

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[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 42-48. [DU Chunying, JIANG Lixia, ZHU Haixia, et al. A Study on Dynamic Assessment of Maize Cold Damage and Relationship between Active Accumulated Temperature Anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ and Maize Yield[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 42-48. doi: 10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2016. 04. 008.]

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^{*}

杜春英, 姜丽霞, 朱海霞, 官丽娟, 曲辉辉

(黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 利用1980-2014年黑龙江省15个玉米农业气象观测站的资料, 基于中华人民共和国玉米冷害评估气象行业标准规定的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平指标, 对玉米3个发育关键时期出苗-七叶期、出苗-抽雄期、出苗-乳熟期的冷害进行动态判识, 并分析其时空演变特征, 同时应用统计方法分析积温距平与玉米实际单产的关系。研究表明: ①1980-2014年间, 玉米3个发育时期内的冷害年数在7~17年之间, 冷害发生对气候变暖趋势具有明显的响应; ②1980-2014年间研究区玉米3个发育时期冷害的发生随时间呈减少趋势, 1990年代中期以前为高发期, 之后冷害发生频率下降。空间分布上, 冷害呈现北多南少特征, 并具有群发性、区域性和局地性特点; ③1980-2014年间, 研究区玉米3个发育时期的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平具有16年左右的周期变化, 总体表现为1995年以前偏冷, 之后偏暖, 其中玉米出苗-七叶期积温距平存在最近几年偏冷的趋势; ④研究区67%的站点 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平与玉米实际单产存在显著或极显著的相关关系, 积温距平为100~200 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 利于玉米高产; ⑤ $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平指标赋予玉米冷害判识指标生物学和农学意义, 充分表征玉米不同发育时期热量需求与供给的关系, 有效提升作物冷害判识的客观性。

关键词: $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平; 玉米冷害; 指标; 玉米单产

中图分类号: X43; S166 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)04-0042-07

doi: 10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2016. 04. 008

农业与气象息息相关。农作物生长全过程均处于自然环境下, 其产量的形成极易受到气象灾害等不利因素的胁迫和干扰, 灾害严重时可导致粮食产量大幅度下降甚至绝产^[1]。研究指出^[2], 低温冷害是影响高纬度地区作物生产的一个严重问题, 作为我国重要商品粮生产基地的东北地区, 因其纬度较高, 恰面临冷害威胁。东北地区盛产玉米, 由于热量资源有限且变幅较大^[3], 在玉米生长季内易出现阶段性低温, 此种特殊的气候类型不易满足玉米正常生长, 从而形成低温冷害而造成减产^[4]。气候变暖导致东北地区热量资源显著增加^[5], 使不同熟型玉米栽培界限发生北移^[6], 无形中增加了玉米低温冷害发生的风险, 且位于最北部的黑龙江省为玉米生产冷害危险性中高值区^[7-8], 同时, 气候变暖导致温带地区的作物生长

季延长, 在未考虑可能出现低温以及作物耐寒性复杂的情况下, 政府鼓励提高作物种植潜力使玉米生产的冷害风险进一步加大^[9]。可见在气候变化大背景下, 作物对热量的需求与区域气候的不稳定性之间的关系仍不可忽视, 这是世界性问题。而黑龙江省处于温带向寒温带过渡区, 热量供给与作物需求之间存在矛盾, 此问题尤为突出, 因此深入探究玉米冷害及其对产量的影响十分必要。

1980年代, 气候变化与农业生产关系的相关研究达到高潮期^[10], 内容多样化, 其中不乏灾害及其对农业的影响研究, 在此领域内, 国内外许多专家学者对低温冷害开展了大量研究工作, 冷害指标、冷害监测预测技术、冷害风险评估技术等方面的成果不断涌现^[11-16]。多年来, 许多专家学者一直致力于国家气象行业标准的建立, 杨霏

* 收稿日期: 2016-04-21 修回日期: 2016-06-03

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206018); 中国气象局气候变化专项(CCSF201606); 中国气象局核心业务发展专项(CMAHX20160205)

第一作者简介: 杜春英(1964-), 女, 吉林扶余人, 硕士, 高级工程师, 主要从事应用气象和气候资源的相关研究。

E-mail: duchunying880@sohu.com

通讯作者: 姜丽霞(1972-), 女, 吉林德惠人, 硕士, 高级工程师, 主要从事应用气象和气候变化的相关研究。

E-mail: hljlxl@163.com

云等经过甄别、筛选, 结合精确的计算分析和验证, 建立了中华人民共和国气象行业标准—玉米冷害评估技术规范(QX/T167-2012)^[17], 该规范于2013年正式颁布实施, 可以用于判识玉米冷害。迄今为止, 采用玉米冷害评估技术规范(QX/T167-2012)^[17]中的积温距平指标判识黑龙江省玉米冷害, 并研究其与玉米产量关系的报道仍较少见。本文基于更新的气象数据和玉米观测资料, 采用数理统计方法, 依据中华人民共和国气象行业标准, 研究探索玉米冷害发生规律及其与玉米产量的关系, 以期对黑龙江省玉米生产趋利避害以及种植结构调整提供气象参考。

