



1971-2016 年寒地大豆霜冻害时空演变特征及对产量影响

吕佳佳^{1,2,3}, 朱海霞^{1,2,3}, 官丽娟^{1,2,3}, 王 铭^{1,2,3}, 刘泽恩⁴, 连 萍⁵, 李秀芬^{1,2,3}, 姜丽霞^{1,2,3}

(1. 中国气象局 东北地区生态气象创新开放实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省气象院士工作站, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 通河县气象局, 黑龙江 哈尔滨 150030; 5. 黑龙江省气象数据中心, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要:为研究寒地大豆霜冻害演变特征,利用黑龙江省大豆主产区 59 个气象观测站 1971 - 2016 年逐日日最低气温资料和大豆发育期资料,基于作物霜冻害等级气象行业标准,采用数理统计和墨西哥帽小波法分析大豆乳熟期轻、中、重霜冻害的空间分布特征及时间变化规律,并统计分析研究区各站霜冻害发生年份的产量增(减)状况。结果表明:1971 - 2016 年,黑龙江省西北部、三江平原西北部及牡丹江半山区等地为寒地大豆乳熟期霜冻主要发生区域。大豆乳熟期轻度、中度、重度霜冻害在 1971 - 1980 年发生范围最广、发生频率最高,2011 - 2016 年发生范围及频率最小。寒地大豆乳熟期霜冻害发生存在 3 ~ 5 年短期振荡周期和 20 年左右的中期振荡周期。1971 - 2016 年,霜冻对大豆产量的影响在一定程度上以负效应为主。对典型站分析结果表明,大豆乳熟期霜冻害出现日期越早对产量的负效应越大。霜冻害对大豆产量的影响为霜冻等级及出现日期的协同作用。研究结果对寒地大豆安全生产及防灾减灾具有重要意义。

关键词:寒地大豆;霜冻害;演变特征;产量

Spatial-temporal Characteristics of Frost Damage on Soybean and Its Effect on Soybean Yield from 1971 to 2016 in Cold Regions

LYU Jia-jia^{1,2,3}, ZHU Hai-xia^{1,2,3}, GONG Li-juan^{1,2,3}, WANG Ming^{1,2,3}, LIU Ze-en⁴, LIAN Ping⁵, LI Xiu-fen^{1,2,3}, JIANG Li-xia^{1,2,3}

(1. Innovation and Opening Laboratory of Eco-Meteorology in Northeast China, CMA, Harbin 150030, China; 2. Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China; 3. Forestry Department of Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China; 4. Tonghe Meteorological Station, Harbin 150030, China; 5. Meteorological Data Center of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to study the evolution characteristics of soybean frost damage in cold region, we analyzed the meteorological standard-grade of crop frost damage, spatial and temporal distribution of frost damage on soybean in mild, modetate and serious grades using mathematical statistics and a wavelet analysis based on the daily lowest air temperature data and soybean growing stages data at 59 weather stations in the main soybean producing areas of Heilongjiang province during 1971 to 2016. In addition, we analyzed the increase (decrease) of yield in the year of frost damage in each station of the study area. The results showed that the frost damage of soybean in cold regions occurred mainly in the northwest of our province, the northwest of Sanjiang Plain and the half mountain area of Mudanjiang during 1971 - 2016 in Heilongjiang province. Mild, modetate and severe frost damage of soybean in cold regions occurred the most widely and frequently from 1971 to 1980. The occurrence range and frequency were the smallest from 2011 to 2016. There were a short-term periodic cycles of 3 - 5 years and a medium-term periodic cycles of about 20 years in frost damage of soybean in cold regions. From 1971 to 2014, frost had a negative effect on soybean yield to some extent. The results of typical station analysis showed that the earlier the frost damage occurred in milk maturity of soybean, the greater the negative effected on yield. The effect of frost damage on soybean yield was the synergism of frost grade and occurrence date. The results were of great significance in preventing and mitigating natural disasters, and ensuring production safety of soybean in cold regions.

Keywords: Soybean in cold regions; Frost damage; Evolution characteristics; Yield

黑龙江省是我国重要的春播大豆产区,是非转基因大豆种植的净土,大豆产量及出口量均居全国首位,在全国商品粮供应及油料进出口贸易方面占有极为重要的地位^[1-2]。霜冻是中国发生地区广、危害农作物种类多、造成损失很大的一种农业气象灾害^[3]。黑龙江省位于中国最北端,冷空气活动频

繁,秋季降温速度快,在 9 月上中旬大豆未成熟前极易发生霜冻灾害。受霜冻灾害影响,黑龙江省粮食生产波动严重。1954、1957、1969、1972 和 1976 年低温加霜冻造成的粮食减产幅度都超过 20%^[4]。1995 年全省大部分区域秋霜比常年早 5 ~ 7 d,导致全省约有 1/3 大田作物遭受冻害。1999 年全省遭

收稿日期:2019-07-02

基金项目:国家自然科学基金(31671576,31801253);中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室开放研究基金(stqx2019zd01, stqx201808)。

第一作者简介:吕佳佳(1983-),女,硕士,高级工程师,主要从事农业气象灾害研究。E-mail: wfljj@163.com。

通讯作者:李秀芬(1973-),女,硕士,研究员,主要从事农业气象、卫星遥感研究。E-mail: ge-2003@163.com。

受冻害面积近 53 万 hm^2 ^[4]。虽然全球气候变暖导致东北地区作物生长季内热量资源增加^[5]、初霜冻推迟^[6-7]。然而,气候变暖导致的生长季延长及人类的适应行为使作物遭受的霜冻和低温事件并未减少^[8-9]。曲辉辉等^[10]分析认为在 A2B2 情景下,未来 30 年间大豆减产面积不断增加,减产幅度逐渐增大。

小波分析方法是一种信号时间—尺度(频率)分析方法,研究不同尺度周期随时间的演变情况,其特点是通过时频变化突出信号在某些方面的特征,具有时频多分辨功能^[11]。近年来,小波分析被应用于各领域,特别是在降水量^[11]、温度^[12]等气象要素以及冷害^[13]、暴雨^[14]等灾害的时间序列中被引入,从而将隐含在时间序列中各种周期变化规律揭示出来。

