

陇中黄土高原半干旱区霜冻时空分异特征

郭俊文^{1,2}, 单红洮², 郭俊瑞³

(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 730020; 2.甘肃省定西市气象局, 甘肃 定西 743000; 3.甘肃省白银市气象局, 甘肃 白银 743000)

摘要:基于 1971—2016 年陇中黄土高原半干旱区逐日地面最低温度资料,采用气候统计学方法,研究了霜冻初、终日和无霜冻期时空变化、异常分布特征。结果表明:研究区域最早霜冻初日为 8 月 25 日;最晚霜冻终日为 6 月 28 日;平均无霜冻期 125~149 d。近 46 a 来,研究区域霜冻初日呈推迟趋势,平均每 10 a 推迟 3.1 d,无霜冻期显著延长,平均每 10 a 延长 3.9 d。无霜期日数显著延长,增加了作物生长季热量条件,有利于作物生长季延长,使得喜温和越冬作物适宜种植区域由低海拔向高海拔区域推进。冬小麦、玉米适宜区、可种植区扩大;春小麦适宜种植区、不可种植区缩小;农作物复种指数明显增加,但霜冻波动的不稳定性变化增加了低温冻害的风险。

关键词:霜冻初、终日;无霜期;时空分异;陇中黄土高原

中图分类号:P429

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0101-05

Characteristics of Spatiotemporal Distribution and Variation of Frost in Semiarid Regions of the Loess Plateau in Central Gansu

GUO Junwen^{1,2}, SHAN Hongtao², GUO Junrui³

(1.Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, China Meteorological Administration, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2.Meteorological Bureau of Dingxi of Gansu Province, Dingxi, Gansu 743000, China; 3.Meteorological Bureau of Baiyin of Gansu Province, Baiyin, Gansu 730900, China)

Abstract: The spatiotemporal change and abnormal distribution characteristics of the earliest day and the latest day of frost as well as the frost-free period were studied by a climatic statistical method based on the daily lowest ground temperatures in semiarid regions of the Loess Plateau in Central Gansu during the period 1971—2016. The results show that the earliest frost day are August 25, the latest frost day is June 28, and the mean frost-free period is 125~149 days in the research area; in recent 46 years, the earliest frost day has been postponed by 3.1 days per decade, and the frost-free period has been significantly prolonged by 3.9 days per decade. The prolongation of frost-free period increased the heat in the crop growth season and was beneficial to crop growing, and thus the planting areas suitable for thermophilic crops and winter crops were expanded from low altitude to high altitude. The areas of winter wheat and maize expanded; the areas of spring wheat and the areas not suitable for planting crops shrank; and the multiple cropping indexes were significantly improved. However, the instable variation of frost has amplified the risk of low temperature and frost-induced damage.

Keywords: earliest frost day; latest frost day; frost-free period; spatiotemporal distribution and variation; Longzhong of the Loess Plateau

霜冻是指作物生育期气温骤降,地面最低温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$,作物细胞间隙间的水分凝结成冰晶,细胞内原生质与液泡逐渐脱水和凝固导致死亡,解冻时细胞间隙中的冰融化为水且快速蒸发,细胞原生质因失水致

死。从而导致农作物受害的农业气象灾害,霜冻多发生于春秋两季,当年春季最后一次霜冻出现的日期称作霜冻终日,当年秋季第一次霜冻出现的日期称作霜冻初日,霜冻终日至初日之间的天数称作无霜期^[1-2]。

收稿日期:2019-06-03

修回日期:2019-07-01

资助项目:公益性行业(气象)科研专项(重大专项)“中国北方农业干旱风险评估技术与对策”(GYHY201506001-6)