1 资料和方法

1.1 资料来源

黑龙江省玉米栽培区主要位于50°N以南地区, 主产区分布在松嫩平原和三江平原, 黑龙江省玉米农业气象观测站相应设置在主产区, 共有15站(表1), 本研究即选取该15站作为研究站点进行分析。所用资料包括15站有观测记录以来至2014年玉米发育期观测数据、1980-2014年逐日平均气温资料, 均来自黑龙江省气象局整编资料。15站官方玉米实际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》^[18]的要求进行, 为保证资料的连续性, 作物观测保持了观测方法的一致性, 所观测品种的熟期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。

表1 研究站点概况

站名	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)	品种熟型	所属行政区域
富裕	47.8	124.48	中熟	齐齐哈尔
龙江	47.33	123.18	中熟	
泰来	46.40	123.42	晚熟	
海伦	47.43	126.97	中熟	绥化
青冈	46.68	126.1	晚熟	
安达	46.38	125.32	晚熟	
巴彦	46.08	127.35	晚熟	哈尔滨
哈尔滨	45.75	126.77	晚熟	
双城	45.38	126.3	晚熟	
方正	45.83	128.8	中熟	
五常	44.9	127.15	晚熟	
肇源	45.5	125.08	晚熟	大庆
佳木斯	46.82	130.28	中熟	佳木斯
集贤	46.72	131.12	中熟	双鸭山
勃利	45.75	130.58	晚熟	七台河

1.2 研究方法

1.2.1 玉米冷害判识指标

杨霏云等研究制定了中华人民共和国气象行业标准《北方春玉米冷害评估技术规范(QX/T167-2012)》^[17], 标准中规定了玉米生长季内关键发

育期冷害的动态评估指标, 即 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温距平指示冷害的指标(表2)。参照该标准, 本文将玉米发育期划分为出苗-七叶期、出苗-抽雄期、出苗-乳熟期, 采用该积温距平指标对玉米主要发育时期的冷害进行动态判识, 本文中玉米各个发育期均采用中国气象局《农业气象观测规范》^[18]中规定观测的普遍发育期。在玉米出苗-七叶期, 当 $H < -30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $H < -35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $H < -40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 时, 玉米早熟、中熟、晚熟品种即分别发生延迟型冷害。其它发育期类似如上判识, 不再赘述, 具体见表2。

表2 玉米出苗至乳熟期 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温距平指示冷害指标($^{\circ}\text{C}$)^[17]

发育期	积温距平指示冷害指标/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)		
	早熟品种	中熟品种	晚熟品种
出苗-七叶期	$H < -30$	$H < -35$	$H < -40$
出苗-抽雄期	$H < -40$	$H < -45$	$H < -50$
出苗-乳熟期	$H < -45$	$H < -50$	$H < -55$

1.2.2 分析方法

根据积温学说原理, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温距平能够很好表征玉米出苗至各个发育期是否遭遇持续低温的影响, 其计算公式为:

$$H = \sum_{i=1}^n t_i - \bar{H} \quad (1)$$

式中: H 为某年某研究站点计算时段内日平均气温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温距平($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$), t_i 为计算时段内第 i 日的 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日平均气温($^{\circ}\text{C}$), n 为计算时段内的日数, \bar{H} 为计算时段内日平均气温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温的常年平均值, 本文取1981-2010年的平均值。

本文将发生冷害的年数与资料序列总年数的比值作为低温冷害发生频率。利用气候统计方法对所有研究站点逐日平均气温进行统计处理, 以SPSS statistics 17.0 处理软件进行数据分析。采用数理统计、墨西哥帽小波分析^[19]等方法, 研究玉米 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温距平变化特征、趋势和周期变化。利用统计回归方法分析 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温距平与玉米单产的相关关系。

2 结果与分析

2.1 冷害判识

1980-2014年间, 基于 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温距平指标判识的研究区玉米出苗-七叶期冷害年数为8~17年; 玉米出苗-抽雄期7~15年; 玉米出苗-乳熟期7~17年。同一研究站点在不同发育时期、不同站点在同一发育时期冷害发生情况均不同。从冷害判识的情况看, 冷害年主要集中于1990年代中期以前, 其对气候变暖趋势具有明显的响应特征^[20], 表明 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温距平指标指示玉米冷害符合实际情况。郭建平等^[4]曾采用其他研究方法判识出比较有代表性的冷害年1983、1987、1989、1992年, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温距平指标对上述年份判识效

