

李芬,于文金,张建新,等. 2012. 山西近 50 a 初霜冻的气候变化特征及其周期分析[J]. 大气科学学报,35(6):754-761.

Li Fen, Yu Wen-jin, Zhang Jian-xin, et al. 2012. Analysis of the climate change characteristics and periodicity of the first frost in Shanxi Province in the past 5 decades[J]. Trans Atmos Sci,35(6):754-761. (in Chinese)

## 山西近 50 a 初霜冻的气候变化特征及其周期分析

李芬<sup>1,2</sup>, 于文金<sup>2</sup>, 张建新<sup>1</sup>, 李娜<sup>1</sup>, 闫永刚<sup>1</sup>

(1. 山西省气象局, 山西 太原 030002; 2. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:**初霜冻日的变化对农业生产的布局和耕作模式具有一定的影响。利用山西 62 个气象观测站点 1961—2010 年的逐年初霜冻日及逐日最低地温资料,应用统计学方法分析了山西初霜冻日的变化特征,结果表明:1) 山西近 50 a 平均初霜冻日的时间分布总体为推后趋势,且具有明显的年代际特征,20 世纪 70 年代、90 年代初霜冻日提早显著,20 世纪 60 年代、80 年代和 21 世纪初霜冻日明显推后。2) 山西近 50 a 平均初霜冻日的空间分布为“5 级阶梯”型分布,从 9 月中旬到 11 月上旬,自北向南相继出现初霜冻。3) M-K 突变检验表明,山西近 50 a 平均初霜冻日在 1989 年发生了一次显著的气候突变。4) 山西近 50 a 初霜冻日变化趋势的分布具有明显的区域特征,大部分地区初霜冻日有推后的趋势,但南部和中南部的部分地区初霜冻日有提前的趋势。5) Morlet 小波分析结果表明,山西的初霜冻、轻微初霜冻、中度初霜冻和重度初霜冻发生的主周期分别为 5 a、2 a、5 a、6 a;目前山西正处在初霜冻和轻微初霜冻的推后期、中度初霜冻和重度初霜冻的提前期。

**关键词:**初霜冻; 气候特征; 突变检验; 周期特征; 山西省

中图分类号: P426.3 文献标志码: A 文章编号: 1674-7097(2012)06-0754-08

## Analysis of the climate change characteristics and periodicity of the first frost in Shanxi Province in the past 5 decades

LI Fen<sup>1,2</sup>, YU Wen-jin<sup>2</sup>, ZHANG Jian-xin<sup>1</sup>, LI Na<sup>1</sup>, YAN Yong-gang<sup>1</sup>

(1. Shanxi Meteorological Bureau, Taiyuan 030002, China; 2. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Change of the first frost date has obvious effect on agricultural distribution and farming pattern. Based on each year's first frost date data and each day's minimum ground temperature data from 62 meteorological stations in Shanxi Province from 1961 to 2010, the first frost date climate change characteristics and its periodicity in Shanxi Province are analyzed with statistical method. The results show that: 1) The average first frost date in Shanxi Province has a delaying trend and changes with decades. It was advanced visibly in the seventies and the nineties of the twentieth century and was delayed obviously in the sixties and the eighties of the twentieth century and in this century. 2) The spatial distribution of the first frost dates in Shanxi Province appears from the north to the south in five steps; it appears from the second ten days of September in the north to the first ten days of November in the south. 3) The average first frost date in Shanxi Province had a mutation in 1989. 4) The first frost date in most areas has a delaying trend, with exception only in some areas such as the south and middle south parts. 5) The Morlet analysis results show that cycles of the first frost frequency, the mild first frost frequency, the moderate first frost frequency and the severe first frost frequency are 5 a, 2 a, 5 a, 6 a respectively. Now, Shanxi is in the phase when the first frost and the mild first frosts are delaying

收稿日期: 2011-05-09; 改回日期: 2011-12-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB955903); 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011M10)

作者简介: 李芬(1964—), 女, 山西汾阳人, 高级工程师, 研究方向为全球变化与区域气候变化, lifen1964@sina.com.

while the moderate and severe first frosts are advancing.

**Key words:** first frost; climate characteristics; mutation test; cycle feature; Shanxi Province

## 0 引言

研究和事实都表明,全球气候正处在变暖阶段(IPCC Working Group I,2001;丁一汇等,2006;于淑秋,2005)。IPCC第4次报告指出:在过去的100 a中,全球地表温度上升幅度为 $(0.74 \pm 0.18) ^\circ\text{C}$ ;全球变暖幅度自20世纪90年代以来明显加速,1850年以来最暖的12 a中有11 a出现在1995—2006年;未来100 a全球气温可能升高 $1.1 \sim 6.4 ^\circ\text{C}$ (IPCC Working Group II,2007)。中国气候变化的情况和全球趋势是一样的(秦大河等,2005),近百年来全国气温上升了 $0.4 \sim 0.5 ^\circ\text{C}$ (林学椿和于淑秋,1990;王绍武,1990;丁一汇和戴晓苏,1994),略低于全球平均的 $0.6 ^\circ\text{C}$ (IPCC Working Group I,2001),而近100 a来中国地表年平均温度则升高了 $0.5 \sim 0.8 ^\circ\text{C}$ (气候变化国家评估报告编写委员会,2007),区域性气候变化已引起人们的普遍重视(IPCC Working Group I,2001)。现在,以温度升高为主要特征的气候变化已经并将继续对自然生态系统和人类社会产生重大影响(郑景云等,2003;徐铭志和任国玉,2004)。