多年来,国内外许多专家学者在霜冻变化趋势和特征^[9,15-17]、风险分析^[18]、对农业影响评估等方面开展了详尽研究。研究表明:在北欧、美国、加拿大过去几十年霜冻日数均有减少趋势^[15,19-20]。在中国东北地区霜冻变化趋势和特征亦有较明确的结论,即东北三省无霜期等值线存在年代际北移现象^[21],霜冻日数明显减少,初霜冻发生受地形影响较大,纬度越高出现越早、地势低出现较迟,山区比平原偏早^[6]。纵观农业气象领域已有霜冻方面研究成果,或从天气气候尺度出发分析总结霜冻特征^[22],或运用数学方法从风险评估角度对霜冻害致灾因子危险性进行评估^[23],对于高寒区大豆霜冻害时空演变特征的研究仍较少见。黑龙江省气候资源对粮食产量影响^[24]的研究较多,但针对霜冻害与寒地大豆产量的关系研究较少。基于此,为规范并准确地对寒地大豆霜冻害进行分析,利用 2008 年中国气象局发布的作物霜冻害等级行业标准,对 1971—2016 年寒地大豆乳熟期不同等级霜冻害时空演变特征进行分析,同时运用小波分析方法分析霜冻害周期振荡规律,并进一步探究霜冻害对大豆产量的影响。以期优化高寒区大豆种植结构及降低大豆生产风险提供基础研究,这在保障国家粮食安全和推动农业经济可持续发展中具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

选取黑龙江省大豆主产区 59 个农业气象观测站为研究站点。气象资料为研究站点有观测记录以来大豆生育期观测资料及 1971—2016 年逐日日最低气温资料,均来自于黑龙江省气象数据中心。

1971—2016 年大豆单产资料来自于黑龙江省统计局。黑龙江省大豆鼓粒期在 8 月中下旬,乳熟期在 9 月中下旬,根据 1980—2016 年大豆逐年发育期观测资料,获得每个研究站点鼓粒期、乳熟期的 37 年平均值,在每个研究站点平均鼓粒期至平均乳熟期的时间段内提取霜冻害事件。采用的大豆霜冻害判别指标是中国气象局 2008 年发布的中华人民共和国气象行业标准(QX/T 88—2008)—《作物霜冻害等级》,该标准采用日最低气温作为霜冻害指标,分级阈值:0.5~0℃为轻霜冻;0~-1℃为中霜冻;-1.0~-2.5℃为重霜冻。

1.2 方法

1.2.1 时间变化分析 分析大豆乳熟期霜冻害的时间变化规律时,采用黑龙江省某年发生霜冻站数与评估总站数的比值(ratio of station with damage to the total stations,IOC 比值)表示该年全省霜冻害出现的范围^[25]。

1.2.2 空间分析 分析大豆乳熟期霜冻害的空间分布时,采用某一时段出现霜冻害的年数与该时段的总年数的比值表示某一站点该时段霜冻害出现的频率。分析大豆乳熟期霜冻害的时空变化规律按 1971—1980(S_1)、1981—1990(S_2)、1991—2000(S_3)、2000—2010(S_4)、2011—2016(S_5)5 个气候年代统计。基于 ArcGIS 10.4 软件制作各气候年代霜冻害出现频率的等值线图,以此分析黑龙江省大豆乳熟期霜冻害的空间分布特征。

1.2.3 周期分析 基于墨西哥帽小波法对近 46 年来黑龙江省大豆乳熟期霜冻害的 IOC 比值进行时间分析。在小波分析等值线中,实线和虚线分别表示小波的正值和负值,对于一个特定时间尺度的振荡,其波峰和波谷与相应尺度小波的正值和负值对应^[11]。采用小波系数方差^[13]对近 46 年来黑龙江省大豆乳熟期霜冻的 IOC 比值的变化周期进行分析。

1.2.4 产量与霜冻害相关分析 为探究寒地大豆霜冻害与产量的关系,选取呼玛、黑河大部、伊春北部、三江平原西北部、齐齐哈尔北部、绥化北部、哈尔滨西部及牡丹江半山区局部的呼玛、黑河、孙吴、逊克、北安、拜泉、依安、五常、富锦、桦南、依兰、穆棱等 21 个农业气象站,这些站点均位于 1971—2016 年黑龙江省大豆乳熟期霜冻害发生频率较高区域,位于大豆主产区、具有代表性。

研究表明,一定区域内,由于邻近年份内农业栽培技术、田间管理措施、品种熟型均变化不大,则雨养作物单位面积产量的差异主要是由气象条件差异引起^[26]。气象部门在科研和业务工作中经验

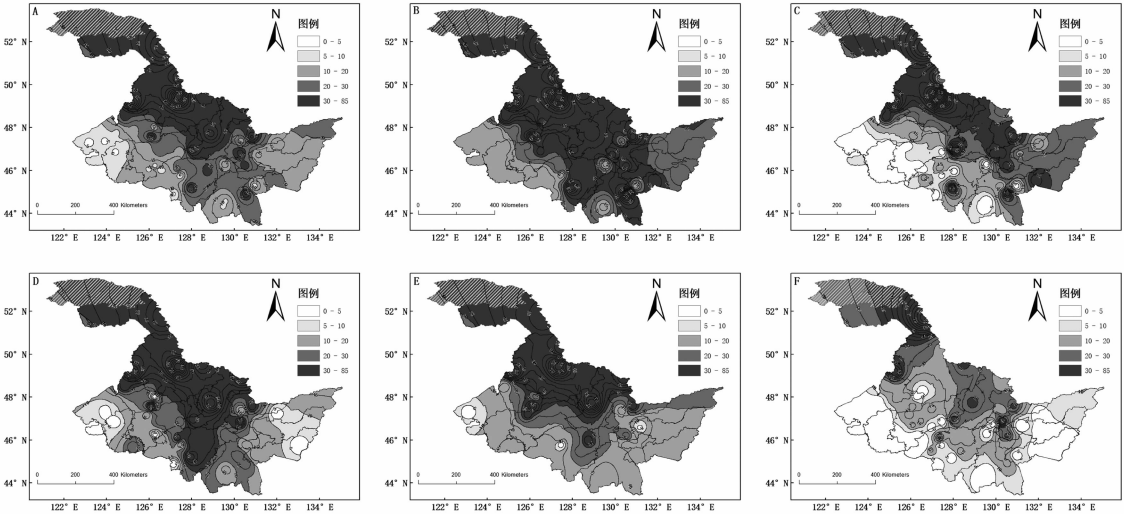
性地以产量比较值评价产量的增(减)产幅度。因此,本研究采用产量比较值分析大豆单产变化状况,计算公式为: $\Delta P_i(\%) = \left(\frac{P_i}{P_n} - 1\right) \times 100$,式中 ΔP_i 为某站点第*i*个霜冻害发生年份的大豆单产增(减)产百分率(%),正(负)值表明产量增加(减少), P_i 为某站点第*i*个霜冻害发生年份的大豆单产($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), P_n 为某站点某时间段内的大豆平均单产($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),平均单产的时间步长取值为10年,本研究起始年为1971年,终止年为2014年,期间每10年求算1个单产平均值。由于邻近年份产量更具可比性,因此,当某站点第*i*个霜冻害发生年份出现于1971-1980年时, P_n 取1971-1980年的平均值,出现于1981-1990年时, P_n 取1981-1990年的平均值……,以此类推,当2014年出现时, P_n 取

