

姜丽霞,赵慧颖,曲辉辉,等,2021. 黑龙江省玉米干旱与低温冷害复合逆境对产量的影响[J]. 气象,47(1):94-105. Jiang L X, Zhao H Y, Qu H H, et al, 2021. Effect of drought and cold damage cross-stress on maize yield in Heilongjiang Province[J]. Meteor Mon, 47(1):94-105(in Chinese).

黑龙江省玉米干旱与低温冷害复合逆境 对产量的影响^{*}

姜丽霞^{1,2,3} 赵慧颖^{1,2,3} 曲辉辉^{1,2,3} 闫平^{1,2,3}
李秀芬^{1,2,3} 翟墨^{1,2,3} 于瑛楠^{1,2,3}

1 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030

2 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室, 哈尔滨 150030

3 黑龙江省气象院士工作站, 哈尔滨 150030

提 要: 利用 1981—2016 年黑龙江省玉米农业气象观测站的资料, 引入中华人民共和国气象行业标准中水分亏缺指数 (K_{CWDI})、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平 (H) 指标, 分别对玉米出苗—乳熟期干旱、低温冷害进行判别, 规定同一站、同一年内干旱、冷害均有发生为两种灾害复合发生, 并分析其时空分布特征, 以数理统计方法构建 K_{CWDI} 和 H 与玉米产量的关系模型, 同时应用比较方法探讨两种灾害单一发生及复合发生的温水逆境对玉米产量的影响。研究结果表明: 1981—2016 年, 研究区玉米出苗—乳熟期 K_{CWDI} 、 H 的变化较好地表达了研究区水资源空间配置特征及气候变暖趋势; 分析期内, 研究区玉米出苗—乳熟期累计发生单一干旱 242 站年, 单一冷害 76 站年, 干旱、冷害复合发生 91 站年; 干旱、冷害复合发生随时间呈减少趋势, 20 世纪 90 年代中期以前密集发生, 之后发生频率下降, 空间上呈西多东少趋势, 松嫩平原西部为频发区; 玉米出苗—乳熟期 H 和 K_{CWDI} 与玉米单产存在显著或极显著的相关关系 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 在一定温度、水分范围内, H 减少、 K_{CWDI} 增大, 玉米单产呈下降趋势; 总体上, 存在干旱、低温冷害单一发生或复合发生程度愈重则单产愈低的趋势。比较干旱、低温冷害复合发生和单一发生对玉米单产的影响可见, 复合发生中干旱(低温冷害)的时间、日数、程度等与单一发生的干旱(低温冷害)相当时, 则干旱(低温冷害)与低温冷害(干旱)复合发生对玉米单产的影响呈加重趋势。

关键词: 干旱和低温冷害复合逆境, 水分亏缺指数, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平, 玉米产量

中图分类号: S16, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.009

Effect of Drought and Cold Damage Cross-Stress on Maize Yield in Heilongjiang Province

JIANG Lixia^{1,2,3} ZHAO Huiying^{1,2,3} QU Huihui^{1,2,3} YAN Ping^{1,2,3}
LI Xiufen^{1,2,3} ZHAI Mo^{1,2,3} YU Yingnan^{1,2,3}

1 Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Harbin 150030

2 Innovation and Opening Laboratory of Eco-Meteorology in Northeast China, CMA, Harbin 150030

3 Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030

Abstract: Based on the observation data from agrometeorological stations from 1981 to 2016 in Heilongjiang

^{*} 中国气象局沈阳大气环境研究所区域合作项目(2018SYIAEHZ1)、中国气象局沈阳大气环境研究所和辽宁省农业气象灾害重点实验室项目(2019SYIAE04)、国家自然科学基金项目(31671575、31671576)和中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室项目(stqx2019zd01)共同资助

2019 年 7 月 2 日收稿; 2020 年 11 月 26 日收修定稿

第一作者: 姜丽霞, 主要从事应用气象、气候资源和气候变化相关研究. E-mail: hljlx@163.com

通讯作者: 赵慧颖, 主要从事应用气象、生态气象和气候变化相关研究. E-mail: zhaohyy2008@aliyun.com

Province, the indicators of water deficiency index (K_{CWDI}) and accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ (H) from the People's Republic of China meteorological industry standards, this paper assesses the drought and cold damage to maize during emergence—milk ripening stage separately, and stipulates the drought and cold damage cross-stress occurs at the same station in the same year. Besides, the temporal and spatial distribution characteristics of it are analyzed. The relational model between K_{CWDI} , H and maize yield is constructed by mathematical statistical method, and the effects of single drought, single cold damage or drought and cold damage cross-stress on maize yield are investigated by comparative method. The results show that the changes of K_{CWDI} and H are consistent with the spatial distribution of water resources and climate warming trend in the study area. During the analysis period, the sum of years of drought was 242 station years, and the sum of years of cold damage was 76 station years, while the sum of years of drought and cold damage cross-stress was 91 station years during maize emergence—milk ripening stage in the study area. The occurrence of drought and cold damage cross-stress presents a decreasing trend, and its appearance was high before mid-1990. After that, the frequency got to decline. The occurrence of drought and cold damage cross-stress in the west is higher than that in the east, and there is frequent drought and cold damage cross-stress in Songnen Plain. Correlation amid H , K_{CWDI} and maize yield is significant ($P < 0.05$ or $P < 0.01$) in maize emergence—milk ripening stage. In a certain range of temperature and water condition, H decreases and K_{CWDI} increases, which is unfavorable for the increase of maize yield. On the contrary, increasing temperature and decreasing water deficit is advantageous to maize yield increase. In general, there exists a trend that the more severe the degree of single drought, single cold damage or drought and cold damage cross-stress is, the lower the yield would be. Comparing the effects of the single drought (single cold damage), and combined occurrence of drought and cold damage on maize yield shows that when the time, days and degree of the single drought (cold damage) is equivalent to drought (cold damage) in combined occurrence of drought and cold damage, then the drought is superimposed with cold damage (drought), which means the trend of its disadvantageous effect on maize yield is increasing.

