

Characteristics of the Frost-Free Season Changes from 1961 to 2009 in Northwest China*

Shaoyong Chen^{1,2}, Wangping Lou³, Junhong Zhang², Jinsong Wang¹

¹Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of CMA,
Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou

²Meteorological Bureau of Baiyin, Baiyin

³Meteorological Bureau of Cixi, Cixi

Email: csy505@tom.com

Received: Aug. 9th, 2012; revised: Aug. 28th, 2012; accepted: Sep. 7th, 2012

Abstract: Using the daily surface minimum air temperature data of 135 observational stations from 1961 to 2009 in Northwest of China and average temperature data, with the methods linear trend analysis, Mann-Kendall, Moving T-examination, wavelet analysis, power spectrum and so on, analyzed climatic variation characteristics of the frost-free season of Northwest China in recent 49 years. The results show that: 1) The frost-free season is the longest place in South Gansu, South Shanxi which has 220 days, and next is South Xinjiang Basin which has 210 days. The frost-free season is the shortest place in the Qinghai Plateau which is shorter than for three months. Other place, It has about 120 d - 140 d in northern Xinjiang-Gansu Corridor and 150 d - 160 d in Gansu East of the river, North Shaanxi; 2) The average frost-free season postpone at a rate of 3.8 d/10 a, whole area postpone 18 days. There is an abrupt change in 1987. The frost-free season have the remarkable 3 year periods in recent 49 year; 3) There are 90% stations that the frost-free season postpone, and majority area postpone by speed of 2 - 5 d/10 a. Looked through the interdecadal climatic trends, since 1980 ages have 50% above station to be increase, especially in the recent 10 years, have the close 92% station to be increase; 4) Is changed the climate warm influence, the cold date number reduces, the last frost ahead of time, the first frost postpone, the frost-free season lengthens. But to the frost-free season contribution, the last frost is higher than the first frost.

Keywords: The Frost-Free Season; Climatic Change; Northwest China

中国西北地区 1961~2009 年无霜期的气候变化特征*

陈少勇^{1,2}, 楼望萍³, 张俊红², 王劲松¹

¹中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州

²白银市气象局, 白银

³慈溪市气象局, 慈溪

Email: csy505@tom.com

收稿日期: 2012 年 8 月 9 日; 修回日期: 2012 年 8 月 28 日; 录用日期: 2012 年 9 月 7 日

摘要: 利用中国西北地区 135 个测站, 1961~2009 年历年逐日地面最低气温和平均气温资料, 采用线性趋势分析、Mann-Kendall、子波分析、功率谱分析和合成分析等方法, 分析了近 49 a 中国西北区无霜期的气候变化特征。结果表明: 1) 中国西北地区无霜期最长的地方在陇南 - 陕南, 平均 220 d 以上, 其次塔里木盆地和吐鲁番地区平均 200 d 以上。无霜期最短的地方主要在青海高原, 一般不足 3 个月。北疆 - 河西走廊 120 d~140 d, 甘肃河东 - 陕北 150 d~160 d。2) 西北地区无霜期平均以 3.8 d/10 a 的速率增加, 1987 年有明显的突变现象。近 49 年来无霜期有显著的 3 年周期; 3) 西北地区有 90% 的站点以 2~5 d/10 a 的速率延长。通过各年代际的变化来看, 1960~1970 年代大多数地方无霜期偏短, 1980 年代开始增加, 1990 年代有 58% 的站偏长, 近 10 年, 有

*资助信息: 国家自然科学基金(40975054)和白银市科技计划项目(GK2011-2-087A)资助。

92%的站无霜期偏长；4) 受气候变暖影响，寒冷日数减少，终霜冻提前，初霜冻推迟，无霜期延长。但对无霜期的贡献，终霜冻高于初霜冻。

关键词：无霜期；气候变化；西北地区

1. 引言

无霜期，是一年中终霜日和初霜日之间的持续日数，无霜期可表示喜温作物在一地区可以生长的时间，因而表示了地区热量资源的丰富程度^[1]，把它称为作物生长期的气候条件。由于气候的年际变化，出现初霜和终霜的日期有早有晚，每年的无霜期也就不一致。通常所说的无霜期，是指从当地的平均终霜日到平均初霜日之间的天数。中国西北属于干旱半干旱地区，敏感响应全球气候变化，并对区域和全球气候变化具有相应的反馈作用^[2]。在全球气候变暖背景下，极端天气气候事件的发生更加频繁^[3-5]，许多地区经常受到冷空气的侵袭。霜冻是一种低温冷害的重要农业自然现象，它与最低气温有着密切的关系^[6]。马柱国^[7]利用 1951~2000 年的资料，研究了中国北方地区的霜冻，认为，中国北方地区霜冻次数有明显减少的趋势，变率大小也存在明显的区域差异，华北、西北东部和东北西南部是变率较大的地区。也有一些关于西北地区无霜期的研究^[8-12]，但都是其中小区域的分析，对整个中国西北地区无霜期的研究并不多见。那么西北区的无霜期具有什么样的分布特征和变化特点，以及区域无霜期与其它因素的关系如何，有必要进一步分析和研究，对于全面认识西北区气候变化和防灾减灾，合理利用气候资源^[13,14]具有重要意义。