第一作者:郭俊文(1970—),女,甘肃会宁人,高级工程师,研究方向为气象预报预测及业务。E-mail:gjw0526@126.com

通信作者:郭俊瑞(1976—),女,甘肃会宁人,工程师,研究方向为农业气象。E-mail:guojunrui@163.com

近百年来,以地表平均气温增高为显著特征的全球气候变化影响着气象灾害的时空分异特征^[3],研究表明,北美、欧洲等多地霜冻呈现初日推迟、终日提前、无霜冻期延长的变化特征^[4-6]。中国大部分地区霜冻也表现为初日推迟、终日提前、无霜冻期延长的特征^[7-9]。但区域变化差异明显^[10]。1963—2009年中国温带季风区终霜冻日显著提前^[11],西北地区初霜冻平均以1.8 d/10 a的速率推迟,1986年有明显的突变现象,近49 a来初霜冻有显著的2~3 a周期^[12];近57 a来,沈阳地区霜冻初日呈推迟趋势,平均每10 a推迟0.9 d,而终日呈显著提前趋势,平均每10 a提前1.9 d,导致无霜冻期显著延长,平均每10 a延长2.8 d,有利于作物生长季延长、热量资源增加;霜冻变化存在不稳定性波动,对农业生产极为不利^[13]。

陇中黄土高原半干旱区晚霜冻结束期在4月下旬到5月下旬,该时段是冬小麦出苗一分蘖期,春小麦、玉米、胡麻和扁豆等春播作物苗期、苹果、梨、杏和桃等林果开花坐果阶段,农作物幼苗和林果花蕾对霜冻危害的承灾能力极敏感且脆弱,抗冻能力低。陇中黄土高原位于黄土高原的腹地,土层深厚,非常适宜优质苹果、桃、梨和杏等经济林果的栽培,近年来黄土高原以苹果、桃为主体的经济林果栽培面积迅速扩大,经济林果产业发展快,效益高。但霜冻会造成林果花蕾期的严重冻害,导致花蕾细胞原生质死亡,无法形成果实,造成大面积减产或绝收^[14-16]。为此,研究霜冻变化特征及其对农作物和林果业的影响意义重大。本文分析陇中黄土高原半干旱区霜冻初、终日和无霜冻期时空变化特征及其对农作物和林果业的影响,为农作物和林业气象灾害防御提供科学依据。

1 研究区域和资料方法

1.1 研究区概况

研究区域位于甘肃中部,属典型的黄土高原半干旱区,地貌特征为黄土高原丘陵、沟壑区。年平均气温6.1~8.1℃,极端最低气温-29.7~-22.3℃,极端最高气温33.3~36.1℃;年降水量377.0~556.3 mm;无霜

期109~162 d;年日照时数2183.7~2 477.2 h。

1.2 资料及处理

选择陇中黄土高原半干旱区1971—2016年安定、通渭、陇西、渭源、临洮、漳县和岷县等7个气象观测站逐日气象观测资料。

霜冻是由于地表温度降低到0℃或以下导致农作物受冻的气象灾害,故以地面最低温度≤0℃作为霜冻指标,定义春季地面最低温度≤0℃的最后一天为霜冻终日,秋季地面最低温度≤0℃的第一天为霜冻初日,霜冻终日的翌日至初日的前一天之间的日数为无霜期^[2]。

1.3 统计方法

1.3.1 倾向率 气候要素的趋势倾向率变化

$$X_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中: X_i 为气候要素变量; t_i 表示 X_i 所对应的时间; a 为回归常数; b 为回归系数; n 为样本量^[17]。

1.3.2 霜冻异常初、终日的确定方法 由于霜冻是因地面最低温度降低而导致的农作物受冻灾害,地面温度变化与大气温度变化特征均符合正态分布,故霜冻的气候异常阈值的概率可定义为0.05,即霜冻的极早初日和极晚终日的概率值定义为0.05^[17-19],其关系式如下:

$$P(-1.65\delta < X - \mu < 1.65\delta) = 0.90$$

$$[1 - P(-1.65\delta < X - \mu < 1.65\delta)] / 2 = 0.05$$

式中: P 为概率值(%); X 为霜冻初(终)日; μ 为1981—2010年平均值; δ 为标准差。当 $X_i - \mu \leq -1.65\delta$ 时; X_i 为霜冻极早初日; $X_i - \mu > 1.65\delta$ 时; X_i 为霜冻极晚终日。

