

王培娟, 霍治国, 杨建莹, 等. 基于热量指数的东北春玉米冷害指标. 应用气象学报, 2019, 30(1): 13-24.
DOI: 10.11898/1001-7313.20190102

基于热量指数的东北春玉米冷害指标

王培娟¹⁾ 霍治国^{1)2)*} 杨建莹¹⁾ 吴霞³⁾

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

²⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

³⁾(黑龙江省气象服务中心, 哈尔滨 150030)

摘 要

构建春玉米冷害指标是冷害研究的基础, 对我国春玉米安全生产和品种布局具有重要参考意义。以我国东北三省春玉米为研究对象, 以具有明确生物学意义的热量指数为春玉米冷害指示因子, 利用气象资料、春玉米生育期资料和冷害灾情资料, 计算春玉米不同生育阶段平均热量指数, 建立春玉米冷害样本序列, 基于 K-S 分布拟合检验和 95% 置信区间上限阈值的方法, 厘定春玉米冷害指标阈值, 构建我国东北春玉米不同生育阶段冷害指标, 并采用独立的春玉米冷害灾情样本验证指标的合理性。研究结果表明: 东北三省春玉米冷害指标在生殖生长和营养生长与生殖生长并进期热量指数的阈值较高, 营养生长期略低; 指标验证结果与历史灾情记录完全吻合的比率为 80.0%, 完全吻合和相差 1 级的比率为 100%, 且各灾害程度验证得到的准确率均高于 75%。

关键词: 热量指数; 冷害指标; 春玉米; 不同生育阶段

引 言

玉米是世界上种植最广泛的谷类作物之一, 也是近百年来全球种植面积扩展最大、单位面积产量提高最快的大田作物。我国是世界上仅次于美国的第二大玉米生产国, 截至 2016 年, 玉米播种面积和总产量分别占全国粮食作物播种面积和总产量的 32.5% 和 35.6%, 超过水稻和小麦, 位居三大作物之首^[1]。东北三省春玉米区(包括黑龙江、吉林、辽宁)是我国最重要的玉米集中产区之一, 但由于所处纬度较高, 玉米生长季内温度条件年际间波动较大, 极易发生冷害, 造成玉米减产。

春玉米冷害是在春玉米生长季遇到较长时间的持续性低温, 导致生育期延迟, 正常成熟受到影响, 引起减产的农业气象灾害^[2]。冷害不仅影响玉米的萌芽、出苗, 而且会影响玉米的生理和形态参数^[3-4], 是我国东北地区主要农业气象灾害之一, 也是导致

该地区玉米产量不稳定的主要因素之一^[4-7]。近年来随着全球气候变暖, 东北地区春玉米可种植边界北移东扩^[8], 发生严重冷害的程度总体表现为减弱趋势^[9], 但由于不同地区年内和年际间温度波动幅度较大, 气候偏暖时期仍然会出现偏冷阶段和低温年份^[5], 区域性低温冷害时有发生, 严重制约和影响我国东北春玉米生产和国家粮食安全。

冷害指标是冷害研究的基础。目前关于玉米冷害指标的研究大致分为 5 类: 温度指标、积温指标、生育期指标、热量指标和综合指标。①温度指标主要是用 5—9 月平均气温的负距平判断某地某年是否发生冷害, 距平值越低, 冷害危害程度越重^[9-12]。②积温指标根据作物某一生育期的活动积温距平^[13-14]或积温差^[15]衡量热量条件对作物生育进程的满足程度^[16-17]。唐余学等^[18]则将日平均温度低于冷害受害温度之差定义为日寒积温, 将各生育阶段的日寒积温累加得到生育阶段寒积温, 赋予不同的权重系数得到年寒积温, 分析年寒积温距平与玉

2018-09-05 收到, 2018-10-12 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(31771672), 中国气象科学研究院科技发展基金(2018KJ012), 中央级基本科研事业费项目(2018SYIAEZD1)

* 通信作者, 邮箱: huozg@cma.gov.cn

米减产率的关系,建立年寒积温距平指标。积温距平、积温差或年寒积温距平数值越低,冷害越严重。温度指标和积温指标均是计算玉米全生育期热量状况,反映的是全生育期的冷害程度,并不能反映冷害发生的具体时段^[19]。③生育期指标通过分析某一生育期的推迟日数表征冷害程度,主要用于判断玉米延迟型冷害。高素华^[20]利用多年玉米分期播种资料,根据玉米生长季不同生育期延迟的日数与减产率关系,判断和监测玉米延迟型冷害;刘布春等^[21]在田间试验基础上,基于东北玉米区域动力模型,模拟玉米生长发育过程,以抽雄期距平值为冷害指标,判断玉米冷害等级。生育期延迟程度能在一定程度上表征玉米的冷害状况,但在气候变暖背景下,东北部分地区的热量条件已明显改善,部分生育期的推迟并不一定意味着冷害的发生;同时抽雄期延迟程度仅能表征玉米一个生育阶段的冷害状况,在实际应用中具有一定局限性。④热量指标是在充分考虑玉米不同生育阶段对热量条件需求程度的基础上,根据高产条件下玉米各生育期的三基点温度,构建热量指数^[6],并以热量指数距平百分率分析玉米不同生育阶段冷害的发生情况^[22-24]。⑤综合指标方面,马树庆等^[25]分别以积温距平指标和发育期延迟日数作为主导和辅助指标,构建玉米冷害综合指标;李伟君等^[26]则分别以活动积温负距平、负积温累积指数和初霜日、产量损失作为主导指标、辅助指标和参考指标,构建东北地区玉米冷害综合指标。但这类指标需要的参数较多,实际应用中会受到资料可获取性的限制。

综上所述,现有冷害指标均以距平值作为判断玉米是否受灾的衡量标准,该方法过多地考虑气象波动对作物的可能影响,而忽略了作物自身生理特性对气象条件的耐受程度。因此,利用任何参数的距平值作为判断某种作物是否发生灾害的衡量指标,均具有一定的局限性。鉴于此,本文以我国东北三省春玉米为研究对象,以玉米冷害为研究重点,以具有明确生物学意义的热量指数为指示因子,通过提取《中国气象灾害大典》^[27-29]和《中国气象灾害年鉴》^[30]中东北春玉米冷害历史灾情记录,重构玉米不同生育阶段的冷害样本,采用置信区间上限阈值的方法厘定不同灾害程度的临界阈值,构建东北三省春玉米不同生育阶段冷害指标,以期为玉米冷害监测预测预警、风险评估和防灾减灾气象服务提供科技支撑。

