

文章编号: 1007-7588(2013)01-0165-08

中国西北地区初霜冻的气候变化特征

陈少勇^{1,2,3,4}, 郑延祥⁴, 楼望萍⁵, 郭玉珍⁴

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020;

2. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020;

3. 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020;

4. 白银市气象局, 白银 730900; 5. 慈溪市气象局, 慈溪 315300)

摘要: 利用中国西北地区 135 个测站, 1961 年-2009 年历年逐日地面最低气温和 NCEP/NCAR 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 49a 中国西北地区初霜冻的气候变化特征。结果表明: ①中国西北地区初霜冻开始最迟的地方在陇南-陕南, 平均出现在 11 月上旬, 其次是南疆盆地出现在 10 月中下旬; 初霜冻开始最早的地方在青海高原, 一般开始在 8 月下旬, 其余的地方初霜冻开始在 9 月中下旬-10 月上旬。初霜冻开始期的稳定性较差, 特别是北疆、高原北部和南部; ②西北地区初霜冻平均以 1.8d/10a 的速率推迟, 1986 年有明显的突变现象, 近 49a 来初霜冻有显著的 2~3a 周期; ③西北地区有 85% 的站点以 (2~4)d/10a 的速率推迟, 通过各年代际的变化来看, 1980 年代以来有 50% 以上的站偏迟, 特别是近 10a, 有接近 90% 的站偏迟; ④从环流特征量分析, 影响西北地区初霜冻的环流特征量主要有副高正相关和极涡负相关; 10 月 500 hPa 高度场合成分析表明, 初霜冻偏迟年, 东亚大槽浅, 西太副高偏西偏强, 亚洲中北部盛行纬向环流, 中国西北区处于新疆脊控制之下, 不利于出现降温天气; 初霜冻偏早年, 乌山脊强, 东亚槽深, 西太副高偏东偏弱, 亚洲中北部盛行径向环流, 西北地区上空不断有来自乌山脊前的冷空气, 易形成强降温天气。

关键词: 初霜冻; 气候变化; 环流特征; 合成分析; 西北地区

1 引言

霜冻, 是一年中温暖时期, 土壤表面和植物表面的温度下降到 0℃ 或 0℃ 以下, 而引起植物损伤乃至死亡的农业气象灾害^[1]。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], 全国许多地区仍然受到低温冷害的侵袭。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]。1951 年-2000 年来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^[7]。有关霜冻的研究较多^[8-11], 但对中国西北地区初霜冻开始的研究并不多见。那么西北

区的初霜冻具有什么样的分布特征和变化特点, 以及影响区域初霜冻的因素是什么, 有必要进一步分析和研究, 这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^[12-14]具有一定意义。

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源

本文采用了 3 种气候资料:

(1) 中国西北地区资料完整的 135 个气象站 1961 年-2009 年逐年实测地面逐日最高气温、平均气温资料, 资料由中国气象局国家气象信息中心提供, 地面气温资料已经进行了严格的质量控制。Karl 等^[15]认为, 50 万人口以下的小城镇所产生的热岛效应对气候变化的影响可以忽略, 中国人口在 50 万以上的站点主要在东部, 因此本文在分析中未考

收稿日期: 2012-10-07; 修订日期: 2012-12-02

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40975054); 白银市科技计划项目 (编号: GK2011-2-087A); 白银市科技计划项目 (编号: GK20124-2-069A)。

作者简介: 陈少勇, 男, 甘肃会宁人, 高级工程师, 主要从事气候预测及相关研究工作。E-mail: csy505@tom.com

虑城市热岛效应;

(2)环流特征量资料,是间接利用高度场网格点的高度值组成的区域综合资料^[16],多年来一直在气候分析和气候预测中广泛应用^[17-19];

(3)NCEP/NCAR 北半球 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格点 100hPa、500hPa 高度场再分析资料,该资料数据可靠,在科学研究中被广泛的应用^[20-22]。初霜冻的定义:每年秋季,首次出现的霜冻称为初霜冻。初霜冻是在晚秋气温下降季节里,受北方强冷空气南下影响,短期内近地面气温骤然降低至 0°C 以下,使作物遭受冻害或死亡的一种严寒现象。本文将日最低气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 作为霜冻的气候指标^[23-26],随着一次次冷空气南下,秋季气温下降,天气渐凉,把首次出现的霜冻作为初霜冻开始日。