2 结果与分析

2.1 霜冻空间变化特征

研究区域1971—2016年霜冻初日平均在10月4日,最早霜冻初日为8月25日,1986年在岷县出现(表1);最晚霜冻初日为10月29日,1975年和2000年分别在陇西、通渭出现;霜冻初日变幅最大为通渭和岷县,达56 d,变幅最小是陇西和漳县,为41 d。

表1 研究区域(1971—2016年)霜冻初(终)日和无霜期统计特征

| 地区 | 霜冻初日(月-日) | | | | 霜冻终日(月-日) | | | | 无霜期/d | | | |
|----|-----------|-------|-------|------|-----------|-------|-------|------|-------|------|------|------|
| | 平均日期 | 最早日期 | 最晚日期 | 极差/d | 平均日期 | 最早日期 | 最晚日期 | 极差/d | 平均日期 | 最早日期 | 最晚日期 | 极差/d |
| 安定 | 10-02 | 09-03 | 10-18 | 45 | 05-06 | 04-05 | 06-10 | 66 | 149 | 100 | 189 | 89 |
| 通渭 | 10-05 | 09-03 | 10-29 | 56 | 05-10 | 04-02 | 06-12 | 71 | 148 | 100 | 192 | 92 |
| 陇西 | 10-10 | 09-18 | 10-29 | 41 | 04-29 | 04-05 | 05-30 | 55 | 164 | 111 | 197 | 86 |
| 渭源 | 10-07 | 09-03 | 10-24 | 51 | 04-30 | 04-03 | 05-22 | 49 | 160 | 127 | 196 | 69 |
| 临洮 | 10-04 | 09-10 | 10-25 | 45 | 05-03 | 04-05 | 05-30 | 55 | 154 | 114 | 187 | 73 |
| 漳县 | 10-08 | 09-15 | 10-26 | 41 | 04-26 | 03-30 | 05-17 | 48 | 165 | 128 | 193 | 65 |
| 岷县 | 09-26 | 08-25 | 10-20 | 56 | 05-24 | 04-21 | 06-28 | 68 | 125 | 78 | 175 | 97 |
| 区域 | 10-04 | 08-25 | 10-29 | 65 | 05-05 | 03-30 | 06-28 | 89 | 152 | 78 | 197 | 119 |

近 46 d 来,研究区域霜冻终日平均在 5 月 5 日,最早霜冻终日为 3 月 30 日,1981 年在漳县出现;最晚霜冻终日为 6 月 28 日,1982 年在岷县出现;霜冻初日变幅最大是通渭,达 71 d,变幅最小是漳县,为 48 d。

研究区域无霜期平均为 152 d,无霜期最长为 197 d,2007 年出现在陇西;最短为 78 d,1977 年出现在岷县;无霜期变幅最大为岷县,达 97 d,变幅最小是漳县,为 65 d。

2.2 霜冻年际变化趋势

近 46 a 来研究区域霜冻初日呈显著推迟趋势(图 1),霜冻初日线性拟合倾向率为 3.117 d/10 a ($p \leq 0.01$)。霜冻初日 Cubic 函数拟合呈先降后升型特征,20 世纪 90 年代中期以后霜冻初日明显推迟。

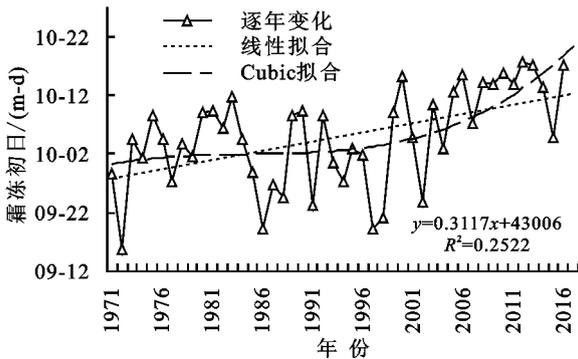


图 1 1971—2016 年研究区域霜冻初日变化趋势

霜冻初日推迟最多的是岷县,趋势倾向率为 5.2 d/10 a ($p \leq 0.01$);推迟最少的是漳县,趋势倾向率为 2.2 d/10 a ($p \leq 0.05$);陇西未发生显著性变化(表 2)。