Key words: drought and cold damage cross-stress, water deficiency index, accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$, maize yield

引 言

黑龙江省土地条件居全国之首,境内松嫩和三江平原地势平坦,土壤肥沃,加之气候温凉,利于一季作物生长和产量形成,因此粮食生产逐年发展,现已成为保障国家粮食安全的压舱石。玉米为黑龙江省主栽作物,总产量占全国玉米总产量近 30%,在全国粮食产量中处于重要地位。黑龙江省玉米生产受干旱和低温冷害影响巨大(杨卫东,2017),两种灾害单一发生时常常造成玉米减产在 15%以上(高松阳,2017;马树庆等,2003),进而导致全国产量波动并影响粮食安全。随着全球气候变暖的持续,黑龙江省生长季干旱发生风险加大(杨晓晨等,2015),程度加重(高蓓等,2014),低温冷害虽总体减少,但 21 世纪以来有回升趋势(姜丽霞等,2016),且区域性严

重冷害发生频率加大(赵俊芳等,2009),这种情况下两种灾害对玉米生产的威胁即随之加大,生产风险也进一步增加。干旱和低温冷害单一发生时的影响已然较大,那么两种灾害复合发生的影响将更为突出,因此研究玉米生长期干旱和低温冷害复合发生特征,明确两种灾害复合发生对玉米产量的影响机制,对于保障国家粮食安全、促进农业经济可持续发展具有重要意义。

多年来,国内外专家学者对气象灾害监测及影响评估方法的研究不断发展(谢五三等,2019;左冰洁和孙玉军,2019),形成多元化模式(郭建平,2016;姜丽霞等,2019;金燕等,2018;Dai,2013;Anjum et al,2017;Ali et al,2017;Yin et al,2016;Beck et al,2007),在灾害指标(毛留喜和魏丽,2015;李秀芬等,2017)、监测评估(di Fenza et al,2017)、风险研究(曹雯等,2019)、灾害影响(高素华和刘玲,

2007)等方面取得长足进展。研究表明,玉米在不同发育期均可能会遭受干旱或低温冷害的威胁,灾害发生区域、程度及时期不同,对玉米所造成的负效应影响也不尽相同,但总体趋势基本一致,多数表现为玉米生长受到抑制,发育期延长,并最终导致玉米产量下降(张建平,2012;王静等,2011)。单从一种灾害对玉米产量的影响来看,马树庆等(2015)研究指出,干旱致使玉米出苗期延迟 1 d,单产即下降 2.9%,而季节性干旱影响更重,2003 年黑龙江省春夏连旱导致玉米单产下降为该省 1994—2014 年谷值(杨卫东,2017),且最新研究表明,一季轻旱、中旱导致玉米减产率在 20%以下,旺盛生长时期的重旱导致玉米减产在 40%~50%,而春、夏、秋三季连旱则使玉米几乎绝产,减产率高达 70.5%(马晓刚等,2019)。对于低温冷害而言,张建平(2012)分析不同发育期冷害对玉米产量的影响,发现灌浆初期低温影响最大,苗期最小,减产率在 2.1%~16.99%,郭春明等(2018)试验表明,冷害导致玉米穗长和穗粒数显著减少,穗粒重显著降低,且温度越低,持续时间越长,影响越重。

黑龙江省位于中国最北部,大陆性季风气候明显,干旱和低温冷害常常在玉米生长期复合发生,但两种灾害复合发生对玉米产量的影响机制仍未十分明确,同时,随着黑龙江省新型农业的发展,经营主体规模大、单产水平高,受多种灾害影响损失更大,其对气象灾害和防灾减灾技术研究的需求十分迫切(陈莉等,2019),但现有研究多侧重于单一灾害对玉米生产的影响,而对两种灾害复合发生的影响研究较少。基于此,利用更新气象数据、采用中华人民共和国气象行业标准,分析玉米生长期干旱、低温冷害复合发生的时空演变特征,研究干旱、低温冷害复合发生对玉米产量的影响,为深入探讨多种灾害造成作物产量损失的量化细化及其影响机制提供技术支撑,以期“藏粮于技”战略及农业防灾减灾提供气象参考。

1 资料和方法

1.1 资料来源

黑龙江省现有 22 个玉米农业气象观测站,考虑资料完整一致性,选取其中 15 个站作为研究区,该 15 个站均匀分布在黑龙江省玉米主产区内,玉米年

种植面积多在 $1 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 以上,能够代表黑龙江省玉米生产实际情况,其地理位置也能够很好反映温度、水分等气候因子分布概况和趋势,保证了研究的客观性及科学性,同时为了更加细致分析干旱、低温冷害对不同区域玉米的影响,根据 15 个站的地理位置和气候特征,将研究区划分为松嫩平原和三江平原,并再将松嫩平原细划为 4 个区域,具体见表 1。所用资料包括 15 个站 1981—2016 年逐日平均气温、降水资料及玉米发育期观测数据,均来自黑龙江省气象局整编资料。15 个站玉米单产来自黑龙江省统计局。玉米发育期观测资料按照中国气象局《农业气象观测规范》(中国气象局,2016)的要求进行,为保证资料连续性,作物观测保持了观测方法的一致性,所观测品种的熟型在研究期间基本保持一致,田间管理与当地大田保持一致,且耕作方式不变。

1.2 研究方法

1.2.1 玉米干旱、低温冷害判识

研究选择玉米出苗—乳熟期为研究时间段,该时间段内的玉米出苗期、拔节期、抽雄期和乳熟期采用《农业气象观测规范》(中国气象局,2016)中规定观测的普遍发育期。《北方春玉米干旱等级》(中国气象局,2015)、《北方春玉米冷害评估技术规范》(中国气象局,2012)中规定了玉米干旱、低温冷害的评估指标,本文以上述标准中水分亏缺指数(K_{CWDI})、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平(H)作为判识玉米干旱、低温冷害的指标,并参照 2 个标准做如下规定:对于干旱,分两个发育时段进行判识,在玉米出苗—拔节期,当水分亏缺指数 $K_{\text{CWDI}} > 50\%$ 时判识发生干旱,在拔节—乳熟期,水分亏缺指数 $K_{\text{CWDI}} > 35\%$ 时发生干旱,并规定两个发育时段均发生干旱或任一时段发生干旱即为出苗—乳熟期发生干旱,标准中未规定作物熟型,因此本文在判识时不考虑作物熟型,即所定指标普适于任意熟型品种。对于低温冷害,在玉米出苗—乳熟期,当 $H < -45^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $H < -50^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $H < -55^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 时,分别判识玉米早熟、中熟、晚熟品种发生延迟型冷害。

本文依据如上指标对玉米出苗—乳熟期干旱、低温冷害分别进行判识,若在同一站点、同一年份内,玉米出苗—乳熟期干旱、低温冷害均有发生,则规定为干旱、低温冷害复合发生,若仅有一种灾害发生,则视为无干旱、低温冷害复合发生。

表 1 研究站点概况

Table 1 Situation of the stations in the research area

站号	站名	纬度/°N	经度/°E	品种熟型	所属区域
50742	富裕	47.80	124.48	中熟	松嫩平原西部
50739	龙江	47.33	123.18	中熟	
50844	泰来	46.40	123.42	晚熟	
50854	安达	46.38	125.32	晚熟	
50756	海伦	47.43	126.97	中熟	松嫩平原北部
50851	青冈	46.68	126.10	晚熟	
50953	哈尔滨	45.75	126.77	晚熟	松嫩平原
50955	双城	45.38	126.30	晚熟	松嫩平原南部
54080	五常	44.90	127.15	晚熟	
50954	肇源	45.50	125.08	晚熟	松嫩平原东部
50867	巴彦	46.08	127.35	晚熟	
50964	方正	45.83	128.80	中熟	
50873	佳木斯	46.82	130.28	中熟	
50880	集贤	46.72	131.12	中熟	三江平原
50973	勃利	45.75	130.58	晚熟	