2.2 研究方法

把1月1日记为1,1月2日记为2, ..., 以此类推,12月31日记为365(闰年366)。统计西北地区1961年-2009年逐年逐站初霜冻出现的时间序列,运用线性趋势分析, Mann-Kendall 突变分析^[27]、MHAT小波^[28]和谱分析^[29]滑动T检验等方法分析西北地区初霜冻的分布特征和变化特点。

使用下式计算各站初霜冻开始期的平均年际变化:

$$k = \frac{\sum_{i=2}^n |f_i - f_{i-1}|}{(n-1)} \quad (1)$$

式中 n 为样本量; f_i 为 i 年 ($i=1, 2, \dots, 49$) 初霜冻开始期。

计算各站逐年初霜冻开始日期序列与74项环流特征量的相关系数,诊断影响西北区初霜冻的环流系统。

使用合成分析方法,分析秋季初霜冻偏迟年与偏早年500 hPa的环流特征。

3 西北地区初霜冻的时空分布特征

3.1 初霜冻平均开始日期

图1给出了西北地区初霜冻平均开始日期的空间分布图,从图中可以看出,西北地区初霜冻开始最迟的地方在陇南-陕南,平均出现在11月上旬,其中汉中、石泉、安康、武都,初霜冻开始于11月中旬,其次南疆盆地开始于10月中下旬;初霜冻开始最早的地方在青海高原和甘南高原,除过柴达木盆地开始于9月上旬,其余普遍在8月下旬就开始了,高原南部的五道梁、玛多、清水河等在7月下旬就有霜冻了,其次,北疆-河西走廊西部,初霜冻开始在9月中下旬,陇东-陕北开始在10月上旬。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^[30],表明,极端寒冷的地方,寒冷期持续时间长,初霜冻开始早,较温暖的地方,寒冷期持续时间短,初霜冻开始迟。

3.2 初霜冻开始期的时间变化特征

3.2.1 气候趋势 用135个站的空间平均,建立西北

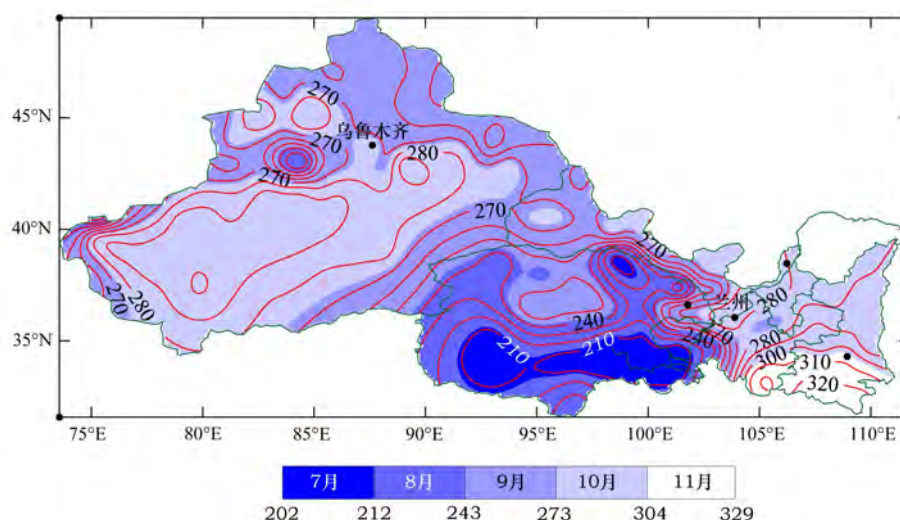


图1 西北地区初霜冻平均开始日期

Fig.1 The spatial distribution of the binging data of First frost in Northwest China

