

# 山西省近 50 年无霜期变化特征研究

范晓辉, 王麒翔, 王孟本

山西大学黄土高原研究所, 山西 太原 030006

**摘要:** 根据山西省 108 个地面站近 50 a (1959—2008 年) 的初霜日、终霜日和无霜期系列数据, 采用非参数 Mann-Kendall 检验法, 对山西省近 50 a 无霜期的变化特点进行了研究。计算结果表明, 全省 108 个地面站的平均无霜期在 124.6~232.9 d 之间。Mann-Kendall 检验结果显示, 在所有地面站中, 77 个站初霜日推后, 78 个站终霜日提前, 87 个站无霜期延长, 其中 35 个站显著延长。全省初霜日显著推后(+1.41 d/10 a), 终霜日显著提前(-2.57 d/10 a), 无霜期显著延长(+3.72 d/10 a)。初霜日推后和终霜日提前对无霜期延长的贡献约分别为 1/3 和 2/3。Pearson 相关分析证明, 在全省范围内, 初霜日、终霜日和无霜期与年平均气温、纬度和海拔具有密切关系。直线回归分析显示, 气温每升高 1 °C, 初霜日迟 4.7 d, 终霜日早 4.1 d, 无霜期延长 8.8 d。纬度每北移 1°, 初霜日早 6.1 d; 终霜日迟 4.5 d; 无霜期短 10.6 d。海拔每升高 100 m, 初霜日早 3.4 d; 终霜日迟 2.8 d; 无霜期短 6.2 d。对初霜日、终霜日和无霜期这些特点的认识, 对本区自然和人工生态系统管理、生态恢复和生态工程实施等具有重要意义。

**关键词:** 初霜日; 终霜日; 无霜期; 趋势分析; Mann-Kendall 检验; 山西省

**中图分类号:** P423      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5906 (2010) 10-2393-05

无霜期是指一年中终霜后至初霜前的一整段时间, 是反映地区热量情况的指标之一, 且农作物的生长期与无霜期密切相关。无霜期愈长, 生长期也愈长。2007年IPCC(政府间气候变化专门委员会)发布了《气候变化2007: 综合报告》。该报告的最重要信息之一: 最近100年(1906—2005)全球气温变暖趋势为0.74 °C (0.56~0.92 °C); 近50 a (1956—2005年)的气温升高幅度[每10 a 升高0.13 °C(0.10~0.16 °C)]几乎是近100年(1906—2005年)的2倍<sup>[1]</sup>。据研究, 随着全球气候变暖, 美国的初霜日推后, 终霜日提前, 无霜期延长<sup>[2]</sup>。德国、奥地利、瑞士和爱沙尼亚的无霜期延长<sup>[3]</sup>。自1864年以来, 挪威斯瓦尔巴(Atndalen流域)的无霜期延长<sup>[4]</sup>。在20世纪, 美国的无霜期延长, 且西部比东部更明显<sup>[5]</sup>。加拿大阿尔伯达省全境初霜日推后, 终霜日提前, 无霜期延长<sup>[6]</sup>。同时有学者研究推测, 自1955—2002年, 北半球温带大陆气候变暖导致入春提早, 终霜日提前<sup>[7]</sup>。最新研究表明, 自1955—2000年, 中国的无霜期呈延长趋势, 特别是自1980—2000年, 无霜期的延长明显加快<sup>[8]</sup>; 自1957—2006年, 中国大部分地区初霜日逐渐推迟, 终霜日不断提前, 且终霜日提前的趋势比初霜日推后的趋势明显<sup>[9]</sup>。