2001-2014年的平均值。剔除由于干旱、洪涝及其它自然灾害造成严重减产的极个别年份,如2007、1998和2013年。

2 结果与分析

2.1 大豆乳熟期霜冻害空间分布

如图1所示:1971-2016年寒地大豆乳熟期霜冻害(轻度、中度和重度)发生频率在30%以上的区域主要集中在黑龙江省西北部、三江平原西北部、通河、尚志、穆棱等18个站。 S_1 年代黑龙江省大豆乳熟期霜冻发生较普遍,发生频率在30%以上的站点有33个; S_2 、 S_3 及 S_4 年代大豆乳熟期霜冻发生较频繁,发生频率在30%以上的站点分别为20、25和17个; S_5 年代大豆乳熟期霜冻较少发生,仅9个站点发生频率超过30%。



A: 1971-2016年;B~F:分别为 $S_1\sim S_5$ 年代。下同。
A: From 1971 to 2016; B-F: $S_1\sim S_5$ years. The same below.

图1 1971-2016年黑龙江省大豆霜冻发生频率空间分布
Fig.1 Spatial distribution of the frequency of frost damage on soybean in Heilongjiang province during 1971-2016

2.1.1 轻霜冻发生频率的空间分布 如图2所示:1971-2016年黑龙江省大豆乳熟期轻霜冻空间分布特征受纬度及海拔因素共同影响,松嫩平原中南部及黑龙江省东部大部发生频率为0~10%;黑龙江省中北部及牡丹江半山区发生频率为10%~40%,其中呼玛、黑河西北部、伊春局部及穆棱发生频率超过20%。 S_1 年代,发生频率大致呈现出自南向北逐渐增加的趋势。黑龙江省南部局部发生频率为0~10%;黑龙江省西北部及牡丹江山区发生频率较高,为20%~60%。 S_2 年代发生程度比 S_1 年代减轻。发生频率为20%~60%的区域仅零散分布于黑龙江省西北部和牡丹江地区,大部地区为0~20%。 S_3 年代发生程度较 S_2 年代加重,但轻于 S_1 年

代。松嫩平原西南部、三江平原大部发生程度较轻在0~10%;其它地区均为10%以上,其中呼玛、黑河大部、伊春大部、讷河为20%~50%。 S_4 年代与 S_5 年代发生程度大幅度减轻。 S_4 年代呼玛、黑河地区、伊春大部及松嫩平原局部发生频率为10%~40%,仅孙吴、明水、伊春在20%以上;其它大部地区较少或未发生。 S_5 年代黑龙江省西北部局部、哈尔滨北部、鹤岗地区及铁力、勃利、穆棱发生频率为10%~50%,其中仅呼玛、嫩江、巴彦为20%以上。 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 5个气候年代黑龙江省59个站平均轻霜冻发生频率分别为13.2%、8.8%、12.0%、7.3%、5.7%。

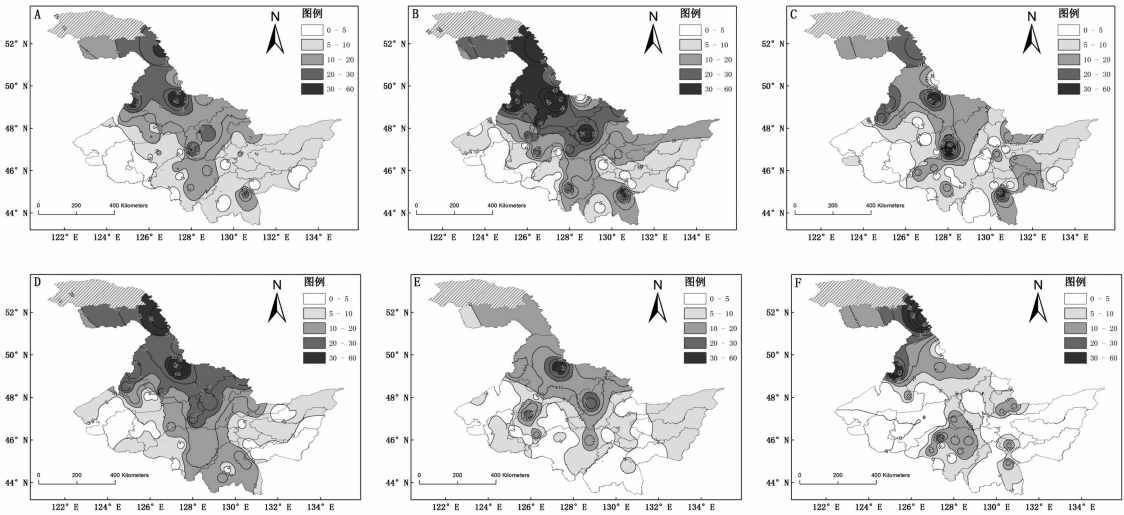


图2 1971 – 2016 黑龙江省大豆轻霜冻发生频率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the frequency of mild frost damage on soybean in Heilongjiang province during 1971 – 2016

2.1.2 中霜冻发生频率的空间分布 如图3所示:近46年来,寒地大豆乳熟期中霜冻发生频率较高,除松嫩平原南部、三江平原中部等地区外;全省大部地区发生频率均在10%以上,其中呼玛、黑河大部、伊春大部及讷河、拜泉、萝北、桦川、穆棱为20%~45%。空间分布特征上,大体呈自南向北逐渐增加的趋势,在海拔因素的共同影响下,牡丹江半山区局部发生频率在20%以上。 S_1 年代中霜冻发生程度较重,除松嫩平原西南局部及个别站点发生频率在10%以下,全省大部均在10%以上,其中黑龙江省西北部、三江平原局部、哈尔滨局部及牡丹江东部共27个站点发生频率为20%~80%。 S_2 年代发