1.2.2 数据处理及分析

国家标准(中国气象局,2012;2015)已对玉米出苗—乳熟期 K_{CWDI} 及 H 的计算方法阐述详细,本文不再赘述。利用上述标准中的方法计算 K_{CWDI} 及 H 并进行判识。本文常年值取 1981—2010 年的平均值。利用气候统计方法先对所有研究站点各项数据进行统计处理,再根据表 1 将 15 个研究站点进行平均处理获取全研究区数据,同时依照表 1 分区情况分别进行区域平均处理,计算得到松嫩平原、三江平原及松嫩平原西部、松嫩平原北部等区域数据,最后根据研究需求以 SPSS Statistics 17.0 软件分别进行单站或区域数据分析。采用数理统计方法研究玉米干旱、低温冷害复合发生的变化特征。利用逐步回归方法分析 K_{CWDI} 和 H 与玉米产量的关系。

2 结果与分析

2.1 干旱、低温冷害单一发生特征

基于 K_{CWDI} 对玉米干旱进行判识,结果显示:1981—2016 年,研究区玉米出苗—乳熟期累计发生干旱 333 站年,各站发生干旱为 16~30 a,肇源站发生最多,海伦站、方正站、五常站最少。时间分布上,不同区域干旱年分布略有差异,大部分站点干旱年相对密集于 21 世纪 00 年代,21 世纪 10 年代以来, K_{CWDI} 有所下降,干旱发生减少。空间上,以松嫩平原西部和南部站点的干旱年数居多,平均每站在

23 a 以上。

利用 H 对玉米低温冷害进行判识,结果表明:1981—2016 年,研究区玉米出苗—乳熟期累计发生低温冷害 167 站年,各站发生低温冷害为 9~16 a,富裕站发生最多,青冈站、勃利站最少。研究期间, H 基本呈少到多的变化,各站部分年份的距平值低于指标阈值,形成低温冷害,低温冷害年主要密集于 20 世纪 90 年代中期前,之后积温距平多为正值或高于指标阈值,形成低温冷害的年份骤然减少,但 21 世纪 10 年代以来积温距平呈下降态势,低温冷害发生出现回升趋势。空间上,不存在明显变化规律,松嫩平原西部较多,平均每站在 12 a 以上。

2.2 干旱、低温冷害复合发生特征

为了更加清晰直观地表达 1981—2016 年玉米出苗—乳熟期的干旱、低温冷害复合发生年份,如图 1 所示,取纵坐标 1~15 代表研究站点,如纵坐标 1 代表龙江站,横坐标为各站干旱、低温冷害复合发生的年份,如龙江站干旱、低温冷害复合发生的年份分别为 1981、1982、1988、1991、1992、1993、1995 年。由图 1 可见,1981—2016 年,研究区玉米干旱、低温冷害复合发生共计 91 站年,各站发生年数为 3~9 a,总体来看,干旱、低温冷害复合发生呈减少趋势,20 世纪 80 年代是干旱、低温冷害集中高发期,大部站点发生年数为 3~6 a;90 年代发生年数下降,多数为 1~3 a;21 世纪 00 年代以后持续偏少,但部分站点 21 世纪 10 年代干旱、低温冷害复

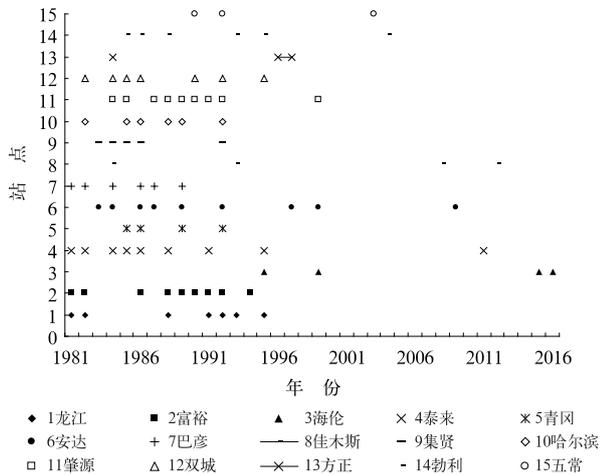


图 1 研究区玉米出苗—乳熟期干旱、低温冷害复合发生年份示意图

Fig. 1 Schematic diagram of years of drought and cold damage cross-stress during maize emergence—milk ripening stage in study area

合发生有回升趋势。空间分布呈西多东少态势,发生年数的高值区处于松嫩平原西部,年数为 9 a;低值中心处于五常、方正一带,年数为 3 a;其他区域处于中间状态,年数为 4~7 a。

2.3 干旱、低温冷害对玉米产量的影响

2.3.1 H 和 K_{CWDI} 与玉米单产关系

首先探究两个判识指标与玉米产量的关系,采用逐步回归方法分别分析 H 和 K_{CWDI} 与玉米单产的相关关系,结果见表 2,表中 y 为玉米单产(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), x_1 为 H (单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$), x_2 为 K_{CWDI} (单位: %)。由表可见,研究区全区、各分区及 73% 单站的 H 和 K_{CWDI} 与玉米单产呈显著或极显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$) 相关关系,且相关性表征不尽相同,从相关因子来看,全研究区、松嫩平原、松嫩平原 4 个分区及 20% 单站为双因子相关,而三江平原及 53% 单站为单因子相关,且单因子相关因子多为 H ;从相关显著性看,不同区域、不同站点存在差异,龙江、海伦、佳木斯、方正 4 站不存在显著相关关系,富裕站、勃利站通过 0.05 显著性水平检验,其余均通过 0.01 显著性水平检验,且总体上区域好于单站,松嫩平原多数站点好于三江平原,双因子相关性最好为松嫩平原, R^2 高达 0.721,单因子相关性最好为集贤站, R^2 为 0.440。由表 2 还可看出,在一定温度、水分范围内,随着 H 的下降、 K_{CWDI} 的增大,玉

米单产呈下降趋势,即在 H 、 K_{CWDI} 均达到灾害阈值指标值的情况下, H 下降幅度越大(表征低温程度越重), K_{CWDI} 增大幅度越大(表明干旱程度越重),玉米单产下降越多。在一定水分条件下, H 每下降 $1^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 玉米单产下降 $1.6 \sim 16.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;在一定温度条件下, K_{CWDI} 每增加 1%, 玉米单产下降 $55.3 \sim 174.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.3.2 干旱、低温冷害对玉米产量的影响

如上分析, K_{CWDI} 和 H 与玉米单产相关关系能够直接反映干旱、低温冷害对玉米的影响,为进一步明晰两种灾害对玉米产量的影响机制,本文分别对单一干旱、单一低温冷害及两种灾害复合发生的温水逆境条件对玉米影响进行深入探讨。考虑同一站、临近年份具有更好可比性,因此筛选各站连续发生单一干旱、单一低温冷害以及干旱和低温冷害复合发生年份的资料进行分析。