山西省地处黄河中游、黄土高原东部。介于110°14'—114°33' E, 34°34'—40°43' N之间, 南北长

628 km, 东西宽385 km, 总面积156 271 km<sup>2</sup>。属于中温带和暖温带季风气候区, 即具有温带大陆性气候。据最新研究, 近50 a (1959—2008年)山西省年平均气温线性趋势升高1.475 °C<sup>[10]</sup>, 升高幅度约为同期全球的2.3倍。气温升高会导致初霜日、终霜日和无霜期发生变化。而无霜期又是制约植物对光、热资源利用的重要因素。尽管有关研究<sup>[8-9]</sup>覆盖了山西, 但至今仍缺乏对山西省无霜期变化的研究。因此, 分析和掌握山西省无霜期变化特点, 对区域自然和人工生态系统管理, 以及生态恢复和生态建设方案实施等具有重要意义。

目前对气象系列数据的趋势分析多采用参数线性回归检验(LR)和非参数秩检验如Mann-Kendall检验(MK)等方法。当数据概率分布为非正态分布时, LR法不如MK法有效<sup>[11]</sup>。本文旨在根据山西省108个气象站近50 a (1959—2008年)的初霜日、终霜日和无霜期系列数据, 从观测站和全省两个尺度, 对山西省无霜期的时空变化基本特征进行研究。

## 1 数据来源与处理

山西省现有108个地面气象观测站(图1)覆盖了全省84个县、10个县级市和14个市辖区。108个站近50 a (1959—2008年)的初霜日、终霜日和无霜期系列数据由山西省气象信息中心提供。初霜日是指每年秋末冬初第一次出现白霜的日期, 而终霜日是指每年冬末春初最后一次出现白霜的日期。所

基金项目: 山西省黄土高原地区综合治理规划研究专项(20081143)

作者简介: 范晓辉(1979年生), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域生态学。E-mail: finexiaohui@163.com

\*通信作者: 王孟本(1954年生), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为植物生态学、区域生态学。E-mail: mbwang@sxu.edu.cn

收稿日期: 2010-09-28

有站点均为连续观测数据,记录年限最少为 30 a, 71 个站点达 50 a。

### 1.1 数据整理

首先根据原始数据,分别以年度总天数中的第某天表示终霜日和初霜日,重建各地面站初霜日和终霜日的数据序列。如 1959 年 4 月 15 日为终霜日,10 月 8 日为初霜日,该年终霜日和初霜日即分别以 105 和 281 计。并由此建立全省初霜日和终霜日的数据序列。进而计算各地面站和全省初霜日、终霜日和无霜期的多年平均值和 5 a 滑动平均值,并对所有数据序列的数据分布特征进行分析。

### 1.2 Mann-Kendall 检验

因为各个数据序列的分布偏斜度值在 -6.2~5.1 之间,本研究采用 Mann-Kendall 检验法(MK 法)对各个数据序列的变化趋势进行检验。利用 MAKESENS 1.0 软件<sup>[12]</sup>对初霜日、终霜日和无霜期的变化趋势统计量  $Z$  及其显著性、斜率  $Q$  (即年变率)和截距  $B$  进行计算。 $p < 0.05$ 、 $0.01$  表示  $Z$  分别达显著和极显著水平。根据  $Q$  值的正负和绝对值大小即可知初霜日(或终霜日)是提前还是推后,以及提前或推后的天数。同理亦可知无霜期是缩短还是延长,以及缩短或延长的天数。为了方便起见,文中初霜日和终霜日的变化率以每 10 a 提前或推后多少天(d),即“d/10 a”表示。无霜期的变化率以每 10 年(10 a)延长或缩短多少天(d),亦即“d/10 a”表示。

### 1.3 Pearson 回归检验

采用 Pearson 相关系数 $\rho$ 对初霜日、终霜日和无霜期与气温、纬度和海拔的相关性进行分析。采用直线回归模型对纬度和海拔(分别为自变量)与初霜日、终霜日和无霜期(分别为因变量)的关系进行拟合。 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$  表示分别达显著、极显著水平。