霜冻与温度变化紧密联系,在全球气候变暖的背景下,我国各地对全球气候变暖的响应并不完全相同(陈仁升等,2001),其变化具有明显的局地线性和非线性特征。山西是全球气候变化反应敏感的生态脆弱带之一,初霜冻常使晚熟的大田作物茎叶提前凋萎,籽粒成熟不饱满或品质变坏,甚至不能成熟。初霜冻对山西南部的棉花油菜、北部的春玉米、谷子和马铃薯、中部的玉米、糜谷等秋粮作物以及大白菜等露天蔬菜的生长影响巨大(张霞等,2009;杜春芳等,2010;史俊东等,2010)。

山西是我国内陆省份之一,地处华北西部的黄土高原东翼,南北跨度约7个纬度,东部太行山、西部吕梁山纵贯南北,中部由北至南分布有大同、忻州、太原、临汾、长治和运城等盆地;恒山、五台山、系舟山、太岳山和中条山散列其中,走势基本均为东北—西南向。山地、丘陵、平原大体成4:4:2的比例。山西受地理纬度和地形特点的共同影响,年平均气温介于 $4 \sim 14 ^\circ\text{C}$ ,冬季,在强盛的干冷大陆性气团控制下,气温最低、气温变化的南北梯度较大;初霜冻北部出现早、结束晚,南部则相反,中部介于北

部和南部之间。

目前对山西霜冻的研究相对较少,大都是对山西局部地区的研究(钱锦霞等,2009;张霞等,2009;张霞和钱锦霞,2010;蔡霞等,2011)。钱锦霞等(2010)分析了山西霜日的基本特征和变化趋势。本文在分析近50 a山西初霜冻时空演变特征的基础上,尝试把小波分析应用于霜冻时间序列的分析中,探讨其可能存在的多时间尺度周期的强弱和时间分布,这对提高山西霜冻预测服务能力、防御农业气象灾害和保障山西粮食安全具有重要意义。

## 1 资料、指标和方法

### 1.1 资料

#### 1.1.1 资料说明

选择山西109个气象站1961—2010年的逐日地面最低温度、逐年初霜冻日资料,剔除时间序列不足50 a、站点迁移在2次以上和有资料缺测现象的站点,最终得到62个站点资料,分布如图1所示。距平值的参考气候期为世界气象组织(WMO)设定的1971—2000年。

#### 1.1.2 资料整理

根据原始数据,分别按照每年初霜冻日,重建所选站点初霜冻日数据序列,本研究利用儒略日定义

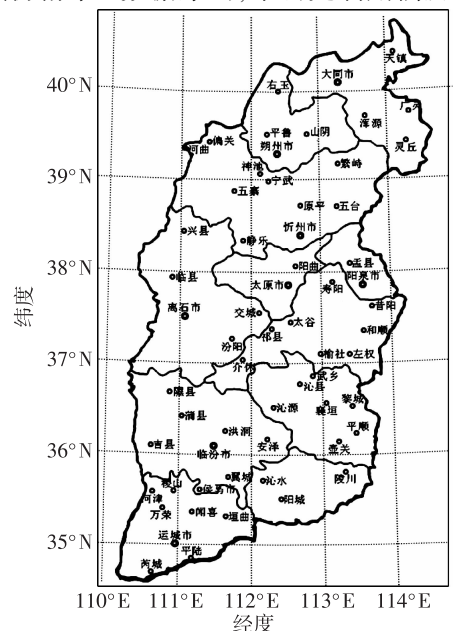


图1 选用的气象站分布

Fig. 1 Distribution of the chosen meteorological stations

日期,即将 1 月 1 日定为 1。如 1959 年 10 月 8 日为初霜冻日,则该年初霜冻日就以 281 计,并由此建立所选站点初霜冻日的的数据序列。

## 1.2 指标

参照《作物霜冻害等级》气象行业标准(张养才等,1991)和中国科学技术蓝皮书第 5 号《气候》(国家科学技术委员会,1990),把地面最低温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  作为霜冻指标。初霜冻日定义为下半年首次出现地面最低温度  $t_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$  的日期(张霞和钱锦霞,2010),本文将下半年最低地温首次出现  $t_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\min} \leq -2^{\circ}\text{C}$  和  $t_{\min} \leq -5^{\circ}\text{C}$  分别定义为轻微、中度和重度初霜冻出现日期。