2.3.2.1 干旱、低温冷害单一发生对玉米产量的影响

2000—2004 年安达站连续 5 年出现干旱,未出现冷害,为典型的连续单一干旱年,较具代表性,另据气象灾害大典(温克刚, 2007)记载,期间安达站未发生其他重大气象灾害,因此其他气象条件视为正常。由表 3 可见,2000 年的出苗—乳熟期平均 K_{CWDI} 最大,最长连续干旱日数最多,最长连续干旱期间平均水分亏缺指数较大,产量最低;而 2002 年各项数据均为最小,产量最高。2000 年相对于 2001 年,总干旱时间略短,但持续干旱时间长且 K_{CWDI} 大,产量低;2003 年相对于 2004 年,总干旱时间较短,持续干旱时间仅少 2 d,但其持续干旱期间 K_{CWDI} 偏高 10.5%,产量低。分析其他站点连续干旱年的情况与此基本一致。因此,从单一干旱影响来看,基本表现为干旱时间长、水分亏缺量大,玉米产量低,期间持续干旱时间愈长,程度愈重,则影响愈大。

从单一低温冷害对玉米的影响来看,以 1983—1986 年的龙江站为例,该站连续 4 年出现冷害,未出现干旱,为典型的连续单一冷害年,据气象灾害大典(温克刚, 2007)记载,其间未发生其他重大气象灾害。由表 4 可见,1983 年出苗—乳熟期 H 较低,总低温日数最长,最长连续低温日数最多,且最长连续低温期间气温距平较低,18 d 中有 17 d 气温距平低

表 2 研究区玉米出苗—乳熟期 H 、 K_{CWDI} 与玉米单产的相关关系
Table 2 Relationship between H , K_{CWDI} and the maize yield during maize emergence—milk ripening stage in study area

区域(站点)	回归方程	R^2	F	F^0	样本数/个
全研究区	$y=15.9x_1-109.6x_2+10001.9$	0.718**	42.088	7.44	36
松嫩平原	$y=14.6x_1-118.0x_2+10522.1$	0.721**	42.554	7.44	36
三江平原	$y=13.5x_1+5286.1$	0.344**	17.807	7.44	36
松嫩平原西部	$y=6.8x_1-92.4x_2+8568.1$	0.443**	13.097	7.44	36
松嫩平原北部	$y=13.7x_1-69.4x_2+8412.8$	0.380**	10.132	7.44	36
松嫩平原东部	$y=16.5x_1-80.1x_2+9151.0$	0.463**	14.227	7.44	36
松嫩平原南部	$y=14.8x_1-103.9x_2+10916.4$	0.676**	34.404	7.44	36
龙江	/	/	/	/	36
富裕	$y=1.6x_1+4000.1$	0.113*	4.332	4.13	36
海伦	/	/	/	/	36
泰来	$y=4.0x_1+3162.7$	0.203**	8.429	7.44	36
青冈	$y=11.0x_1-84.8x_2+8957.9$	0.482**	14.898	7.50	35
安达	$y=-134.9x_2+11969.5$	0.424**	24.324	7.50	35
巴彦	$y=13.6x_1+7856.5$	0.424**	24.996	7.44	36
佳木斯	/	/	/	/	34
集贤	$y=8.3x_1+5901.3$	0.440**	25.150	7.50	34
哈尔滨	$y=7.9x_1-55.3x_2+8067.0$	0.525**	18.223	7.44	36
肇源	$y=9.9x_1-174.7x_2+11929.8$	0.553**	19.799	7.50	35
双城	$y=6.5x_1+8044.3$	0.220**	9.594	7.44	36
方正	/	/	/	/	36
勃利	$y=6.7x_1+5116.8$	0.127*	4.934	4.13	36
五常	$y=14.7x_1+7557.2$	0.362**	18.143	7.50	34

注: * 和 ** 分别为通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验, “/”表示未通过 0.05 显著性水平检验。
Note: * and ** passed through the tests at $\alpha=0.05$ and $\alpha=0.01$ significance levels, separately, “/” means that failed to pass through the test at $\alpha=0.05$ significance level.

表 3 2000—2004 年安达站玉米出苗—乳熟期干旱代表年份的水分逆境概况及产量表现
Table 3 Summary of water condition and yield during maize emergence—milk ripening stage at

Anda Station in the typical years of drought during 2000—2004							
年份	平均 $K_{CWDI}/\%$	总干旱日数/d	干旱日数占比/%	最长连续干旱日数/d	最长连续干旱期间平均 $K_{CWDI}/\%$	最长连续干旱出现时期	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2000	65.6	100	96.2	88	70.4	出苗—乳熟期	3590
2001	60.5	106	99.1	78	62.4	出苗—吐丝期	4282
2002	45.8	63	58.9	56	54.5	拔节—乳熟期	5923
2003	49.4	69	63.3	69	70.6	出苗—拔节期	4414
2004	57.2	99	92.5	71	60.1	出苗—拔节后期	4861

表 4 同表 3, 但为 1983—1986 年龙江站低温冷害代表年份
Table 4 Same as Table 3, but at Longjiang Station in the typical years of cold damage during 1983—1986

年份	$H/(\text{C} \cdot \text{d})$	总低温日数/d	低温日数占比/%	最长连续低温日数/d	最长连续低温出现时期	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
1983	-271.1	68	78.2	18	七叶期	1485
1984	-64.7	55	59.8	16	拔节期	2843
1985	-333.6	43	56.6	16	拔节期	2325
1986	-255.4	54	66.7	13	乳熟初期	2521

于 -3.0°C , 产量最低, 1984—1986 年, 各年总低温日数、最长连续低温日数相差较小; 1984 年的 H 较高, 表明其低温程度相对较小, 其产量最高; 1985 年相对于 1986 年, 最长连续低温日数略多, 且 H 偏低

78.2 $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$, 其产量低于 1986 年。分析其他站点连续冷害年的情况与此基本一致。由此可见, 单一低温冷害对玉米影响与干旱相似, 基本表现为低温时间长、低温程度重, 玉米产量低, 期间持续低温时间

愈长,程度愈重,则影响愈大。

2.3.2.2 干旱、低温冷害复合发生对玉米产量的影响

从各站干旱、低温冷害复合发生年份的温水条件看,其逆境形式一般表现为先干旱后低温冷害,或先低温冷害后干旱,或两种灾害伴随发生。龙江站在 1991—1993 年连续出现干旱、低温冷害复合发生逆境,代表性较强,分析龙江站 1991—1993 年玉米出苗—乳熟期的 K_{CWDI} 、气温,结合表 5、图 2 可见,在 3 个代表年份中, K_{CWDI} 均呈波动式变化,1991 年、1993 年 K_{CWDI} 波动减小,玉米拔节后基本无旱,