生范围比 S_1 年代明显缩小,发生频率为20%~40%的仅有13个站点,零星分布于黑龙江省西北部及东部,其它大部地区较少或未发生。 S_3 年代发生范围比 S_2 年代明显增加,除三江平原中东部大部及松嫩平原局部等地发生频率在10%以下;全省大部地区均在10%以上,其中黑龙江省中西大部有25个站点发生频率超过20%。 S_4 年代发生频率超过20%的地区缩小至黑龙江省西北部地区共15个站点。 S_5 年代仅呼玛、伊春、佳木斯3个站点发生频率为20%以上。 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 5个气候年代黑龙江省59个站平均中霜冻发生频率分别为16.9%、8.6%、15.4%、10.3%、6.8%。

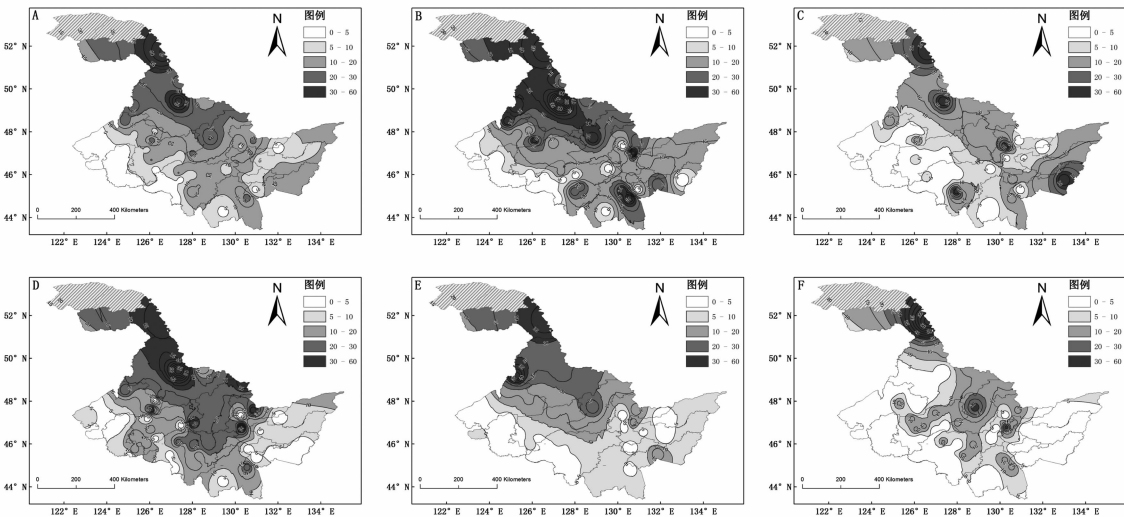


图3 1971 – 2016 黑龙江省大豆中霜冻发生频率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the frequency of moderate frost damage on soybean in Heilongjiang province during 1971 – 2016

2.1.3 重霜冻发生频率的空间分布 如图4所示:1971–2016年寒地大豆乳熟期重霜冻发生频率空间分布仍具有较明显的纬度特征及海拔特征,黑龙江省西北部及牡丹江半山区发生频率较高在10%

以上,呼玛、黑河北部、伊春中部及萝北、穆棱6个站为20%~65%。 S_1 年代发生程度较重,全省59个站发生频率均在10%以上,黑龙江省北部地区及牡丹

江半山区等 25 个站在 20% 以上。S₂年代仅黑龙江省西北部、三江平原西部局部及穆稜 14 个站发生频率超过 10% ,发生频率超过 20% 的站点更是急剧减少,黑龙江省南部大部及三江平原大部重霜冻较少或未发生。与 S₂年代相比,S₃年代发生频率超过 10% 区域向黑龙江省东南部扩展,黑龙江省西南部及东南部共 31 个站发生频率在 10% 以上,发生频率超过 20% 的有 12 个站,集中在黑龙江省西北部。

与 S₃年代相比,S₄年代发生频率在 10% 以上的站点扩大到 42 个,发生频率在 20% 以上站点扩大到 16 个,集中在呼玛、黑河地区和伊春地区等地。S₅年代发生频率在 10% 以上地区范围锐减,仅剩黑龙江省西北部局部、佳木斯西部及牡丹江东北部等 12 个站。S₁、S₂、S₃、S₄、S₅5 个气候年代黑龙江省 59 个站平均中霜冻发生频率分别为 17.8%、6.4%、9.5%、13.1%、4.0%。

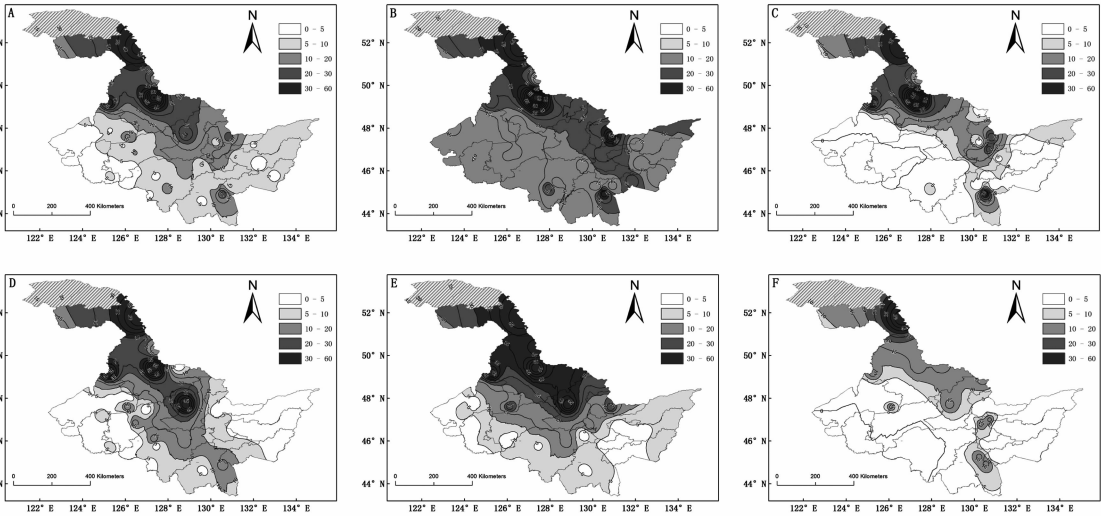


图 4 1971 – 2016 黑龙江省大豆重霜冻发生频率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the frequency of serious frost damage on soybean in Heilongjiang province during 1971 – 2016