2013年1月

地区年平均初霜冻开始日期序列,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初霜冻序列求相关,其相关系数分别为0.73、0.75、0.74、0.53、0.46、0.72、0.74、0.68,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2a),从图中可见,在49a尺度上,西北地区初霜冻气候趋势极显著($r=0.64$,通过 $\alpha=0.001$ 显著性水平),以1.8d/10a的速率波动上升,全区平均推迟了9d。平均开始期,1960年代-1970年代在277(10月4日)左右,1970年代中期-1980年代在282(10月9日)左右,从1990年代以来上升趋势更加显著,目前初霜冻开始在10月中旬。图3给出了西北区各站年初霜冻开始日期的气候倾向率,有85%的站点初霜冻推迟,50%的站初霜冻显著推迟(达到90%信度),从图3中可见,大多数区域初霜冻开始愈来愈迟,大多数地方以(2~4)d/10a的速率显著推迟,其中推迟最大区在青海高原北部-新疆东部地区达到(4~8)d/10a。

初霜冻开始期提前的地方少而且零零散散,主要在南疆局地的库车、陕西的长武、商州等地方,但都不显著。

3.2.2 气候突变 从M-K曲线图(图2b)也能看出,西北区初霜冻表现出明显的推迟趋势,1960年代有提前趋势,之后1970年代有急剧推迟趋势,结合滑动T检验和图2a确定1986年有显著的突变现象,其后初霜冻开始达到一个更迟的时期。

3.2.3 年代际变化 在平均初霜冻序列的小波分析图上(图2c),20a以上的振荡变化层次上,经历了“- + - +”的演变阶段,目前正处在推迟时期,20a以下5a以上的变化中,无明显的稳定周期。结合功率谱分析,2~3a周期比较显著($\alpha=0.10$)。

进一步分析各地初霜冻的年代际变化情况,相对于1961年-2009年的平均状况,1960年-1970年代西北地区大多数地方初霜冻开始偏早,从1980年代以来有50%以上的站开始偏迟,特别是近10a,有接近90%的站初霜冻开始偏迟。西北地区气候变暖显著,且变暖的一致性较高^[31],通过以上分析表明,在全球气候变暖背景下,西北地区初霜冻开始日期愈来愈迟,这与其他人对于其中小区域的研究结果一致^[32-33]。

3.2.4 年际变化 分析初霜冻开始期平均距平(K)的空间分布(图略)发现,初霜冻开始期的年际变化值大于10d以上的区域分布在北疆、青海高原除过江河源区、甘肃河西中东部及以东的大部分地方、宁夏、陕西,其中最大值在青海南部达到20d,表明