2. 资料与方法

本文采用了中国西北地区资料完整的 135 个气象站 1961~2009 年逐年实测地面逐日最低气温、平均气温资料，资料由中国气象局国家气象信息中心提供，已经进行了严格的质量控制。

无霜期的定义：以日最低气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 作为霜冻的气候指标^[15-18]，每年春季/秋季，末次/首次出现的霜冻称为终霜冻/初霜冻，终霜日和初霜日之间的持续日数就是无霜期。

统计西北地区 1961~2009 年逐年逐站无霜期时间序列，运用线性趋势分析，Mann-Kendall 突变分析^[19]、

MHAT 小波^[20]、谱分析^[21]和滑动 T 检验等方法分析西北地区无霜期的分布特征和变化特点。

计算各站逐年无霜期与初、终霜日、年平均气温、极端低温频数的相关系数，分析各要素与无霜期之间的关系。

3. 西北地区无霜期的时空分布特征

3.1. 无霜期的地理分布

图 1 给出了西北地区无霜期平均日数的地理分布图，从图中可以看出，西北地区无霜期最长的地方在陇南-陕南，全年在 220 d 以上，将近 8 个月，其中武都、安康 256 d、汉中 248 d、石泉 243 d；其次无霜期较长的地方是南疆的塔里木盆地和吐鲁番地区有 7 个月左右，如和田 220 d，吐鲁番 220 d；无霜期最短的地方在青海高原、甘南高原以及天山等高寒地区，普遍不足三个月，高原南部的五道梁、玛多、清水河、河南州、久治和天山地区的巴音布鲁克，帕米尔高原的吐尔尕特等地方不足 15 天，几乎没有无霜期。其次，北疆-河西走廊，无霜期开始在 120 d~140 d；甘肃河东-陕北在 150 d~160 d。这种分布状况与西北地区常年极端最低气温的分布大体一致^[22]，表明，极端寒冷的地方，寒冷期持续时间长，无霜期短，较温暖的地方，寒冷期持续时间短，无霜期长。

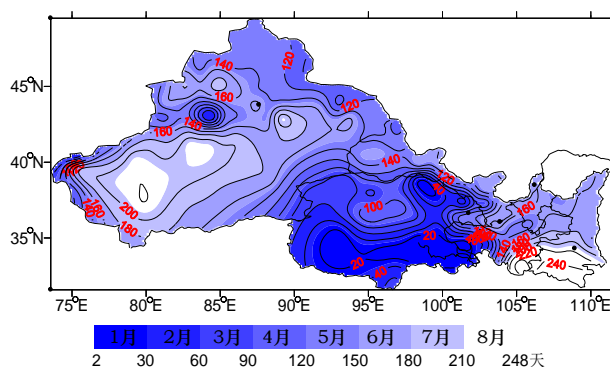


Figure 1. The spatial distribution of the frost-free season in Northwest China

图 1. 西北地区平均无霜期日数

3.2. 无霜期的时间变化特征

3.2.1. 气候趋势

用 135 个站的空间平均, 建立西北地区年平均无霜期日数序列, 把这一序列分别与青海、北疆、南疆、陕南、陕北、宁夏、甘肃河西、甘肃河东区域的平均无霜期序列求相关, 其相关系数分别为 0.80、0.69、0.75、0.54、0.36、0.78、0.79、0.64, 可见整个西北区域的平均序列具有较高的代表性。分析其年际变化特征(图 2(a)), 从图中可见, 在 49 a 尺度上, 西北地区无霜期气候趋势极显著($r = 0.81$, 通过 $\alpha = 0.001$ 显著性水平), 以 3.8 d/10 a 的速率波动上升, 全区平均增加了 18 天。平均无霜期, 1960 年代~1970 年代在 145 d 左右, 1970 年代后期~1980 年代后期在 150 d 左右, 从 1990 年代以来上升趋势更加显著, 目前无霜期在 165 d 左右。图 3 给出了西北区各站年无霜期开始日期的气候倾向率, 有 90% 的站点无霜期延长, 64% 的站无霜期显著延长(达到 90% 信度), 从图 3 中可见, 大多数区域无霜期以 2~5 d/10 a 的速率显著延长, 其中延长最大区在青海高原北部 - 新疆东部地区达到 5~12 d/10 a。