## 1.3 方法

采用线性倾向估计法(魏凤英,2007)分析山西近 50 a 平均初霜冻日的变化趋势;采用  $t$  检验对其信度进行检验(吴洪宝和吴蕾,2005);采用均值分布法分析山西近 50 a 平均初霜冻日的空间分布;采用 Mann-Kendall(M-K)法(魏凤英,2007)检测山西近 50 a 平均初霜冻日的突变特征;采用 Morlet 小波分析法(Christopher and Gilbert,1998;杨梅学和姚檀栋,2003;毛军军等,2010;李斌等,2011;钟升等,2011)分析山西近 50 a 初霜冻及其强度的周期特征。

# 2 结果与分析

## 2.1 山西近 50 a 初霜冻的基本特征

### 2.1.1 山西近 50 a 平均初霜冻的时间分布特征

山西近 50 a 平均初霜冻日最早是 1974 年的 9 月 25 日,最晚是在 1983 年的 10 月 20 日。从线性趋势线看,近 50 a 来,平均初霜冻日总体呈现推后趋势,趋势系数为正值(0.112 7)(图 2),且通过了  $\alpha = 0.01$  的显著性检验,这与钱锦霞等(2010)得出的结论基本一致。

从图 2 多项式拟合曲线可以看出,山西平均初霜冻日变化具有明显的年代际特征,曲线呈完好的“W”型分布,其中,20 世纪 70 年代和 90 年代初霜冻日提早显著,20 世纪 60 年代、80 年代和 21 世纪初霜冻日明显推后;特别是 21 世纪初霜冻日推后最为明显,较 20 世纪 90 年代推后达 5.6 d/(10 a)。初霜冻日的推后,使农作物在成熟后期遭受初霜冻危害的可能性降低;初霜冻日的稳定推后,直接影响了农业生产布局,可通过延长作物的生育期来提高单位面积的农业生物产量;各地可适当考虑增加复种指数,改变以往的耕作模式,引进生育期较长的作物,充分发挥当地热量资源。

### 2.1.2 山西近 50 a 平均初霜冻的空间分布特征

在所选山西 62 站中,平均初霜冻日最早为 9 月 15 日,最迟为 11 月 6 日。9 月中旬开始,北部高寒区开始出现初霜冻;9 月中下旬北部以及东北部相继出现初霜冻;10 月上旬中部和东南部等地开始出现初霜冻;在此后的 1 候里,中西部的广大地区相继出现初霜冻。10 月 21—25 日这一候,南部的临汾、运城的大部分地区出现初霜冻。初霜冻出现最晚的是垣曲县。山西初霜冻的出现时间正值各地作物、水果成熟期,对作物乳熟、黄熟及水果着色构成影响,尤其对叶类植物影响较大。

对 62 站 1961—2010 年平均初霜冻进行统计,得到山西各地累年平均初霜冻日分布(图 3),由图可见,山西近 50 a 平均初霜冻日从南向北呈“5 节阶梯”型分布,且北部为西部早于东部,中南部为东部早于西部。这样分布一方面是地理地形原因,另一方面是冷空气路径原因。入侵山西的冷空气多为北和西北方向,当冷空气抵达山西时,便通过大同盆地、忻州盆地、太原盆地长驱直入长治盆地,这是导致山西中东部以及东南部平均初霜冻日早于中西部 and 西南部的的主要原因。