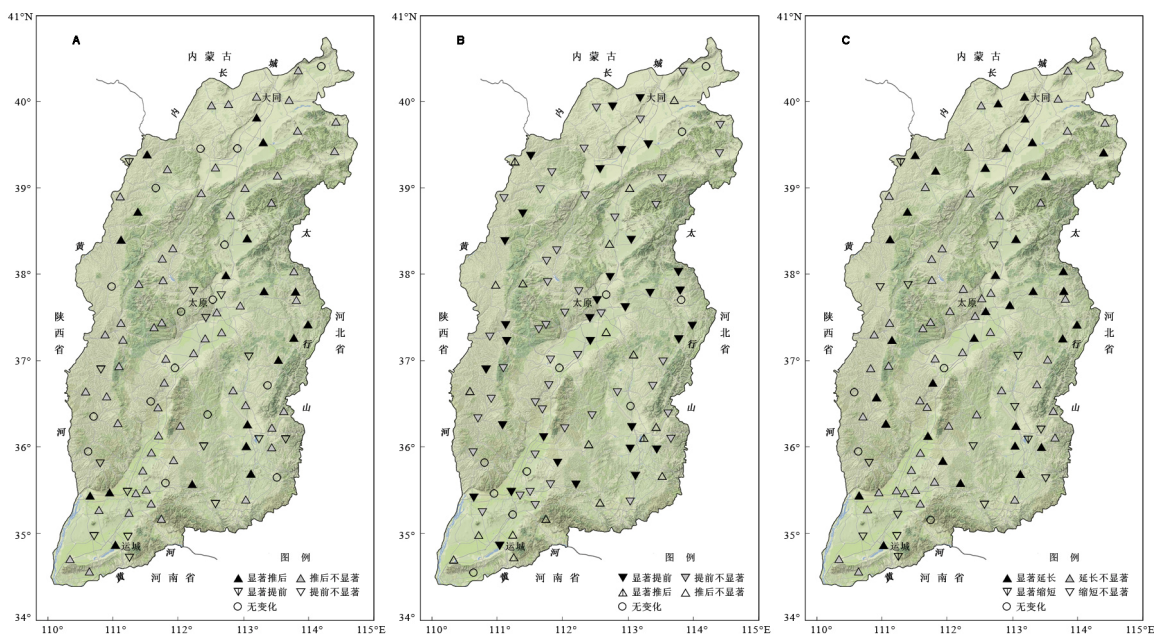
## 2 结果与分析

### 2.1 各观测站的无霜期变化趋势

山西省 108 个地面站的各站多年平均初霜日在 9 月 14 日至 11 月 5 日之间(晋西北右玉站初霜日最早,晋南垣曲站初霜日最晚),各站平均终霜日在 3 月 14 日至 5 月 13 日之间(晋南平陆站终霜日最早,晋西北五寨站终霜日最晚),各站平均无霜期在 124.6~232.9 d 之间(晋西北五寨站无霜期最短,晋南平陆站无霜期最长)。108 个地面站的总平均无霜期为  $(181.02 \pm 21.75)$  d。(平均值 $\pm$ 标准差,下同)。

根据 MK 检验结果(图 1),77 个站初霜日推后  $[+1.84 \pm 1.17]$  d/10 a,其中 19 个站显著推后  $[+3.09 \pm 0.82]$  d/10 a。15 个站初霜日提前  $[-0.99 \pm 0.88]$  d/10 a,仅河曲站显著提前  $(-2.68)$  d/10 a。另有 16 个站初霜日没有变化( $Q=0$ )。

MK 检验结果同时显示,78 个站终霜日提前  $[(-3.55 \pm 2.60)]$  d/10 a,其中 34 个站显著提前  $[(-5.40 \pm 2.74)]$  d/10 a。19 个站终霜日推后  $[+2.06 \pm 1.35]$  d/10 a,仅河曲和长治站终霜日显著推后  $[+3.88 \pm 0.18]$  d/10 a。另有 11 个站终霜日没有