无霜期减少的地方少而零零散散, 主要在新疆局地的奇台、库车、陕西的长武、商州等地方。

3.2.2. 气候突变

从 M-K 曲线图(图 2(b))也能看出, 西北区无霜期表现出明显的延长趋势, 1960 年代先上升后降低, 1970 年代以来, 一直在较稳定的上升趋势中, 结合滑动 T 检验和图 2(a)确定 1987 年有显著的突变现象, 其后无霜期开始达到一个显著延长的时期。

3.2.3. 年代际变化

在平均无霜期序列的小波分析图上(图 2(c)), 30 年以上的振荡变化层次上, 经历了“一十—”的演变阶段, 目前正处在延长期, 20 年以下 5 年以上的变化中, 无明显的稳定周期。结合功率谱分析, 3 年周期比较显著($\alpha = 0.10$)。

进一步分析各地无霜期的年代际变化情况, 相对于 1961~2009 年的平均状况, 1960~1970 年代西北地区大多数地方无霜期偏短, 1980 年代有 42% 的站偏长, 1990 年代有 58% 的站偏长, 近 10 年, 有 92% 的站无霜期偏长。

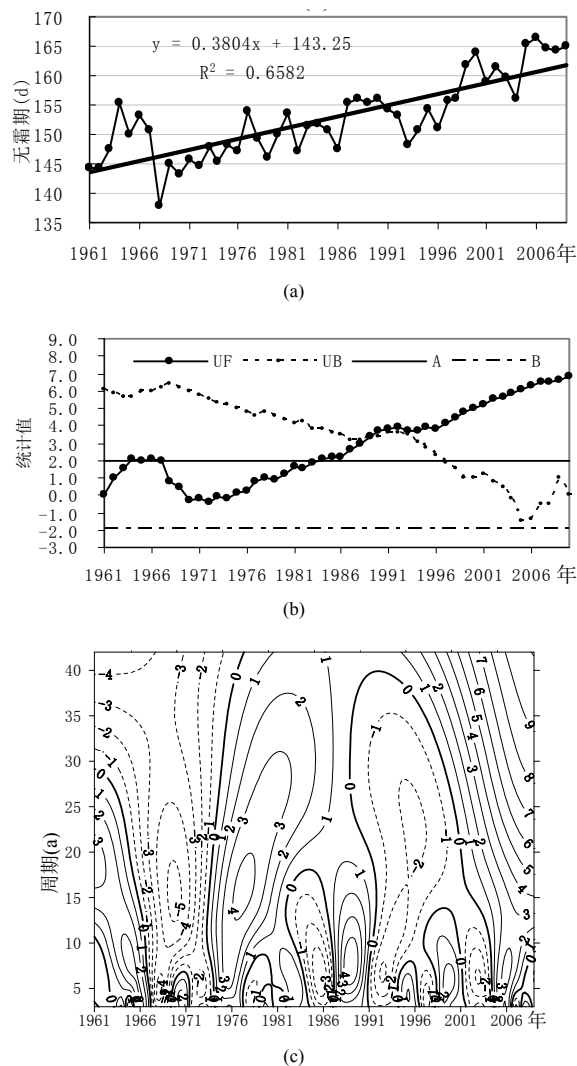


Figure 2. The inter-annual variation (a), the M-K curve (b) and MHAT wavelet analysis (c) of the frost-free season in China Northwest

图 2. 中国西北地区无霜期年际变化(a)和 M-K 检验曲线图(b)以及小波分析(c)

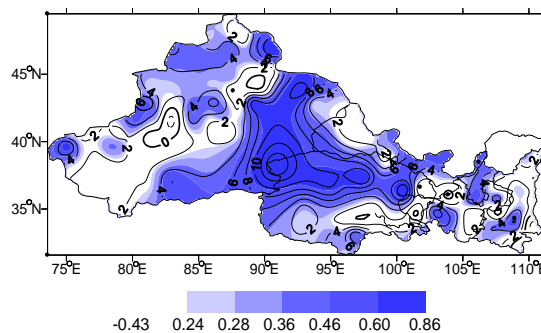


Figure 3. The spatial distribution of linear trend of long-term variation of the frost-free season in Northwest China. (unit: d/10 a, shaded areas from light to dark have passed confident levels of 90%, 95%, 99%, 99.9%, respectively)