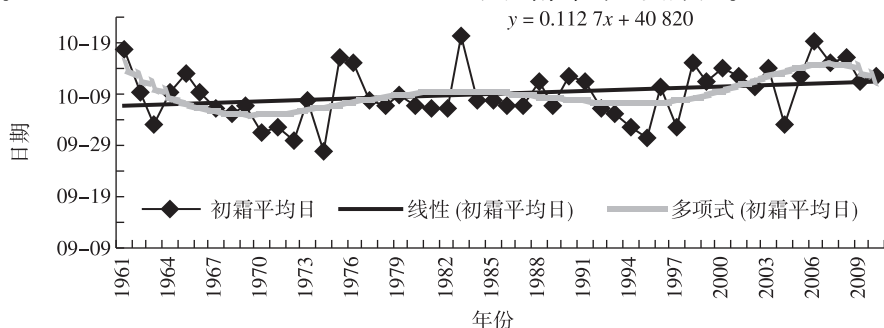


图 2 山西平均初霜冻日历年变化曲线

Fig. 2 Curve of the average first frost date in Shanxi from 1961 to 2010

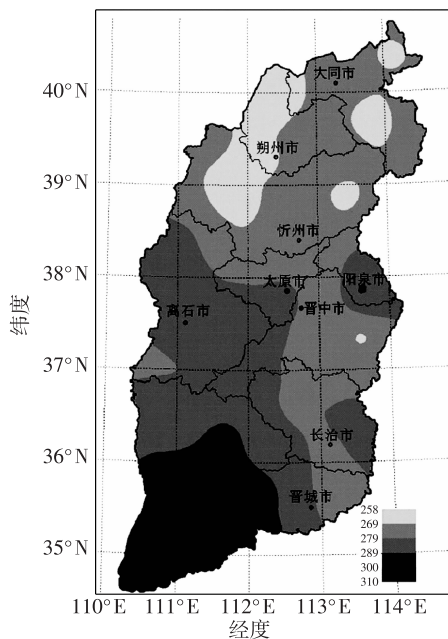


图3 山西平均初霜冻日空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the average first frost date in Shanxi

鉴于山西平均初霜冻日的空间分布,农作物品种布局北部、东部应以早熟、特早熟品种为宜,南部和西部则可选择偏晚的品种。平均初霜冻日的推后,山西农作物不同熟性品种的可种植区逐渐北移东扩,晚熟品种的可种植区域逐渐扩大。

### 2.1.3 山西近50 a 平均初霜冻的突变特征

气候突变是普遍存在于气候变化中的一个重要现象。符淙斌和王强(1992)综合给出气候突变的普适定义,气候突变有4种类型,即均值突变、方差突变、跷跷板突变和转折突变,实际的突变往往是它们的组合。本文使用的是M-K方法,当2条曲线的波动范围超过了置信区间,表明有明显的突变发生;2条曲线的交点位于置信区间内,则交点所在的年

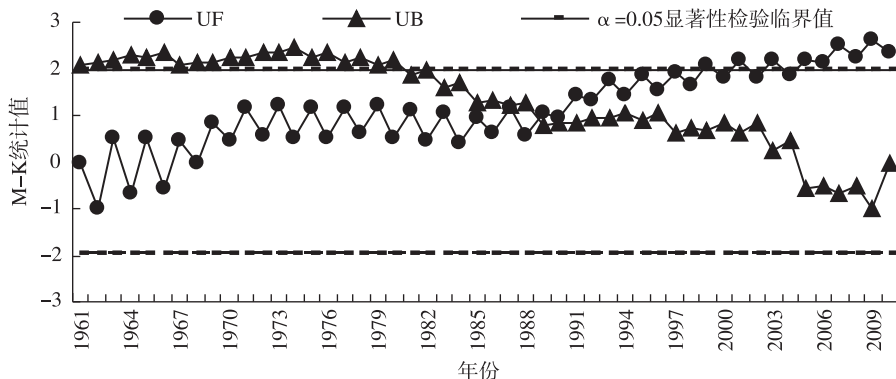


图4 山西平均初霜冻日的M-K突变检验

Fig. 4 M-K mutation test of the average first frost date in Shanxi

份就是突变年份。

山西平均初霜冻日的M-K突变分析表明,近50 a 平均初霜冻日在1989年发生了一次突变(图4),平均初霜冻日从一个相对偏早期跃变为一个相对偏晚期。这与钱锦霞等(2010)得出的结论——突变时间是2000年差别较大。

以上分析表明,所取序列时段不同会造成突变点的不同,这需要进一步加强对影响山西初霜冻日突变的内部和外部机理认识,才能更好地把握山西初霜冻日的突变特征,这将在另一篇文章中详细探讨。

平均初霜冻日的突变会造成热量资源分布的变化,使不同农作物种类和品种的种植区域随之发生变化,会增加农业生产结构的不稳定性。

## 2.2 山西近50 a 初霜冻的变化趋势分布特征

对所选62个台站初霜冻资料进行了线性回归计算,得到初霜冻日趋势变化系数分布(图5)。正系数表示趋势变化率增大,对应初霜冻日有推后趋势;负系数表示趋势变化率减小,对应初霜冻日有提前趋势。

图5表明,山西近50 a 初霜冻日的正趋势变化明显,且占据大部分区域,初霜冻日有推后的趋势;但南部和中南部的部分地区的趋势系数为负值,表明这些地区初霜冻日有提前的趋势。

结果表明,山西各地初霜冻趋势变化差异明显,62个台站中,有48个站线性倾向为正,大部分地区的初霜冻呈现推后趋势。推后幅度最大的地区位于山西的东北部、东部和西北部地区;推后幅度较大的地区集中在晋北的大同和朔州、晋中的吕梁北部和阳泉以及晋南的临汾和运城的部分地区,线性倾向为 $1.9 \sim 4.2 \text{ d}/(10 \text{ a})$ ;推后趋势最大的是偏关,线性倾向为 $6.5 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 。

