

姜丽霞, 吕佳佳, 曲辉辉, 等. 黑龙江省玉米生长期冷害与干旱混合发生对产量的影响[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 6-13. [JINAG Lixia, LV Jiajia, QU Huihui, et al. Effect of hybrid occurrence of cold damage and drought on maize yield in heilongjiang province[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 6-13. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.002.]

黑龙江省玉米生长期冷害与干旱混合发生对产量的影响^{*}

姜丽霞^{1,2}, 吕佳佳², 曲辉辉², 杨晓强², 季生太³, 李秀芬²,
张雪梅⁴, 王 铭², 王 萍²

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 2. 黑龙江省气象科学研究所/中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室/黑龙江省气象院士工作站, 黑龙江 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江省生态气象中心, 黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 哈尔滨市气象局, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘 要: 基于1981-2016年黑龙江省玉米农业气象观测站资料, 利用国家气象行业标准中 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、水分亏缺指数(K_{CWDI})指标分别判识玉米出苗-抽雄期冷害、干旱, 规定同一站点同一年份内冷害、干旱均有发生为2种灾害混合发生, 分析其时空分布特征, 以逐步回归方法构建积温距平、 K_{CWDI} 与玉米单产的关系, 并探讨2种灾害混发逆境对玉米产量的影响。结果表明: 1981-2016年间, 研究区玉米出苗-抽雄期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平对气候变暖具有明显响应, 呈显著增加趋势($P < 0.01$), 空间上呈北低南高特征; K_{CWDI} 随时间呈波动式下降变化($P > 0.05$), 空间上表征为西多东少趋势, 较好反映研究区水分资源配置特征; 在分析期内, 各站玉米出苗-抽雄期冷害、干旱混合发生年数为2~12年, 研究区累计发生94年, 两种灾害混合发生随时间呈减少趋势, 1990年代中期以前密集发生, 之后发生频率下降, 空间上, 两种灾害混合发生表现为由西至东减少趋势, 松嫩平原西部为频发区; 玉米出苗-抽雄期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、 K_{CWDI} 与玉米单产存在显著或极显著的相关关系($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平下降、 K_{CWDI} 增大, 玉米产量呈下降趋势; 玉米出苗-抽雄期冷害与干旱混发逆境对玉米产量以负效应影响为主。

关键词: 冷害; 干旱; 玉米产量; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平; 水分亏缺指数; 黑龙江省

中图分类号: X43; P642; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)04-0006-08
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.002

黑龙江省为全国最大的农业省份, 其玉米总产占全国玉米总产近30%, 目前已成为“藏粮于地”的主要区域。然而, 黑龙江省位于中国最北部, 在全球气候变暖及大陆性季风气候影响下, 该省在作物生长季内极易发生低温冷害和干旱灾害^[1-2], 两种灾害恰为影响玉米生产的最大因素^[3-4], 常常造成玉米减产^[5-6], 混合发生时所造成的影响和损失更为严重^[7-8], 尤其, 与气候变暖相伴发生的低温冷害、季节性干旱气候变率增大对黑龙江省玉米生产稳定性造成巨大影响, 使玉米生产风险进一步增加。因此, 研究明确黑龙江省玉米生产关键时期低温冷害和干旱混合发生特点及其对玉米产量的影响, 对玉米生产趋利避害

及保障国家粮食安全具有重要意义。

1980年代以来, 国内外相关领域专家和学者对低温冷害、干旱等灾害的研究愈显全面化和精细化^[9-12]。研究表明, 两种灾害的发生存在明显区域性、季节性特征^[11,13], 低温冷害此种特征表现更强, 多发于中国北部的作物生长季节, 尤以黑龙江省最为频发^[1,5,12,14]。不同区域、不同季节、不同作物发育期内, 灾害指标也不尽相同, 在气候变化持续影响下, 研究者不断修订、完善、更新两种灾害指标^[14-15], 并建立了两种灾害监测预测模型及风险评估模型^[16-18], 以适应不同时期粮食生产和气象服务保障需求。从低温冷害、干旱对玉米的具体影响来看, 短时低温危害对玉米生

