

近 50 年山西终霜冻变化特征分析

李 芬¹, 张建新²

(1. 山西省气象服务中心, 山西 太原 030002; 2. 山西省气象决策服务中心, 山西 太原 030006)

摘 要: 利用山西 62 个测站 1961—2010 年的逐日最低地温资料, 分析了终霜冻的历年变化规律和空间分布特征。结果表明: (1) 1961—2010 年平均终霜冻日呈现提早结束的趋势, 并伴有明显的波动变化; 21 世纪的 10 年是平均终霜冻波动最为剧烈的时期。 (2) 山西省 1961—2010 年平均终霜冻日为 4 月 12 日, 其分布整体呈现南早北晚的特征, 从 3 月中旬到 5 月中旬, 终霜冻自南向北相继结束。 (3) 山西省正常终霜冻的发生概率为 54% ~ 74%, 从东北到西南的分布为“小—大”相间分布, 概率较大的地区主要位于中部和东南部; 偏晚终霜冻的发生概率为 2% ~ 22%, 南部和北部是其发生概率最大的地区; 特晚终霜冻的发生概率为 14% ~ 36%, 概率较大的地区主要集中在北中部。 (4) M—K 突变检验表明, 山西平均终霜冻在 1990 年发生了一次显著的气候突变; 1975—1996 年, 山西大部分站点的终霜冻日都发生了显著的气候突变。 (5) 1961~2010 年山西终霜冻变化趋势的分布具有明显的区域差异, 从南到北呈“大—小”相间分布, 提前幅度较大的地区主要位于中西部和南部, 推后幅度较大的地区集中在西北部以及中东部。 (6) 2001—2010 年山西轻微、中度和重度终霜冻的主周期分别为 15 a、12 a 和 7 a; 次周期分别为 1 a、1 a 和 5 a。

关键词: 终霜冻; 发生概率; 时间变化; 空间分布; 山西省

中图分类号: S425 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)03-0256-07

Analysis of the variation features of last frost over latest 50 years in Shanxi Province

LI Fen¹, ZHANG Jian-xin²

(1. Shanxi Meteorological Service Center, Taiyuan, Shanxi 030002, China;

2. Shanxi Meteorological Service Center for Decision - making, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: Based on each day's minimum ground temperature data of 62 meteorological stations from 1961 to 2010 in Shanxi Province, has analyzed yearly variation features and spatial distribution characteristics of the last frost. The results showed that: (1) The average last frost day presented an advancing trend in 1961 to 2010 with obvious wave variation, during 2001—2010 was the most volatile stage. (2) The average last frost day was Apr. 12, whole distribution presented a property of early in South and late in North. The last frost day will be finished at the middle ten days in March to the middle ten days in May from the South to the North. (3) The probability of the end of normal last frost was 54% ~ 74% in Shanxi Province. its distribution was alternately “small—large” from Northeast to Southwest, the bigger probability area was located in the Central and the Southeast. The probability of the later frost was 2% ~ 22%, the maximal probability appeared in the South and the North. The probability of the most late frost was 14% ~ 36%, the larger probability area was located in the Northern central region. (4) The M—K mutation test showed that the average last frost day in Shanxi Province had an obvious mutation in 1990. The last frost day in most meteorological stations had obvious mutations from 1975 to 1996. (5) The distribution of the last frost changing trend in Shanxi Province possessed apparent regional difference, from the South to the North, it appeared in alternately “large—small” distribution, the large advancing region was located in the Midwest and the South, the large delaying region was concentrated in the Northwest and the Mideast. (6) The primary cycle of the mild, moderate and severe last frost was 15, 12 and 7 years, respectively; the secondary cycle of the mild, moderate and severe last frost was 1, 1 and 5 years, respectively.

Keywords: last frost; probability; temporal variation; spatial distribution; Shanxi Province

收稿日期: 2013-11-20
基金项目: 国家 973 计划项目 (2012CB955903); 中国气象局气象关键技术集成与应用项目 (CMAGJ2011M10); 山西省自然科学基金 (2013011038)
作者简介: 李 芬 (1964—), 女, 山西汾阳人, 高级工程师, 主要从事区域气候变化及生态与农业气象研究。E-mail: lifen1964@sina.com。

终霜冻是一种常见的农业气象灾害,历来是农业科学、气象科学及其它相关科学研究的重点问题,终霜冻显著推迟,对农作物造成的危害尤其严重。对于霜冻的研究,上世纪一些发达国家,如:美欧、日本就相继建立了气候监测和诊断分析业务,以加强对霜冻、干旱等气象灾害机理和预测的研究。20 世纪 70 年代以后,随着自然灾害的不断加剧,防灾减灾工作得到各国政府和社会各界前所未有的重视。在霜冻研究方面,各国专家对其进行了较为深入的探讨并取得了许多研究成果^[1-15]。