表 2 研究区域霜冻初(终)日和无霜期变化倾向率(1971—2016 年)

| 地区 | 倾向率 d/(10 a) | | |
|----|--------------|--------|--------|
| | 霜冻初日 | 霜冻终日 | 无霜期 |
| 安定 | 3.1** | -2.5 | 7.4** |
| 通渭 | 2.6* | -0.1 | 2.6 |
| 陇西 | 0.6 | 1.9 | -1.3 |
| 渭源 | 2.4* | 1.3 | 1.1 |
| 临洮 | 3.7** | -0.5 | 4.2** |
| 漳县 | 2.2* | -0.4 | 2.7 |
| 岷县 | 5.2** | -5.4** | 10.7** |
| 平均 | 3.1** | -0.8 | 3.9** |

注:*,**分别表示 $p \leq 0.05, p \leq 0.01$ 。

近 46 a 来研究区域霜冻终日呈提前趋势,但未通过显著性检验(图 2),霜冻终日线性拟合倾向率为 -0.823 d/10 a ($p > 0.05$)。霜冻终日 Cubic 函数拟合呈波动变化,进入 21 世纪 9 以后霜冻终日明显提前。

就次区域而言,霜冻终日显著提前的是岷县,趋势倾向率为 -5.4 d/10 a ($p \leq 0.01$);其余各地未发生显著性变化(表 2)。

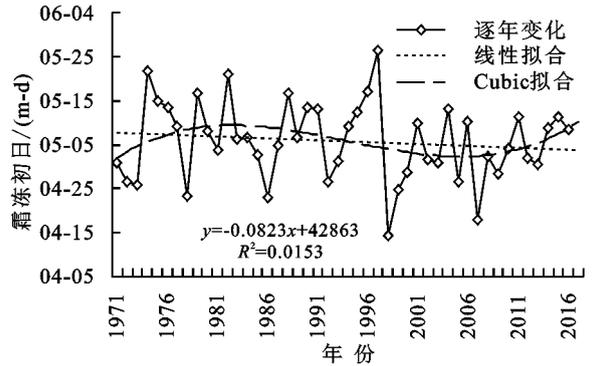


图 2 1971—2016 年研究区域霜冻终日变化趋势

研究区域无霜期日数呈显著延长趋势(图 3),无霜期日数线性拟合倾向率为 3.94 d/10 a ($p \leq 0.01$)。无霜期日 cubic 函数拟合也呈先降后升型变化特征,20 世纪 90 年代中期以后无霜期日数明显延长。

就次区域而言,无霜期日数显著延长的是岷县、安定和临洮,趋势倾向率分别为 10.7 d/10 a ($p \leq 0.01$),7.4 d/10 a ($p \leq 0.01$)和 4.2 d/10 a ($p \leq 0.01$);其余各地未发生显著性变化(表 2)。