本文对其变化趋势的显著性进行了检验,全省

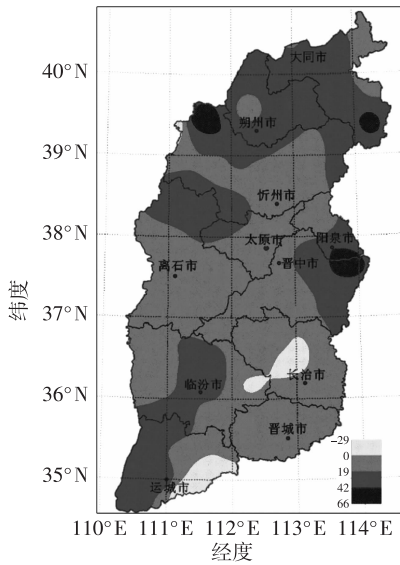


图 5 山西近 50 a 初霜冻趋势变化系数 ( $\times 10$ ; 单位:  $d/(10 a)$ ) 分布

Fig. 5 Distribution of the first frost trend changing coefficient ( $d/(10 a)$ ; tenfold) in Shanxi from 1961 to 2010

共有 14 个站通过 0.05 信度的显著性检验 (图 6), 这 14 个站是: 安泽、忻府区、兴县、阳城、阳曲、阳泉、翼城、右玉、孟县、榆社、垣曲、原平、盐湖区、左权。这些区域主要位于山西的北部、中东部以及南部地区。

可见, 在平均初霜冻总体趋势推后的背景下, 仍然存在有提前的地区, 这增加了农作物品种布局的复杂性、不确定性和农作物遭受初霜冻危害的可能性。

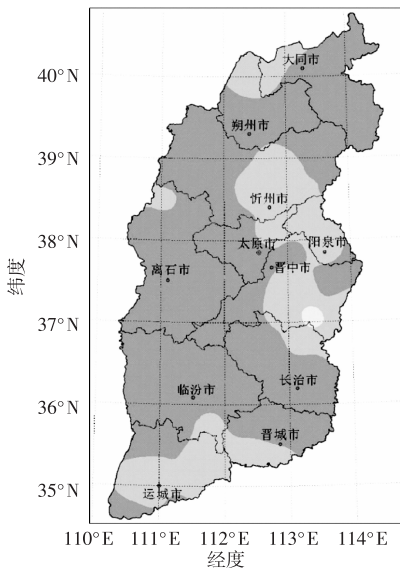


图 6 通过信度检验的台站区域分布

Fig. 6 Distribution of the stations which passed the reliability test

## 2.3 山西近 50 a 初霜冻的周期分析

小波分析是一种时频域分析方法, 具有多分辨率的特性和表现序列局部特征的能力, 被形象地称为数学显微镜 (李正周, 2008)。20 世纪 90 年代, Daubechies and Sweldens (1998)、Sweldens (1996) 提出了一种新的基于提升算法的小波变换; Du et al. (2006) 提出了基于小波变换的峰值检测方法, 并融合了基于小波变换的基线校准。小波变换允许把一个时间序列分解为时间和频率的贡献, 对于获取一个复杂时间序列的特征规律, 分辨时间序列在不同尺度上的演变特征非常有效 (邵晓梅等, 2006; 刘刚等, 2008), 小波分析在数学上具有严格意义的突变点诊断能力 (毛军军等, 2010), 近年来被广泛应用于气候的多时间尺度分析和突变特征研究, 但目前利用小波分析对山西霜冻变化进行多尺度研究尚未见报道。

### 2.3.1 初霜冻序列的小波分析

采用 Morlet 小波对山西近 50 a 来初霜冻日序列进行连续小波变换, 得到小波变换系数的实部等值线 (图 7)。

图 7 显示了山西近 50 a 初霜冻日在不同时间尺度上存在的周期振荡, 图中等值线为正的用实线表示, 表示初霜冻日推后; 等值线为负值用虚线表示, 表示初霜冻日提前; 等值线零处则对应着突变点。近 50 a 来山西初霜冻日存在着多个时间尺度变化规律, 在 1961—2010 年期间山西初霜冻日变化准周期是以准 5 a 的低频振荡为主, 准 5 a 的较小尺度的周期振荡存在于近 50 a 来的大部分时段, 同时 15 a 左右的周期振荡也非常明显。2010 年, Morlet 小波系数实部等值线无论是大尺度还是小尺度均为正值且未闭合, 所以, 目前山西初霜冻正处于推后期。

### 2.3.2 初霜冻日的小波方差分析

图 8 是山西近 50 a 初霜冻日序列的小波方差曲线。小波方差反应了能量随时间尺度的分布, 可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度, 对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度, 用以反应时间序列的主要振荡周期 (王文圣, 2005)。可以看出, 山西初霜冻日小波方差在不同时间尺度上存在 3 个峰值, 对应的时间尺度分别为 1 a、5 a 和 15 a。