山西省位于华北平原西侧、黄土高原东部,是一个夹峙在太行山和黄河中游峡谷之间的高原地区,有山地、台地、丘陵等多种地貌类型,山区、丘陵约占总面积的 2/3,且地处中高纬度,海拔高度悬殊较大,南北宽广,东西狭窄,热量分布存在明显差异,生态环境相对脆弱,对气候变化的响应极其敏感,各地终霜冻日期变化范围很大,这使山西成为终霜冻的多发、频发区^[16-19]。一些学者对山西省霜冻的发生规律进行了研究,但大都是针对部分地区的分析^[20-24],这些零散的研究并不能完全反映山西终霜冻的总体特征。本文对山西 1961—2010 年终霜冻的气候变化特征进行了分析,以期对山西省以及更大范围的霜冻气候变化的预测和预报研究提供依据。

1 资料、指标和方法

1.1 资料与处理

选择山西 62 个站点 1961—2010 年的逐日最低地温资料,站点分布见图 1。本文用儒历日定义终霜冻日期,将每年的 1 月 1 日定义为 1,1 月 2 日定义为 2,⋯,2 月 10 日即可定义为 41。如:2000 年 3 月 31 日为终霜冻日,终霜冻日就以 91 计,并由此重建历年终霜冻日的数据序列。

1.2 指标与方法

参照《作物霜冻害等级》气象行业标准^[25]和中国科学技术蓝皮书第 5 号《气候》^[26],定义终霜冻日为由寒冷季节向温暖季节过渡期间最后一次出现 $T_{min} \leq 0^{\circ}\text{C}$ 的日期;本文将比平均终霜日推后 $\leq 5\text{ d}$ 定义为正常终霜冻,比平均终霜日推后 $6 \sim 10\text{ d}$ 定义为偏晚终霜冻,比平均终霜日推后 $\geq 11\text{ d}$ 定义为特晚终霜冻。

本文采用线性倾向估计法^[27]¹⁰⁵⁻¹⁴²分析山西省 1961—2010 年平均终霜冻日的变化趋势并用 t 检验对其进行了信度检验^[28];采用均值分布法分析平均终霜冻日的空间分布;采用概率论^[27]³⁵⁻⁴²分析不同等级终霜冻发生概率的空间分布特征;采用 Mann-Kendall(M-K)法^[29]检测平均终霜冻日的突变及其

突变分布特征;采用 Morlet 小波分析法^[31-34]分析了山西初(终)霜冻及其强度的多时间尺度周期特征。

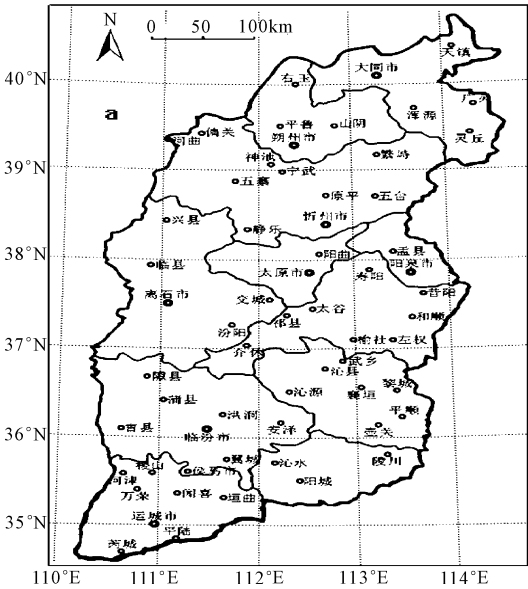


图 1 选用站点分布

Fig.1 Distribution of the chosen meteorological stations

2 结果与分析

2.1 1961—2010 年山西平均终霜冻的基本特征

2.1.1 平均终霜冻日的时间分布 1961—2010 年平均终霜冻日为 4 月 12 日,平均终霜冻日发生最早的年份为 2002 年(3 月 25 日),最晚为 1990 年(4 月 27 日),全省最早、最晚差值超过 1 个月。

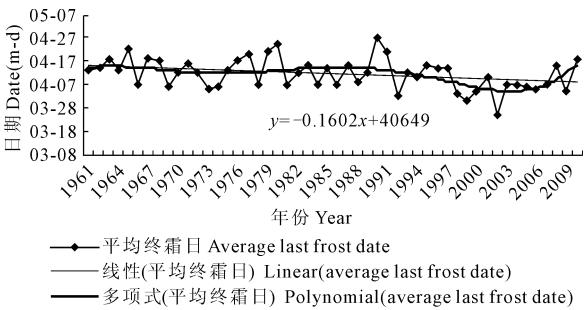


图 2 山西平均终霜冻日历年变化曲线

Fig.2 The yearly changing curve of average last frost day in Shanxi Province

从图 2 线性拟合线看,全省平均终霜冻日整体呈现提早趋势,趋势系数为 -0.1602 ,经检验该趋势通过了 99% 的显著性检验;多项式拟合表明,平均终霜冻日 20 世纪 90 年代中期以后变化剧烈,其变化呈“勺”型分布,60~70 年代缓慢提前,80 年代有所推后,90 年代到 2005 年显著提前,之后又明显推后。与此相对应,60~70 年代平均终霜冻日为 4 月 12 日;80 年代推后到 4 月 14 日;90 年代提早到 4 月