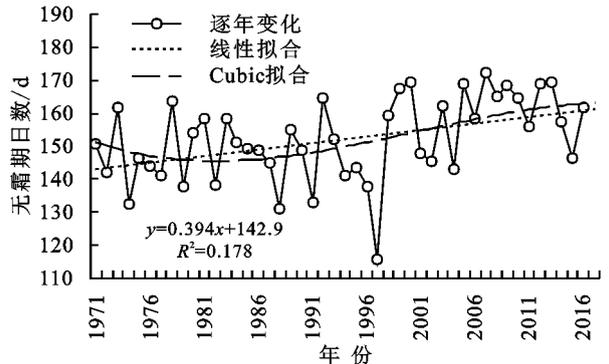


图 3 1971—2016 年研究区域无霜期变化趋势

2.3 霜冻异常分布特征

近 46 a 来,安定霜冻初日极早出现 1 次,出现在 1972 年 9 月 3 日,霜冻初日极晚未出现。安定霜冻终日极早出现 2 次,分别出现在 1999 年 4 月 5 日和 2009 年 4 月 7 日;霜冻终日极晚出现 4 次,分别出现在 1973 年 5 月 29 日、1974 年 6 月 6 日,1990 年 5 月 31 日和 1997 年 6 月 10 日。安定无霜期极长出现 1 次,出现在 2009 年,为 189 d;无霜期极短出现 3 次,分别出现在 1973 年、1974 年和 1997 年,分别为 112 d,107 d 和 100 d(表 3)。

通渭霜冻初日极早出现 1 次,同安定一样出现在 1972 年 9 月 3 日;霜冻初日极晚出现 3 次,分别出现在 1975 年 10 月 29 日、1983 年 10 月 26 日和 2000 年 10 月 29 日。通渭霜冻终日极早出现 2 次,分别出现在 1998 年 4 月 12 日和 1999 年 4 月 2 日;霜冻终日极晚出现 3 次,分别出现在 1974 年 6 月 6 日、1979 年 6 月 12 日、和 1997 年 6 月 10 日。通渭无霜期极

长出现1次,出现在1999年,为192 d;无霜期极短出现3次,出现在1974年、1979年和1997年,分别为106 d,113 d和100 d。

陇西霜冻初日极早出现2次,出现在1991年9月20日和1997年9月18日;霜冻初日极晚也出现2次,出现在1975年10月29日和1978年10月27日。陇西霜冻终日极早出现2次,出现在2007年4月5日和2009年4月7日;霜冻终日极晚出现1次,出现在1997年5月30日。陇西无霜期极长出现2次,出现在1978年和2007年,分别为194 d和197 d;无霜期极短出现1次,出现在1997年,为111 d。

渭源霜冻初日极早出现2次,出现在1972年9月3日和1997年9月12日;霜冻初日极晚未出现。渭源霜冻终日极早出现1次,出现在1999年4月3日;霜冻终日极晚出现2次,出现在1976年5月22日和2011年5月22日。渭源无霜期极长出现1次,

出现在1999年,为196 d;无霜期极短也出现1次,出现在1991年,为127 d。

临洮霜冻初日极早出现1次,出现在2007年9月10日;霜冻初日极晚也出现3次,出现在2010年10月25日、2013年10月21日和2014年10月21日。临洮霜冻终日极早出现1次,出现在2007年4月5日;霜冻终日极晚出现3次,出现在1977年5月24日、1997年5月30日和1999年5月26日。临洮无霜期极长出现1次,出现在2013年为187 d;无霜期极短也出现1次,出现在1997年,为114 d。

漳县霜冻初日极早出现2次,出现在1987年9月15日和1988年9月19日;霜冻初日极晚出现1次,出现在2010年10月26日。漳县霜冻终日极早出现1次,出现在1981年3月30日;霜冻终日极晚未出现。漳县无霜期极长出现1次,出现在81 a,为193 d;无霜期极短也出现1次,出现在2002年,为132 d。

表3 研究区域1971—2016年霜冻极早、极晚初(终)日出现年份

| 区域 | 霜冻初日 | | 霜冻终日 | | 无霜冻期 | |
|----|-----------|----------------|-----------|---------------------|-----------|----------------|
| | 极早 | 极晚 | 极早 | 极晚 | 极长 | 极短 |
| 安定 | 1972 | | 1999,2009 | 1973,1974,1990,1997 | 2009 | 1973,1974,1997 |
| 通渭 | 1972 | 1975,1983,2000 | 1998,1999 | 1974,1979,1997 | 1999 | 1974,1979,1997 |
| 陇西 | 1991,1997 | 1975,1978 | 2007,2009 | 1997 | 1978,2007 | 1997 |
| 渭源 | 1972,1997 | | 1999 | 1976,2011 | 1999 | 1991 |
| 临洮 | 2007 | 2010,2013,2014 | 2007 | 1977,1997,1999 | 2013 | 1997 |
| 漳县 | 1987,1988 | 2010 | 1981 | | 1981 | 2002 |
| 岷县 | 1977,1986 | 1981,2005 | 1973,1998 | 1975,1982 | 2005 | 1977,1996 |