图 3. 中国西北地区无霜期日数线性趋势空间分布图。(单位: d/10 a, 阴影区从浅到深分别为达到 90%、95%、99%、99.9% 信度)

西北地区气候变暖显著, 且变暖的一致性较高^[23], 通过以上分析表明, 在全球气候变暖背景下, 西北地区无霜期日数愈来愈多, 这与其他人对于其中小区域的研究结果一致^[10,24]。

4. 影响无霜期的因素

4.1. 初/终霜冻对无霜期的影响

计算西北地区平均无霜期序列与初、终霜冻的相关系数分别为-0.81、0.79, 各站都相关极其显著。其中, 各站无霜期与初霜冻的最高相关系数青海高原的清水河站-0.94, 最低相关系数新疆的吐尔尕特-0.49。各站无霜期与终霜冻的最高相关系数在青海高原的茫崖站 0.91, 最低相关系数在甘肃的岷县 0.39。这是容易理解的, 当终霜冻结束早(迟)、初霜冻开始迟(早)时, 无霜期就长(短)。为了鉴别初霜冻和终霜冻各自对无霜期的影响, 建立无霜期与终霜冻和初霜冻的回归方程:

$$Y = 6.816 - 1.008X_1 + 0.983X_2$$

Y 是无霜期, X_1 是终霜冻, X_2 是初霜冻, 复相关系数 1.00。

从相关系数和回归系数判断, 对无霜期的影响, 终霜冻的贡献要略大于初霜冻。这一点, 从初/终霜冻的变化率上也可以得证。西北地区平均终霜冻以 1.91 d/10 a 速率显著提前, 而终霜冻以 1.82 d/10 a 的速率显著推迟。终霜冻的速率大于初霜冻, 因而对无霜期的贡献要大。

4.2. 其它要素对无霜期的影响

西北地区年平均气温与无霜期相关显著, 相关系数 0.48, 通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平。两者都有显著的上升趋势, 年代际变化也一致。图 4(a)给出了各站气温与无霜期的相关系数, 从图中可见, 西北地区绝大部分为正相关, 相关显著(通过 $\alpha = 0.1$ 显著性水平)的区域主要在南疆、青海高原-河西走廊-新疆东北一带。说明西北地区无霜期正响应气候变暖, 但这种响应关系存在区域差异。

西北地区极端低温频数与无霜期相关极显著, 相关系数-0.55, 通过 $\alpha = 0.001$ 显著性水平。两者都有显著的线性气候趋势, 且反向变化, 无霜期增加, 极端低温频数减少。年代际变化也反向明显(图略)。图 4(b)给出了各站极端低温频数与无霜期的相关系数,

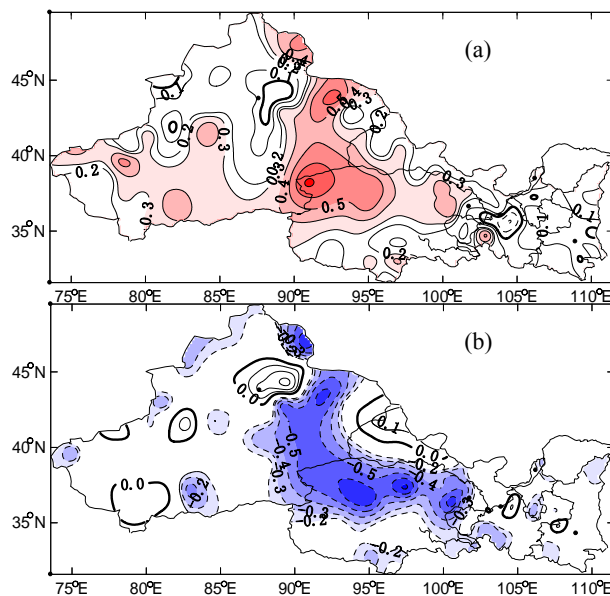


Figure 4. The correlation coefficients among the temperature(a) and the frequency of the annual extreme lowest temperature and the data of the frost-free season in Northwest China (Shaded areas have passed confident levels of 90%)

图 4. 中国西北地区无霜期日数与年平均气温(a)和极端低温频数(b)的相关系数(阴影区为达到 90% 信度)