果也较好。

2.2 冷害变化特征

2.2.1 冷害时间分布特征

以龙江、哈尔滨、海伦、集贤站为例，该4站分别位于玉米主产区西部、南部、北部、东部，地理位置具有明显的代表性(图1)。从 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平的变化来看，研究区1980-2014年玉米出苗-七叶期积温距平基本呈少-多-少变化趋势，各站1980年代至1990年代初多为负距平，且距平

值与指标阈值比较偏低较多，形成冷害；1990年代中期至21世纪初，负距平年数明显少于前期，其中低于指标阈值的年份较少，即形成冷害的年份较少；2010年代，负距平年数呈增加趋势，尤其黑龙江省西南部地区表现明显。从年代际变化趋势看，玉米出苗-七叶期冷害总体呈减少趋势，1980年代是冷害集中高发期，1990年代发生频率下降，21世纪初，冷害发生持续偏少，但进入2010年代，冷害的发生有回升趋势(表3)。

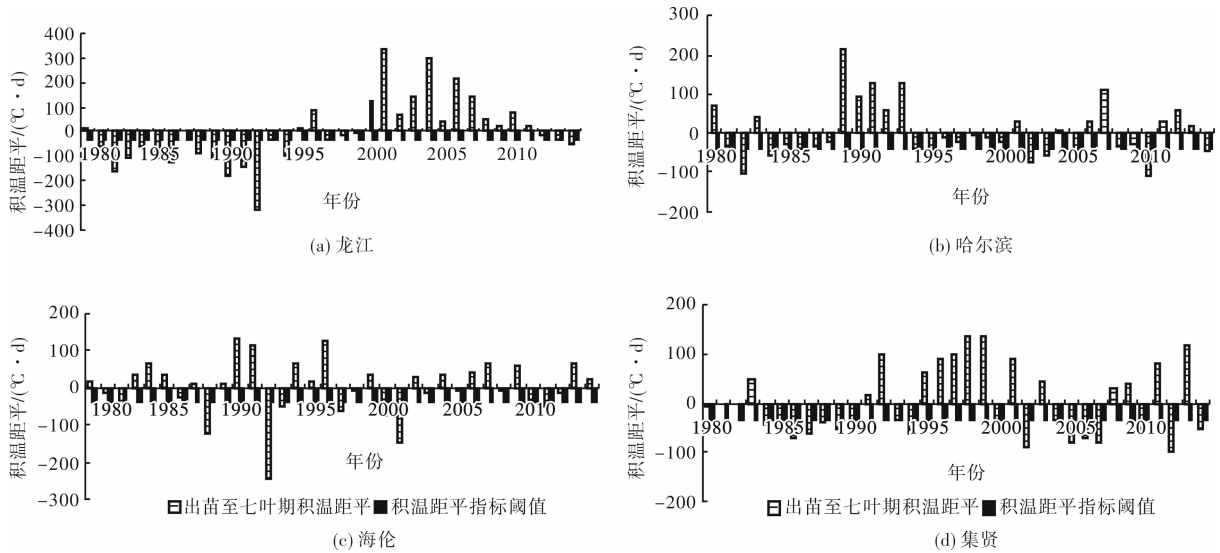
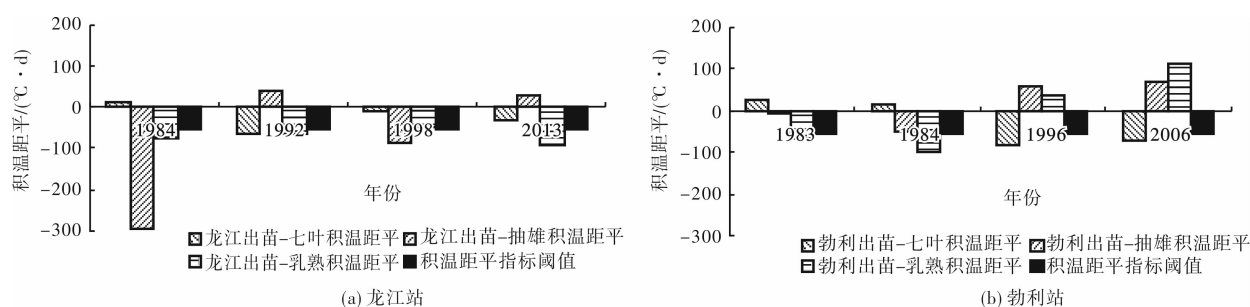


图1 1980-2014年玉米出苗-七叶期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平变化及与指标阈值比较