图的底图为地形图,颜色越深表示海拔越高

图 1 山西省 108 个地面气象观测站近 50 年 (1959-2008) 的初霜日(A)、终霜日(B)和无霜期(C)的变化趋势  
Fig. 1 Mann-Kendall test trends for the dates of first fall frost (A) and last spring frost (B), and the length of frost-free period (C) over the 50 years for the period 1959-2008 from 108 surface meteorological stations in Shanxi Province

变化( $Q=0$ )。

检验结果同时表明,87 个站的无霜期呈延长趋势 $[(+4.68\pm 3.48) \text{ d}/10 \text{ a}]$ ,其中 35 个站无霜期显著延长 $[(+7.67\pm 3.40) \text{ d}/10 \text{ a}]$ 。4 个站(垣曲、永和、吉县和介休站)无霜期没有变化趋势( $Q=0$ )。另有 17 个站无霜期呈缩短趋势 $[(+2.75\pm 1.65) \text{ d}/10 \text{ a}]$ ,其中 3 个站(平陆、长治和河曲站)无霜期呈显著缩短趋势 $[(+5.26\pm 1.29) \text{ d}/10 \text{ a}]$ 。

由此可见,初霜日推后和终霜日提前的站点分别占 71.4%和 72.2%,而初霜日提前和终霜日推后的站点分别占 13.9%和 17.6%,初霜日和终霜日没有变化的站点亦很少(分别占 14.7%和 10.2%)。同时由于仅终霜日提前(或初霜日推后)便可导致无霜期延长。所以 MK 检验结果表明,无霜期呈延长趋势的站点高达总站数的 80.6%,而无霜期呈缩短趋势和无霜期没有变化趋势的站点仅分别占总站数的 15.7%和 3.7%。

## 2.2 山西省的无霜期总体变化趋势

山西省各年平均初霜日在 9 月 26 日至 10 月 21 日之间,平均终霜日在 3 月 27 日至 4 月 26 日之间。平均无霜期为 179.3 d,1963 年最短(164.62 d),2006 年最长(199.75 d)。

对全省历年平均初霜日、平均终霜日和平均无霜期数据进行 MK 分析,结果显示,山西省初霜日呈显著推后趋势 $(+1.41 \text{ d}/10 \text{ a})$ ,终霜日呈极显著提前趋势 $(-2.57 \text{ d}/10 \text{ a})$ ,无霜期呈极显著延长趋势 $(+3.72 \text{ d}/10 \text{ a})$ (图 2)。

根据初霜日推后值和终霜日提前值得到的无霜期延长值为 $+3.98 \text{ d}/10 \text{ a}$ ,与直接从历年无霜期平均天数得到的无霜期延长值 $(+3.72 \text{ d}/10 \text{ a})$ 略有不同。

以后者为基础,运用平差法对初霜日推后值和终霜日提前值进行校正,便可计算出初霜日推后和终霜日提前对无霜期延长的贡献率分别为 35.4%和 64.6%,约各占 1/3 和 2/3。由后者同时可知,近 50 a 全省平均无霜期延长了 18.6 d。

## 2.3 无霜期长短与气温、纬度和海拔的关系

### 2.3.1 与气温的关系

山西省气温分布趋势是由南向北降低,由盆地向高山降低。相关分析表明,全省 108 个地面站的初霜日、终霜日和无霜期与年平均气温具有极显著相关性(表 1)。在全省范围内,平均气温越高,初霜日越迟,终霜日越早,无霜期越长。气温每升高  $1^\circ\text{C}$ ,初霜日退后约 4.7 d,终霜日提前约 4.1 d,无霜期延长约 8.8 d(表 2)。

### 2.3.2 与纬度和海拔的关系

山西省初霜日和无霜期与纬度和海拔具有显著负相关性;终霜日与纬度和海拔具有显著正相关性(表 1)。在全省范围内,纬度或海拔越高,初霜日越早,终霜日越迟,无霜期越长。由表 2 可见,纬度每北移  $1^\circ$ ,初霜日提前约 6.1 d,终霜日推迟约 4.5 d,无霜期缩短 10.6 d。海拔每升高 100 m,初霜日提前约 3.4 d,终霜日推迟约 2.8 d,无霜期缩短 6.2 d。