而 1992 年则呈减小—增大的交替式变化,其平均 K_{CWDI} 、总干旱日数、总干旱日数占出苗—乳熟期总日数的比率以及最长连续干旱日数均为最大,总干旱日数超出了出苗—乳熟期间总日数的 50% 以上,且最长连续干旱时间达 1 月之久,并出现于较为关键的发育时段拔节—乳熟期内,可见 1992 年的干旱程度相对较重,而 1991 年、1993 年次之;从温度变化看,1992 年日均温波动最剧烈,部分时间温度偏低幅度较大, H 最低,为 $-227.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,即 1992 年低温程度相对最重,其次为 1991 年、1993 年。另外 1992 年的逆境形式表现为先低温后低温、干旱伴随

表 5 1991—1993 年玉米出苗—乳熟期龙江站干旱和低温冷害复合发生代表年份的温水逆境概况及产量表现

Table 5 Summary of temperature and water and yield during maize emergence—milk ripening stage at Longjiang Station in the typical years of drought and cold cross-stress during 1991—1993

年份	日平均温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	$H/(\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$	平均 $K_{CWDI}/\%$	总干旱日数/d	干旱日数占比/ $\%$	最长连续干旱日数/d	产量/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$
1991	14.0~27.0	-120.2	31.3	29	33.3	19	4212
1992	6.4~29.3	-227.5	46.3	60	62.5	31	3345
1993	15.9~25.7	-106.9	30.9	22	24.2	17	4467

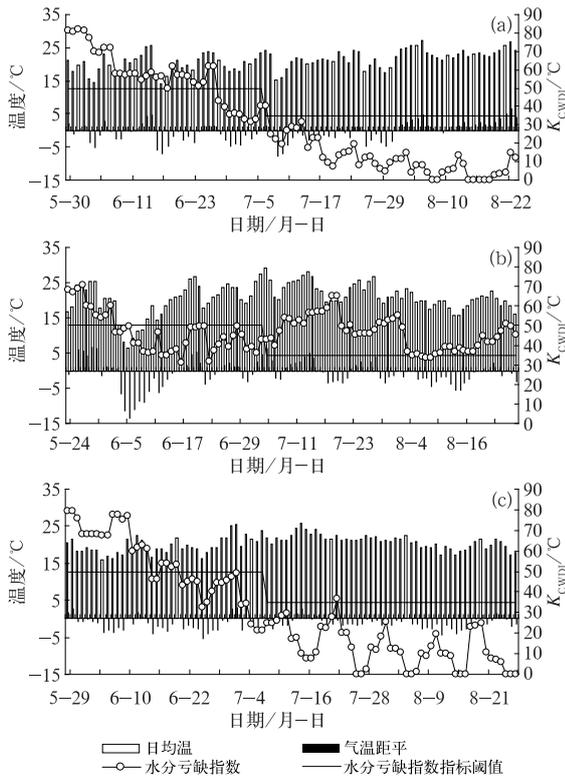


图 2 1991 年(a)、1992 年(b)和 1993 年(c) 龙江站玉米出苗—乳熟期干旱和低温冷害复合发生代表年份的温度与 K_{CWDI} 变化
Fig. 2 Changes of temperature and K_{CWDI} in the typical years of drought and cold cross-stress during maize emergence—milk ripening stage at Longjiang Station in 1991 (a), 1992 (b) and 1993 (c)

发生。再比较 3 年的产量可见,1992 年较 1991 年减产 20.6%,1991 年较 1993 年减产 5.7%,1992 年较 1993 年下降更多,减产 25.1%。统计龙江站 3 a 玉米出苗—乳熟期间的日照及乳熟至成熟期间气象数据,结合气象灾害大典(温克刚,2007)分析,3 年的日照及后期总体光、温、水条件基本相当,差异不大,且未出现其他重大气象灾害,因此日照、后期条件及其他灾害所造成的产量差异也不大。分析其他站点连续复合发生年份的情况与此基本一致。由此可见,玉米出苗—乳熟期干旱、低温冷害复合发生逆境条件不同,对玉米产量影响不同,总体上表现为干旱、低温冷害复合发生程度重则产量低的趋势,这与表 2 所体现的结论相一致,因此在一定程度上可以说明,较重干旱伴随较重低温冷害复合发生的逆境条件对玉米影响更大。

2.3.2.3 干旱、低温冷害复合发生与单一发生对玉米产量影响比较

研究区干旱、低温冷害复合发生共计 91 站年,与单一干旱比较,91 站年中,有 12 站年的产量损失高于全部单一干旱年的产量损失,有 56 站年的产量损失高于单一干旱年中 50% 年份的产量损失,其余 23 站年的产量损失高于单一干旱年中 8%~46% 年份的产量损失;与单一冷害比较,91 站年中,有 16 站年的产量损失高于全部单一冷害年的产量损失,有 35 站年的产量损失高于单一冷害年中 50% 年份

的产量损失,其余 40 站年的产量损失高于单一冷害年中 14%~43% 年份的产量损失。通过以上分析发现,两种灾害复合发生与单一发生相比的产量损失表征较为复杂,并非所有复合发生年份产量损失最大,而部分单一干旱或单一冷害年的产量损失高于两种灾害复合发生年的产量损失。再对干旱、低温冷害复合发生与单一发生状态进行分析,发现其发生机制十分复杂,发生形式多样,因此其对玉米生长和产量的影响机制也较为复杂,这可能是造成其

影响不同的主要原因之一。

根据上文分析,与单一干旱、低温冷害比较,分别有 12 和 16 站年复合发生年份的产量损失最高,其中有 8 站年为重复年份,即青冈站的 1989 年,巴彦站的 1982 年、1984 年和 1989 年,方正站的 1996 年,哈尔滨站的 1982 年,双城站的 1985 年,集贤站的 1983 年,因此总计 20 站年,进一步分析该 20 站年温水逆境,由表 6 可见,总体存在两种灾害发生程度均较重或干旱(冷害)时间长、程度重的特征。

表 6 产量损失最高的复合发生年份的温水逆境

Table 6 Temperature and water condition of the highest yield loss in the drought and cold cross-stress year

站点	年份	平均 KcWDI/%	干旱 日数/d	最长连续干 旱日数/d	低温日 数/d	最长连续低 温日数/d	干旱伴随低温 发生日数/d	最长连续干旱伴随 低温发生日数/d	H/(°C·d)
富裕	1982	72.2	71	71	19	9	19	9	-288.9
富裕	1981	41.9	42	19	56	21	30	12	-298.5
富裕	1988	35.2	32	10	37	10	17	4	-208.8
安达	1983	35.7	37	22	67	34	21	7	-114.3
安达	1984	50.6	53	44	43	10	32	6	-154.0
青冈	1989	37.2	25	25	53	14	10	7	-262.5
巴彦	1981	40.0	33	8	54	17	16	3	-188.8
巴彦	1982	68.2	72	72	17	6	14	6	-168.2
巴彦	1984	38.6	44	26	41	17	24	6	-250.9
巴彦	1986	45.6	58	48	50	17	25	6	-146.8
巴彦	1987	31.7	24	11	56	27	11	6	-111.1
巴彦	1989	42.0	42	24	54	14	20	6	-77.6
方正	1984	40.0	37	25	42	17	18	8	-65.0
方正	1996	44.1	60	38	46	9	30	9	-58.8
哈尔滨	1982	66.1	79	76	23	6	23	6	-61.9
哈尔滨	1985	41.5	49	22	61	18	36	9	-251.1
双城	1982	66.2	87	87	21	6	21	6	-118.5
双城	1985	35.5	29	16	58	12	18	10	-289.2
集贤	1983	29.8	19	19	70	39	5	3	-143.6
勃利	1985	45.1	58	53	45	9	34	7	-65.2