- 新疆东北一带。说明西北地区无霜期负响应极端低温事件, 极端低温事件多(少), 则无霜期短(长), 但这种响应关系也存在区域差异。

5. 结论

1) 中国西北地区无霜期最长的地方在陇南-陕南, 全年在 220 d 以上, 其次是南疆的塔里木盆地和吐鲁番地区有 7 个月左右。无霜期最短的地方在青海高原、甘南高原以及天山等高寒地区, 普遍不足三个月, 高原南部、天山地区, 帕米尔高原等地方不足 15 天。北疆-河西走廊在 120 d~140 d, 甘肃河东-陕北在 150 d~160 d。

2) 西北地区无霜期以 3.8 d/10 a 的速率显著增加, 近 49 年来全区平均增加了 18 天。1987 年有明显的突变现象, 其后无霜期达到一个更长的时期。无霜期有 3 年的显著周期。

3) 有 90% 的站点无霜期延长, 64% 的站无霜期显著延长, 其中延长最大区在青海高原北部-新疆东部地区。表明, 在全球气候变暖背景下, 西北地区无霜期愈来愈长。

4) 通过各年代际的变化来看, 1960~1970 年代大多数地方无霜期偏短, 1980 年代有 42% 的站偏长, 从

图中可见,西北地区绝大部分为负相关,相关显著(通过 $\alpha = 0.1$ 显著性水平)的区域主要在青海高原北部 1990 年代有 58% 的站偏长,近 10 年,有 92% 的站无霜期偏长。

5) 初霜冻、终霜冻日期、平均气温、极端低温频数等影响无霜期的变化,从相关系数、回归系数以及气候趋势综合判断,对无霜期的贡献,终霜冻高于初霜冻;无霜期与年平均气温正相关,与极端低温频数负相关。表明受气候变暖影响,寒冷日数减少,终霜冻提前,初霜冻推迟,无霜期延长。但这种影响存在区域差异。

参考文献 (References)

- [1] 大气科学辞典编委会. 大气科学辞典[M]. 北京气象出版社, 1994: 576-576.
- [2] 王劲松, 陈发虎, 张强等. 亚洲中部干旱半干旱区近 100 年来的气温变化研究[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1035-1045.
- [3] X.-J. Gao, Z.-C. Zhao and F. Giorgi. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(5): 927-942
- [4] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1066-1075.
- [5] 王冀, 江志红, 丁裕国等. 21 世纪中国极端气温指数变化情况预估资源科学[J]. 资源科学, 2008, 30(7): 1084-1092.
- [6] 冯玉祥, 何维勋. 霜冻的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 1-6.
- [7] 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, 58(增刊): 31-37.
- [8] 唐晶, 张文煜, 赵光平等. 宁夏近 44 a 霜冻的气候变化特征[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 39-43.
- [9] 李万希, 陈雷, 王润元等. 石羊河流域 1970~2009 年气候变化对农业生产结构的影响[J]. 农学学报, 2012, 2(3): 25-30.
- [10] 白松竹, 李焕, 田忠锋. 1961~2008 年阿勒泰地区异常初终霜日变化特征[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(5): 25-29.
- [11] 蒲云锦, 韩春光. 石河子地区霜冻变化及其对农业的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(6): 50-53.
- [12] 陈少勇, 孙秉强. 白银市霜冻的气候变化及对农业生产的影响[J]. 甘肃科学学报, 2006, 18(4): 46-49.
- [13] 汤绪, 杨续超, 田展等. 气候变化对中国农业气候资源的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1962-1968.
- [14] 郭建平, 高素华, 刘玲. 我国西部地区农业开发与农业气候资源高效利用[J]. 资源科学, 2002, 24(2): 22-25.
- [15] 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.
- [16] 张旭晖, 谢小萍, 霍金兰. 江苏初霜冻发生时空变化特征[A]. 第 28 届中国气象学会年会——S11 气象与现代农业[C], 2011.
- [17] 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, 31(1): 111-114, 120.
- [18] 刘静. 宁夏棉花霜冻及全生育期热量指标研究[J]. 宁夏农林科技, 1995, 4: 7-9.
- [19] 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): 482-493.
- [20] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 21-26.
- [21] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 126-145.
- [22] 陈少勇, 王劲松, 任燕等. 近 49 a 中国西北地区极端低温事件的演变特征[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1266-1273.
- [23] S. Y. Chen, Y. Y. Shi, Y. Z. Guo, et al. Temporal and spatial variation of annual mean air temperature in arid and semiarid region in northwest China over a recent 46 year period. *Journal of Arid Land*, 2010, 2(2): 87-97.
- [24] 曹倩, 姚凤梅, 林而达等. 近 50 年冬小麦主产区农业气候资源变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 161-166.