9 日;21 世纪的 10 年平均终霜冻日更提早为 4 月 7 日。图 2 可见,21 世纪的 10 年是山西平均终霜冻日波动最为剧烈的时期。

2.1.2 平均终霜冻日的空间分布 统计表明,3 月中旬到 5 月中旬,山西终霜冻自南向北相继结束。平均终霜冻结束最早的是平陆(3 月 11 日),结束最晚的是五寨(5 月 14 日),两地相差超过了 2 个月。终霜冻日的出现时间正值各地作物的出苗期和生长期,对作物尤其对春播作物的苗期影响更大。

图 3 表明,平均终霜冻分布总体呈南早北晚的分布特征;中南部表现为西早东晚,北部则表现为东早西晚的分布特征。3 月中下旬,南部的大部分地区率先结束终霜冻;4 月上旬,中西部的大部地区和中东部的部分地区终霜冻结束,由于局地小气候和地形的共同作用,这些地区的终霜冻结束时间比周边地区早;4 月中旬,中南部到中北部的大部分地区结束终霜冻;平均终霜冻的结束时间在 4 月下旬的地区,可分为晋北和晋东南两个区域,这是与晋北纬度较高和晋东南这些区域海拔高度较高有关;5 月上中旬,北部的高寒地区的右玉、五寨终霜冻结束,这是地理位置和冷空气路径共同影响的结果。至此,山西全部进入作物生长期。

2.2 1961—2010 年山西不同等级终霜冻出现概率的空间分布

正常终霜冻的发生概率为 54% ~ 74%(图 4a)。正常终霜冻的发生概率东北到西南其分布为“小 - 大”相间分布。发生概率较小的地区主要位于北中

部以及中西部的部分地区,发生概率在 54% ~ 59%;发生概率较大的是东南部以及中东部等地,其中左权、五寨、阳城和太原正常终霜冻发生概率都在 70% 以上。

偏晚终霜冻的发生概率在 2% ~ 22%(图 4b),偏晚终霜冻的发生概率从北到南为“大 - 小 - 大”分布,北部和南部是出现偏晚终霜冻概率较大的地区,包括晋南、晋东南和晋北的部分地区。偏晚终霜冻

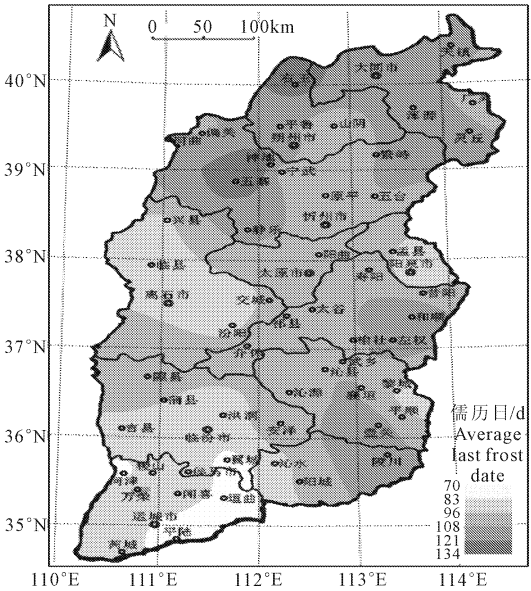
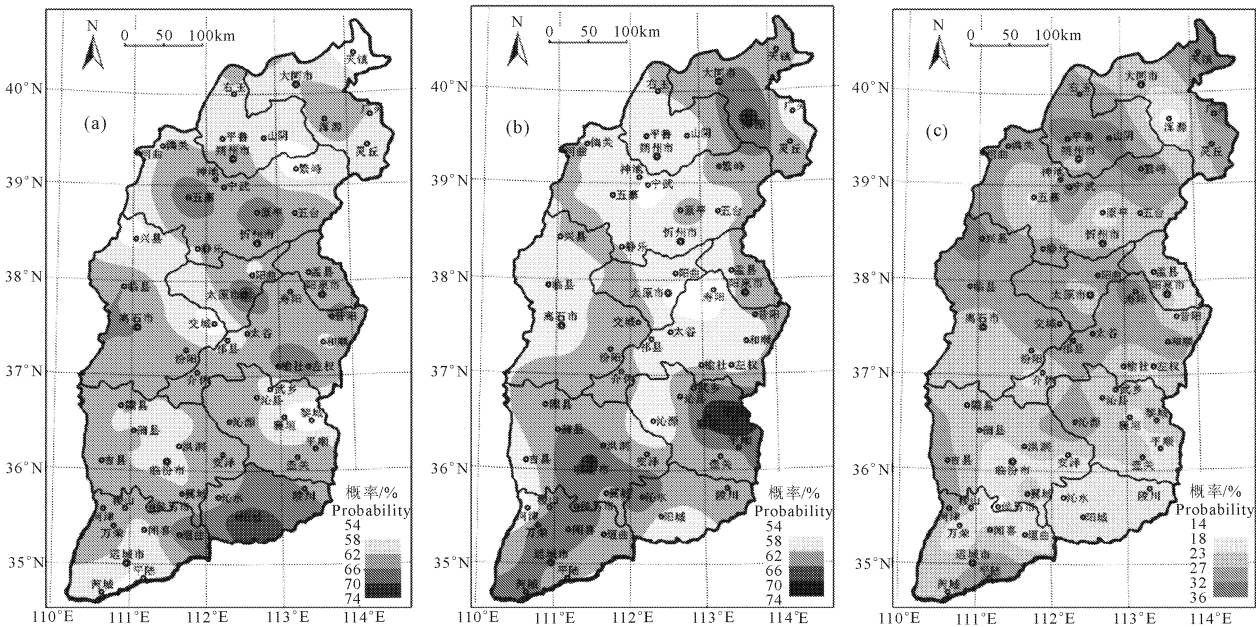