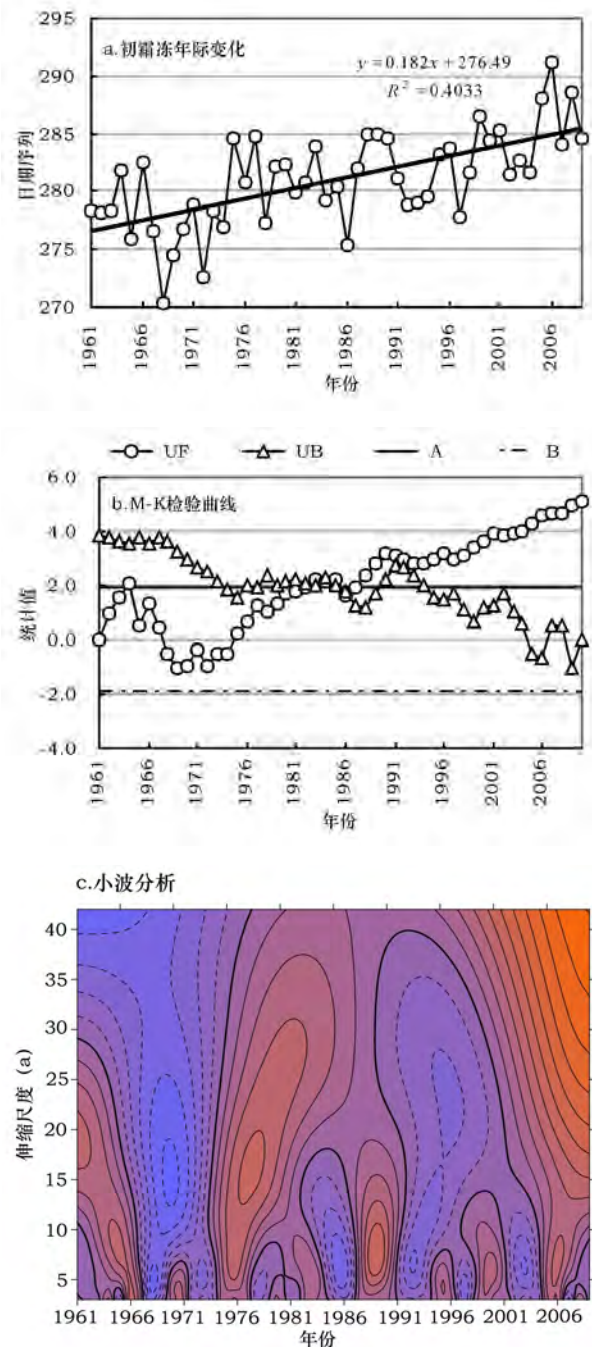


图2 中国西北地区初霜冻年际变化、M-K 检验曲线以及小波分析

Fig.2 The inter-annual variation, the M-K curve and MHAT wavelet analysis of the data of first frost in China Northwest

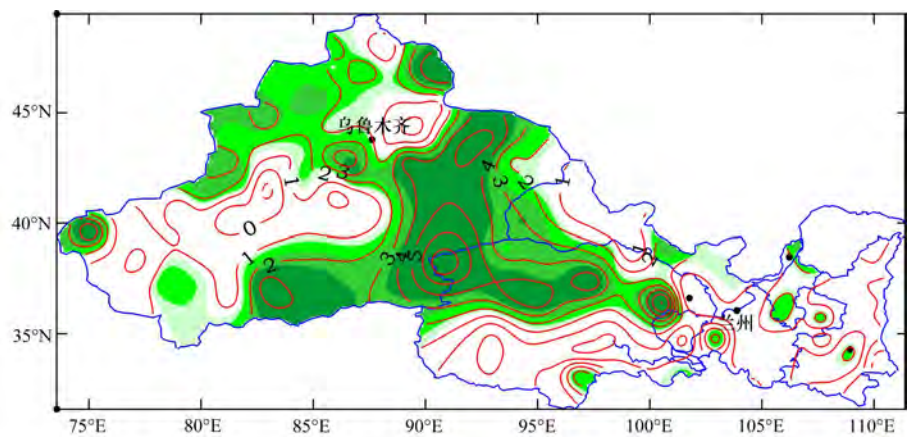


图3 中国西北地区初霜冻开始日期线性趋势空间分布
(注:单位为d/10a,阴影区从浅到深分别为达到90%、95%、99%、99.9%信度)

Fig.3 The spatial distribution of linear trend of long-term variation of the data of first frost in Northwest China

这些地方初霜冻开始期的年际稳定性差;较小的区域在南疆盆地,最小的区域位于江河上源区一向西至昆仑山南侧一带, K 值在2~4d左右,可能与这里众多的湖泊、河流等湿润下垫面有关联。因此,从整体上来看,西北区初霜冻开始期的稳定性较差,特别是北疆、高原北部和南部。

4 大气环流对初霜冻的影响

4.1 影响初霜冻的环流系统

计算西北各站逐年初霜冻序列与当年1月-10月74项环流特征量的相关系数,诊断影响西北初霜冻的环流系统。通过计算发现,影响西北地区初霜

冻的环流特征量主要有副高和极涡(限于篇幅,表1只列出相关最高的特征量),其中,与副高指数正相关,与极涡指数负相关。相关显著的持续阶段,副高指数在5月-10月,极涡指数在4月-10月。

从表2可以看出,副高特征量从当年5月-10月,与中国西北地区初霜冻有大范围的显著正相关区存在(表2只给出相关最大的月份),当副高面积越大、强度越强、脊线越北时,冷空气南下受阻,西北地区的初霜冻开始得就越迟,因而初霜冻与副高特征量为正相关;当极涡强度越强(极涡强度指数是极涡中心的最小高度值,极涡强度指数越大时表