## 2.4 山西近 50 a 初霜冻强度的周期分析

### 2.4.1 初霜冻强度的小波分析

分别对轻微初霜冻、中度初霜冻、重度初霜冻的

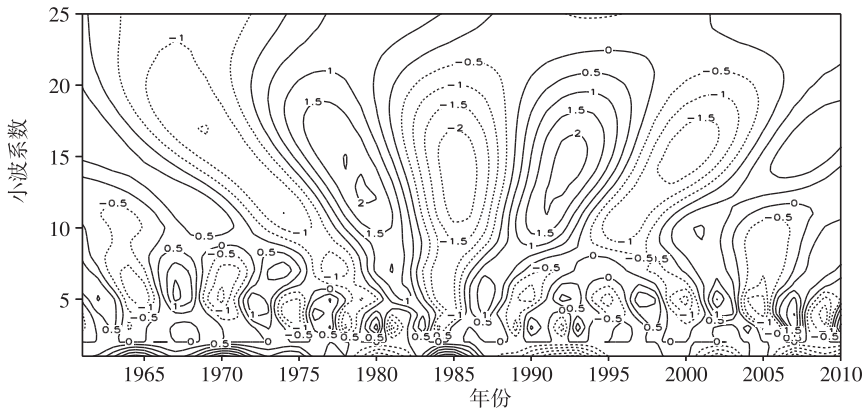


图 7 山西初霜冻日 Morlet 小波系数实部等值线

Fig. 7 Morlet coefficient real part isoline of the first frost dates in Shanxi

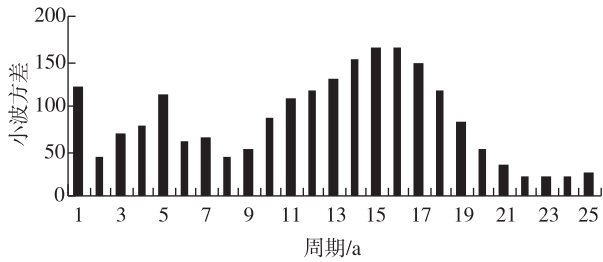


图 8 山西近 50 a 初霜冻日序列的小波方差曲线

Fig. 8 The wavelet variance curve of the first frost date series in Shanxi from 1961 to 2010

周期进行了分析。图 9a 清楚地展示了山西轻微初霜冻变化的多层次结构。上半部分等值线稀疏,对应较长时间尺度的振荡,下半部分等值线密集,对应较短时间尺度的振荡。在 1961—2000 年期间具有 10 a 左右的周期震荡,1967—1983 年期间还存在 6 a 周期,2000 年以后 6~7 a 周期明显。2010 年无论从大尺度还是小尺度周期,小波系数实部等值线均为正值且未闭合,因此,目前处于轻微初霜冻的推后期。

图 9b 为山西中度初霜冻的小波变换,其周期变化呈现出多尺度、多层次,正负交替频繁,突变点多,这些尺度的振荡常表现出较强的阶段性。1961—2010 年周期从 5 a 逐渐延长为 10 a,另外,5 a 以下尺度的振荡也存在其中,主要出现在 20 世纪 80 年代以后。2010 年,中度小波系数实部等值线均为负值且未闭合,因此,目前处于中度初霜冻发生的提前期。

图 9c 为山西重度初霜冻的小波变换,在 1961—1973 年,5 a 周期明显,在 1979—2010 年,6~7 a 的周期振荡明显,9 a 的周期也存在于整个 50 a 中。2010 年,重霜冻小波系数实部等值线均为负值且未闭合,因此,目前处于重度初霜冻的提前期。

由此可见,用小波在对时间序列的周期分析时,均存在多时间周期尺度的复杂嵌套结构,小尺度的变化嵌套在大尺度的变化下,但周期变化并不像均值变化可以在短时间从一个周期变化到另一个周期。