图 3 山西平均终霜日(儒历日)的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of the average last frost day in Shanxi Province



(a) 正常终霜冻 Normal last frost (b) 偏晚终霜冻 Later last frost (c) 特晚终霜冻 The latest last frost
图 4 山西省不同等级终霜冻出现概率的空间分布
Fig.4 The spacial distribution of the last frost (different levels) probability in Shanxi Province

发生概率最大的黎城、襄垣、临汾和浑源,发生概率都在 20% 以上;发生概率最小的地区如:中部的太原、北中部的忻州和北部的朔州地区发生概率在 5% 左右。

特晚终霜冻的发生概率在 14% ~ 36% (图 4c)。其分布总体表现为南部偏小,北中部偏大的特点。特晚终霜冻发生概率较大的地区主要包括:北部的朔州大部、中西部的吕梁、中部的晋中和太原等地;发生概率为 34% ~ 36%;晋东南的晋城、长治和南部的临汾、运城是特晚终霜冻发生概率最小的地区,发生概率不足 20%。

历史上北部的山阴最晚终霜冻出现在 5 月 14 日(1989 和 1977 年),较累年平均值(4 月 12 日)推后 32 d;北中部的宁武最晚出现在 5 月 30 日(1998 年),较累年平均值(4 月 12 日)推后 48 d;中部的寿阳最晚出现在 5 月 28 日(1961 年),较累年平均值 4 月 15 日推后 43 d。终霜冻的异常推后,给农作物的生长造成了毁灭性的危害,给农业生产造成了严重损失。山西出现特晚终霜冻的概率大大超过偏晚终霜冻,特晚终霜冻是山西霜冻灾害中最严重的灾害。

2.3 1961—2010 年山西平均终霜冻的突变特征

2.3.1 平均终霜冻日的突变特征 M-K 是 WMO (世界气象组织)推荐的应用于环境数据时间序列趋势分析的方法^[34],该方法最初于 1945 年由 Mann 创立^[35],它在数学上严格成立^[29],经 Goossens 等的发展,现已成为检测气候突变的一种有效方法^[36]。该方法为无分布检验,不需要样本遵从一定的分布,不受少数异常值的干扰,检测范围宽、定量化程度高。因此,本文利用 M-K 方法,分析 1961—2010 年山西平均终霜冻日气候突变。

检测表明,1961—2010 年山西平均终霜冻在 1990 年发生了一次显著的气候突变(图 5),从相对偏晚期跃变为相对偏早期。

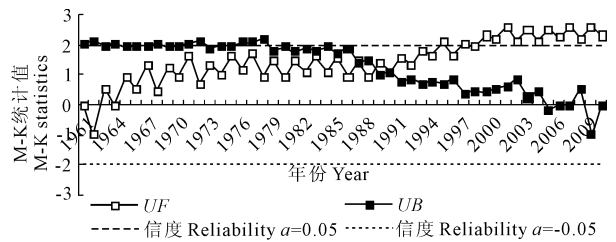


图 5 山西平均终霜冻的 M-K 突变检验
Fig.5 M-K mutation test of average last frost in Shanxi Province

2.3.2 平均终霜冻日突变的时空分布 对山西 62 个测站终霜冻资料进行了 M-K 突变检验,大部分站点 1961—2010 年终霜冻日都发生了显著突变,突变年份主要集中在 20 世纪 80 ~ 90 年代;发生在 80

年代的有 38 个站点,发生在 90 年代的有 14 个站点,有 7 个站点突变出现在 70 年代;南部的河津突变时间最早为 1975 年,中东部的阳泉、寿阳、孟县和北中部的五台县突变最晚为 1996 年;另外,右玉、神驰和闻喜没有检验出突变,闻喜位于南部,右玉和神驰位于北部,其空间分布不具有规律性。

终霜冻突变年代的空间分布表明(图 6a)。突变发生在 70 年代的地区,主要位于中部的部分和西南部的局部地区;突变在 80 年代的地区,占据山西从南到北的广大地区,约占国土面积的三分之二;中北部的东部和西部,突变发生 90 年代。