表3 研究区玉米冷害年代际变化

发育期	时间段/年	龙江县	泰来县	海伦市	青冈县	巴彦县	勃利县	集贤县	富裕
出苗-七叶期	1980-1990	25.7	22.9	5.7	20	11.4	2.9	17.1	20
	1991-2000	11.4	8.6	11.4	8.6	5.7	17.1	2.9	11.4
	2001-2010	0	0	2.9	2.9	0	2.9	14.3	2.9
	2011-2014	2.9	11.4	2.9	0	5.7	0	5.7	5.7
出苗-抽雄期	1980-1990	25.7	31.4	22.9	25.7	28.6	8.6	17.1	28.6
	1991-2000	14.3	8.6	5.7	5.7	2.9	11.4	5.7	11.4
	2001-2010	0	0	2.9	0	0	2.9	2.9	0
	2011-2014	0	2.9	0	0	0	0	0	0
出苗-乳熟期	1980-1990	28.6	25.7	11.4	20	25.7	17.1	22.9	31.4
	1991-2000	11.4	5.7	14.3	2.9	0	8.6	8.6	14.3
	2001-2010	2.9	0	0	5.7	2.9	2.9	0	0
	2011-2014	2.9	5.7	0	0	2.9	0	0	2.9
发育期	时间段/年	安达	佳木斯	哈尔滨	肇源	双城	方正	五常	
出苗-七叶期	1980-1990	25.7	20	8.6	11.4	17.1	11.4	2.9	
	1991-2000	5.7	14.3	5.7	2.9	2.9	2.9	11.4	
	2001-2010	0	5.7	11.4	5.7	8.6	8.6	17.1	
	2011-2014	0	8.6	2.9	5.7	0	0	0	
出苗-抽雄期	1980-1990	20	2.9	22.9	20	20	2.9	11.4	
	1991-2000	8.6	11.4	5.7	8.6	0	20	8.6	
	2001-2010	0	5.7	0	0	0	8.6	0	
	2011-2014	0	2.9	0	0	0	0	0	
出苗-乳熟期	1980-1990	20	8.6	22.9	20	20	14.3	14.3	
	1991-2000	8.6	8.6	5.7	11.4	5.7	14.3	11.4	
	2001-2010	2.9	8.6	0	0	5.7	2.9	2.9	
	2011-2014	2.9	8.6	0	0	0	0	0	

图2 龙江、勃利站代表年份 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 玉米积温距平

1980–2014 年玉米出苗–抽雄期积温距平变化形势基本呈少–多变化趋势, 明显携带气候变暖信息。各站 1980 年代至 1990 年代初多为负距平, 且距平值与指标阈值比较低较多; 1990 年代中期开始, 负距平年数明显减少, 冷害发生较少。从年代际变化看, 玉米出苗–抽雄期冷害呈明显减少趋势, 1980 年代冷害发生频率明显偏高, 1990 年代至 2010 年代, 冷害发生频率持续下降(表 3)。研究区玉米出苗–乳熟期积温距平变化形势与出苗–抽雄期变化形势相似(表 3), 此处不再赘述。

在同一站同一年内, 基于 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平判识的玉米不同发育期的冷害具有不连续性特点。由图 2 可见, 龙江站 1992 年在玉米出苗–七叶期积温距平低于指标阈值, 发生冷害, 至抽雄期积温距平转为正值, 反映了前期冷害被后期热量所补偿的温度走势, 而至乳熟期, 热量的累积再次偏少, 积温距平转负并低于指标阈值, 说明后期温度转低, 再次发生冷害。勃利站在 1996、2006 年存在相同变化。同时还存在前期冷害、后期热量补偿充足或热量前期够用、后期不足发生冷害等情况, 研究区大部分站点在部分冷害年份均存在上述类似现象。可见, 基于 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平指标很好反映了一年内热量的波动变化, 分发育时期反映了热量供给状况, 从而可以很好评价不同时期热量满足的状态, 使冷害的判识更加接近实际情况, 并从时间上避免了以某一段时间代替全年或以全年代替某一时间来判识冷害的弊端。

2.2.2 冷害空间分布特征

从空间分布上看, 由图 3 可见, 玉米冷害具有群发性特点, 表现在同一年份研究区冷害普遍发生, 1984 年玉米出苗–乳熟期, 研究区 14 站发生冷害, 仅五常站未发生冷害, 在 1983、1987、1989、1992 等年份, 在不同的发育期内, 均有 10 站以上研究站点发生冷害。不同发育期的玉米冷害同时又表现出区域性、局地性特点, 在同一年份内各站积温距平表现为不一致性, 2014 年在玉米出苗–七叶期龙江、哈尔滨、集贤等 7 站积温距平低于指标阈值, 发生冷害, 7 站均

位于松嫩平原西南部和三江平原北部, 呈现区域性; 1994 年在玉米出苗–抽雄期, 仅龙江、富裕、方正、勃利、集贤 5 站出现冷害, 在玉米主产区呈分散性点状分布, 表现为局地性, 尤其在 1990 年代中期以后, 多数年份不足 5 站发生冷害, 呈现显著的局地性。