## 3 小结与讨论

以上分析表明,就 108 个地面站而言,2/3 以上(71.3%)初霜日推后(其中 19 个显著推后),接近 1/3(28.7%)初霜日无变化和提前(仅 1 个显著提前)。7/10 以上(72.2%)终霜日提前(其中 34 个显著提前),接近 3/10(27.8%)终霜日无变化和终霜日推后(仅 2 个显著推后)。8/10 以上(80.6%)无霜期延长[其中 35

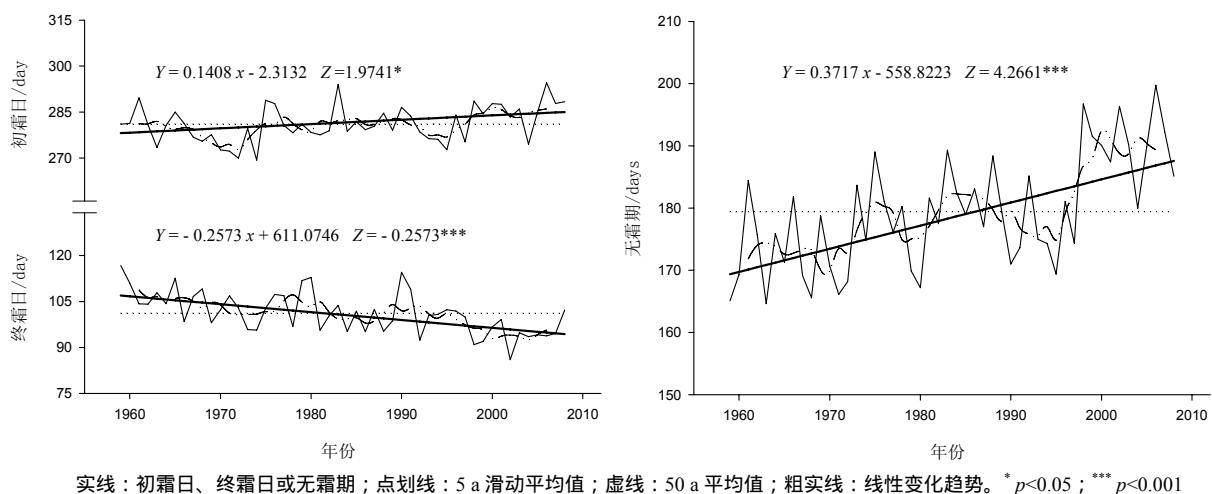


图 2 山西省近 50 a (1959—2008) 的初霜日、终霜日和无霜期变化趋势

Fig. 2 Mann-Kendall test trends for the dates of first fall frost (FFF) and last spring frost (LSF), and the length of frost-free period (FFP) in Shanxi Province

表1 山西省108个气象站的初霜日、终霜日和无霜期与气温、纬度和海拔的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between the variable of the date of first fall frost, the date of last spring frost or the length of frost-free period and the variable of air temperature, latitude or altitude for 108 surface meteorological stations in Shanxi Province.

因子	气温/°C	纬度/(°)	海拔/m
初霜日/d	0.9491***	-0.8246***	-0.8187***
终霜日/d	-0.8172***	0.5997***	0.6829***
无霜期/d	0.9055***	-0.7321***	-0.7689***

\*\*\* $P < 0.001$

表2 山西省108个气象站的初霜日、终霜日和无霜期与气温、纬度和海拔的直线回归模型

Table 2 The linear regression models with the date of first fall frost, the date of last spring frost, or the length of frost-free period as dependent variable, and the air temperature, latitude or altitude as independent variable for 108 surface meteorological stations in Shanxi Province