表1 西北地区初霜冻与环流特征量的相关系数

Table 1 The correlation coefficients among the circulation indices and the end data of first frost in Northwest China						
环流特征量	月份	主要相关区域				最大相关站
北非大西洋北美	5	青海0.44, 北疆0.47, 南疆0.38, 宁夏0.28, 甘肃0.33				民丰0.60
副高面积指数	10	青海0.46, 北疆0.47, 南疆0.60, 宁夏0.34, 河西0.37, 陕南0.30				民丰0.59
北非大西洋北美副高	9	青海0.35, 北疆0.51, 南疆0.44, 宁夏0.24, 河西0.37				民丰0.60
强度指数	10	青海0.45, 北疆0.45, 南疆0.59, 宁夏0.36, 河西0.36, 河东0.26, 陕南0.34				西峰0.62
北半球副高面积指数	5	青海0.40, 北疆0.43, 南疆0.29, 河西0.25, 河东0.29				合作0.59
	10	青海0.47, 北疆0.48, 南疆0.61, 宁夏0.25, 河西0.35				民丰0.66
北半球副高强度指数	9	青海0.35, 北疆0.52, 南疆0.40, 河西0.33				民丰0.56
	10	青海0.44, 北疆0.48, 南疆0.62, 宁夏0.27, 河西0.35				民丰0.64
北半球极涡面积指数	2	青海-0.47, 北疆-0.59, 南疆-0.34, 宁夏-0.36, 河西-0.43, 陕南-0.32				小灶火-0.54
	9	青海-0.52, 北疆-0.45, 南疆-0.52, 宁夏-0.26, 河西-0.38, 陕南-0.25				巴里塘-0.56
	10	青海-0.41, 北疆-0.28				红柳河-0.44
北半球极涡强度指数	4	青海-0.63, 北疆-0.57, 南疆-0.36, 宁夏-0.35, 河西-0.32, 陕南-0.36				敦煌-0.56
	10	青海-0.49, 北疆-0.43				玉树-0.57

注:下划线数据为达到99%信度。

2013年1月

明极涡强度越弱)、极涡面积越小时,极区的冷空气就不易南下,西北地区的初霜冻开始得就越早,因而初霜冻与极涡特征量为负相关。

图4是1961年以来10月份北半球极涡面积指数和北半球副高面积指数与西北区初霜冻日的年际变化标准化曲线图。从图4a可以看出,极涡面积与初霜冻的变化趋势相反,相关程度高达 -0.691 ,超过了 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平($r_{0.001} = 0.4734$)。为了区分两者的年际变化和年代际变化,我们对初霜冻和极涡面积两序列计算各自的三阶趋势,各趋势都极其显著,相关系数皆分别达到 0.644 和 0.424 ,两趋势序列相关系数高达 -0.69 ,皆超过 0.001 显著性水平检验。表明在年代际变化上极涡面积和初霜冻表现为相反的演变趋势,1960年代和1970年代初霜冻偏早,而极涡面积偏大,从1980年代中期以来初霜冻偏迟,对应极涡面积缩小。再将原序列