1 研究区和资料

1.1 研究区概况

东北三省(38.6°~53.5°N,118.5°~135.1°E)属寒温带湿润、半湿润气候带,冬季低温干燥,夏季温暖湿润,无霜期为130~170 d,全年降水量为400~800 mm,其中60%的降水集中在7—9月,雨热同季,日照充足、昼夜温差大,适于春玉米种植,是我国春玉米的主要产区和重要的商品粮基地。

1.2 资料来源及处理

资料包括气象资料、农业气象资料和春玉米灾情资料,其中气象资料和农业气象资料来源于中国气象局气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>),春玉米灾情资料分为两部分,2000年之前的灾情资料来源于研究区域内各省的《中国气象灾害大典》^[27-29],2000年之后中国气象灾害以年鉴的形式汇编,收录于《中国气象灾害年鉴》^[30]。

1.2.1 气象资料

本文收集了1961—2015年研究区83个国家级基本气象站(图1)逐日平均气温,经过质量控制及有效性检查后,筛选出82个气象站,对其中个别缺测值采用与该日相邻两日该要素的平均值替代。

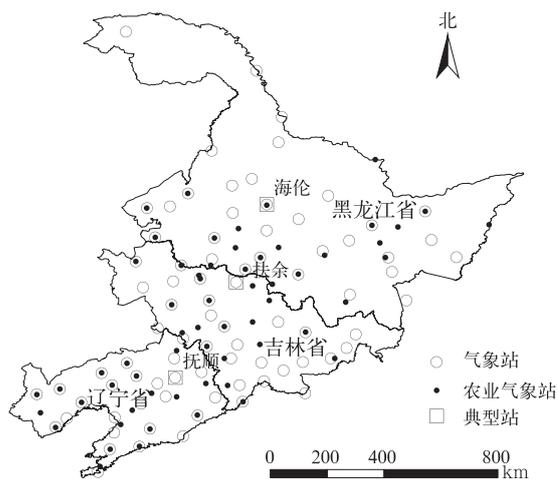


图1 研究区气象站和农业气象站分布

Fig. 1 The spatial distribution of meteorological stations and agro-meteorological stations in the target area

1.2.2 春玉米生育期资料

春玉米生育期资料包括1981—2013年研究区61个农业气象站春玉米出苗、三叶、拔节、抽穗、开

花、乳熟、成熟日期,由于农业气象站建站时间不统一,各站点能够收集到的春玉米生育期起始年份不尽相同,且有部分站点、部分年份、部分生育期资料不完整。为研究方便,各农业气象站生育期资料以该站同一生育期历年的平均值表示;同时,由于部分站点无春玉米开花期观测资料,通过分析春玉米抽穗期和开花期,发现我国东北三省春玉米抽穗后 3 d,基本进入开花普遍期,因此,部分站点缺测的开花期资料可利用抽穗期延后 3 d 插补。

1.2.3 冷害资料

收集《中国气象灾害大典》^[27-29]和《中国气象灾害年鉴》^[30]中关于研究区春玉米冷害的相关记录,根据灾情描述,将冷害划分为轻、中、重 3 个等级。重度冷害为严重低温冷害、异常/罕见低温、异常强降温、1949 年以来最重、几乎绝产;中度冷害为气温明显偏低、较严重的低温冷害、出现霜冻(大于 1 d)、作物受冻较重;轻度冷害为气温偏低、出现霜冻(1 d),出现低温冷害、作物生长受影响。

$$F(T) = \begin{cases} 100 \times \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B}, & T_1 < T < T_2; \\ 0, & T \leq T_1 \text{ 或 } T \geq T_2. \end{cases} \quad (1)$$

$$B = \frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1}. \quad (2)$$

其中, $F(T)$ 为热量指数,量纲为 1; T 为某生育阶段内日平均气温,单位:°C; T_0, T_1, T_2 分别为春玉米在某生育阶段的适宜温度、下限温度和上限温度,单位:°C(表 1)^[6,22]。 $F(T)$ 值越大,表明热量条件越

2 研究方法

2.1 生育期分区

由于研究区内的气象站和农业气象站并非一一对应,为了更好地基于气象站资料进行后续分析,本文将农业气象站的平均生育期资料进行反距离权重(inverse distance weighted, IDW)插值处理,得到研究区春玉米出苗、三叶、拔节、开花、乳熟和成熟期的空间分布图,并根据各生育期普遍期的平均日期,将其划分为 5 个区,以方便确定各气象站、各生育阶段的起止时间。

2.2 热量指数

2.2.1 热量指数

热量指数结合作物的生长发育特性,考虑作物不同生育阶段的适宜温度、下限温度和上限温度,可以反映不同阶段的热量条件对作物生长发育的影响,其计算公式^[6]如下:

好,反之亦然。

春玉米不同生育阶段热量指数以各统计时段内热量指数平均值表示,以其为指示因子,构建春玉米冷害指标。

表 1 高产条件下春玉米各生育阶段三基点温度

Table 1 Three physiological temperatures at different developmental stages of spring maize under high-yielding conditions

生育时段	生育阶段	简称	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_0/^\circ\text{C}$
营养生长期	出苗-三叶期	S1	8.0	27.0	20.0
	三叶-拔节期	S2	11.5	30.0	24.5
营养生长与生殖生长并进期	拔节-开花期	S3	14.0	33.0	27.0
生殖生长期	开花-乳熟期	S4	14.0	32.0	25.5
	乳熟-成熟期	S5	10.0	30.0	19.0

2.2.2 热量指数差

以春玉米不同生育阶段发生轻度冷害的热量指数上限阈值为标准,计算逐日热量指数差

$$\Delta H_i = F(T)_i - F(T)_{s,1}. \quad (3)$$

式(3)中, ΔH_i 为第 i 日春玉米热量指数与该生育阶

段春玉米发生轻度冷害的热量指数上限阈值的差值,即热量指数差, $F(T)_i$ 表示第 i 日春玉米热量指数, $F(T)_{s,1}$ 表示第 i 日所在生育阶段(s)春玉米发生轻度冷害的热量指数上限阈值。

热量指数差与冷害等级的对应关系为

$$\begin{cases} \Delta H_i > 0, \text{无冷害;} \\ F(T)_{s,2} - F(T)_{s,1} < \Delta H_i \leq 0, \text{轻度冷害;} \\ F(T)_{s,3} - F(T)_{s,1} < \Delta H_i \leq F(T)_{s,2} - F(T)_{s,1}, \text{中度冷害;} \\ \Delta H_i \leq F(T)_{s,3} - F(T)_{s,1}, \text{重度冷害。} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, $F(T)_{s,1}, F(T)_{s,2}, F(T)_{s,3}$ 分别表示第 s 生育阶段春玉米发生轻度冷害、中度冷害、重度冷害的热量指数上限阈值。 $\Delta H_i > 0$ 表示无冷害发生, $\Delta H_i < 0$ 则发生冷害,且可以根据 ΔH_i 的大小判断春玉米逐日冷害等级。