^{*} 收稿日期: 2019-04-23 修回日期: 2019-06-18

基金项目: 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联合开放基金项目(2019SYIAE04); 中国气象局沈阳大气环境研究所区域合作项目(2018SYIAEHZ1); 国家自然科学基金项目(31671575, 31671576)

第一作者简介: 姜丽霞(1972-), 女, 吉林德惠人, 硕士, 正研级高级工程师, 主要从事应用气象和气候资源的相关研究。

E-mail: hljlxs@163.com

通讯作者: 王萍(1976-), 女, 辽宁锦州人, 硕士, 主要从事应用气象和气候资源的相关研究. E-mail: nqzxp@163.com

长影响不大^[19], 每天持续 1~4 h 的 14~20℃ 的温度能够有效减少 5℃ 低温对玉米最终产量的不利影响^[20], 但低温时间延长则会导致玉米生育期推迟, 产量出现不同程度下降, 且温度越低、低温持续时间越长, 影响越大^[21-22]; 不同时期低温的影响也不同, 表现为灌浆初期>抽雄期>苗期, 减产率在 2.1%~16.99% 之间^[23]; 干旱抑制玉米生长, 常导致发育期延迟、发育不良、植株矮小^[24-25], 出苗期延迟 1d, 玉米单产即下降 2.9%^[6], 不同季节、不同程度干旱对玉米生长和产量影响不同, 严重夏旱导致大幅度减产, 减产率为 39.6%, 而春、夏、秋连旱几乎造成绝产, 减产率高达 70.5%^[26]。

前人多选择单一灾害进行研究分析, 所得结论通常为一种灾害对玉米的影响评估。而在黑龙江省玉米生长的同一时期, 经常会出现低温冷害、干旱混合发生现象, 而两种灾害混合发生对玉米产量的影响状况仍未十分明确, 且相关研究报道仍较少见, 基于此, 利用更新气象数据、采用国家气象行业标准, 分析黑龙江省玉米生长期低温冷害、干旱混合发生时空演变特征, 研究低温冷害、干旱交叉逆境对玉米产量的影响, 为深入探讨产量损失的量化细化, 进而揭示多种灾害对作物产量影响机制提供技术支撑, 以期对玉米安全生产、防灾减灾及高产稳产田的布局提供气象参考。

1 资料和方法

1.1 资料来源

选取黑龙江省龙江、双城、五常、集贤、勃利等 15 个玉米农业气象观测站进行研究, 15 站玉米农业气象观测资料较完整, 且均匀分布在黑龙江省玉米主产区, 玉米年种植面积多在 10 万 hm^2 以上, 能够代表黑龙江省玉米生产实际状况, 15 站的地理位置也能够很好反映热量、水分等气候因子分布概况和趋势, 保证了研究的客观性。根据研究站点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 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 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》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

站号	站名	纬度/(°)	经度/(°)	品种熟型	所属行政区域
50742	富裕	47.8	124.48	中熟	
50739	龙江	47.33	123.18	中熟	松嫩平原
50844	泰来	46.4	123.42	晚熟	西部
50854	安达	46.38	125.32	晚熟	
50756	海伦	47.43	126.97	中熟	松嫩平原
50851	青冈	46.68	126.1	晚熟	松嫩平原
50953	哈尔滨	45.75	126.77	晚熟	北部
50955	双城	45.38	126.3	晚熟	平原
54080	五常	44.9	127.15	晚熟	松嫩平原
50954	肇源	45.5	125.08	晚熟	南部
50867	巴彦	46.08	127.35	晚熟	松嫩平原
50964	方正	45.83	128.8	中熟	东部
50880	集贤	46.72	131.12	中熟	
50973	勃利	45.75	130.58	晚熟	三江平原
50873	佳木斯	46.82	130.28	中熟	