岷县霜冻初日极早出现2次,出现在1977年8月28日和1986年8月25日;霜冻初日极晚也出现2次,出现在1981年10月18日和2005年10月20日。岷县霜冻终日极早亦出现2次,出现在1973年4月21日和1998年4月24日;霜冻终日极晚同样出现2次,出现在1975年6月19日和1982年6月28日。岷县无霜期极长出现1次,出现在2005年为175 d;无霜期极短出现2次,出现在1977年和1996年,分别为78 d和84 d。

区域分析可知,无霜期极短年在20世纪70年代最多,达4 a,分别在1973年、1974年、1977年、1979年,其中1977年是因为霜冻初日极早造成的,其余是由于霜冻终日极晚导致。90年代无霜期极短出现3 a,分别在1991年、1996年、1997年,其中1997年是由于霜冻终日极晚导致,1991年和1996年是由于霜冻终日偏晚,霜冻初日偏早所致。在21世纪,无霜期极短年仅出现一年,为2002年,因霜冻终日偏晚,霜冻初日偏早所致。

无霜期极长年在21世纪最多,达4 a,出现在2005年、2007年、2009年、2013年,其中,2005年和2013年是因为霜冻初日极晚形成;2007年和2009年

是因为霜冻终日极早形成。无霜期极长年在20世纪70,80,90年代各出现一次,分别在1978年、1981年和1999年、1978年是因为霜冻初日极晚形成,1981年和1999年是因为霜冻终日极早形成。

可见,无霜期极短年在20世纪70年代最多,在21世纪最少;无霜期极长年在21世纪最多,在其余年代少。

3 讨论

研究区域霜冻初日显著推迟,无霜期日数显著延长,无霜期平均每10 a延长3.9 d。霜冻初、终日及无霜期的不稳定性增加。该结论与西北区域研究结论一致。中国西北霜冻初日也推迟,终日提前,无霜期也呈逐年延长趋势,霜冻频率减小、但强度增加,霜冻灾害损失呈加重趋势^[20-21]。

无霜期日数显著延长,增加了作物生长发育季热量资源条件,有利于延长作物生长季,使得陇中黄土高原半干旱区域喜温和越冬作物适宜种植区域由较低海拔向较高海拔区域推进扩展^[3,14-15]。冬小麦、玉米适宜区和可种植区扩大;春小麦适宜种植区、不可种植区缩小;该区域由以春小麦为主的传统种植结构

向以冬小麦、马铃薯和冬油菜为主的作物种植结构转变;区域农作物复种指数明显提高。苹果、桃、梨和杏等林果生长发育期提前,生长发育速度加快,生长周期缩短,且随着海拔高度增加,生育期提前愈明显;使苹果、桃、梨和杏等林果的产量和糖分含量增加^[22-24]。

由于冻初、终日及无霜期的不稳定性增加,霜冻强度增加,使得该区域冬小麦出苗一分蘖期、春小麦、玉米、胡麻和扁豆等春播作物苗期的霜冻灾害风险增加,在调整作物种植结构和布局时应予以高度重视。随着研究区域经济林果开花期提前,经济林果开花期霜冻灾害风险也随之加大,灾害造成的损失呈加重趋势,尤其应注重霜冻灾害的防御。

4 结论

(1) 研究区域 1971—2016 年霜冻初日平均为 10 月 4 日,区域最早霜冻初日为 8 月 25 日,最晚霜冻终日为 6 月 28 日;平均无霜冻期 125~149 d,无霜冻期极差天数为 65~97 d。