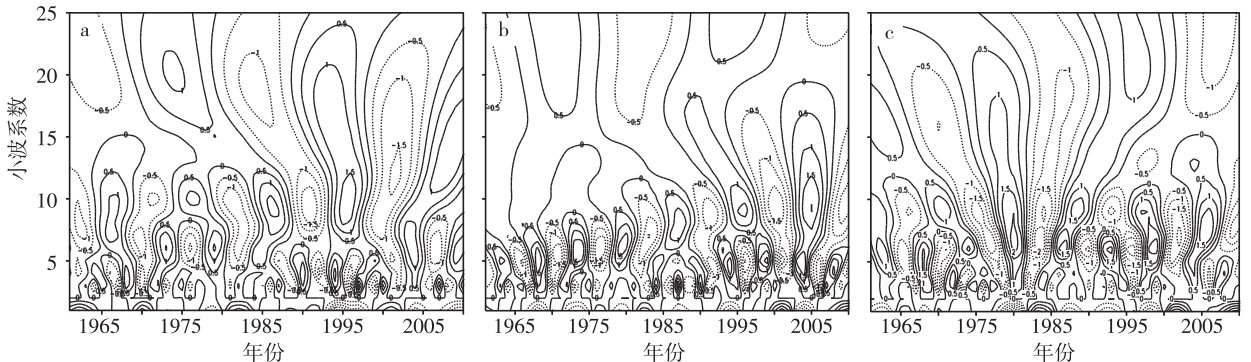


图 9 山西各种强度初霜冻的 Morlet 小波系数实部等值线 a. 轻微初霜冻;b. 中度初霜冻;c. 重度初霜冻

Fig. 9 Morlet coefficient real part isoline of 3 different first frost intensities in Shanxi a. mild first frost;b. moderate first frost;c. severe first frost

### 2.4.2 山西近 50 a 初霜冻强度的小波方差分析

图 10a 是山西轻微初霜冻的小波方差分布。其小波方差主要存在 3 个峰值,对应的时间尺度分别为 2 a 和 10 a。其中尺度为 2 a 的峰值最高,能量最大,其次是 10 a 时间尺度。

图 10b 为山西中度初霜冻的小波方差分布。其小波方差主要存在 3 个峰值,对应的时间尺度分别为 3 a、5 a 和 9 a。其中,尺度 5 a 峰值最高,其次是 3 a 时间尺度。

图 10c 是山西重度初霜冻的小波方差分布。其小波方差主要存在 2 个峰值,对应的时间尺度分别为 6 a 和 9 a,其中 6 a 尺度峰值最高。

总之,小波分析较好地揭示了初霜冻的周期特点,分析其系数实部以及小波方差曲线均能有效地找出初霜冻的变化特征,并给出不同时段初霜冻的周期特点。根据初霜冻日及其强度的周期可有效判断未来初霜冻的推后提前,这对于合理调整种植结构、合理选择作物品种、充分发挥当地热量资源、避开初霜冻危害、实现农业增产丰收具有重要作用。

## 3 结论与讨论

1) 山西近 50 a 平均初霜冻日呈显著的推后趋势,具有明显的年代际特征。20 世纪 70 年代和 90 年代平均初霜冻日提早显著,60 年代、80 年代和 21 世纪平均初霜冻日明显推后;21 世纪以来推后更为显著,达 5.6 d/(10 a)。初霜冻日的推后,延长了作物的生育期,使农作物成熟后期遭受初霜冻危害的可能性降低,各地农作物可种植区可逐渐北移东扩,晚熟品种的可种植区也有所扩大。初霜冻日稳定推后,对山西农业生产的布局和耕作模式具有一定的影响。

2) 山西近 50 a 平均初霜冻日从南向北呈“5 级阶梯”型分布,9 月中旬到 11 月上旬,自北向南出现初霜冻,且北部为西部早于东部,中南部为东部早于

西部。因此,农作物品种北部、东部应以早熟、特早熟品种为宜,南部和西部则可选择晚熟的品种。但在山西平均初霜冻总体趋势推后的背景下,仍然存在提前的地区,这增加了农作物品种布局的复杂性和不确定性。

3) 山西初霜冻、轻微初霜冻、中度初霜冻、重度初霜冻的主要周期分别为 5 a、2 a、5 a 和 6 a;次周期分别为 15 a、10 a、3 a、9 a;目前,山西正处在初霜冻日和轻微初霜冻的推后期以及中度和重度初霜冻的提前期。初霜冻日及其强度的周期可有效判断未来霜冻的提前与推后,对于短期内调整选择合理的品种、充分发挥当地热量资源具有重要意义。

## 参考文献:

- 蔡霞,吴占华,梁桂花,等. 2011. 近 53 a 山西朔州市农业气候资源变化特征分析[J]. 干旱气象,29(1):88-93.
- 陈仁升,康尔泗,蓝永超,等. 2001. 河西地区近 50 年来年径流、降水和气温变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,15(4):51-56.
- 丁一汇,戴晓苏. 1994. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象,20(12):19-26.
- 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 2006. 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2(1):3-8.
- 杜春芳,咸拴狮,李建勋,等. 2010. 晋南地区油菜主要气象灾害与减灾避灾对策[J]. 山西农业科学,38(8):57-60.
- 符添斌,王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,16(4):482-493.
- 国家科学技术委员会. 1990. 中国科学技术蓝皮书第 5 号《气候》[M]. 北京:科学文献出版社:25-26.
- 李斌,李丽娟,李海滨,等. 2011. 澜沧江流域干旱变化的时空特征[J]. 农业工程学报,27(5):87-92.
- 李正周. 2008. MATLAB 数字信号处理与应用[M]. 北京:清华大学出版社:203-204.
- 林学椿,于淑秋. 1990. 近 40 年我国气候趋势[J]. 气象,16(10):16-21.
- 刘刚,刘纪平,赵荣,等. 2008. 小波方法在澜沧江降水量周期变化分析中的应用[J]. 计算机工程与应用,44(8):236-241.
- 毛军军,朱良燕,张学友,等. 2010. 基于小波变换的气温趋势和分形