1.2 研究方法

1.2.1 玉米低温冷害、干旱判别

本文选择玉米出苗-抽雄期为研究时间段, 该时间段内的玉米出苗期、拔节期和抽雄期采用中国气象局《农业气象观测规范》中规定观测的普遍发育期。国家气象行业标准《北方春玉米冷害评估技术规范(QX/T167-2012)》^[27]、《北方春玉米干旱等级(QX/T259-2015)》^[28]中规定了玉米冷害、干旱的评估指标, 参照两个标准, 本文分别以 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距平(H)、水分亏缺指数(K_{CWDI})作为判别玉米冷害、干旱的指标。对于冷害: 在玉米出苗-抽雄期, 当积温距平 $H < -40^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $H < -45^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $H < -50^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 时, 判别玉米早熟、中熟、晚熟品种分别发生延迟型冷害^[27]; 对于干旱, 文献^[28]中将出苗-抽雄期划分为出苗-拔节期、拔节-抽雄期, 且未考虑作物熟型, 即所定指标普适于任意熟型品种, 则参考该标准, 本文规定在玉米出苗-拔节期, 水分亏缺指数 $K_{\text{CWDI}} > 50\%$ 时发生干旱, 拔节-抽雄期水分亏缺指数 $K_{\text{CWDI}} > 35\%$ 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-抽雄期发生干旱。

本文依据如上指标对玉米出苗-抽雄期的低温冷害、干旱分别进行判别, 若在同一站点同一年份内, 玉米出苗-抽雄期低温冷害、干旱均有发生, 则规定为低温冷害、干旱混合发生, 若仅有一种灾害发生, 则视为无低温冷害、干旱混合发生。

1.2.2 数据处理及分析

文献^[27-28]中对玉米出苗-抽雄期 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温距

平及水分亏缺指数的计算方法阐述详细, 本文不再赘述。利用两个标准中的方法计算 H 及 K_{CWDI} 并进行判识。将低温冷害、干旱混合发生年数与资料序列总年数的比值作为低温冷害和干旱混合发生频率。本文常年值取 1981–2010 年的平均值。利用气候统计方法对所有研究站点各项数据进行统计处理, 以 SPSS statistics 17.0 处理软件进行数据分析。采用数理统计、气候倾向率、Mann–Kendall 检测法^[30] 等方法, 研究玉米 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平和水分亏缺指数的变化趋势以及低温冷害、干旱混合发生的变化特征。利用逐步回归方法分析 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、水分亏缺指数与玉米产量的关系。

2 结果与分析

2.1 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平变化及冷害判识

2.1.1 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平时空变化

1981–2016 年, 研究区玉米出苗–抽雄期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平呈显著升高趋势, 增幅为 $88.8^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}/10$ 年 ($P < 0.01$), 积温距平呈明显的少–多变化, 负距平集中于 1990 年代中期之前; 之后出现急转式升高变化。年代际变化表征为先增后减, 表明最近几年的积温距平与 21 世纪初相比有所减

少。Mann–Kendall 法对各区域 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平突变检验表明, 全研究区、松嫩平原、松嫩平原西部均在 1994 年发生 1 次突变, 松嫩平原北部、东部、南部分别在 1993、1997、1996 年分别发生 1 次突变, 三江平原未发生突变。

在空间上, 研究区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平在经向上不存在明显的变化规律, 表现出低–高的间隔式分布, 在纬向上呈北低南高趋势, 峰值出现在哈尔滨站, 谷值出现在泰来站。从两大平原分区平均积温距平大小来看, 表现为松嫩平原南部 > 三江平原 > 松嫩平原北部 > 松嫩平原西部 > 松嫩平原东部。

2.1.2 冷害判识

选取泰来、哈尔滨、海伦、巴彦、集贤站分析单站积温距平变化及对冷害的判识情况。5 站为玉米主要种植市(县), 地理位置较具代表性, 分别位于松嫩平原的西部、南部、北部、东部以及三江平原。由图 1 可见, 研究期间, 5 站 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平与研究区同步振荡, 呈少–多变化, 各站部分年份的距平值低于指标阈值, 形成冷害, 冷害年主要密集于 1990 年代中期以前, 之后积温距平多为正值或高于指标阈值, 形成冷害的年份骤减, 但部分区域 2010 年代以来冷害有回升趋势。