(2) 近 46 a 来,研究区域霜冻初日呈显著推迟趋势,平均每 10 a 推迟 3.1 d。其中,推迟最多的是岷县,每 10 a 推迟 5.2 d,推迟最少的是漳县,每 10 a 推迟 2.2 d。研究区域霜冻终日日呈提前趋势,但未通过显著性检验。研究区域无霜期日数呈显著延长趋势,平均每 10 a 延长 3.9 d。其中,极显著延长的是岷县、安定和临洮,每 10 a 分别延长 10.7 d,7.4 d,4.2 d。

(3) 近 46 a,研究区域霜冻初、终日及无霜期的不稳定性波动特征明显,该特征极易造成农作物冻害,对农业生产不利;霜冻终日的不稳定性最大,霜冻初日的不稳定性次之,无霜期的不稳定性较前两者小,不稳定性年代际变化呈减弱趋势。无霜期极短年在 20 世纪 70 年代最多,在 21 世纪最少;而无霜期极长年在 21 世纪最多,在其余年代少。

(4) 冻初、终日及无霜期的不稳定性增加,霜冻强度增加,使春播作物苗期的灾害风险增加,经济林果业开花期霜冻灾害风险也加大,灾害损失加重,应注重霜冻灾害的防御。

参考文献:

[1] 霍治国,王石立,郭建平,等.农业和生物气象灾害[M].北京:气象出版社,2009.

[2] 钱锦霞,张霞,张建新,等.近 40 年山西省初终霜日的变化特征[J].地理学报,2010,65(7):801-808.

[3] 姚玉璧,杨金虎,肖国举,等.气候变暖对西北雨养农业及农业生态影响研究进展[J].生态学报,2018,37(7):2170-2179.

[4] 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.

[5] Menzel A, Jakobi G, Ahas R, et al. Variations of climatological growing season (1951—2000) in Germany compared with other countries[J]. International Journal of Climatology, 2003,23(7):793-812.

[6] Shen S S P, Yin H, Cannon K. Temporal and spatial changes of the agro-climate in Alberta, Canada, from 1901 to 2002 [J]. Journal of Applied Meteorology, 2005,44(7):1090-1105.

[7] 许艳,王国复,王盘兴.近 50 a 中国霜期的变化特征分析[J].气象科学,2009,29(4):427-433.

[8] 宁晓菊,张丽君,杨群涛,等.1951 年以来中国无霜期的变化趋势[J].地理学报,2015,70(11):1811-1822.

[9] 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.

[10] 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(S):31-37.

[11] 戴君虎,王焕炯,葛全胜.近 50 年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化[J].地理学报,2013,68(5):579-592.

[12] 陈少勇,郑延祥,楼望萍,等.中国西北地区初霜冻的气候变化特征[J].资源科学,2013,35(1):165-172.

[13] 慕臣英,纪瑞鹏,周晓宇,等.1960—2016 年沈阳地区霜冻初、终日和无霜冻期时空特征[J].干旱气象,2018,36(2):290-294.

[14] 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.

[15] 王荣梅,张晓琴,刘姣,等.新疆喀什地区近 50 a 来霜冻变化特征及其对农业的影响[J].干旱气象,2013,31(2):309-312.

[16] 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.

[17] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:37-40.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 张强,姚玉璧,李耀辉,等.中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J].地球科学进展,2015,30(2):196-213.

[21] 周广胜.气候变化对中国农业生产影响研究展望[J].气象与环境科学,2015,38(1):80-94.

[22] 张强,王润元,邓振镛.中国西北干旱气候变化对农业与生态影响及对策[M].北京:气象出版社,2012.

[23] 万梓文,许彦平,姚晓琳,等.甘肃天水近 30 a 气候变化对桃产量形成的影响分析[J].干旱区地理,2016,39(4):738-746.

[24] 王鹤龄,张强,王润元,等.气候变化对甘肃省农业气候资源和主要作物栽培格局的影响[J].生态学报,2017,37(18):6099-6110.