深入比较分析干旱、低温冷害复合发生与单一发生对玉米产量的影响,鉴于临近年份比较性更强,本文选取 15 个单站连续 3 年均发生灾害的年份,选取模式为 2 年干旱 1 年复合发生、2 年低温冷害 1 年复合发生、1 年干旱 1 年低温冷害 1 年复合发生,共选出所有符合条件的 59 例。分析表明,59 例中 25 例复合发生年份产量最低,24 例干旱年份产量最低,10 例低温冷害年份产量最低。受篇幅限制,本文给出 6 个代表站的比较情况(表 7),当发生单一干旱(或低温冷害)时,表中关于低温冷害(或干旱)的各项数据未统计。由表 7 可见,单一干旱年和低温冷害年产量最低年份的逆境条件存在干旱和低温总日数长,或持续时间长,或程度重的趋势,而其中的复合发生年份逆境条件则表现为干旱和低温总时

间相对短,或持续时间相对短或其伴随发生时间相对短或程度轻;25 例产量最低的复合发生年份逆境条件与表 6 相似,也表现为干旱和低温较重发生,或其中的干旱(或低温冷害)较重发生的趋势,表 7 中青冈站两种灾害复合发生年份产量较单一灾害年份产量下降幅度高达 50% 以上,细致分析其温水条件可见,青冈站 1989 年 6 月 9 日至 7 月 30 日出现 4 个低温时段,各段低温持续时间分别为 14、9、7 和 7 d,8 月 3—27 日出现干旱,干旱持续近 1 月之久,干旱期间又出现阶段性低温,此种复合发生特征表现为先低温冷害后干旱且后期相伴发生,其具体逆境条件表征为 H 达 -262.5 °C·d,低温日数为 53 d,最长连续干旱时间达 25 d,且处于需水量较大的开花—吐丝期;1989 年与 1988 年低温冷害相比,

冷害程度、总低温日数、持续低温日数等相差较少；1989 年与 1990 年干旱相比，1990 年总干旱日数较长，但 5 月 18 日至 8 月 9 日为间断性干旱，且 6 月 12 日至 7 月 21 日的关键生长期无旱，8 月 10—31 日持续干旱 22 d，期间平均 K_{CWDI} 为 57.3%，1989 年 5 月 30 日至 8 月 2 日未出现干旱，8 月 3 日至 8 月 27 日持续干旱 25 d，期间平均 K_{CWDI} 为 58.2%，可见这两年的干旱状态较为相似。总体来看，青冈站 1989 年低温程度重，关键期干旱持续时间长，在低温逆境已造成负效应影响前提下，后期干旱及干旱、低温相伴发生的逆境继续产生不利影响，造成负

效应影响加重，这可能是导致 1989 年较 1988 年、1990 年产量大幅度下降的主要原因之一。

如上文分析，自然条件下干旱和低温冷害复合发生、单一发生的随机性较强，发生机制复杂，其对玉米的影响机制也较为复杂，因此复合发生与单一发生对玉米影响的可比性偏弱，但总体上存在这样的趋势，即当与单一干旱(低温冷害)比较时，复合灾害中干旱(低温冷害)的时间、日数、程度等与之相当时，则干旱(低温冷害)与低温冷害(干旱)复合发生对玉米产量的影响呈加重趋势。

表 7 研究区代表站玉米出苗—乳熟期连续 3 年干旱、低温冷害复合发生及单一发生的温水逆境及产量比较
Table 7 Comparison of temperature and water condition and yield of consecutive three years of the drought year, the cold damage year and the drought and cold cross-stress year during maize emergence—milk ripening stage at representative stations in study area

统计量	龙江站			青冈站		
	1994 年	1995 年	1996 年	1988 年	1989 年	1990 年
灾害类型	干旱	干旱、冷害复合	干旱	冷害	干旱、冷害复合	干旱
平均 $K_{CWDI}/\%$	45.0	42.0	45.0	26.9	37.2	45.7
$H/(\text{C} \cdot \text{d})$	-33.3	-51.1	95.8	-248.0	-262.5	27.1
干旱日数/d	48	41	65		25	56
最长连续干旱日数/d	41	36	24		25	22
低温日数/d		35		43	53	
最长连续低温日数/d		6		9	14	
干旱伴随低温发生日数/d		17			10	
最长连续干旱伴随低温发生日数/d		6			7	
产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	5663	4218	5734	2670	1329	3597
统计量	五常站			双城站		
	1989 年	1990 年	1991 年	1989 年	1990 年	1991 年
灾害类型	干旱	干旱、冷害复合	冷害	干旱	干旱、冷害复合	干旱
平均 $K_{CWDI}/\%$	45.6	33.8	17.6	59.3	43.7	39.8
$H/(\text{C} \cdot \text{d})$	-45.8	-75.2	-109.7	240.2	-115.1	-38.3
干旱日数/d	60	31		89	54	43
最长连续干旱日数/d	19	9		40	53	11
低温日数/d		48	53		44	
最长连续低温日数/d		11	13		11	
干旱伴随低温发生日数/d		11			16	
最长连续干旱伴随低温发生日数/d		3			6	
产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	2922	5628	6489	4425	8035	8464
统计量	海伦站			泰来站		
	1993 年	1994 年	1995 年	2010 年	2011 年	2012 年
灾害类型	冷害	干旱	干旱、冷害复合	干旱	干旱、冷害复合	冷害
平均 $K_{CWDI}/\%$	37.7	39.3	29.2	52.6	33.5	36.8
$H/(\text{C} \cdot \text{d})$	-189.5	-23.3	-50.9	199.3	-62.8	-186.7
干旱日数/d		42	39	66	30	
最长连续干旱日数/d		27	19	66	26	
低温日数/d	53		40		43	47
最长连续低温日数/d	16		16		6	9
干旱伴随低温发生日数/d			23		13	
最长连续干旱伴随低温发生日数/d			3		3	
产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	5092	7715	8990	2378	2541	1500

3 结 论

(1)1981—2016 年,研究区玉米出苗—乳熟期 K_{CWDI} 变化准确表达了研究区水资源空间分布状况。 H 对气候变暖具有极强指示性,并能够较好反映研究区热量资源的空间配置。

(2)分析期内,研究区玉米出苗—乳熟期累计发生干旱 333 站年,其中单一干旱 242 站年;累计低温冷害 167 站年,其中单一低温冷害 76 站年;累计干旱、低温冷害复合发生 91 站年。干旱、冷害复合发生总体呈减少趋势,20 世纪 90 年代中期以前密集发生,之后明显减少,但部分站点 21 世纪 10 年代开始有回升趋势。空间分布呈西多东少趋势,松嫩平原西部为频发区。