因子	气温/°C	纬度/(°)	海拔/m
初霜日/d	$Y=236.83+4.69x$	$Y=509.553-6-6.098-1x$	$Y=311.696-4-0.033-5x$
终霜日/d	$Y=139.40-4.098-8x$	$Y=4.505-9x-68.246-2$	$Y=74.720-2+0.028-4x$
无霜期/d	$Y=96.49+8.780-4x$	$Y=577.983-6-10.635x$	$Y=235.934-3-0.061-8x$

个(32.4%)显著延长,接近2/10(19.4%)无霜期无变化和缩短(仅2个显著缩短)。在省级尺度上,山西省初霜日显著推后,终霜日显著提前,无霜期显著延长,近50a无霜期线性延长18.6d;初霜日推后和终霜日提前对无霜期延长的贡献约各占1/3和2/3。

Pearson回归分析表明,在本省范围内,初霜日、终霜日和无霜期与年平均气温、纬度和海拔具有密切关系:年平均气温、纬度和海拔越高,初霜日越早,终霜日越迟,无霜期越长。也就是说,初霜日由南向北提前,由盆地向高山提前;终霜日由南向北推后,由盆地向高山推后;无霜期由南向北延长,由盆地向高山延长。直线回归分析显示,气温每升高1°C,初霜日迟4.7d,终霜日早4.1d,无霜期增长8.8d。纬度每北移1°,初霜日早6.1d;终霜日迟4.5d;无霜期缩短10.6d。海拔每升高100m,初霜日早3.4d;终霜日迟2.8d;无霜期缩短6.2d。

对比而言,山西全省终霜日提前幅度(2.57d/10a)比Schwartz等<sup>[7]</sup>(2006)对北半球温带大陆的估测值(1.5d/10a)明显要大。山西全省无霜期延长幅度(3.72d/10a)显然大于大致同纬度的美国(约1.4d/10a)<sup>[5]</sup>;而与德国、奥地利、瑞士和爱沙尼亚等国(3.4~5.0d/10a)<sup>[3]</sup>大致相当。明显小于黑龙江省佳木斯地区的无霜期延长幅度(5.7d/10a)<sup>[13]</sup>,而与内蒙古阿尔山市的无霜期延长幅度(3.82d/10a)<sup>[14]</sup>基本相同。

山西全省初霜日推后幅度(+1.41d/10a)略小于华北地区(+1.77d/10a),而终霜日与华北地区相等(-2.57d/10a)<sup>[9]</sup>。需要注意的是,由于无霜期变化的空间异质性,山西省不仅有沁水、怀仁和中阳等23个站的无霜期延长幅度比佳木斯地区大;而且有平遥、蒲县和壶关等64个站的无霜期延长幅度比阿尔山市小。更有垣曲等4个站的无霜期无变化,河曲等3个站的无霜期显著缩短。