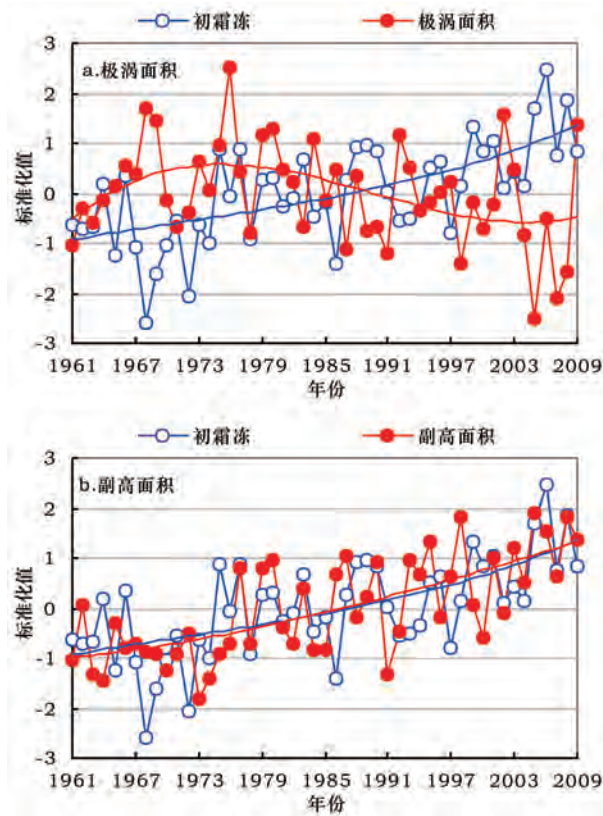


图4 初霜冻与同期北半球极涡面积指数和副高面积指数年际变化

Fig.4 The interannual variation of the first frost and Northern Hemisphere Polar vortex index and Northern Hemisphere subtropical high area index

分离出三阶趋势后得到年际变化序列,相关系数为 -0.18 ,说明在年际变化上,也有相反变化,但不显著。

从初霜冻和北半球副高面积的年际变化来看(图4b),两者有显著的正相关关系,相关系数为 0.56 ,超过了 $\alpha = 0.001$ 显著性水平检验。以三阶多项式分离出年代际和年际信号,年代际相关系数 0.997 ,超过了 $\alpha = 0.001$ 显著性水平检验。说明副高面积与初霜冻存在明显相同的年代际变异。在年际变化上也有一致的反应,年际相关系数 0.19 ,但不显著。

前期的高相关(相关系数 ≥ 0.50)主要有:5月北非副高面积指数、5月北非大西洋北美副高面积指数、1月西太平洋副高脊线、1月西太平洋副高北界、1月太平洋副高北界、2月北半球极涡面积指数、5月、6月亚洲区极涡强度指数、4月和6月北半球极涡强度指数,通过时空遥相关影响西北地区的初霜冻。对于初霜冻的气候预测具有指示性意义。

4.2 初霜冻偏迟年与偏早年高度场的合成分析

除过青海高原初霜冻开始早、陕南开始迟,西北地区其余的地方初霜冻大都开始在9月下旬-10月上旬。因此,从这些地方的初霜冻开始日平均序列中,挑去开始最迟的前5a依次是2006年、2008年、1999年、2005年、1990年,平均开始在10月中旬,比常年(10月上旬)偏迟一个星期。初霜冻开始最早的前5a依次是1968年、1972年、1974年、1969年、1967年,平均开始在9月下旬,比常年偏早1个星期。

以下做亚欧500hPa高度场的合成分析。初霜冻开始偏迟年(图5a),10月500hPa东北半球高度场上,极涡及其对应的负距平偏西,说明极涡强,极区冷空气不易南下,围绕极区的中高纬度为正距平,对应二脊二槽,二槽在东亚东岸和欧洲东部,二脊在欧洲西岸和新疆,东亚大槽浅薄。西太平洋副高偏西偏强,亚洲中北部盛行纬向环流,中国西北区处于新疆高压脊控制之下,不利于出现降温天气,因而初霜冻开始较迟;初霜冻偏早年(图5b),10月500hPa高度场上,极涡及其对应的负距平偏东,围绕极区的中高纬度为负距平,对应一脊二槽,欧洲西部浅槽、乌拉尔山脊强和东亚槽深厚,西太平