图 6b 给出平均终霜冻突变年份的空间分布,总体表现为南部偏早北部偏晚,中部偏早、东部和西部偏晚的分布特征。20 世纪 70 年代,中部和西南的局部率先出现突变;中部和西南、东南部,突变在 80 年代前期;突变发生在 80 年代后期的地区,从南到北分布最广;突变在 90 年代的地区,主要位于中西部、西北部、东北部和中东部,这些区域是平均终霜冻突变发生最晚的地区。

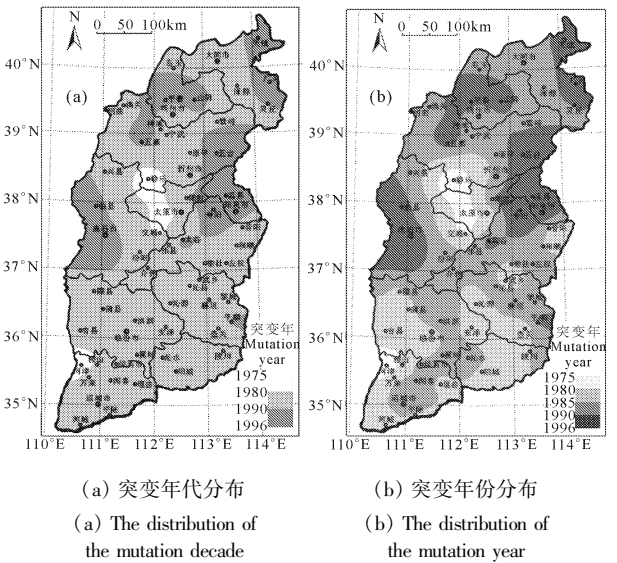
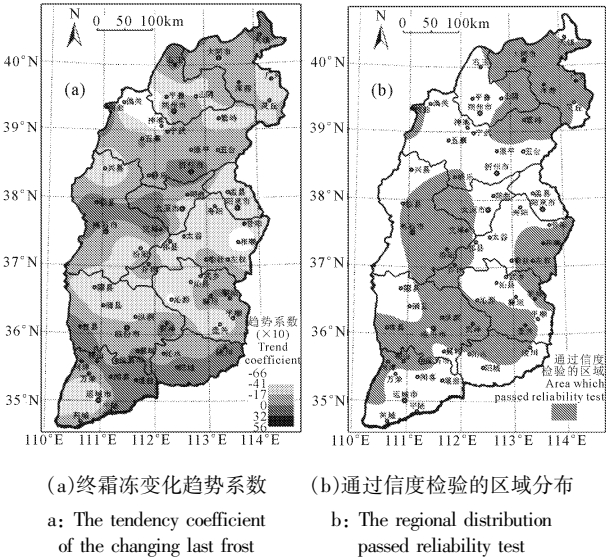


图 6 山西平均终霜冻的 M-K 突变检验的空间分布
Fig.6 Spacial distribution of the M-K mutation test of the average last frost in Shanxi Province

2.4 1961—2010 年山西终霜冻日变化趋势的空间分布

对所选山西 62 个台站终霜冻资料的线性回归分析,得到其趋势变化系数分布图(图 7a)。正值表示趋势变化率增大,终霜冻日有推后趋势;负值表示趋势变化率减小,终霜冻日有提前趋势。

图 7a 表明,1961—2010 年终霜冻趋势变化分布存在明显的区域差异,其分布从南到北具有“大 - 小”相间的分布特征。62 个站点中,有 47 个站点趋



(a)终霜冻变化趋势系数 (b)通过信度检验的区域分布
a: The tendency coefficient of the changing last frost
b: The regional distribution passed reliability test

图 7 近 50 年山西省终霜冻变化趋势系数 (× 10) 分布及其通过检验的区域分布

Fig.7 Distribution of the tendency coefficient of the changing last frost (× 10) and regional distribution passed reliability test so latest years