2.2 大豆乳熟期霜冻害时间变化

2.2.1 轻霜冻时间变化 1971 – 2016 年黑龙江省大豆乳熟期轻霜冻 IOC 最大值(0.33)出现在 1977 年,表明这一年黑龙江省大豆产区有超过 30% 的站点出现轻霜冻害。IOC 大于 0.2 的年份较多,1977、1979、1997、1999、2001、2011 年黑龙江省大豆产区有超过 20% 的站点出现轻霜冻害,属于区域性轻霜冻害;1993 – 1994、2006 – 2008、2012、2016 年未发生轻霜冻,其它年份发生了局部轻霜冻(图 5a)。

2.2.2 中霜冻时间变化 1977 和 1999 年中霜冻 IOC 比值均≥0.5,表明这两年黑龙江省大豆产区有 50% 以上的站点出现中霜冻害;中霜冻 IOC 比值≥0.2 的年份有 1977、1979、1980、1989、1995、1997、

1998、1999、2001、2010 和 2011 年,这些年份黑龙江省大豆产区有 20% 以上的站点出现了中霜冻害,属区域性中霜冻害;1986、1994、2004、2005、2012、2016 年未发生中霜冻,其它年份发生了局部中霜冻(图 5b)。

2.2.3 重霜冻时间变化 1977 年重霜冻 IOC 比值为 1,表明该年黑龙江大豆产区 59 个站点全部发生重霜冻灾害;1999、2001、2010 年重霜冻 IOC 比值为 0.3 ~ 0.6,即这些年黑龙江省大豆产区有 30% ~ 60% 的站点出现重霜冻;1994、2000、2004、2007、2008、2012 和 2014 年未发生轻霜冻,其它年份发生了局部轻霜冻(图 5c)。

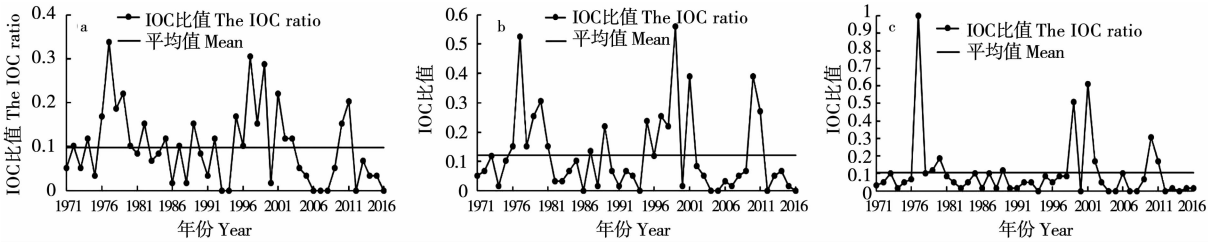


图 5 1971 – 2016 年黑龙江省大豆乳熟期轻霜冻(a)、中霜冻(b)、重霜冻(c) IOC 比值变化

Fig. 5 Variation of IOC for mild(a), moderate(b) and serious(c) frost damage on soybean in Heilongjiang province during 1971 – 2016

2.3 周期分析

2.3.1 IOC 比值小波分析 图 6 清晰地反映了在不同时间尺度上 IOC 比值正负位交替出现的周期规律。由图 6a 可见,寒地大豆乳熟期霜冻 IOC 比值存在多重时间尺度上的复杂周期结构。明显存在 5 年左右的短期振荡周期及 20 年左右的中期振荡周期。

5 年左右的短期振荡周期变化规律为,1971 – 1975 年为轻霜冻偏少期,1976 – 1982 年为偏多期,1983 – 1994 年为偏少期,1995 – 2003 年为偏多期,2003 年以后为偏少期,直到 2016 年等值线也仍未闭合,表明 2016 年以后在该周期上轻霜冻灾害正处于偏少时期,1975、1982、1994 和 2003 年为突变点。

在 5 年时间尺度上,1971 – 2016 年寒地大豆乳熟期中霜冻、重霜冻灾害 IOC 比值主要经历了 4 次交替,1975 年以前为偏少期,1976 – 1982 年为偏多期,1983 – 1994 年为偏少期,1995 – 2003 年为偏多期,2003 年以后为偏少期。

20 年尺度上轻、中霜冻灾害 IOC 比值在 1995 年以前以偏多趋势为主,1995 年以后以偏少趋势为主,直到 2016 年等值线仍未闭合,表明在该周期上轻、中霜冻灾害正处于偏少时期,突变点为 1995 年。20 年尺度上寒地大豆乳熟期重霜冻灾害 IOC 比值变化规律与轻、中霜冻基本一致,但突变点为 1992 年。

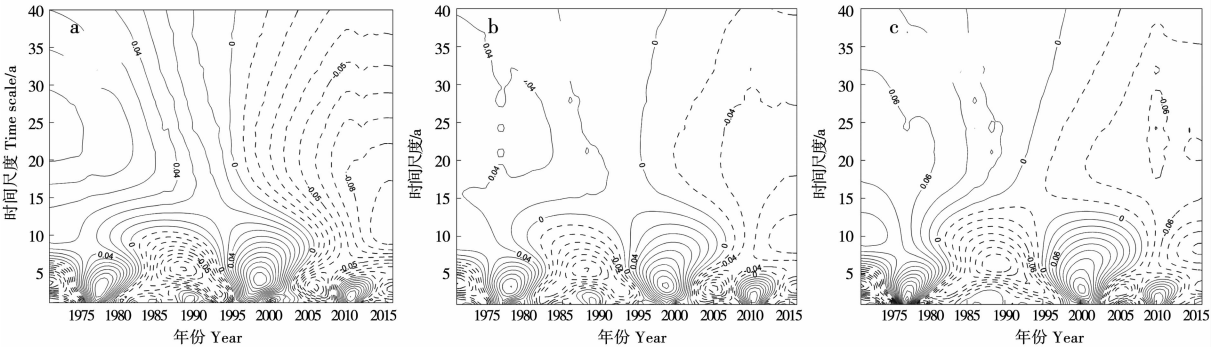


图 6 1971 – 2016 年黑龙江省大豆乳熟期轻霜冻(a)、中霜冻(b)、重霜冻(c) IOC 比值小波分析
Fig. 6 Wavelet analysis of IOC for mild(a) , moderate(b) and serious frost(c) damage on soybean in Heilongjiang province during 1971 – 2016