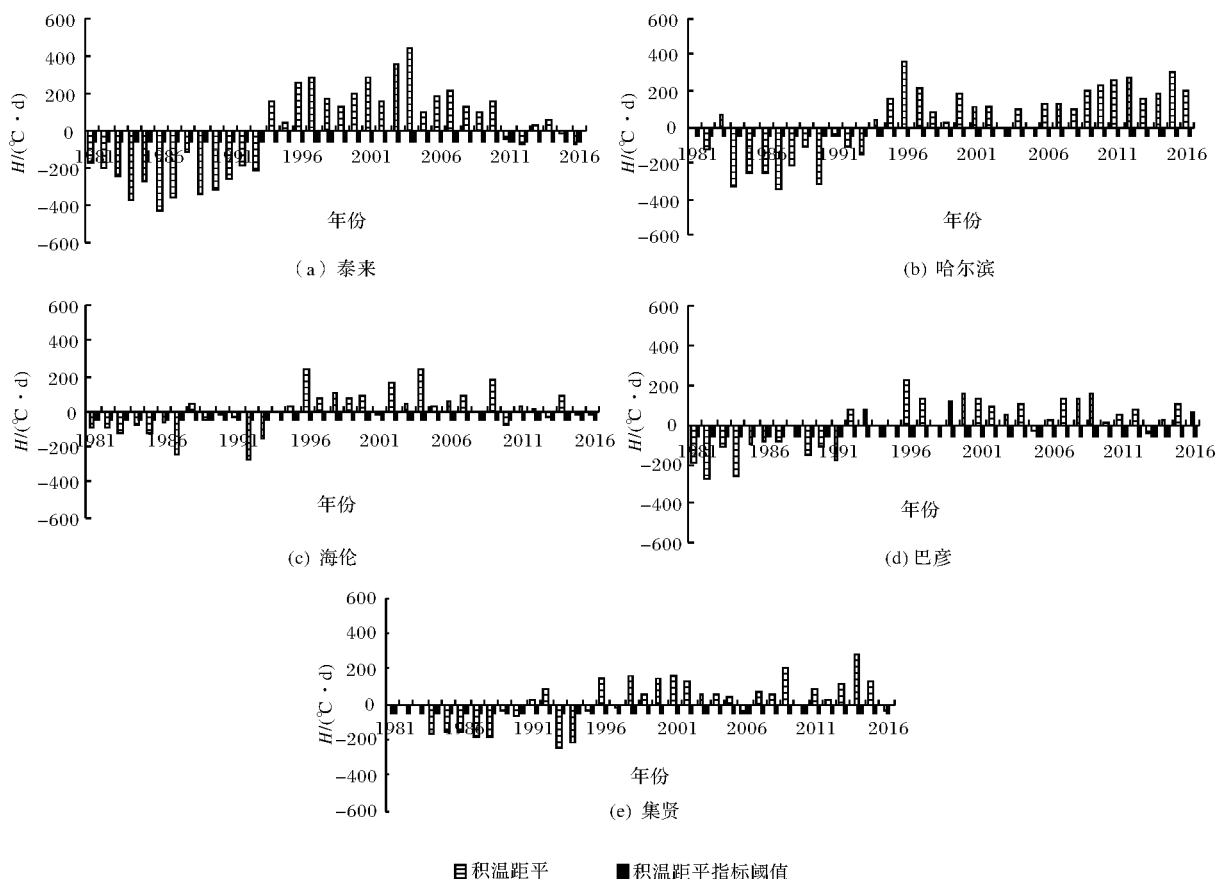


图 1 1981–2016 年代表站玉米出苗–抽雄期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平变化及与指标阈值比较