2.2.3 累积热量指数差

将逐日热量指数差累加得到计算时段内累积热量指数差,

$$\begin{cases} \Delta H_A > 0, \text{无冷害;} \\ \sum [F(T)_{s,2} - F(T)_{s,1}] < \Delta H_A \leq 0, \text{轻度冷害;} \\ \sum [F(T)_{s,3} - F(T)_{s,1}] < \Delta H_A \leq \sum [F(T)_{s,2} - F(T)_{s,1}], \text{中度冷害;} \\ \Delta H_A \leq \sum [F(T)_{s,3} - F(T)_{s,1}], \text{重度冷害。} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 冷害指标

2.3.1 冷害样本构建

基于灾情记录中春玉米冷害发生的时间(时段)、地点(区域)、受灾程度,提取春玉米冷害发生时段对应生育阶段热量指数,构建冷害样本,整理得到1961年以来我国东北三省春玉米区5个生育阶段

$$\Delta H_A = \sum_{i=1}^n \Delta H_i. \quad (5)$$

其中, $\Delta H_A > 0$, 表示无冷害发生; $\Delta H_A < 0$, 表示发生冷害。可以根据 ΔH_A 判断一段时期内的冷害等级。

分别将中度和重度冷害等级上限阈值与轻度冷害上限阈值的差值累加,得到中度和重度冷害等级累积热量指数差(式(6)):

(出苗-三叶期、三叶-拔节期、拔节-开花期、开花-乳熟期、乳熟-成熟期)、3个灾害等级(轻度、中度、重度)共362个样本,选取其中337个用于指标构建,随机预留各个生育阶段、各个灾情等级样本共25个用于指标验证(表2)。不同年代各冷害等级的样本量如表3所示,除20世纪60年代的中度冷害和2000年

表2 春玉米各生育阶段不同冷害等级样本量

Table 2 The information of chilling damage samples at different developmental stages of spring maize

生育阶段	轻度冷害样本量		中度冷害样本量		重度冷害样本量	
	指标构建	指标验证	指标构建	指标验证	指标构建	指标验证
S1	11	2	17	1	37	2
S2	31	1	24	3	26	3
S3	11	1	8	1	14	1
S4	40	3	50	1	20	1
S5	36	2	27	1	15	2

表3 不同时段春玉米冷害样本量

Table 3 The information of chilling damage samples for spring maize in different decades

时段	指标构建样本			指标验证样本
	轻度冷害	中度冷害	重度冷害	
1961—1970年	27	1	18	5
1971—1980年	54	12	61	5
1981—1990年	20	42	18	8
1991—2000年	18	23	14	2
2001—2015年	10	18	1	5

以后的重度冷害等级样本量较少外,其他各年代、各冷害等级样本量分布相对较均匀,从中也可以看

到,2000年以后春玉米发生重度冷害的次数相对较少。

2.3.2 指标率定

春玉米不同生育阶段的热量条件是决定春玉米冷害等级的关键决定性因素。本研究采用K-S检验(Kolmogorov-Smirnov test)方法^[31],对春玉米不同生育阶段、不同致灾等级下的15组热量指数序列,分别进行正态分布、均匀分布和指数分布模型概率密度函数拟合检验,判断样本序列的最优理论概率分布类型^[32]。当检验结果超过0.05时,表明样本序列服从该分布类型。各分布模型的概率密度函

数见式(7)~式(9)^[33]。

$$\text{正态分布: } f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

$$\text{均匀分布: } f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b; \\ 0, & x \leq a \text{ 或 } x \geq b. \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{指数分布: } f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} e^{-x/\theta}, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

其中, x 为样本变量; $\sigma, \mu, a, b, \theta$ 为参数。

基于灾害样本序列的最优分布函数,采用 95% 置信区间估计的方法,表征春玉米各生育阶段、各致灾等级热量指数样本序列区间,以 95% 置信区间的上限值作为春玉米冷害的临界阈值,构建春玉米不同生育阶段冷害指标。

2.3.3 指标验证

利用随机预留的 25 个春玉米冷害样本,根据灾害发生时段和计算得到的灾害发生阶段的热量指数,划分冷害等级,对比验证历史灾情记录与冷害指标计算结果的一致性。

3 结果与分析

3.1 冷害指标的构建

3.1.1 春玉米冷害样本热量指数描述

分别对春玉米不同生育阶段、不同冷害等级 15 组样本序列的热量指数进行统计(表 4),结果表明:同一生育阶段内,各冷害等级的平均热量指数变化规律一致,平均热量指数从大到小依次为轻度冷害、中度冷害、重度冷害。在各冷害等级内,平均热量指数均为营养生长与生殖生长并进期及生殖生长期略大,营养生长期略小。轻度和中度冷害在营养生长与生殖生长并进期(S3)的平均热量指数最大,分别为 73.11 和 64.76;生殖生长期(S4, S5)次之,营养生长期(S1, S2)最小。重度冷害则在生殖生长期最大,开花-乳熟期和乳熟-成熟期的平均热量指数分别为 59.10 和 58.21;拔节-开花期次之,平均热量指数为 57.53;营养生长期最小,出苗-三叶期和三叶-拔节期平均热量指数分别为 51.78 和 52.15。

从标准差看,15 组样本序列离散程度不同,标

表 4 春玉米冷害指标构建样本平均热量指数统计特征

Table 4 Statistical characteristics of average heat index for modeling samples of spring maize chilling damage

生育阶段	冷害等级	样本量	平均热量指数	标准差	最小热量指数	最大热量指数
S1	轻度	11	64.08	10.46	36.72	72.19
	中度	17	58.42	10.43	39.18	73.47
	重度	37	51.78	11.81	25.25	75.48
S2	轻度	31	67.06	5.95	56.98	77.05
	中度	24	61.42	8.08	41.82	80.10
	重度	26	52.12	11.44	27.35	72.04
S3	轻度	11	73.11	4.18	66.59	81.76
	中度	8	64.76	4.71	56.01	70.26
	重度	14	57.53	7.66	43.69	70.97
S4	轻度	40	71.56	10.09	50.79	85.57
	中度	20	64.60	8.20	50.62	76.60
	重度	20	59.10	8.62	42.12	69.97
S5	轻度	36	69.29	8.38	50.90	86.63
	中度	27	64.13	6.40	50.18	75.58
	重度	15	58.21	7.06	46.64	76.80