势变化系数为负,有 15 个站点为正,表明大部分地区的终霜冻日有提前趋势,提前较大的地区主要位于南部和北中部的广大地区,如南部的河津,趋势变

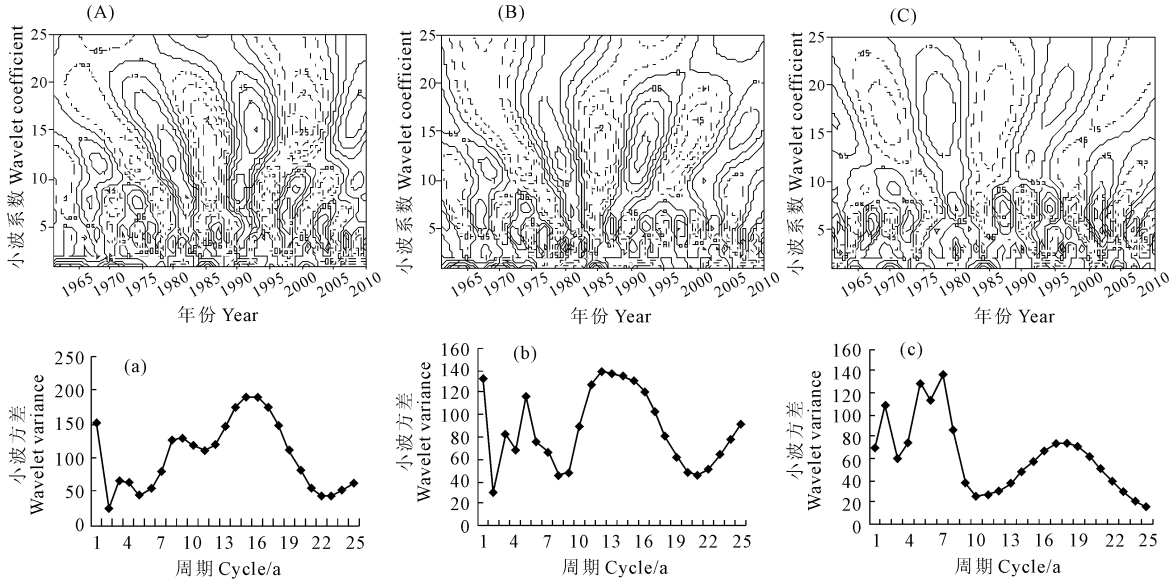
化系数达 $-6.2\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$,每 10 a 提前 6.2 d;推后幅度较大的地区主要集中在北中部以及南部的大部地区,如北中部的河曲,线性倾向为 $5.1\text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$,每 10 a 推后 5.1 d。

本研究对其趋势变化的显著性进行了检验(图 7b)。全省有 18 个站通过 0.05 的显著性检验,这些区域分别位于中东部、东北部、中西部、东南部以及中南部。

2.5 1961—2010 年山西平均终霜日的周期特征

将 62 个测站 50a 的终霜冻资料作为被检测信号,实现 Morlet 一维连续小波变换(图 8)。

图 8A 表示了轻微终霜冻变化存在着多个时间尺度变化:在较大时间尺度 15 a 左右的周期震荡较明显,轻微终霜冻变化经历了推后 - 提前 3 个循环交替,1965 ~ 1970 年、1977 ~ 1983 年、1988 ~ 1995 年、2004 ~ 2010 年为正值,轻微终霜冻推后;1971 ~ 1976 年、1982 ~ 1987 年、1996 ~ 2003 年为负值,轻微终霜冻提前;在 8 ~ 9 a 的较小尺度上,也存在推后提前交替的周期振荡,但周期震荡趋向不稳定;准 3 a 的小周期变化存在于 50 年来的整个时段。在周期为 15 a、8 ~ 9 a 和 3 a 尺度上,2010 年后小波系数都处于负值区,因此,轻微终霜冻都处于提前期。



注: A, a 分别为轻微终霜冻的小波系数实部等值线及其小波方差; B, b 分别为中度终霜冻的小波系数实部等值线及其小波方差; C, c 分别为重度终霜冻的小波系数实部等值线及其小波方差。

Note: A: Isoline of the wavelet coefficient for the mild last frost; a: Wavelet variance; B: Isoline of the wavelet coefficient for the moderate last frost; b: Wavelet variance; C: Isoline of the wavelet coefficient for the severe last frost; c: Wavelet variance.

图 8 各种强度终霜冻的 Morlet 小波系数及其小波方差分布

Fig.8 Morlet wavelet coefficient and variance distribution for each intensity of last frost

轻微终霜冻小波方差分析(图 8a)可见,在 1961—2010 年期间,轻微终霜冻振动最强的是 15 a 时间尺度的低频振荡,同时存在 1a 的低频振荡。因

此,15 a 是轻微终霜冻发生的主要周期,1 a 是轻微终霜冻发生的次周期。

图 8B 表示了中度终霜冻在不同时间尺度上的

周期振荡。在较大尺度 12~15 a 上的周期振荡明显,期间中度终霜冻变化经历了“提前-推后”4 个交替变化,1961—1965 年、1971—1977 年、1983—1988 年、1994—2000 年为负值,中度终霜冻提前;1966—1970 年、1978—1982 年、1989—1993 年、2001—2010 年为正值,中度终霜冻推后。在准 5 a 的较小尺度上,1961—1985 年周期震荡不稳定,1985 年后 5 a 周期振荡变得非常明显,1985—2010 年期间,中度终霜冻变化经历了“推后-提前”5 个的循环交替变化。2010 年前后,在周期为 12~15 a 和 5 a 尺度上,小波系数都处于正值区,中度终霜冻正处于推后期。

中度终霜冻小波方差分析(图 8b)可见,中度终霜冻的小波方差主要存在 2 个峰值,对应的时间尺度分别为 12 a 和 1 a。其中尺度 12a 峰值最高,能量最大。因此,12 a 是山西中度终霜冻的主要周期,1 a 是山西中度终霜冻的次周期。