2.3.2 IOC 比值小波方差分析 如图 7 所示,寒地大豆乳熟期轻、中、重霜冻的 IOC 比值的小波方差均存在两个峰值,对应的时间尺度为 3 ~ 5 年和 21 年,从振荡的剧烈程度看 3 年的短周期振荡最强,为

第一主周期,21 年左右的中周期为第二主周期。表明 3 ~ 5 年的短周期对寒地大豆乳熟期轻、中、重霜冻的 IOC 比值影响最大,但 21 年左右的中周期变化对轻、中、重霜冻的 IOC 比值也存在较大影响。

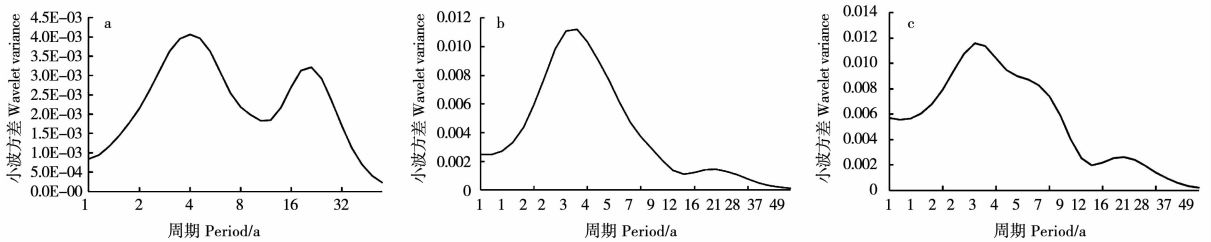


图 7 1971 – 2016 年黑龙江省大豆乳熟期轻霜冻(a)、中霜冻(b)、重霜冻(c) IOC 比值小波方差
Fig. 7 Wavelet variance of IOC for mild(a) , moderate(b) and serious(c) frost damage on soybean in Heilongjiang province during 1971 – 2016

2.4 霜冻害与大豆实际单产关系

2.4.1 霜冻害对大豆单产的影响效应 采用产量比较值方法对各年份中冻害发生增减产频次、轻度、中度、重度分别发生增减产频次的统计结果如表 1 所示;21 个研究站点大豆霜冻害共发生 265 年次,其中 $\Delta P_i < 0$ 的有 156 年次,即大豆霜冻害发生的 265 年次中有 156 年次大豆单产减少; $\Delta P_i > 0$ 的有 109 年次,即大豆霜冻害发生的 265 年次中有

109 年次大豆单产增加; $\Delta P_i < 0$ 的累计年份较 $\Delta P_i > 0$ 的年份多 18%。大豆轻霜冻害共发生 114 年次,其中 $\Delta P_i < 0$ 的有 71 年次, $\Delta P_i > 0$ 的有 43 年次; $\Delta P_i < 0$ 的累计年份较 $\Delta P_i > 0$ 的年份多 24%。大豆中霜冻害共发生 140 年次,其中 $\Delta P_i < 0$ 有 78 年次, $\Delta P_i > 0$ 的有 62 年次; $\Delta P_i < 0$ 的累计年份较 $\Delta P_i > 0$ 的年份多 12%。大豆重霜冻害共发生 128 年次,其中 $\Delta P_i < 0$ 有 77 年次, $\Delta P_i > 0$ 的有 51 年次, $\Delta P_i < 0$ 的累计年

份较 $\Delta P_i > 0$ 的年份多 20%。

统计各减产年大豆乳熟期气象数据,结合《中国气象灾害大典·黑龙江卷》^[4] 进行的分析结果表明:除 1998、2007、2013 年干旱、洪涝年外,大部分站点霜冻害发生年份大豆乳熟期未出现明显的其它自然灾害,因此,可以说明在一定程度上各等级霜冻害对大豆产量的影响均以负效应为主,总体为减产趋势。这在一定程度上证明了在一定的温度范

围内,温度对产量的正效应作用。通过比较 $\Delta P_i < 0$ 的累计年次占霜冻发生年次的百分率发现,中霜冻 < 重霜冻 < 轻霜冻,可以看出轻霜冻发生导致减产年次最多,其次为重霜冻,最少为中霜冻。这与霜冻发生时间有关,轻霜冻发生时间往往较早,因此致减产频次较高。要探究霜冻害对大豆产量的影响,需要进一步结合霜冻害出现日期对大豆单产的影响。

表 1 大豆轻度、中度、重度及总霜冻发生增减产年次统计表

Table 1 Frequency of soybean yield increase and decrease in mild, moderate, serious and total frost

	霜冻发生 年次 Frequency of frost	$\Delta P_i < 0$ 累计年次 $\Delta P_i < 0$ Cumulative frequency	$\Delta P_i > 0$ 累计年次 $\Delta P_i > 0$ Cumulative frequency	$\Delta P_i < 0$ 的累计年次占 霜冻发生年次的百分率 $\Delta P_i < 0$ Percentage of cumulative annual frequency of frost occurrence/%	$\Delta P_i > 0$ 的累计年次占 霜冻发生年次的百分率 $\Delta P_i > 0$ Percentage of cumulative annual frequency of frost occurrence/%	减产年次与增产年 次百分率差值 The difference between the frequency of production reduction and the frequency of production increase/%
轻霜冻 Mild grade of frost	114	71	43	62	38	24
中霜冻 Moderate grade of frost	140	78	62	56	44	12
重霜冻 Serious grade of frost	128	77	51	60	40	20
总霜冻 Total frost	265	156	109	59	41	18

2.4.2 霜冻害出现日期与大豆单产关系 进一步分析霜冻害出现日期对大豆单产的影响,以拜泉、孙吴站为例,因拜泉站在 1995 年出现最大减产率,考虑同一站更具可比性,再选择该站出现最小减产率的 1992 年,比较分析上述两年大豆乳熟期的日最低气温及霜冻害出现日期。拜泉站 1995 年大豆乳熟期霜冻害最早出现在 9 月 10 日,1992 年大豆乳