准差平均值为 8.23,其中标准差小于 8 的有 6 组: S2 轻度冷害(5.95), S3 轻度、中度、重度冷害(4.18, 4.71, 7.66), S5 中度、重度冷害(6.40, 7.06);标准差为 8~10 的有 4 组: S2 中度冷害(8.08), S4 中度冷害(8.20)和重度冷害(8.62), S5 轻度冷害(8.38);其余 5 组样本标准差大于 10。总体上, S1 平均离散程度最大,标准差平均值为

10.90;从冷害等级来看,重度冷害样本序列的离散程度最大,平均值为 9.32。

3.1.2 指标构建

基于春玉米 5 个生育阶段、3 个冷害等级的 15 组样本序列,利用 SPSS 统计分析软件,分别对样本序列进行正态分布、均匀分布、指数分布拟合,并用 K-S 方法(0.05 的显著性水平)进行检验(表 5),结

果表明:15组冷害样本序列总体属于正态分布、均匀分布、指数分布的结果分别为15组、13组、0组,并且同一样本序列3种分布函数的检验结果中,正态分布均为最高或接近最高,因此,本文选用均通过

显著性检验的正态分布作为研究区春玉米不同发育阶段、不同冷害等级平均热量指数样本序列的最优拟合函数。

基于15组春玉米冷害样本序列服从正态分布

表5 不同分布型函数对春玉米冷害样本热量指数序列拟合的K-S检验结果

Table 5 K-S test results of heat index for chilling damage samples of spring maize based on different distribution functions

生育阶段	冷害等级	显著性检验		
		正态分布	均匀分布	指数分布
S1	轻度	0.628	0.008	0.009
	中度	0.977	0.798	0.001
	重度	0.633	0.267	0.000
S2	轻度	0.926	0.990	0.000
	中度	0.895	0.096	0.000
	重度	0.981	0.185	0.000
S3	轻度	0.947	0.700	0.001
	中度	0.888	0.440	0.009
	重度	0.760	0.953	0.001
S4	轻度	0.603	0.076	0.000
	中度	0.416	0.307	0.000
	重度	0.623	0.204	0.000
S5	轻度	0.912	0.226	0.000
	中度	0.829	0.386	0.000
	重度	0.790	0.026	0.000

的假设,利用样本平均值95%置信区间,确定春玉米冷害等级(表6),即每组样本中有95%或以上的热量指数处于春玉米对应生育阶段、对应冷害等级内。以春玉米S1轻度冷害为例,该样本序列95%置信区间的热量指数为57.1~71.1,说明在出苗-三叶期热量指数为57.1~71.1时,我国东北春玉米有95%的概率发生轻度冷害。

以95%置信区间上限值作为临界阈值,得到我国东北三省春玉米不同生育阶段冷害等级指标,为应用方便,将指数取以0.0和0.5结尾^[34](表7)。由表7可知,当春玉米处于同一生育阶段,热量指数越低,冷害程度越重;对同一冷害等级而言,春玉米在生殖生长期和营养生长与生殖生长并进期热量指

表6 春玉米不同冷害等级样本序列95%置信区间热量指数

Table 6 95% confidence ranges of heat index at different developmental stages for spring maize at different chilling damage levels

生育阶段	轻度冷害	中度冷害	重度冷害
S1	57.1~71.1	53.1~63.8	47.8~55.7
S2	64.9~69.2	58.0~64.8	47.5~56.7
S3	70.3~75.9	60.8~68.7	53.1~61.9
S4	68.3~74.8	60.8~68.4	55.1~63.1
S5	66.5~72.1	61.6~66.7	54.3~62.1

数较高,营养生长期略低,说明春玉米在生育后期(S3~S5)所需热量条件较多,生育前期(S1~S2)所需热量条件较少。如当热量指数为60时,在春玉米生

表7 基于热量指数的东北三省春玉米各生育阶段冷害等级指标

Table 7 Chilling damage indicators for spring maize at different developmental stages based on heat index

生育阶段	重度冷害	中度冷害	轻度冷害	无冷害
S1	[0, 55.5]	(55.5, 64.0]	(64.0, 71.0]	(71.0, 100]
S2	[0, 56.5]	(56.5, 65.0]	(65.0, 69.0]	(69.0, 100]
S3	[0, 62.0]	(62.0, 68.5]	(68.5, 76.0]	(76.0, 100]
S4	[0, 63.0]	(63.0, 68.5]	(68.5, 75.0]	(75.0, 100]
S5	[0, 62.0]	(62.0, 66.5]	(66.5, 72.0]	(72.0, 100]

育前期(营养生长期)会发生中度冷害,而在生育后期则会达到重度冷害的程度;当热量指数为 66 时,春玉米在营养生长期为轻度冷害,在营养生长与生殖生长并进期和生殖生长期则为中度冷害;当热量指数为 72 时,春玉米在营养生长期无冷害发生,而在营养生长与生殖生长并进期和生殖生长期,则为轻度冷害。

3.2 冷害指标的验证

利用随机预留的春玉米不同生育阶段、不同灾害等级的 25 个样本,根据《中国气象灾害大典》^[27-29]和《中国气象灾害年鉴》^[30]中关于春玉米冷害发生时段、地点、灾情的描述,计算临近气象站、对应春玉米生育阶段的热量指数,将其与表 7 中东北三省春玉米不同发育阶段冷害等级指标进行一致性检验

(表 8),结果表明:25 个预留的独立样本中,灾情等级完全吻合的样本有 20 个,占总样本量的 80%,其余 5 个灾害样本的热量指数等级指标较实际冷害偏轻 1 个等级,即检验结果中灾情等级完全吻合及相差一级的比例为 100%。

由表 8 关于不同生育阶段和不同灾害等级的准确率统计结果可以看到,基于热量指数构建的东北三省春玉米不同生育阶段冷害等级指标在各灾情等级内,验证得到的准确率均大于 75%;从不同生育阶段看,由于灾害样本量的差异,S2 和 S3 的准确率最高,达 100%;S4 次之,为 80%;S1 和 S5 的准确率最低,为 60%。

表 8 东北三省春玉米冷害指标验证

Table 8 Validation of chilling damage indicators for spring maize in Northeast China

生育阶段	轻度冷害		中度冷害		重度冷害		准确率/%
	总样本量	验证正确量	总样本量	验证正确量	总样本量	验证正确量	
S1	2	2	1	1	2	0	60.0
S2	1	1	3	3	3	3	100.0
S3	1	1	1	1	1	1	100.0
S4	3	2	1	1	1	1	80.0
S5	2	1	1	0	2	2	60.0