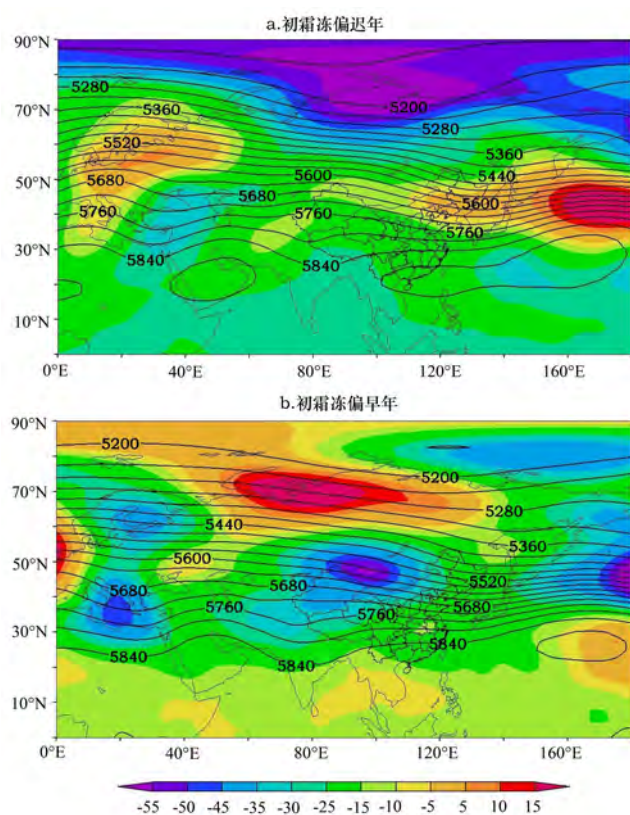


图5 西北地区初霜冻偏迟年和偏早年10月份平均500hPa位势高度合成(gpm)

Fig.5 The composite field of averaged geo-potential height of October at 500hPa for later years and early years of the first frost in Northwest China

洋副高偏东偏弱,退居太平洋上,亚洲中北部盛行径向环流,西北地区上空不断有来自乌拉尔山滑下的冷空气,易形成强降温天气,因而初霜冻开始较早。

5 结论与讨论

本文主要结论如下:

(1)中国西北地区初霜冻开始最迟的地方在陇南-陕南,平均出现在11月上旬,其次是南疆盆地平均出现在10月中下旬;初霜冻开始最早的地方在青海高原和甘南高原,一般在8月下旬就开始了;其余的北疆-河西走廊西部,初霜冻开始在9月中下旬;陇东-陕北开始在10月上旬。初霜冻开始期的稳定性较差,特别是北疆、高原北部和南部。

(2)西北地区初霜冻平均以1.8d/10a的速率显著推迟,全区有85%的站点初霜冻推迟,50%的站初

霜冻显著推迟,近49a来全区平均推迟了9d,其中推迟最大区在青海北部-新疆东部地区达到(5~8)d/10a。1986年有明显的突变现象,其后达到一个更迟的时期。初霜冻有2~3a的显著周期。表明,在全球气候变暖背景下,西北地区初霜冻出现愈来愈晚。

(3)通过各年代际的变化来看,1980年代以来有50%以上的站偏迟,特别是近10a,有接近90%的站初霜冻偏迟。

(4)从环流特征量分析,影响西北地区初霜冻的环流特征量主要有副高指数和极涡指数,与副高正相关,与极涡负相关。前期的高相关因子对于初霜冻的预测具有指示意义。10月500hPa高度场合成分析表明,初霜冻开始偏迟年,东亚大槽浅薄。西太平洋副高偏西偏强,亚洲中北部盛行纬向环流,中国西北区处于新疆高压脊控制之下,不利于出现降温天气;初霜冻偏早年,乌拉尔山脊强,东亚槽深厚,西太平洋副高偏东偏弱,亚洲中北部盛行径向环流,西北地区上空不断有来自乌拉尔山脊前的冷空气,易形成强降温天气。

本文揭示了西北内陆地区初霜冻的时空分布特征,以统计方法讨论了影响区域初霜冻的大气环流因素,早霜推迟,应该是气候变暖的结果,极涡和高压变化的原因,也是气候变暖的结果。霜冻是冷空气的产物,气候变暖影响副高面积扩大、极涡面积缩小,冷空气难以南下,很可能是气候变暖影响环流,再而影响初霜冻的机理。文中仅仅给出了一个事实的分析,其内在的物理机制有待于通过数值模拟等方法做进一步的研究。

致谢:感谢审稿专家提出指导性的意见和建议!