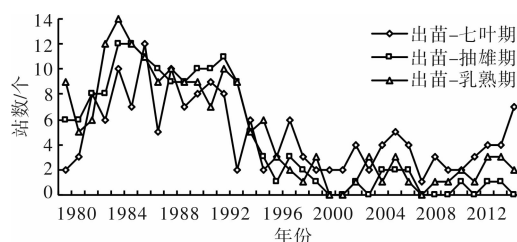


图3 1980–2014 年研究区各年发生冷害站数

图 4 给出了 1980–2014 年研究区各站发生冷害年数的变化趋势, 图中横坐标研究站点按照纬度高低严格排列, 从左至右站点的纬度度数逐渐降低。从图 4 可见, 研究区各站玉米各发育期的冷害年数由高纬度向低纬度地区呈现减少趋势, 即存在北多南少的特征, 在玉米各发育时期, 偏北地区发生冷害年数多在 11 年以上, 偏南地区不足 11 年。此种趋势与已有研究成果一致^[4]。

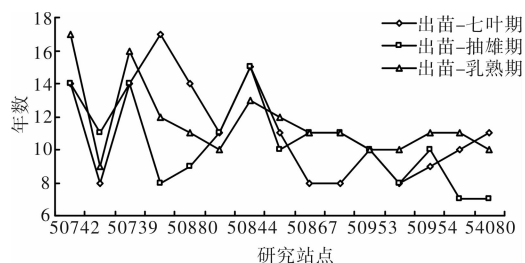


图4 1980–2014 年研究区各站发生冷害年数

2.3 积温距平周期变化

本研究采用墨西哥帽小波分析方法, 对玉米出苗–七叶期、玉米出苗–抽雄期、玉米出苗–乳熟期的各发育期研究区的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 平均积温距平进行周期变化分析。图 5 中正等值线用实线表示, 代表积温距平为正, 负等值线用虚线表示, 代表积温距平为负。由图 5 可见, 研究区 1980–2014