3.3 典型站、典型年份春玉米逐日热量指数差变化

根据郭建平^[35]的典型站选取原则,自北向南选取海伦、扶余和抚顺 3 个典型站(图 1),根据文献

[27-30]记录,分别选取 1969 和 2007 年作为典型冷害年和无冷害年,分析 3 个典型站在有、无冷害发生年份春玉米逐日热量指数差变化(图 2)。

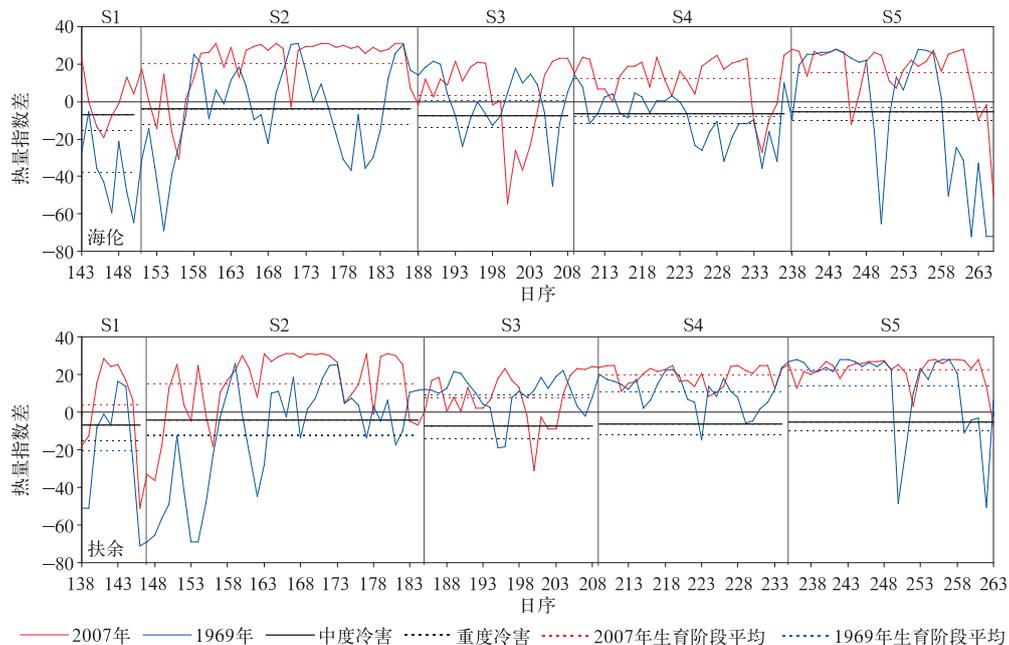
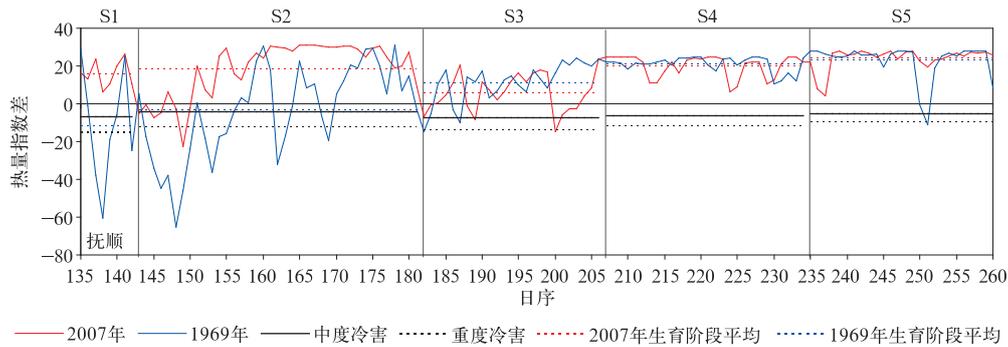


图 2 东北三省典型站有无冷害年春玉米热量差逐日变化

Fig. 2 Daily heat index difference for spring maize with chilling or chilling-free damages at three typical stations in Northeast China



续图 2

由图 2 可见,2007 年 3 个典型站春玉米逐日热量指数差仅在少数几日内小于 0,其余大部分时段的逐日热量指数均远大于各生育阶段无冷害发生的临界阈值;从生育阶段尺度看,2007 年除海伦站 S1 平均热量指数差略小于 0 外,3 个典型站其余生育阶段平均热量指数差均大于 0。2007 年《中国气象灾害年鉴》^[30] 也无东北三省春玉米冷害的相关记载,说明 2007 年东北三省春玉米并无冷害发生或冷害不是当年的主要气象灾害。

1969 年《中国气象灾害大典》^[27-29] 均记载:“该年是严重冷害年”、“黑龙江省 6 月、7 月、8 月、9 月平均气温分别比常年低 1.7℃,0.1℃,0.9℃和 0.7℃,为严重的延迟型低温冷害年,粮食减产 37.2%”。海伦站春玉米出苗-成熟期的 123 d 中,1969 年逐日热量指数低于低温冷害阈值的为 69 d,占全生育期的 56.1%,其中达到重度、中度和轻度

冷害等级的日数分别为 39 d,18 d 和 12 d,即重度冷害等级日数超过所有冷害等级的一半,且主要集中在春玉米生育前期和末期(图 2)。各生育阶段尺度,春玉米在出苗-三叶期的 8 d 内均发生了低温冷害,且有 87.5% 的日数达到重度冷害等级(表 9);其余 4 个生育阶段中,S2 和 S4 均有超过一半的日数发生低温冷害,S3 和 S5 发生冷害的日数略低,分别占该生育阶段总日数的 47.6% 和 39.2%,其中 S5 发生低温冷害的日数中,80% 达到重度冷害等级。各生育阶段平均热量指数差(图 2 蓝色点划线)也表明,海伦站春玉米全生育期热量指数差均小于 0,冷害较重。这与马树庆等^[5] 分析认为的黑龙江省海伦地区在气候风险上属春玉米冷害的较高风险区,在春玉米灾损风险上属春玉米冷害灾损高风险区的结论一致。

《中国气象灾害大典(吉林卷)》^[28] 记载:“1969 年

表 9 典型站有无冷害年春玉米不同生育阶段低温冷害日数比例(单位:%)
Table 9 Day ratios with chilling or chilling-free damages for spring maize at different developmental stages of three typical stations in Northeast China(unit:%)

站点	生育阶段	生育阶段 日数	2007 年			1969 年		
			轻度	中度	重度	轻度	中度	重度
海伦	S1	8 d	25.0	25.0	12.5	12.5	0.0	87.5
	S2	37 d	2.7	0.0	8.1	8.1	13.5	35.1
	S3	21 d	14.3	0.0	19.0	23.8	14.3	9.5
	S4	29 d	6.9	6.9	3.4	10.3	27.6	27.6
	S5	28 d	3.6	3.6	7.1	0.0	7.1	32.1
扶余	S1	9 d	0.0	11.1	22.2	22.2	22.2	33.3
	S2	38 d	5.3	7.9	10.5	7.9	5.3	42.1
	S3	24 d	8.3	8.3	4.2	4.2	0.0	8.3
	S4	26 d	0.0	0.0	0.0	7.7	0.0	3.8
	S5	29 d	0.0	3.4	0.0	6.9	0.0	13.8
抚顺	S1	8 d	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0	50.0
	S2	39 d	7.7	7.7	2.6	7.7	2.6	35.9
	S3	25 d	24.0	4.0	4.0	8.0	4.0	4.0
	S4	28 d	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	S5	26 d	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	3.8