熟期霜冻害最早出现在 9 月 18 日。孙吴站 1995 年大豆乳熟期霜冻害最早出现在 9 月 14 日,1992 年大豆乳熟期霜冻害最早出现在 9 月 19 日(图 8)。由此可见,大豆乳熟期霜冻害出现日期不同,对大豆单产的影响不同,在一定程度上,大豆乳熟期霜冻害出现日期越早对产量的负效应越大。

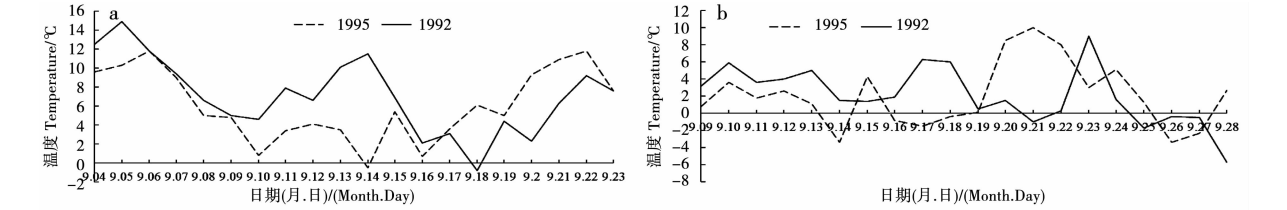


图 8 拜泉站(a)、孙吴站(b)减产代表年份大豆乳熟期日最低气温与日期变化

Fig. 8 Relation between daily lowest air temperature and date variation in daily milk ripening period of soybean in Baiquan station (a) and Sunwu station (b)

3 讨论

本研究引入气象行业标准(QX/T 88 - 2008)—《作物霜冻害等级》,使研究区霜冻害事件的筛选具有科学性;而依托大豆发育期划分霜冻提取时段,并分析其时空分布特征,使分析结果更具

生物学和农学意义,且更加细致、全面、清晰,能够在更大程度上接近实际情况。本研究所得结论可为寒地大豆规避霜冻灾害提供科学指导,对寒地大豆品种选择具有一定宏观指导意义。但是,大豆霜冻受灾程度除受日最低气温这个主要因素影响外,还与地形、农田小气候、土壤含水量、品种、成熟期

等众多因素密切相关。本研究仅从日最低气温角度出发,假设土壤、品种及其它农业技术条件得到充分保证、其它自然环境处于正常状态时,判定大豆乳熟期霜冻事件,或与真实霜冻事件存在一定误差。因此,在今后的研究中,需考虑更精细化的综合因素对霜冻害的影响,进一步提高对大豆生产指导的科学性与实用性。

本研究初步探索了霜冻害对寒地大豆产量的影响,大部分研究站点 $\Delta P_i < 0$ 的年份居多,表明霜冻害发生年份的大豆产量与邻近 10 年平均产量相比,多数年份产量表现为下降,可以看出,在一定程度上各等级霜冻害对大豆产量的影响均以负效应为主。比较分析各等级霜冻害减产年次占霜冻发生年次的百分率发现,轻霜冻导致减产年次最多,其次为重霜冻,最少为中霜冻。主要是因为轻霜冻发生日期往往较早,因此致减产频次较高。但霜冻灾害出现的日期不同,其对产量的影响程度也不同,因此本文进一步建立霜冻害最早出现日期与大豆减产率的关系,初步分析认为,霜冻害出现时间越早,大豆产量损失在一定程度上可能会加重。霜冻害对大豆产量的影响与冻害等级及出现日期均有关。然而,霜冻灾害对大豆产量的影响机制较为复杂,仅仅基于历史气象数据及产量资料尚不能完全揭示,必须依托严谨的大豆霜冻害试验来实现,此部分工作尚需进一步深入研究。

4 结 论

本研究以寒地大豆为研究对象,以 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 5 个气候年代划分研究时段,结合大豆发育期,采用气象行业标准(QX/T 88-2008)——《作物霜冻害等级》作为大豆霜冻灾害判别指标,全面揭示在气候变暖事实下,近 46 年来寒地大豆乳熟期霜冻害(轻度、中度、重度)时空演变特征,进而探究霜冻害与大豆单产的关系。

1971-2016 年,黑龙江省西北部、三江平原西北部及牡丹江半山区等地为寒地大豆乳熟期霜冻主要发生区域。这与朱红蕊等^[23]的研究结论较一致。从各年代特征看,轻度、中度霜冻害在 S_1 年代发生范围最广、发生频率最高, S_3 年代次之; S_1 、 S_4 年代重霜冻害平均发生频率大于 10%。空间分布特征显示,霜冻害分布存在一定纬度及海拔特征,北部地区及牡丹江半山区普遍比南部地区及低海拔平原地区发生频率高。

近 46 年,寒地大豆乳熟期轻、中、重霜冻害存在明显多发年,1977、1979、1999、2001 和 2011 年发生了区域性霜冻灾害。霜冻害发生存在多重时

间尺度的周期性规律,明显存在 3~5 年短期振荡周期和 20 年左右的中期振荡周期。

1971-2016 年,由产量比较值方法统计分析研究区各站霜冻害发生年份的产量增(减)状况,结果表明,在一定程度上各等级霜冻害对大豆产量的影响均以负效应为主。结合对典型站霜冻害出现日期的进一步分析表明,大豆乳熟期霜冻害出现日期越早对产量的负效应越大。霜冻害对大豆产量的影响为霜冻等级及出现日期的协同作用。

参考文献

[1] 朱海霞,赵慧颖,李秀芬,等. 黑龙江省大豆主产地产量动态预报系统的建立[J]. 大豆科学, 2017, 36(6): 950-957. (Zhu H X, Zhao H Y, Li X F, et al. System development of dynamic forecast on soybean yield of main areas in Heilongjiang province[J]. Soybean Science, 2017, 36(6): 950-957.)

[2] 陈莉,韩冰,李百超,等. 黑龙江省农业气象灾害服务需求分析[J]. 灾害学, 2019,34(2):78-82. (Chen L, Han B, Li B C, et al. Demand for agrometeorologica disasters service in Heilongjiang province[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 78-82.)