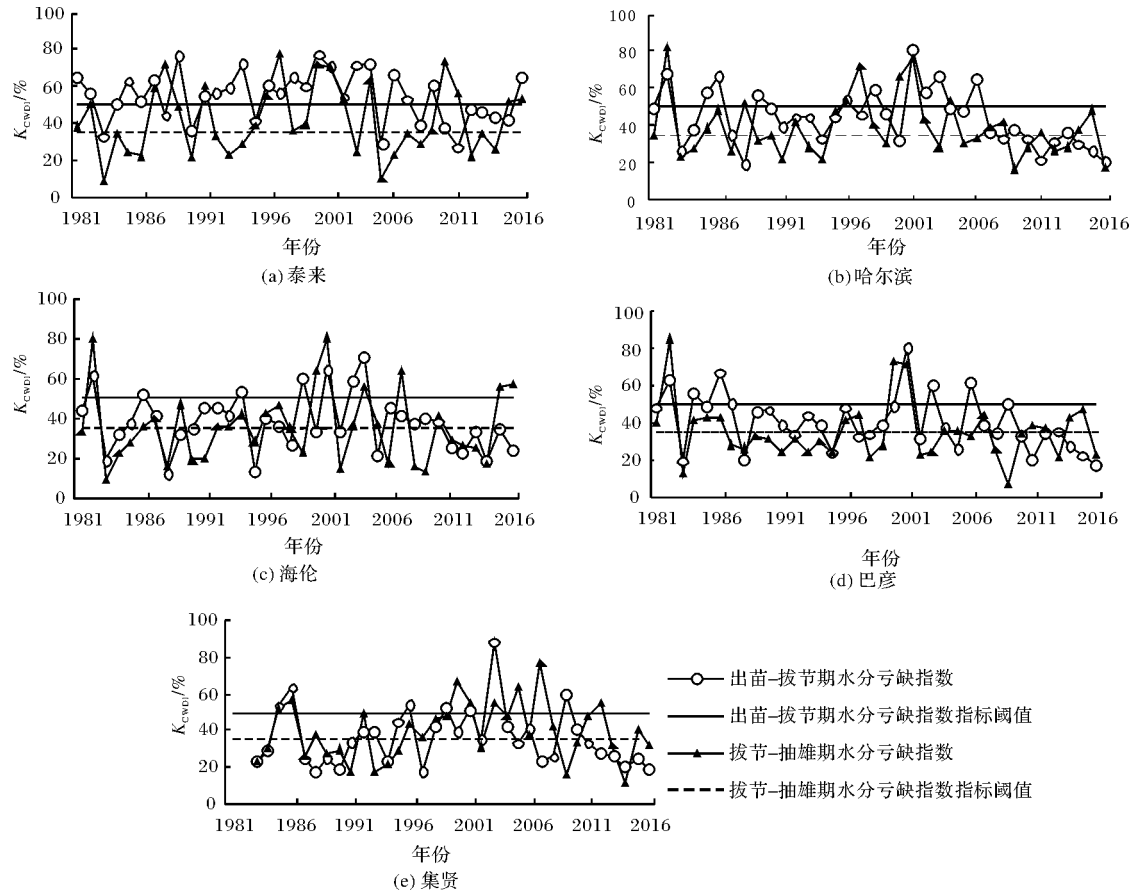


图2 1981-2016年代表站玉米出苗-拔节期、拔节期-抽雄期 K_{CWDI} 变化及与指标阈值比较

2.2 水分亏缺指数 (K_{CWDI}) 变化及干旱判识

2.2.1 K_{CWDI} 时空变化

1981-2016年, 研究区玉米出苗-抽雄期 K_{CWDI} 总体为波动式变化, 不存在明显下降趋势 ($P > 0.05$), 峰值、谷值分别出现在1982、1983年。年际间波动幅度不稳定, 呈阶段式变化, 1980年代前期, K_{CWDI} 波动较大; 1980年代后期至1990年代呈小幅波动; 21世纪以来, 最初几年 K_{CWDI} 振荡剧烈, 后期明显下降且波动趋于平稳, 期间2001的最高值比2014年的最低值偏高达150%。年代际变化呈先增加后减少趋势, 最近几年 K_{CWDI} 有所下降。Mann-Kendall法突变检验表明, 各区域 K_{CWDI} 在研究期间未发生突变。