5月、6月气温特低,7月、8月、9月气温正常或偏低,作物生长前期严重低温,发育期明显推迟,作物成熟度很差”。1969年扶余站(图2)春玉米在营养生长期冷害较为集中,其余生育阶段仅有零星几日热量条件较差,与灾害大典中的描述相符。春玉米S1和S2达到冷害日数较多,分别占各自生育阶段总日数的77.7%和55.3%(表9),热量指数差的分析结果亦表明:这两个生育阶段分别处于重度冷害和中度冷害等级(图2蓝色点划线),与马树庆等^[5]研究得出的哈尔滨至长春一带属春玉米冷害灾损高风险区的结论相符。

《中国气象灾害大典(辽宁卷)》^[27]记载:“1969年5—6月全省大部分地区气温较常年低1℃以上,抚顺地区粮豆减产16.3%”。1969年抚顺站(图2)春玉米低温冷害主要集中在S1和S2,达到冷害的日数略少于扶余站,分别为6d和18d,占各自生育

阶段总日数的75.0%和46.2%(表9),热量指数差的计算结果表明:抚顺站春玉米前两个发育阶段分别处于中度冷害和轻度冷害等级(图2蓝色点划线);S3和S5冷害日数很少,分别为4d和2d;S4无冷害发生,在春玉米冷害气候风险和灾损风险方面均属较低风险区^[5]。

3.4 典型站、典型年份春玉米累积热量指数差变化

在春玉米的全生育周期内,前期低温胁迫会影响后续生长,但若后期温度条件好转会减弱春玉米遭受冷害胁迫的等级。因此,本节从春玉米全生育周期的角度分析累积热量指数差变化。

由图3可见,2007年除海伦站和扶余站的前两个生育阶段少数几日的累积热量指数差略小于0、出现短暂的轻度冷害外,海伦站和扶余站其余发育阶段及抚顺站全生育期的累积热量指数差均远大于0,热量条件较好。

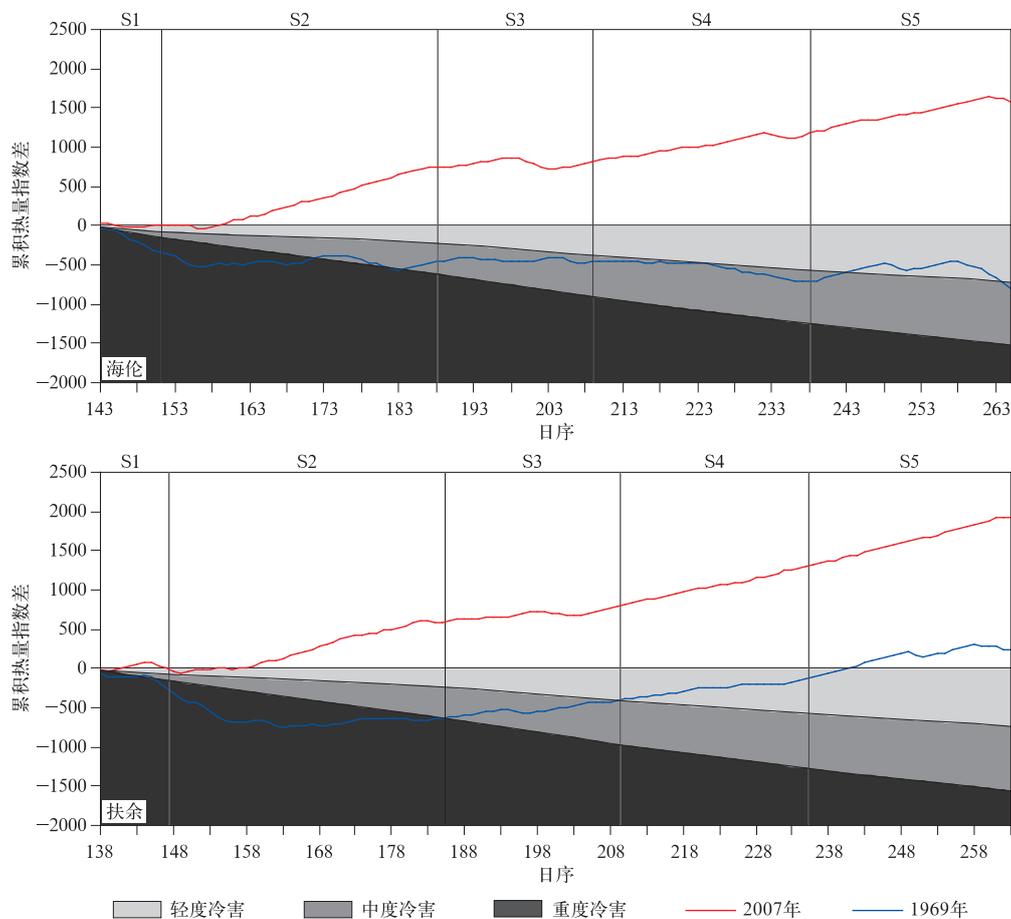
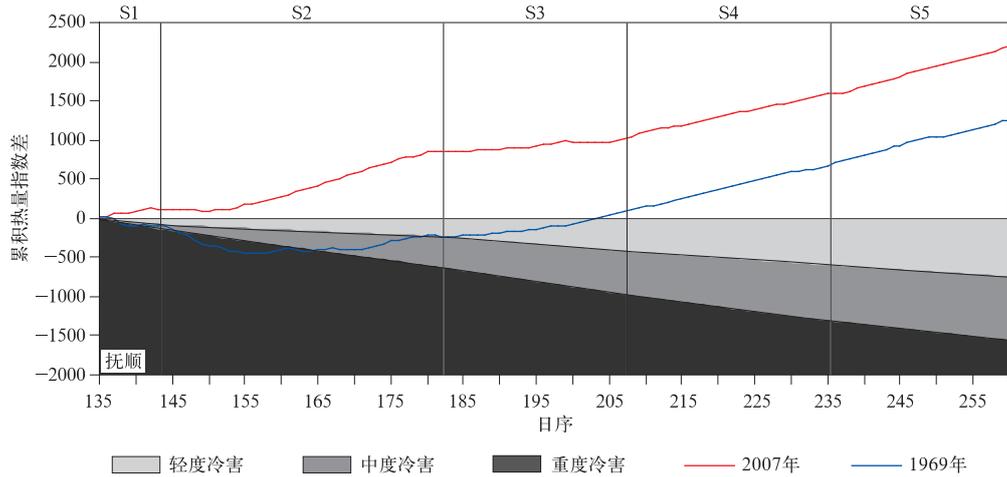