对山西省无霜期变化的这些认识,对因地制宜制定新品种引进计划、调整种植结构和进行气象灾害防御,对区域自然和人工生态系统管理,以及生态恢复和生态建设方案实施等具有重要指导意义。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report[C]// CORE WRITING TEAM, PACHAURI, R.K & REISINGER, A. The assessment of the three Working Groups of the IPCC's Fourth Assessment Report- Geneva, Switzerland, 2007: 104.
- [2] EASTERLING D R. Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(9): 1327-1332.
- [3] MENZEL A, JAKOBI G, AHAS R. Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries[J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(7): 793-812.
- [4] NORDLI P O, GRIMENES A A. The climate of Atndalen[J]. Hydrobiologia, 2004, 521(1/3): 7-20.
- [5] KUNKEL K E, EASTERLING D R, HUBBARD K. Temporal variations in frost-free season in the United States: 1895-2000[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(3): 1-4.
- [6] SHEN S S P, YIN H, CANNON K. Temporal and spatial changes of the agroclimate in Alberta, Canada, from 1901 to 2002[J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(7): 1090-1105.
- [7] SCHWARTZ M D, AHAS R, AASA A. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere[J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 343-351.
- [8] LIU B H, HENDERSON M, XU M. Spatiotemporal change in China's frost days and frost-free season, 1955-2000[J]. Journal Geophys Res, 2008, 133.
- [9] 许艳, 王国复, 王盘兴. 近50a中国霜期的变化特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(4): 427-433.  
XU Yan, WANG Guofu, WANG Panxing. Climatic change of frost in China in recent 50 a[J]. Sci Meteor Sinica, 2009, 29(4): 427-433.
- [10] 王孟本, 范晓辉. 山西省近50a气温和降水变化基本特征研究[J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2009, 32(4): 457-465.  
WANG Mengben, FAN Xiaohui. Characterization of General Change Patterns of Air Temperature and Precipitation over the 50 Years from 1958 to 2007 in Shanxi Province, China[J]. Journal of Shanxi University Natural Science Edition, 2009, 32(4): 457-465.
- [11] ÖNÖZ B, BAYAZIT M. The power of statistical tests for trend detection[J]. Turkish journal of Engineering and Environmental Sciences, 2003, 27: 247-251.
- [12] SALMI T, MÄÄTTÄ A, ANTTILA P, et al. Detecting trends of annual

- values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKESENS. [http://www.fmi.fi/organization/contacts\\_25.html](http://www.fmi.fi/organization/contacts_25.html).
- [13] 于盛楠. 佳木斯地区 50 年初终霜日及无霜期的变化趋势[J]. 杂粮作物, 2004, 24(4): 225-227.
- YU Shengnan. The change trends in the dates of first fall frost and last spring frost, the length of frost-free period over the 50 Years from 1951 to 2000 in Kiamusze area[J]. Rain Fed Crops, 2004, 24(4): 225-227.
- [14] 谷新波, 王佳, 萨日娜. 阿尔山市 35 年初终霜日及无霜期变化分析[J]. 内蒙古气象, 2008, 3: 26-28.
- GU Xinbo, WANG Jia, SA Rina. The change trends in the dates of first fall frost and last spring frost, the length of frost-free period over the 35 Years from 1971 to 2006 in Aershan City[J]. Inner Mongolia Weather, 2008, 3: 26-28.

## Variations in frost-free period in Shanxi province, China: 1959-2008

FAN Xiaohui, WANG Qixiang, WANG Mengben

Institute of Loess plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006

**Abstract:** A data set of the date of last spring frost (LSF), the date of first fall frost (FFF), and the length of frost-free period (FFP) for the period 1959-2008 from 108 surface meteorological stations was used to characterize the variations of LSF, FFF and FFP in Shanxi Province (PR China) from the aspects of every stations and provincial level with the help of nonparametric Mann-Kendall test method. The average FFP ranged from 124.6 days to 232.9 days among all the stations. A later FFF, an earlier LSF and a longer FFP were found at 77, 78 and 87 stations, respectively, with a significant positive trend for the FFP found at 35 stations. Significant later FFF (+1.41days per decade), earlier LSF (-2.57 days per decade) and longer FFP (+3.72 days per decade) were found over the province, and the later FFF and earlier LSF accounted for one third and two thirds of the longer FFP, respectively. The extremely significant correlations were found of FFF, LSF and FFP with air temperature, latitude and elevation within the province, with the FFF 4.7 days later, LSF 4.1 days earlier and FFP 8.8 days longer for every one degree increase in air temperature; the FFF 6.1days earlier, LSF 4.5 days later and FFP 10.6 days shorter for every one degree increase in latitude; and the FFF 3.4 days earlier, LSF 2.8 days later and FFP 6.2 days shorter for every 100 m increase in elevation. The current research would be greatly helpful for sound and effective ecosystems managements in the province.

**Key words:** first frost day; last frost day; frost-free period; trend analysis; Mann-Kendall test; Shanxi