参考文献(References):

- [1] 大气科学辞典编委会. 大气科学辞典[M]. 北京:北京气象出版社, 1994.
- [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] GAO Xuejie, ZHAO Zongci, Filippo Giorgi. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia[J]. *Advances*

2013年1月

- 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[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.
- [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(S1): 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] 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.
- [10] 梁进秋,贾利芳,何正梅,等. 大同市近50年霜冻及其异常事件变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(S1): 124-128.
- [11] 陶云,段旭,任菊章,等. 云南北端霜冻气候事件的气候特征及环流背景分析[J]. 灾害学, 2012, 27(2): 43-48.
- [12] 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.
- [13] 吴金栋,王石立,张建敏. 未来气候变化对中国东北地区水热条件影响的数值模拟研究[J]. 资源科学, 2000, 22(6): 36-42.
- [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] Karl T R, Jones P D, Knight R W, et al. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, 74(6): 1007-1024.
- [16] 邓贤峰,曾文华,孔玉寿. 中长期天气预报[M]. 北京:气象出版社, 1996.
- [17] 陈少勇,石光普,董安祥,等. 祁连山层状云的时空分布及其环流特征分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 946-953.
- [18] 魏凤英,黄嘉佑. 大气环流降尺度因子在中国东部夏季降水预测中的作用[J]. 大气科学, 2010, 34(1): 202-212.
- [19] 施能,朱乾根. 北半球大气环流特征量的长期趋势及年代际变化[J]. 南京气象学院学报, 1996, 19(3): 21-27.
- [20] Y Zhang, K Sperber, J Boyle. Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis[J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125(10): 2605-2619.
- [21] 方之芳,张丽. 夏季NCEP资料质量和20世纪70年代东亚热低压的突变[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 179-189.
- [22] 苏志侠,吕世华,罗四维. 美国NCEP/NCAR全球再分析资料及其初步分析[J]. 高原气象, 1999, 18(2): 84-93.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社, 2000.
- [30] 陈少勇,王劲松,任燕,等. 近49a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.
- [31] ShaoYong CHEN, YuanYuan SHI, YuZhen 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 [J]. *Journal of Arid Land*, 2010, 2(2): 87-97.
- [32] 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.
- [33] 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.

Changes in the First Frost Date from 1961 to 2009 in Northwest China

CHEN Shaoyong^{1,2,3,4}, ZHENG Yanxiang⁴, LOU Wangping⁵, GUO Yuzhen⁴

(1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

2. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu, Lanzhou 730020, China;

3. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

4. Meteorological Bureau of Baiyin, Baiyin 730900, China;

5. Meteorological Bureau of Cixi, Cixi 315300, China)

Abstract: Using daily surface minimum air temperature data from 135 observational stations from 1961 to 2009 in northwest China and NCEP/NCAR reanalysis data, we examined changes in the date of first frost over time. We found that first frost starts in southern Gansu and south Shanxi in the first 10 days in November and in southern Xinjiang in mid-October. On the Qinghai plateau first frost appears in late August. The first frost period has poor stability, especially in northern Xinjiang and the Qinghai plateau. The average first frost date occurred later at a rate of 1.8 d/10a, and 9 days for the whole area. There was an abrupt change in patterns in 1986. For 85% of stations, the date of first frost was postponed, and majority were postponed at a speed of (2~4) d/10a. Since 1980, 50% of stations have a late first frost date, especially in the last 10 years where a late first frost date was found at 90% of stations. The subtropical high and polar vortex affect first frost across northwestern China, the subtropical high has a positive correlation and the polar vortex is has negative correlation. The 500 hPa composite analysis indicated, in first frost late years the East Asian trough is weak, the Western Pacific vice-high in the west strong, and the Mid-northern Asian is the prevalent zonal circulation. In first frost early years, the Ukraine mountain high ridge is strong, the East Asian trough is deep, the Western Pacific vice-high easterly is weak, and the Mid-northern Asian is the prevalent radial circulation. We suppose that a changing polar vortex and high-pressure results in the date of first frost being postponed; climate warming is also contributing. Frost is a by-product of cold air and climate warming causes increased vice-high and a decreasing vortex, and prevents cold air moving south.

Key words: Data of first frost; Climatic change; Circulation characteristic; Composite analysis; Northwest China