图3 东北三省典型站有无冷害年春玉米累积热量差变化
Fig. 3 Accumulated heat index difference for spring maize with chilling or chilling-free damages at three typical stations in Northeast China



续图 3

1969年自南至北3个典型站春玉米全生育期冷害程度逐渐加重。抚顺站春玉米S1和S2中期呈重度冷害,而后向中度冷害转变,S3以轻度冷害为主,到了生殖生长期(S4和S5)则无冷害发生,对春玉米整体影响较轻。扶余站冷害程度较抚顺站略高,S1和S2阶段表现为重度冷害,S3为中度冷害,S4为轻度冷害,仅在乳熟-成熟期热量条件略好,达到无冷害等级;生育期内大部分时段热量条件较差,导致扶余站春玉米减产。海伦站在3个站中热量条件最差,春玉米全生育期热量指数差均小于0,营养生长期属重度冷害,后期整体处于中度冷害等级,春玉米减产严重。

4 结论与讨论

本文以我国东北三省春玉米为研究对象,以冷害为灾种,以具有明确生物学意义的热量指数为指示因子,通过历史冷害灾情记录,重构基于热量指数的灾害样本,采用样本序列分布拟合和热量指数均值95%置信区间上限阈值的方法,厘定临界灾害等级阈值,构建我国东北三省春玉米不同生育阶段、不同冷害等级评价指标,得到以下主要结论:

1) 基于热量指数的东北三省春玉米不同生育阶段轻度、中度、重度冷害指标临界阈值:出苗-三叶期为71.0,64.0,55.5;三叶-拔节期为69.0,65.0,56.5;拔节-开花期为76.0,68.5,62.0;开花-乳熟期为75.0,68.5,63.0;乳熟-成熟期为72.0,66.5,62.0。表现为东北三省春玉米冷害指标在生殖生长和营养生长与生殖生长并进期热量指数的阈值较高,营养生长期略低。

2) 基于25个独立灾情样本的验证结果表明:灾情等级与冷害指标完全吻合的比率为80.0%,完全吻合和相差1级的比率为100%;且春玉米各生育阶段的灾情准确率均在60%以上,所有生育阶段各灾情等级的验证准确率均大于75%,说明本文构建的东北三省春玉米不同生育阶段冷害指标能较好地反映该区域春玉米冷害状况。

3) 典型站、典型年份春玉米逐日和累积热量指数差变化均能够有效地指示春玉米生长季内的冷害程度。

从历史灾情记录出发,通过分析灾害样本的最优分布型,采用置信区间阈值的方法,确定农业气象灾害指标等级,该方法已经在我国西南地区水稻洪涝^[36]、湖南省早稻洪涝^[37]、江淮地区夏玉米涝渍^[38]、江汉和江南西部春玉米涝渍^[39]、黄淮海冬小麦干旱^[34]灾害指标构建上得到广泛证实。上述研究均为与水分相关的洪涝、涝渍、干旱灾害指标,本文从农作物生长所需的热量条件出发,构建与温度相关的冷害指标。研究发现:该方法亦可以有效地构建我国东北三省春玉米不同生育阶段、不同冷害等级指标,进一步扩大了该方法的应用范围。本文选取热量指数作为春玉米冷害指标的指示因子,充分考虑了春玉米生长发育特性和不同生育阶段的三基点温度,具有明确的生物学意义,可以有效避免非热量因素的干扰;同时,该指标计算的是春玉米各生育阶段的平均热量指数,对持续性低温、短时异常低温、以及持续低温与短时异常低温相继出现或同时发生的冷害均有效。另外,冷害和霜冻本质上是两种不同的灾害类型,但在有些年份,由于春玉米生育期内温度骤降,引发早霜冻害,或者由于生育期内温