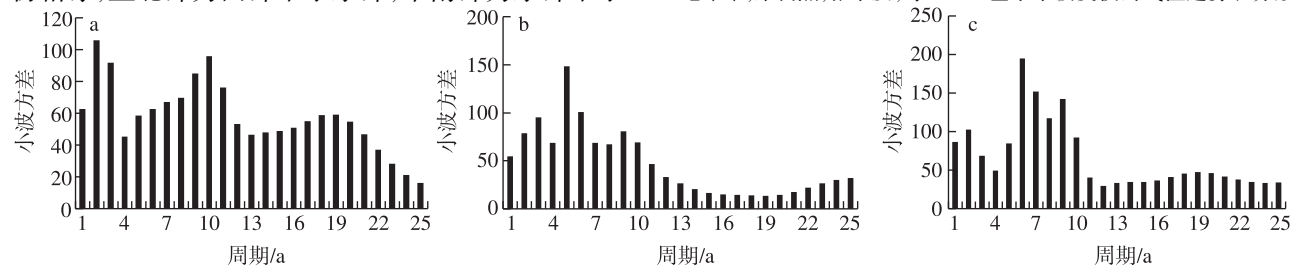


图 10 山西近 50 a 初霜冻强度的小波方差分布 a. 轻微初霜冻;b. 中度初霜冻;c. 重度初霜冻

Fig. 10 The wavelet variance distribution of the 3 different first frost intensities in Shanxi from 1961 to 2010 a. mild first frost;b. moderate first frost;c. severe first frost

- 特征分析[J]. 计算机工程,36(2):18-24.
- 气候变化国家评估报告编写委员会. 2007. 气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社.
- 钱锦霞,武捷,班胜林. 2009. 1951—2008年太原市霜冻发生特征分析[J]. 中国农学通报,25(10):287-289.
- 钱锦霞,张霞,张建新,等. 2010. 近40年山西初终霜日的变化特征[J]. 地理学报,65(7):801-808.
- 秦大河,丁一汇,苏纪兰,等. 2005. 中国气候与环境演变评估(1):中国气候与环境变化及未来趋势[J]. 气候变化研究进展,1(1):4-9.
- 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 2006. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报:自然科学版,42(4):503-509.
- 史俊东,张建诚,许爱玲,等. 2010. 晋南低温与霜冻发生规律及其对棉花生产的影响[J]. 山西农业科学,38(3):30-33.
- 王绍武. 1990. 近百年我国及全球气温变化趋势[J]. 气象,16(2):11-15.
- 王文圣. 2005. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社:4-5.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京:气象出版社:105-142.
- 吴洪宝,吴蕾. 2005. 气候变率诊断方法和预测方法[M]. 北京:气象出版社:1-40.
- 徐铭志,任国玉. 2004. 近40年中国气候生长期的变化[J]. 应用气象学报,15(3):306-312.
- 杨梅学,姚檀栋. 2003. 小波气候突变的检测——应用范围及应注意的问题[J]. 海洋地质与第四纪地质,23(4):73-76.
- 于淑秋. 2005. 近50年我国日平均气温的气候变化[J]. 应用气象学报,16(6):787-793.
- 张霞,钱锦霞. 2010. 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,31(1):111-114.
- 张霞,钱锦霞,靳宁. 2009. 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,25(22):348-351.
- 张养才,何稚勋,李世魁. 1991. 中国农业气象灾害概论[M]. 北京:气象出版社:147-157.
- 郑景云,葛全胜,赵会霞. 2003. 近40年中国植物物候对气候变化的响应研究[J]. 中国农业气象,24(1):28-32.
- 钟升,沈绪榜,郑江滨,等. 2011. 提升小波变换的数据并行计算方法研究[J]. 计算机学报,34(7):1323-1332.
- Christopher T, Gilbert P A. 1998. Practical guide to wavelet analysis [J]. American Meteorological Society,79(1):61-78.
- Daubechies I, Sweldens W. 1998. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. Journal of Fourier Analysis and Applications,4(3):245-267.
- Du P, Kibbe W A, Lin S M. 2006. Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform based pattern matching [J]. Bioinformatics,22(17):2059-2065.
- IPCC Working Group I. 2001. Climate change 2001: The scientific basis [M]. New York: Cambridge University Press.
- IPCC Working Group II. 2007. Climate Change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability Summary for policymakers [M]. New York: Cambridge University Press.
- Sweldens W. 1996. The lifting scheme: A Custom-design construction of biorthogonal wavelets [J]. Applied and Computation Harmonic Analysis,3(2):186-200.

(责任编辑:张福颖)