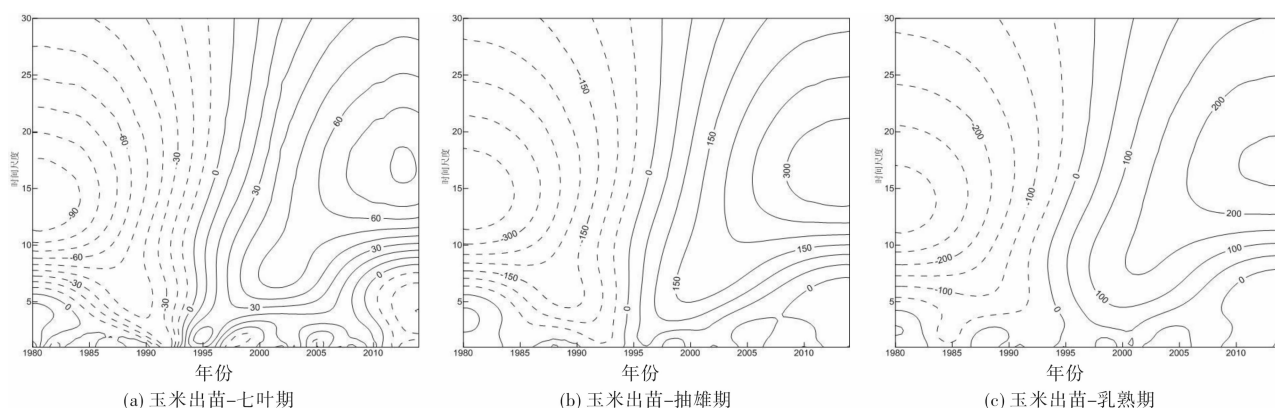


图5 研究区玉米出苗-七叶期、出苗-抽雄期、出苗-乳熟期积温距平小波变换图

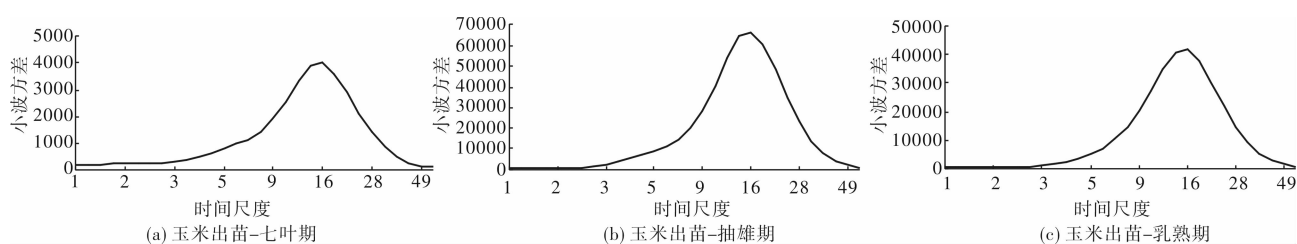


图6 研究区玉米出苗-七叶期、出苗-抽雄期、出苗-乳熟期积温距平小波方差

年玉米出苗-七叶期、出苗-抽雄期、出苗-乳熟期积温距平存在明显的周期变化。由图5a可见,在15~20年时间尺度上,玉米出苗-七叶期积温距平周期震荡表现为明显的低→高2个变化过程,1995年以前偏冷,之后为偏暖期。在小尺度上,2~5年左右的周期振荡也很显著。最近几年的积温距平变化,从小尺度周期来看,处于偏冷期。由图5b、图5c可见,在15~20年时间尺度上,玉米出苗-抽雄期、出苗-乳熟期积温距平变化一致,经历了低→高2个变化阶段,1995年以前偏冷,之后持续偏暖。从积温距平序列中存在的主要周期来看,图6中积温距平小波方差均有1个峰值,对应的时间尺度均为16年,说明在1980-2014年整个时间域内,玉米出苗-七叶期、出苗-抽雄期、出苗-乳熟期积温距平16年左右的周期震荡最强,为积温距平变化的主要周期。

2.4 积温距平与玉米实际单产的关系

本文以泰来站为例,分析 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平与玉米官方实际单产的震荡趋势。选取接近玉米全生育期的出苗-乳熟期分析,由图7可见,泰来站1980-2014年出苗-乳熟期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平变化与玉米单产变化具有高度的一致性,二者同步震荡,可见产量高低变化对 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平具有一定响应,当积温距平为负值且低于指标阈值即发生冷害时,玉米产量表现为偏低水平,这从一定程度上印证了冷害对玉米产量作用的负效应。进一步分析二者关系,利用研究区玉米官方实际单产资料,考虑温度变化对玉米产量的影响特点,

采用曲线估计的二次项回归方法建立玉米出苗-乳熟期积温距平与玉米实际单产的相关关系,结果表明,研究区67%的站点玉米出苗-乳熟期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平与玉米实际单产具有显著或极显著的相关关系($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),可见温度适宜与否对玉米产量的形成具有重要影响,温度极低或极高均对玉米增产不利(表4)。

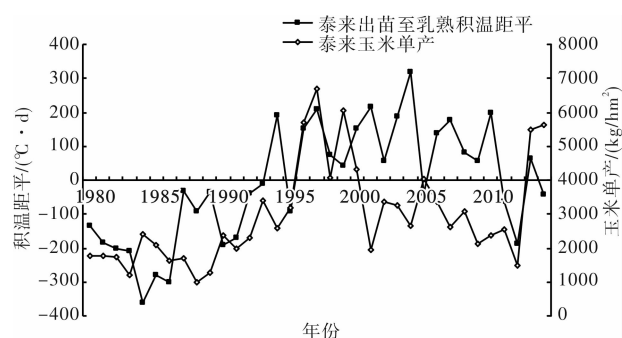


图7 泰来站1980-2014年玉米出苗-乳熟期积温距平及产量变化

由图8可见(以龙江、集贤站为例,其它研究站点图略),玉米实际单产随积温距平呈“抛物线”型变化,随着积温距平的升高,玉米实际单产也随之升高,当达到峰值后,玉米实际单产随积温距平的升高而下降,此种趋势符合温度对产量影响的变化规律,与陈立亭等^[3]的研究成果一致。从图中可以看出,当 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平即积温比常年值偏高100~200 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 左右时,玉米实际单产达到最高,说明充裕的热量利于玉米获得高产。

表 4 研究区玉米出苗 - 乳熟积温距平与玉米实际单产的相关关系

站点	回归方程	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	样本数
龙江	$Y = -0.026x^2 + 4.157x + 5580.2$	0.258 *	5.552	4.15	35
泰来	$Y = -0.007x^2 + 3.603x + 3183.1$	0.224 *	4.609	4.15	35
海伦	$Y = -0.002x^2 + 8.547x + 5744.8$	0.117	2.124	4.15	35
青冈	$Y = -0.020x^2 + 7.235x + 6028.2$	0.379 **	9.479	7.50	34
巴彦	$Y = -0.009x^2 + 13.233x + 8195.4$	0.418 **	11.468	7.50	35
勃利	$Y = -0.0009x^2 + 6.660x + 5091.9$	0.125	2.276	4.15	35
集贤	$Y = -0.020x^2 + 8.019x + 6347.9$	0.495 **	13.723	7.60	31
富裕	$Y = -0.009x^2 + 13.233x + 8195.4$	0.232 *	4.381	4.17	32
安达	$Y = -0.06x^2 + 1.006x + 6515.3$	0.129	2.217	4.17	33
佳木斯	$Y = -0.003x^2 - 3.362x + 5136.6$	0.038	0.585	4.17	33
哈尔滨	$Y = -0.001x^2 + 6.438x + 5969.9$	0.355 **	7.976	7.56	32
双城	$Y = -0.013x^2 + 4.922x + 8186.3$	0.253 *	5.240	4.15	34
肇源	$Y = -0.046x^2 + 3.725x + 6716.5$	0.245 *	4.378	4.20	30
方正	$Y = -0.021x^2 + 2.319x + 4695.9$	0.044	0.695	4.17	33
五常	$Y = -0.031x^2 + 16.807x + 7697.7$	0.337 *	6.876	4.20	30