图 8c 为山西近 50 a 重度终霜冻的 Morlet 小波系数变化,结果显示:山西近 50 a 重度终霜冻变化也存在多时间尺度结构。山西近 50 a 重度终霜冻序列在 5~7 a 的时间尺度上正负闭合中心明显,在该时间尺度下重终霜冻年际变化存在明显的周期振荡;在较大时间尺度 15~17 a 的周期低频震荡较明显,山西地区重度终霜冻变化经历了“推后-提前”2 个完整的循环交替变化,1965—1973 年、1982—1988 年为负值,轻微终霜冻提前;1974—1983 年、1989—1997 年为正值,轻微终霜冻推后。在该周期为 15~17 a 尺度上,目前重度终霜冻正处于负值且未闭合,重度终霜冻处于推后期;在周期为 5~7 a 的尺度上,中度终霜冻为正值区,重度终霜冻处于推后期。

图 8c 是重度终霜冻在不同的时间尺度上的小波方差,可以看出,山西重终霜冻的小波方差主要存在 3 个峰值,对应的时间尺度分别为 2 a、5 a 和 7 a。其中尺度 7 a 峰值最高,能量最大,5 a 次之。因此,7 a 是山西中度终霜冻的主要周期,5 a 是山西中度终霜冻的次周期。

3 结 论

在目前全球变暖的大趋势下,多数地区终霜冻日会提前,这样农作物苗期遭受终霜冻危害的可能性会降低;但仍有部分地区终霜冻日会推后,这增加了农作物布局的复杂性;另外近些年山西平均终霜冻日波动比较剧烈,这增加了农作物受霜冻灾害的可能性。本文利用山西 62 个气象观测站 1961—2010 年的逐日最低地温资料分析了终霜冻的历年变化规律和空间分布特征,主要结论如下:

(1) 山西 1961—2010 年平均终霜冻日呈提早趋势,且具有明显的波动变化,变化趋势呈“勺”型分布,20 世纪 60~70 年代缓慢提前,80 年代有所推后,90 年代到 2005 年显著提前,2005 年后明显推后。近 10 年是山西平均终霜冻日波动最为剧烈的时期。

(2) 山西近 50 年平均终霜冻日为 4 月 12 日,3 月中旬到 5 月中旬自南向北相继结束。平均终霜冻分布总体呈南早北晚的特征;中南部表现为西部早东部晚,北部则表现为东部早西部晚的特征。

(3) 山西正常终霜冻的发生概率为 54%~74%,从东北到西南呈“小-大”相间分布;偏晚终霜冻的发生概率为 2%~22%,从北到南呈“大-小”分布,南部和北部是发生概率最大的地区;特晚终霜冻的发生概率为 14%~36%,分布为南部偏小,北中部偏大的特点,特晚终霜冻发生概率较大的地区主要集中在北部和中部地区。山西特晚终霜冻的发生概率大大超过偏晚终霜冻,特晚终霜冻是山西霜冻灾害中最严重的灾害。

(4) 山西 1961—2010 年平均终霜冻日在 1990 年发生了一次显著的气候突变。62 个测站近 50 年终霜冻日大都发生了突变,突变时间在 1975—1996 年,且集中在 20 世纪 80~90 年代。突变发生在 70 年代的区域位于中部和西南部的局部地区;突变在 80 年代的地区分布最广,从南到北占据约占国土面积的三分之二;中北部的东部和西部突变在 90 年代。

(5) 山西 1961—2010 年山西终霜冻趋势变化分布存在明显的区域差异,其分布从南到北呈“大-小”相间分布。大部分站点的终霜冻日呈现提前趋势,提前幅度较大的地区主要位于中西部和南部的广大地区,推后幅度较大的地区集中在西北部以及中东部。

(6) 2001—2010 年山西轻微、中度和重度终霜冻的主要周期分别为 15 a、12 a 和 7 a;次周期分别为 1 a、1 a 和 5 a;目前,正处在轻微终霜冻的提前期以及中度和重度终霜冻的推后期,这是在总体终霜冻提前情况下,终霜冻灾害造成的损失加大的主要原因。

参 考 文 献:

- [1] Heino R, Brazdil R, Forland R, et al. Progress in the study of climate extremes in Northern and Central Europe[J]. Climatic Change, 1999, 42:151-181.
- [2] Easterling D R. Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2002,83:1327-1332.
- [3] Katrina R, Mandy B. Towards topoclimate maps of frost and frost risk for Southland, New Zealand[C]//Dunedin, New Zealand: The 15th

Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre, University of Otago, 2003: 1-10.

[4] 马克西莫夫 HA. 周小民译. 马克西莫夫院士选集[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 27-31.

[5] 西涅里席科夫 B B. 北京农业大学译. 普通农业气象学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1959: 105-110.

[6] 奇尔科夫 IOH. 方志译. 农业气象学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 126-128.

[7] Levitt J. Freezing temperature responses of plants to environmental stresses[J]. New York: Academic press, 1979, 1: 267-290.

[8] Palta J P, Jensen K G, Li P H. Cell membrane alterations following a slow freeze thaw cycle: Ion leakage, injury and recovery [C]//Plant Cold Hardiness and Freezing Stress. New York: Academic press, 1982: 221-242.

[9] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada[J]. Journal of Climate, 2001, 14: 1959-1976.

[10] 韩荣青, 李维京, 艾婉秀, 等. 中国北方初霜冻日期变化及其对农业的影响[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 525-532.