(3)研究期间, H 和 K_{CWDI} 与玉米单产存在显著或极显著的相关关系 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),在一定温度、水分条件范围内, H 降低、 K_{CWDI} 增大,玉米单产呈减少趋势,反之呈增加趋势,换言之,温度、水分适宜与否对玉米单产的形成具有重要影响,温度降低、水分亏缺量增大对玉米增产不利。

(4)比较干旱、低温冷害单一发生和复合发生对玉米产量的影响可见,复合发生中干旱(低温冷害)的时间、日数、程度等与单一发生的干旱(低温冷害)相当时,则干旱(低温冷害)与低温冷害(干旱)复合发生对玉米产量的影响呈加重趋势。在一定程度上,较重干旱伴随较重低温复合发生的逆境条件对玉米影响更大。

4 讨 论

本文基于中华人民共和国气象行业标准《北方春玉米干旱等级》(中国气象局,2015)、《北方春玉米冷害评估技术规范》(中国气象局,2012)中规定的 K_{CWDI} 、 H 判识玉米干旱、低温冷害,两个指标均考虑了玉米生育期及主要气候因子,赋予了指标生物学和气象学意义,使作物灾害辨识性及科学性显著提升。以 K_{CWDI} 、 H 对干旱、低温冷害判识效果较为理想,与高松阳(2017)、杨卫东(2017)、郭建平和马树庆(2009)采用其他研究方法的判识结果基本一致,对 1982、2000、2001、2003、2016 年等有代表性的干旱年以及 1983、1987、1989、1992 年等比较典型的低温冷害年判识较为准确。另外,从 K_{CWDI} 、 H 变化

看, K_{CWDI} 具有西高东低的空间分布特征,这准确表达了研究区水资源分布状况,体现出黑龙江省松嫩平原西部和南部偏干易旱特点,与陈立亭和孙玉亭(2000)研究所指出的该区素有“十年九旱”之说相吻合。同时, H 呈显著增加趋势,此种变化对气候变暖趋势存在极强的指示性,充分体现积温距平具有判识低温冷害和评价气温变化趋势性的双重指标作用。可见, K_{CWDI} 、 H 是干旱和低温冷害分析及气候变化方面较为可靠的指标,它们在辨识作物灾害及甄别气候变化趋势及农业气候资源时空分布上效果显著。

与过去单一灾害的影响分析相比(姜丽霞等,2016;曹雯等,2019),本文利用 K_{CWDI} 和 H 与玉米单产数据,建立了同一区域、同一时期气候-作物-两种灾害间的相互影响关系,通过 K_{CWDI} 和 H 两个气候因子的变化趋势反映产量变化趋势,并进而体现干旱、低温冷害两种灾害复合发生逆境对玉米产量的影响模式,结合干旱、低温冷害复合发生逆境对玉米产量的影响,分析可见,在玉米出苗—乳熟期总体存在干旱、低温冷害复合发生程度愈重、负效应影响愈大的趋势。另从两个因子与玉米单产的相关关系可见, H 与玉米单产相关性更好,可见在黑龙江省,就热量与水分比较而言,热量条件为制约玉米生产的相对关键因素,这与陈立亭和孙玉亭(2000)的研究结论一致。

玉米出苗—乳熟期干旱和低温冷害两种灾害单一发生、复合发生以及对玉米的影响情况较为复杂,两种灾害单一发生或复合发生的形式不同、程度不同、出现时间不同、出现的发育时段不同、持续时间不同等,其影响均不相同,如龙江站 1992 年最长连续干旱出现时间不同于 1991 年和 1993 年,其出现于拔节—乳熟期,该发育期包含玉米水分临界期,此时期干旱对玉米会造成巨大的负效应影响,这可能也是导致玉米大幅度减产的原因之一,因此玉米在不同生长时期遭遇不同灾害的影响,玉米产量损失不尽相同,且其影响机制较为复杂,后续可采取田间试验、模拟试验等方法进一步探索灾害复合发生对作物的影响,研究提炼复合灾害产量损失的临界阈值,并研究更新作物适宜气象指标,分析区域气候资源最新匹配特征,开展区域易发频发农业气象灾害风险区划及灾害影响的精细化评估,探索作物高产稳产区域,以充分发挥区域资源优势,进而保障国家粮食安全,此部分内容应在今后工作中进行深入研究。