注: * 和 ** 分别为通过 0.05 和 0.01 显著性检验

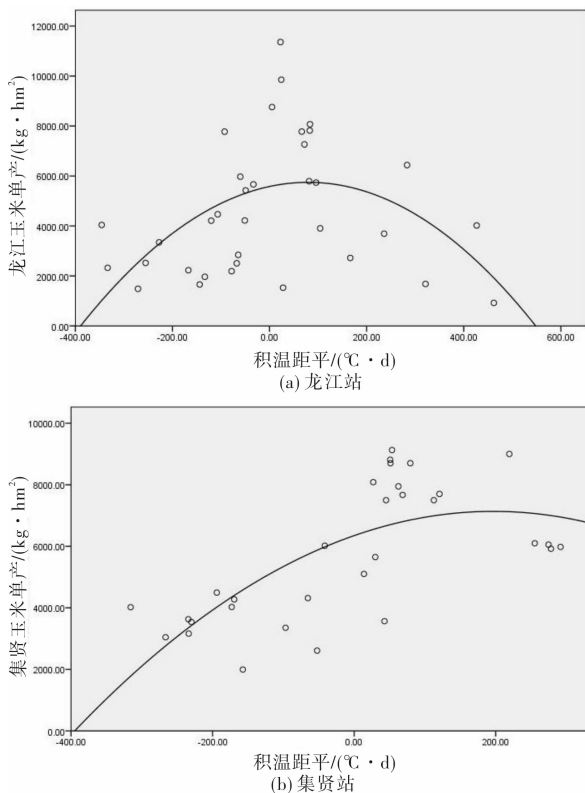


图 8 代表站积温距平与玉米实际单产的曲线变化

3 结论与讨论

(1) $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平指标与玉米发育期相结合, 赋予了玉米冷害判识指标的生物学和农学意义, 将气象条件状况和作物生育需求巧妙结合, 提升了作物冷害判识的客观性和适用性。

(2) 1980 - 2014 年间, 基于 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平指标判识的玉米不同发育期冷害年数总体为 7 ~ 17

年, 冷害发生对气候变暖趋势具有明显的响应, 表征 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平指标判识冷害与实际情况相符。

(3) 1980 - 2014 年研究区玉米不同发育期冷害的发生随时间呈减少趋势, 1980 年代是冷害集中高发期, 1990 年代发生频率下降, 21 世纪初, 冷害持续偏少, 进入 2010 年代, 冷害的发生呈现回升趋势。在同一年份内, 基于 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平动态判识的不同发育期冷害具有不连续性特点, 充分表征了积温距平指标能够很好反映一年内热量的波动变化, 分发育时期反映热量供给状况, 进而可以客观评价热量满足状态, 并从时间上避免了以某段时间代替全年或以全年代替某段时间来判识冷害的弊端。空间分布上, 冷害呈北多南少趋势, 同时具有群发性、区域性和局地性特点。

(4) 1980 - 2014 年间, 研究区玉米出苗 - 七叶期、出苗 - 抽雄期、出苗 - 乳熟期 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平具有明显的周期变化, 各发育期积温距平均存在 16 年左右的主要周期, 表现为 1995 年以前偏冷、之后偏暖, 但玉米出苗 - 七叶期积温距平嵌套 2 ~ 5 年的小尺度周期, 且存在最近几年偏冷的趋势。黑龙江省玉米出苗 - 七叶期处于后春 - 初夏期间, 由此可见, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平指标客观、准确地体现了春季气温变化明显、夏季气温变化相对稳定的气候变暖趋势, 这与丁一汇等^[21]、姜丽霞等^[22]的研究成果一致。

(5) 研究区 67% 的站点 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平与玉米实际单产存在显著或极显著的相关关系 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 表明温度适宜与否对玉米产量的形成具有重要影响, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平为 100 ~ 200 $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$, 利于玉米高产。

