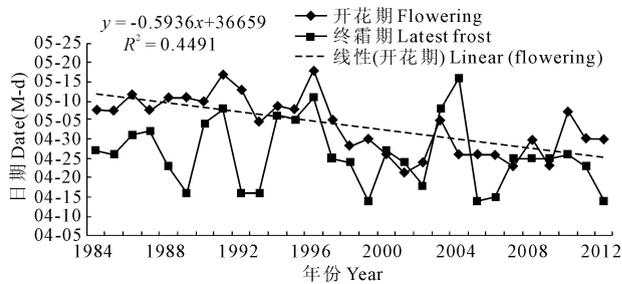


图 3 苹果盛花期与终霜期变化曲线

Fig.3 Curve of full bloom stage of apple and date of latest frost

### 3 结论与讨论

终霜日期提前的气候趋势对于把握苹果遭受终霜冻的气候风险时具有一定的参考意义, 但分析表明终霜日地面最低温度表现为波动变化, 1996 年以来在反常年份出现绝对值较大的地面最低温度记录, 终霜日冻害强度增强; 终霜冻过程持续日数序列表现为波动变化趋势, 尤其在波动上升阶段, 应注意终霜冻过程持续日数长和终霜冻过程的负积温绝对

值大的反常年份对苹果冻害加重的变化特点。

苹果开花盛期的提前速率明显大于终霜期的提前速率, 特别是 1998 年以来苹果春季开花盛期出现了极显著提前变化趋势, 这一速率差异的重要意义在于: 表征未来在气候持续变暖趋势下<sup>[14]</sup>, 黄土高原中部地区苹果在春季花蕾出现和开花盛期遭受终霜冻危害的气候风险在增大。将苹果在春季生长对气候变暖的响应与终霜冻的变化特征及其对苹果的影响进行综合判别分析, 对于相对单纯的霜冻与防御措施研究和应对气候变化是一个有益的补充<sup>[6-7, 15-16]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 韩湘玲. 农业气候学[M]. 太原: 科学技术出版社, 1999: 22-45.
- [2] 杜军, 宁斌. 雅鲁藏布江中游近 40 年异常初终霜冻分析[J]. 气象, 2006, 32(9): 84-89.
- [3] Heino R C. Progressin the study of climate extremes in Northern and Central Europe[J]. Climate Chang, 1999, 42: 151-181.
- [4] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada[J]. J Climate, 2001, 14: 1959-1976.
- [5] Easterling D R. Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States[J]. Bull Amer Mete Soe, 2002: 1327-1332.
- [6] 冯秀藻, 陶炳炎. 农业气象学原理[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 84-89.
- [7] 邓振镛, 仇化民, 李怀德. 陇东气候与农业开发[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 47-50.
- [8] 王位泰, 张天峰, 黄斌, 等. 甘肃陇东黄土高原苹果对气候变暖的响应[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 774-778.
- [9] 郭海英, 赵建平, 素安林, 等. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 608-613.
- [10] 蒲金涌, 姚小英, 姚晓红, 等. 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.
- [11] 国家气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 43-49.
- [12] 黄嘉佑. 气候状态变化趋势与突变分析[J]. 气象, 1995, 21(7): 54-57.
- [13] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 23-27.
- [14] 施能, 陈家琪, 屠其璞. 中国近百年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439.
- [15] 篓伟平, 关旭江. 河套灌区农业生产中的几种灾害及减灾对策[J]. 中国农业气象, 2005, 26(1): 61-63.
- [16] 钟秀丽. 近 20 年霜冻害大发生与防御研究进展[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 4-6.