参考文献

- 曹雯,成林,杨天明,等,2019.河南省冬小麦拔节-抽穗期干旱天气指数保险研究[J].气象,45(2):274-281. Cao W, Cheng L, Yang T M, et al, 2019. Study on weather index insurance of drought damage at jointing-heading stage of winter wheat in Henan Province[J]. Meteor Mon, 45(2):274-281(in Chinese).
- 陈莉,韩冰,李百超,等,2019.黑龙江省农业气象灾害服务需求分析[J].灾害学,34(2):78-82. Chen L, Han B, Li B C, et al, 2019. Demand for agrometeorological disasters service in Heilongjiang Province[J]. J Catastrophol, 34(2):78-82(in Chinese).
- 陈立亭,孙玉亭,2000.黑龙江省气候与农业[M].北京:气象出版社. Chen L T, Sun Y T, 2000. Climate and Agriculture in Heilongjiang Province[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 高蓓,姜彤,苏布达,等,2014.基于 SPEI 的 1961—2012 年东北地区干旱演变特征分析[J].中国农业气象,35(6):656-662. Gao B, Jiang T, Su B D, et al, 2014. Evolution analysis on droughts in Northeast China during 1961—2012 based on SPEI[J]. Chin J Agrometeor, 35(6):656-662(in Chinese).
- 高松阳,2017.黑龙江省玉米旱灾发生规律及影响因素研究[D].哈尔滨:东北农业大学. Gao S Y, 2017. Study on occurrence law and influencing factors of maize drought in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Agricultural University (in Chinese).
- 高素华,刘玲,2007.低温、干旱胁迫对抽雄期玉米叶片光化效率和光合作用速率的影响[J].气象,33(4):88-91. Gao S H, Liu L, 2007. Impact of low temperature and drought on corn photochemical conversion effect and photosynthesis process in heading stage[J]. Meteor Mon, 33(4):88-91(in Chinese).
- 郭春明,任景全,曹铁华,等,2018.春玉米穗分化期低温对产量构成因素的影响[J].应用气象学报,29(4):505-512. Guo C M, Ren J Q, Cao T H, et al, 2018. Effects of low temperature during ear differentiation stage on yield components of spring maize[J]. J Appl Meteor Sci, 29(4):505-512(in Chinese).
- 郭建平,2016.农业气象灾害监测预测技术研究进展[J].应用气象学报,27(5):620-630. Guo J P, 2016. Research progress on agricultural meteorological disaster monitoring and forecasting[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):620-630(in Chinese).
- 郭建平,马树庆,2009.农作物低温冷害监测预测理论和实践[M].北京:气象出版社. Guo J P, Ma S Q, 2009. The Theory and Practice on Monitoring and Forecasting of Crop Chilling Damage[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 姜丽霞,王铭,朱海霞,等,2016. $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平对玉米不同发育期冷害的判定及其与产量的关系[J].中国农学通报,32(36):152-162. Jiang L X, Wang M, Zhu H X, et al, 2016. Judgment of maize cold damage in different development periods based on active accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ and its relationship with yield[J]. Chin Agric Sci Bull, 32(36):152-162(in Chinese).
- 姜丽霞,朱海霞,闫敏慧,等,2019.黑龙江省主汛期异常降水变化及其与洪涝的关系研究[J].灾害学,34(2):1-6. Jiang L X, Zhu H X, Yan M H, et al, 2019. Changes of abnormal rainfall and relationship between precipitation and flood during main flood seasons of Heilongjiang Province[J]. J Catastrophol, 34(2):1-6(in Chinese).
- 金燕,况雪源,晏红明,等,2018.近 55 年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J].气象,44(9):1169-1178. Jin Y, Kuang X Y, Yan H M, et al, 2018. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. Meteor Mon, 44(9):1169-1178(in Chinese).
- 李秀芬,马树庆,姜丽霞,等,2017.两种常用的春玉米干旱等级指标在东北区域的适用性检验[J].气象,43(11):1420-1430. Li X F, Ma S Q, Jiang L X, et al, 2017. Applicability test of two common indexes for spring maize drought grade in Northeast China[J]. Meteor Mon, 43(11):1420-1430(in Chinese).
- 马树庆,王琪,陈凤涛,等,2015.春旱背景下春玉米苗情对产量的影响及减产评估模式[J].农业工程学报,31(S1):171-179. Ma S Q, Wang Q, Chen F T, et al, 2015. Impact of spring maize seeding growth on yield and assessment models of production cut under background of spring drought[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 31(S1):171-179(in Chinese).
- 马树庆,袁祝香,王琪,2003.中国东北地区玉米低温冷害风险评估研究[J].自然灾害学报,12(3):137-141. Ma S Q, Xi Z X, Wang Q, 2003. Risk evaluation of cold damage to corn in Northeast China[J]. J Nat Dis, 12(3):137-141(in Chinese).
- 马晓刚,李凝,周斌,等,2019.干旱对阜新粮食产量的影响研究[J].灾害学,34(1):139-144. Ma X G, Li N, Zhou B, et al, 2019. Study on the effect of drought on grain yield in Fuxin[J]. J Catastrophol, 34(1):139-144(in Chinese).
- 毛留喜,魏丽,2015.大宗作物气象服务手册[M].北京:气象出版社. Mao L X, Wei L, 2015. Mass Crop Meteorological Service Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 王静,杨晓光,李勇,等,2011.气候变化背景下中国农业气候资源变化 VI. 黑龙江省三江平原地区降水资源变化特征及其对春玉米生产的可能影响[J].应用生态学报,22(6):1511-1522. Wang J, Yang X G, Li Y, et al, 2011. Changes of China agricultural climate resources under the background of global climate change. VI. Change characteristics of precipitation resource and its possible effect on maize production in Sanjiang Plain of Heilongjiang Province[J]. Chin J Appl Ecol, 22(6):1511-1522(in Chinese).
- 温克刚,2007.中国气象灾害大典黑龙江卷[M].北京:气象出版社. Wen K G, 2007. Heilongjiang Volume of China Meteorological Disaster Canon[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 谢五三,唐为安,宋阿伟,2019.多时间尺度 SPI 在安徽省气象干旱监测中的适用性研究[J].气象,45(11):1560-1568. Xie W S, Tang W A, Song A W, 2019. Applicability study of SPI in multiple time scales in meteorological drought monitoring in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 45(11):1560-1568(in Chinese).
- 杨卫东,2017.黑龙江省气象灾害防御技术手册[M].北京:气象出版

- 社. Yang W D, 2017. Technical Manual of Meteorological Disaster Prevention in Heilongjiang Province[M]. Beijing, China Meteorological Press(in Chinese).
- 杨晓晨, 明博, 陶洪斌, 等, 2015. 中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 23(6): 758-767.
- Yang X C, Ming B, Tao H B, et al, 2015. Risk evaluation of cold damage to corn in Northeast China[J]. Chin J Eco-Agric, 23(6): 758-767(in Chinese).
- 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等, 2012. 不同发育期低温冷害对玉米灌浆和产量影响模拟[J]. 中国农学通报, 28(36): 176-182. Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, et al, 2012. The simulation of the effects of low temperature disasters on maize growth and yield during different development stages[J]. Chin Agric Sci Bull, 28(36): 176-182(in Chinese).
- 赵俊芳, 杨晓光, 刘志娟, 2009. 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[J]. 生态学报, 29(12): 6544-6551. Zhao J F, Yang X G, Liu Z J, 2009. Influence of climate warming on serious low temperature and cold damage and cultivation pattern of spring maize in Northeast China[J]. Acta Ecol Sin, 29(12): 6544-6551(in Chinese).
- 中国气象局, 2012. 北方春玉米冷害评估技术规范: QX/T 167—2012 [S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2012. Technical specification for assessment of cold damage to spring maize in northern China; QX/T 167—2012 [S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 中国气象局, 2015. 北方春玉米干旱等级: QX/T 259—2015[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2015. Drought grade of spring maize in northern China; QX/T 259—2015[S]. Beijing, China Meteorological Press(in Chinese).
- 中国气象局, 2016. 农业气象观测规范: QX/T 361—2016[S]. 北京: 中国气象局. China Meteorological Administration, 2016. Standard of agrometeorological observation; QX/T 361-2016[S]. Beijing, China Meteorological Press(in Chinese).
- 左冰洁, 孙玉军, 2019. 福建省几种气象干旱指数的对比分析[J]. 气象, 45(5): 685-694. Zuo B J, Sun Y J, 2019. Comparative analysis of several drought indices to use in Fujian Province[J]. Meteor Mon, 45(5): 685-694(in Chinese).
- Ali F, Bano A, Fazal A, 2017. Recent methods of drought stress tolerance in plants[J]. Plant Growth Regul, 82(3): 363-375.
- Anjum S A, Ashraf U, Tanveer M, et al, 2017. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids[J]. Front Plant Sci, 8: 69.
- Beck E H, Fettig S, Knake C, et al, 2007. Specific and unspecific responses of plants to cold and drought stress[J]. J Biosci, 32(3): 501-510.
- Dai A G, 2013. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nat Climate Change, 3: 52-58.
- di Fenza M, Hogg B, Grant J, et al, 2017. Transcriptomic response of maize primary roots to low temperatures at seedling emergence [J]. PeerJ, 5: e2839.
- Yin X G, Olesen J E, Wang M, et al, 2016. Impacts and adaptation of the cropping systems to climate change in the Northeast Farming Region of China[J]. Eur J Agron, 78: 60-72.