(6) 2016 年中共中央 1 号文件已将“深入推进农业结构调整”列为一项重要工作内容。目前在气

候变化影响下,虽热量资源增加,但同时灾害频发,程度呈加重趋势^[1],因此,发展现代农业应根据作物生育特性及其对气象条件的需求,充分考虑区域气候资源以及区域性灾害问题,对作物种植格局进行长远的规划布署和调整,做到趋利避害、合理高效利用气候资源。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability [M]//Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Makoto Kuroki, Koji Saito, Shuichi Matsuba, et al. A quantitative trait locus for cold tolerance at the booting stage on rice chromosome 8[J]. Theor Appl Genet, 2007, 115: 593-600.
- [3] 陈立亭,孙玉亭. 黑龙江省气候与农业[M]. 北京:气象出版社, 2000: 1-64.
- [4] 郭建平,马树庆. 农作物低温冷害监测预测理论和实践[M]. 北京:气象出版社, 2007: 26-62.
- [5] 刘实,王勇,缪启龙,等. 近 50 年东北地区热量资源变化特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 266-278.
- [6] 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[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6544-6551.
- [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价与区划[J]. 中国农业科学, 2014, 47(24): 4805-4820.
- [8] 李帅,王瞭瞭,陈莉,等. 黑龙江省玉米低温冷害风险综合评估模型研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(4): 635-645.
- [9] Humphreys M, Gasior D. Cold Tolerance[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 133-165.
- [10] 魏柱灯,方修琦,苏筠,等. 过去 2000 年气候变化对中国经济与社会发展影响研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 336-343.
- [11] 张倩,赵艳霞,王春乙. 我国主要农业气象灾害指标研究进展[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(6): 40-54.
- [12] 高晓容,王春乙,张继权. 气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2110-2118.
- [13] Leipner J, Choosak J, Karl-Heinz C, et al. QTL studies reveal little relevance of chilling-related seedling traits for yield in maize[J]. Theoretical & Applied Genetics, 2008, 116: 555-562.
- [14] 朱萌,周沫,乌兰,等. 吉林省东部水稻延迟型冷害的空间分布特征分析[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 223-228.
- [15] 姜丽霞,李帅,南瑞,等. 东北玉米低温冷害监测预测系统一在黑龙江省的应用[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 132-135.
- [16] 王春乙,张继权,霍治国. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 1-19.
- [17] 杨霁云,郭建平,马树庆,等. 北方春玉米冷害评估技术规范[M]. 北京:气象出版社, 2012: 1-5.
- [18] 国家气象局编定. 农业气象观测规范(上卷)[Z]. 北京:气象出版社, 1993: 7-12.
- [19] 陈克龙,李双成,周巧富,等. 江河源区达日县近 50 年气候变化的多尺度分析[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 526-533.
- [20] 姜丽霞,李帅,纪仰慧,等. 1980-2005 年松嫩平原土壤湿度对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 91-97.
- [21] 丁一汇,戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994, 20(12): 19-26.
- [22] 姜丽霞,吕佳佳,王瞭瞭,等. 黑龙江省气温日较差的变化趋势及其与作物产量的关系[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 179-185.

A Study on Dynamic Assessment of Maize Cold Damage and Relationship between Active Accumulated Temperature Anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ and Maize Yield

DU Chunying, JIANG Lixia, ZHU Haixia, GONG Lijuan and QU Huihui
(Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China)

Abstract: Based on the observation data from 15 agro-meteorological stations from 1980 to 2014 in Heilongjiang province, By using of the active accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ index for assessment of cold damage to maize in Northern China, this paper estimated the occurrence of maize cold damage during seeding emergence and seven leaves period, during seeding emergence and tasseling period, during seeding emergence and milky maturity period, and the temporal and spatial distribution of cold damage were analyzed. This paper investigated the relationship between active accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ and maize yield. The results showed that the sum of maize cold damage year is from 7 to 17 in the three critical development period during 1971 to 2014, and the occurrence of cold damage is consistent with climate warming trend. The frequency of cold damage year decreased and its appearance was high from 1980's to the middle 1990's. In whole study area, the frequency of cold damage year in North was higher than that in South areas, and the occurrence of cold damage showed the clustering, regional and local characteristics. From 1980 to 2014, the period of active accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ was about 16 years in a large scale, and the temperature was low before 1995 and it was warming after 1995, but during seeding emergence and seven leaves period, it had been cold in the recent years in a small scale. Correlation between active accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ and maize yield was significant in agricultural meteorological station from 67% stations, active accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ was $100 \sim 200^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ which was favorable to maize yield. Active accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$ indicated the biology and agronomy meaning of maize cold damage index, it showed the relation of heat supply and demand, which improved the objectivity of assessment of cold damage to maize.

Key words: active accumulated temperature anomaly $\geq 10^{\circ}\text{C}$; maize cold damage; index; maize yield