[11] 叶殿秀, 张 勇. 1961—2007 年我国霜冻变化特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 661-665.

[12] 马柱国. 中国北方地区霜冻日的变化与区域增暖相互关系[J]. 地理学报, 2003, 9(增刊): 31-37.

[13] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 1-10.

[14] 李 想, 陈丽娟, 张培群. 1954—2005 年长江以北地区初霜期变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(1): 21-25.

[15] 陈乾金, 张永山. 华北异常初终霜冻气候特征的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(2): 33-39.

[16] 李艳丽, 王迎春, 孙忠富. 山西霜冻灾害现状及其防御对策分析[J]. 中国农业资源与区划, 2006, 27(1): 57-59.

[17] 王迎春, 孙忠富, 郭 尚, 等. 雁北地区不同品种玉米的抗霜冻能力比较[J]. 中国农业气象, 2005, 26(4): 233-235.

[18] 冯玉香, 何维勋. 我国玉米霜冻害的时空分布[J]. 中国农业气象, 2000, 21(3): 6-10.

[19] 王正旺, 庞转棠, 张瑞庭, 等. 长治农业气候资源的变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 258-262.

[20] 钱锦霞, 张 霞, 张建新, 等. 近 40 年山西初终霜冻日的变化特征[J]. 地理学报, 2010, (7): 801-808.

[21] 蔡 霞, 吴占华, 梁桂花, 等. 近 53a 山西朔州市农业气候资源变化特征分析[J]. 干旱气象, 2011, (1): 88-93.

[22] 张 霞, 钱锦霞. 气候变暖背景下太原市霜冻发生特征及其对农业的影响[J]. 中国农业气象, 2010, (1): 111-114.

[23] 张 霞, 钱锦霞, 靳 宁. 山西北部初终霜冻日特征及其对农业的影响[J]. 中国农学通报, 2009, (22): 348-351.

[24] 钱锦霞, 武 捷, 班胜林. 1951—2008 年太原市霜冻发生特征分析[J]. 中国农学通报, 2009, (10): 287-289.

[25] 国家科学技术委员会. 中国科学技术蓝皮书第 5 号《气候》[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1990: 25-26.

[26] 中国气象标准化信息网. <http://standard.cma.gov.cn/plus/view.php?aid=170>, 2012-01-19.

[27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第 2 版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.

[28] 吴洪宝, 吴 蕾. 气候变率诊断方法和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 1-40.

[29] 符淙斌, 王 强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-492.

[30] Christopher T, Gilbert P C. A practical guide to wavelet analysis[J]. American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.

[31] 毛军军, 朱良燕, 张学友, 等. 基于小波变换的气温趋势和分形特征分析[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 18-24.

[32] 李 斌, 李丽娟, 李海滨, 等. 澜沧江流域干旱变化的时空特征[J]. 农业工程学报, 2011, (5): 87-92.

[33] 钟 升, 沈绪榜, 郑江滨, 等. 提升小波变换的数据并行计算方法研究[J]. 计算机学报, 2011, (7): 1323-1332.

[34] Yu Paoshan, Yang Taochang, Wu Chikang. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan[J]. Journal of Hydrology, 2002, 260: 161-175.

[35] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrika, 1945, 13(3): 245-259.

[36] 李栋梁, 郭 慧, 王 文, 等. 青藏铁路沿线平均年气温变化趋势预测[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 431-439.

(上接第 243 页)

[5] 李生秀, 罗志成, 王 谦, 等. 中国旱作农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 1-60.

[6] 高照良, 冯兴平, 彭珂珊. 试论我国北方旱地农业与持续发展[J]. 生态经济, 2005, (9): 87-90.

[7] 卢其尧, 傅抱璞, 虞静明. 山区农业气候资源空间分布的推算方法及小地形的气候效应[J]. 自然资源学报, 1988, 3(2): 101-112.

[8] Landsberg. Physical Climatology(2nd ed)[M]. New York: Gray Printing Company, Dubois, Pennsylvania, USA, 1958.

[9] Balchin Pye. A Microdimatical Investigation of Bath and the Surrounding District[M]. London, Great Britain: University Tutorial Press, 1973.

[10] 王 宇. 云南山区日照时数的垂直分布[J]. 山地研究, 1993, 11(1): 1-8.

[11] 谢庆梓. 福建山地气候生态特征及其宜茶气候带的划分[J]. 山地研究, 1993, 11(1): 43-49.

[12] 杨晓光, 李 勇, 代姝玮, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化[J]. 中国农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3177-3188.

[13] 纪瑞鹏, 张玉书, 冯 锐, 等. 辽宁省农业气候资源变化特征分析[J]. 资源科学, 2007, 29(2): 74-82.

[14] 周绍毅, 徐圣璇, 黄 飞, 等. 广西农业气候资源的长期变化特征[J]. 中国农学通报, 2011, 27(27): 168-173.

[15] 李白萍, 姜子平, 孙晓光, 等. 洛隆县农业气候资源变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(28): 13888-13890.

[16] 樊 静. 近 40 年来奇台县农业气候资源的变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(1): 273-278.