度较低,引起作物生育期延迟,遭受秋霜危害而不能正常成熟,这时霜冻就是冷害的必然结果^[40],因此,本文在构建和验证冷害时,均选取了生育期内发生霜冻的灾害样本,扩大了指标的适用范围。由于研究区内气象站与农业气象站并非一一对应,研究中根据各农业气象站的平均生育期资料将整个研究区划分为 5 个区域,分别判断各气象站所处的生育期分区,计算得到该气象站春玉米不同生育阶段的平均热量指数。该方法对生育期与平均水平相似的年份效果较好,然而,当气象条件异常使春玉米发育期延迟(延迟型低温冷害)时,也会因生育期的推迟而增大计算结果的不确定性。此外,作物的三基点温度虽然能够很好地指示高产条件下春玉米不同生育阶段对温度的需求程度,但本文的研究区覆盖范围较大,不同区域内种植的春玉米品种和熟型均有差异,且 1961 年以来东北地区春玉米品种不断更替,基于同一套三基点温度参数计算的热量指数仅能反映符合该生理特性的春玉米品种和熟型的热量状况,更精细的春玉米冷害指标研究将在收集更多春玉米品种和熟型的三基点温度后逐步完善。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2017). 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] 杨菲云, 郭建平, 马树庆, 等. QX/T167—2012 北方春玉米冷害评估技术规范行业标准. 北京: 气象出版社, 2012.
- [3] Miedema P. The effects of low temperature on Zea mays. *Advances in Agronomy*, 1982, 35: 93-128.
- [4] 郭春明, 任景全, 曹铁华, 等. 春玉米穗分化期低温对产量构成因素的影响. *应用气象学报*, 2018, 29(4): 505-512.
- [5] 马树庆, 王琪, 王春乙, 等. 东北地区玉米低温冷害气候和经济损失风险分区. *地理研究*, 2008, 27(5): 1169-1177.
- [6] 郭建平, 田志会, 张涓涓. 东北地区玉米热量指数的预测模型研究. *应用气象学报*, 2003, 14(5): 626-633.
- [7] 高晓容, 王春乙, 张继权, 等. 东北地区玉米主要气象灾害风险评估与区划. *中国农业科学*, 2014, 47(24): 4805-4820.
- [8] 初征, 郭建平. 未来气候变化对东北玉米品种布局的影响. *应用气象学报*, 2018, 29(2): 165-176.
- [9] 赵俊芳, 杨晓光, 刘志娟. 气候变暖对东北三省春玉米严重低温冷害及种植布局的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6544-6551.
- [10] 张梦婷, 刘志娟, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征: 东北春玉米延迟型冷害. *中国农业气象*, 2016, 37(5): 599-610.
- [11] 朱红蕊, 刘赫男, 张洪玲, 等. 黑龙江省玉米低温冷害风险评估及预估. *气候变化研究进展*, 2015, 11(3): 173-178.
- [12] 中国气象局. QX/167—2012. 北方春玉米冷害评估技术规范. 北京: 气象出版社, 2012.
- [13] 杜春英, 姜丽霞, 朱海霞, 等. 基于积温距平的玉米冷害动态评估及其与玉米产量的关系. *灾害学*, 2016, 31(4): 42-48.
- [14] 侯琼, 王海梅, 云文丽. 河套灌区玉米低温冷害监测评估指标的研究. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(2): 179-184.
- [15] 陈凯奇, 米娜. 辽宁省玉米低温冷害和霜冻灾害风险评估. *气象与环境学报*, 2016, 32(1): 89-94.
- [16] 李蕊, 郭建平. 东北春玉米积温模型的改进与比较. *应用气象学报*, 2017, 28(6): 678-689.
- [17] 李蕊, 郭建平. 东北春玉米非线性积温模型参数改进. *应用气象学报*, 2018, 29(2): 154-164.
- [18] 唐余学, 郭建平. 我国东北地区玉米冷害风险评估. *应用气象学报*, 2016, 27(3): 352-360.
- [19] 王春乙. 东北地区农作物低温冷害研究. 北京: 气象出版社, 2008.
- [20] 高素华. 玉米延迟型低温冷害的动态监测. *自然灾害学报*, 2003, 12(2): 117-121.
- [21] 刘布春, 王石立, 庄立伟, 等. 基于东北玉米区域动力模型的低温冷害预报应用研究. *应用气象学报*, 2003, 14(5): 616-625.
- [22] 杨若子, 周广胜. 1961—2013 年东北三省玉米低温冷害强度的时空分布特征. *生态学报*, 2016, 36(14): 4386-4394.
- [23] 吕厚荃. 中国主要农区重大农业气象灾害演变及其影响评估. 北京: 气象出版社, 2011.
- [24] 蔡菁菁, 王春乙, 张继权. 东北地区玉米不同生长阶段干旱冷害危险性评价. *气象学报*, 2013, 71(5): 976-986.
- [25] 马树庆, 刘玉英, 王琪. 玉米低温冷害动态评估和预测方法. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1905-1910.
- [26] 李伟君, 王春乙. 东北地区玉米低温冷害综合指标研究. *自然灾害学报*, 2007, 16(6): 15-20.
- [27] 温克刚. 中国气象灾害大典(辽宁卷). 北京: 气象出版社, 2005.
- [28] 温克刚. 中国气象灾害大典(吉林卷). 北京: 气象出版社, 2008.
- [29] 温克刚. 中国气象灾害大典(黑龙江卷). 北京: 气象出版社, 2007.
- [30] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴. 北京: 气象出版社, 2005-2014.
- [31] Massey E J. The Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit. *J Am Stat Assoc*, 1951, 46: 68-78.
- [32] 霍治国, 李世奎, 王素艳, 等. 主要农业气象灾害风险评估技术及其应用研究. *自然资源学报*, 2003, 18(6): 692-703.
- [33] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [34] Wu X, Wang P J, Huo Z G. et al. Crop drought identification index for winter wheat based on evapotranspiration in the Huang-Huai-Hai Plain, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 263: 18-30.
- [35] 郭建平, 庄立伟, 陈玥煜. 东北玉米热量指数预测方法研究(I)——热量指数与玉米产量. *灾害学*, 2009, 24(4): 6-10.
- [36] Yang J Y, Huo Z G, Wu L, et al. Indicator-based evaluation of spatiotemporal characteristics of rice flood in Southwest China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 230:

- 221-230.
- [37] 汪天颖, 霍治国, 李旭辉, 等. 基于生育时段的湖南省早稻洪涝等级指标及时空变化特征. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 709-718.
- [38] 张桂香, 霍治国, 杨建莹, 等. 江淮地区夏玉米涝渍灾害时空分布特征和风险分析. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 747-756.
- [39] 杨宏毅, 霍治国, 杨建莹, 等. 江汉和江南西部春玉米涝渍指标及风险评估. *应用气象学报*, 2017, 28(2): 237-246.
- [40] 郭建平, 马树庆. 农作物低温冷害监测预测理论和实践. 北京: 气象出版社, 2009.

Indicators of Chilling Damage for Spring Maize Based on Heat Index in Northeast China

Wang Peijuan¹⁾ Huo Zhiguo¹⁾²⁾ Yang Jianying¹⁾ Wu Xia³⁾

¹⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*Collaborative Innovation Center of Meteorological Disaster Forecast, Early-Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

³⁾ (*Heilongjiang Meteorological Service Center, Harbin 150030*)

Abstract

Chilling damage is one of the most destructive disasters for spring maize in Northeast China (Heilongjiang Province, Jilin Province, and Liaoning Province). Proper indicators of spring maize chilling damage are important for understanding the spatio-temporal distribution characteristics of disaster, dynamic monitoring, early warning, and conducting risk assessment. Therefore, it is of great scientific significance for the safe production and reasonable spatial planting of spring maize in China. Daily time series of air temperature during the past 55 years (1961–2015) at 82 meteorological stations, phenology at different developmental stages of spring maize from 1981 to 2013 at 61 agro-meteorological stations, and historical chilling damage records during the past 55 years (1961–2015) are jointly used to establish chilling damage indicators of spring maize at different developmental stages. The heat index with significant biological basis is selected as a factor, and its average at different developmental stages of spring maize is calculated based on three physiological temperatures. And then, 15 heat index sets of spring maize chilling damage samples collected from historical disaster records are built in the context of the combinations of five developmental stages of spring maize (seedling to clover, clover to jointing, jointing to blossom, blossom to milk, milk to physiological maturity) and three chilling damage levels (light, moderate, and severe). Kolmogorov-Smirnov (K-S) test method is used in checking the best distribution fitting functions of the heat index sets, and 15 normal distribution functions are established by comparing three fitting functions, including normal distribution, exponent distribution, and evenly distribution. Each critical threshold of spring maize chilling damage levels at different developmental stages is determined by using the upper limit of 95% confidence interval. The rationality of the spring maize chilling damage indicator is validated by using 25 independent samples. Results show that the verification based on the spring maize chilling damage level indicators is detected to be basically consistent with historical records, with 80% assessment being thoroughly consistent and all the errors of validation samples being within one level. Meanwhile, consistent rates of chilling damage indicators for three chilling damage levels are all above 75%.

Key words: heat index; chilling damage indicator; spring maize; different developmental stages