[3] 李帅,杜春英. 黑龙江省农业与气候[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 2012: 124-125. (Li S, Du C Y. Agriculture and climate in Heilongjiang province[M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2012:124-125.)

[4] 温克刚,孙永罡. 中国气象灾害大典·黑龙江卷[M]. 北京:气象出版社, 2007. (Wen K G, Sun Y G. Heilongjiang volume of China meteorological disaster[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.)

[5] 冶明珠,郭建平,袁彬,等. 气候变化背景下东北地区热量资源及玉米温度适宜度[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2786-2794. (Ye M Z, Guo J P, Yuan B, et al. Thermal resources and maize temperature suitability in northeast China under climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10):2786-2794.)

[6] 杨克明,陈秀凤,王东生,等. 东北地区初霜冻的天气气候特征[J]. 气象, 1999(6): 14-19. (Yang K M, Chen X F, Wang D S, et al. Analysis of weather climatic features of the first frost in the northeast part of China[J]. Meteorological Monthly, 1999 (6):14-19.)

[7] Ning X, Liu G, Zhang L, et al. The spatio-temporal variations of frost-free period in China from 1951 to 2012[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(1): 23-42.

[8] 方修琦,王媛,朱晓禧. 气候变暖的适应行为与黑龙江省夏季低温冷害的变化[J]. 地理研究, 2005(5): 664-672. (Fang X Q, Wang Y, Zhu X X. Change of cool summer hazard under an adaptation behavior to the climate warming in Heilongjiang province, northeast China[J]. Geographical Research, 2005 (5): 664-672.)

[9] Liu Q, Piao S L, Janssens I A, et al. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. [J]. Nature Communications, 2018, 9:426.

[10] 曲辉辉, 朱海霞, 王秋京, 等. 气候变化对东北三省大豆生育期和产量的影响模拟[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(7): 61-69. (Qu H H, Zhu H X, Wang Q J, et al. Effects of climate change on soybean growth period and yield in northeast China[J]. Journal of Northwest of A & F University (Nature Science Edition), 2014, 42(7): 61-69.)

[11] 李森, 夏军, 陈社明, 等. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011. (Li M, Xia J, Chen S M, et al. Wavelet analysis on annual precipitation around 300 years in Beijing area[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(6): 1001-1011.)

[12] 益西拉姆, 扎多, 索朗仓决. 1981~2018 年山南市气温变化特征分析[J]. 高原科学研究, 2019, 3(1): 35-43, 52. (Yi X L M, Zha D, Suo L C J. Analysis on the characteristics of temperature changes from 1981 to 2018 in Shannan[J]. Plateau Science Research, 2019, 3(1): 35-43, 52.)

[13] 宫丽娟, 李帅, 姜丽霞, 等. 1961~2010 年黑龙江省水稻延迟型冷害时空变化特征[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(1): 76-83. (Gong L J, Li S, Jiang L X, et al. Spatial-temporal characteristics of delayed cool injury for rice from 1961 to 2010 in Heilongjiang province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(1): 76-83.)

[14] 杨银, 李岩瑛, 陈豫英, 等. 基于 Copula 函数的甘肃河东短时强降水特征分析[J]. 气象, 2019, 45(5): 632-640. (Yang Y, Li Y Y, Chen Y Y, et al. Characteristics of short-time heavy rainfall in Hedong area of Gansu based on Copula-Function[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(5): 632-640.)

[15] Anandhi A, Perumal S, Gowda P H, et al. Long-term spatial and temporal trends in frost indices in Kansas, USA[J]. Climatic Change, 2013, 120(1): 169-181.

[16] 吴幸毓, 林毅, 陈文键, 等. 福建霜冻时空分布特征及环流背景分析[J]. 大气科学学报, 2016, 39(4): 501-509. (Wu X S, Lin Y, Chen W J, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of frost injury in Fujian and its circulation background[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2016, 39(4): 501-509.)

[17] Wang L, Wu Z, He H, et al. Changes in start, end, and length of frost-free season across northeast China: Start, end, and length of frost-free season over northeast China[J]. International Journal of Climatology, 2017: 37.

[18] 陈凯奇, 米娜. 辽宁省玉米低温冷害和霜冻灾害风险评估[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(1): 89-94. (Chen K Q, Mi N. Risk evaluation on maize cold damage and frost damage in Liaoning province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(1): 89-94.)

[19] Heino R. Progress in the study of climate extremes in northern and central Europe[J]. Climatic Change, 1999, 42: 151-181.

[20] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada[J]. Climate, 2001, 14: 1959-1971.

[21] 胡琦, 潘学标, 张丹, 等. 东北地区不同时间尺度下气温和无霜期的变化特征[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 1-8. (Hu Q, Pan X B, Zhang D, et al. Variation of temperature and frost-free period in different time scales in northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 1-8.)

[22] 景学义, 安晓存, 宫沿平, 等. 黑龙江省霜冻的气候变化特征和预报指标[J]. 灾害学, 2013, 28(1): 65-68. (Jing X Y, An X C, Gong Y P, et al. Climatic change features and forecast indicators of frost in Heilongjiang province[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(1): 65-68.)

[23] 朱红蕊, 于宏敏, 姚俊英, 等. 黑龙江省水稻初霜冻灾害致灾因子危险性分析[J]. 灾害学, 2012, 27(2): 96-99. (Zhu H R, Yu H M, Yao J Y, et al. Frost hazard risk assessment of rice in Heilongjiang province[J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(2): 96-99.)

[24] 姜丽霞, 李帅, 李秀芬, 等. 黑龙江省近三十年气候变化对大豆发育和产量的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(6): 921-926. (Jiang L X, Li S, Li X F, et al. Impacts of climate change on development and yield of soybean over past 30 years in Heilongjiang province[J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 921-926.)

[25] 纪瑞鹏, 于文颖, 武晋雯, 等. 气候平均值变化对辽宁水稻延迟型冷害评估结果的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1695-1703. (Ji R P, Yu W Y, Wu J W, et al. Effect of climatic mean value change on the evaluation result of rice delayed cold damage in Liaoning province, northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1695-1703.)

[26] 米娜, 蔡福, 张玉书, 等. 雨养作物产量差研究进展[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 140-147. (Mi N, Cai F, Zhang Y S, et al. Advanced in research on rain fed crop yield gaps[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(6): 140-147.)