在空间上, K_{CWDI} 在纬向上表现为“高-低-高-低-高”的波浪式分布特征; 在经向上呈西高东低态势, 基本由西向东逐渐减小, 峰值出现在泰来站, 谷值出现在方正站。比较分区的 K_{CWDI} , 表现为松嫩平原西部 > 松嫩平原南部 > 松嫩平原北部 > 三江平原 > 松嫩平原东部。

2.2.2 干旱判识

再以泰来、哈尔滨、海伦、巴彦、集贤站分析单站 K_{CWDI} 变化及对干旱的判识。由图2可见, 分析期内, 5站玉米出苗-拔节期、拔节-抽雄期

K_{CWDI} 呈波动式下降变化, 下降趋势均不明显 ($P > 0.05$), 比较而言, 松嫩平原南部的哈尔滨站和东部的巴彦站下降幅度相对较大, 海伦站次之, 而泰来站、集贤站则较微弱。在两个发育阶段内, 各站部分年份 K_{CWDI} 高于指标阈值, 即形成干旱。干旱的发生存在区域差异, 且松嫩平原站点的干旱年数明显多于三江平原。松嫩平原西部和南部干旱年呈离散式分布态势, 不存在明显集中时期, 而松嫩平原北部、东部以及三江平原干旱年在1980年代初期及21世纪2000年代较为集中, 但2010年代以来, 各区 K_{CWDI} 均下降较多, 干旱发生有所减少。

2.3 低温冷害、干旱混合发生特征

为了更加清晰直观地表达1981-2016年间玉米出苗-抽雄期冷害、干旱混合发生的年份, 取1~15做为冷害、干旱混合发生年份的示意值, 如图3所示, 即以图3中图例站名前标示的数值作为各站两种灾害混发年的示意值。由图3可见, 1981-2016年间, 研究区各站玉米冷害、干旱混合发生年数为2~12年, 全研究区累计94年, 总体来看, 冷害、干旱混合发生呈减少趋势, 发生年份主要密集于1990年代中期以前, 之后呈零散发生或未发生状态。在空间上, 存在由西至东减少趋

势,发生年数的高值中心处于松嫩平原西部,年数为9~12年;五常站、勃利站一线以东区域为低值区,年数在2~4年;其他区域处于中间状态,年数为5~8年。

从年代际变化趋势看,研究期间,玉米出苗-抽雄期冷害、干旱混合发生频率总体呈减少趋势,1980年代是冷害、干旱集中高发期,大部站点发生频率在2.8%~22.2%,1990年代发生频率有所下降,2000年代后持续较少,但部分站点2010年代以来有回升趋势。

2.4 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、 K_{CWDI} 与玉米单产关系

采用逐步回归方法分析 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、 K_{CWDI} 与玉米单产的相关关系,结果见表2,表中回归方程 y 为玉米单产, x_1 为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平, x_2 为水分亏缺指数。由表2可见,研究区全区、各分区及73%单站 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、 K_{CWDI} 与玉米单产呈显著或极显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)的相关关系,全研究区、5个分区及27%单站为双因子相关,而三江平原及47%单站为单因子相关,且单因子均为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平,这在一定程度上可以说明确 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平与玉米单产相关性更好。不同区域、不同站点相关显著性存在差异,总体上松嫩

平原好于三江平原,双因子相关性最好为全研究区, R^2 高达0.679,单因子相关性最好出现于松嫩平原东部的巴彦站。由表2可见,玉米出苗-抽雄期两种因子对玉米产量影响不同, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平与玉米单产呈正相关,表明温度对玉米产量的影响为正效应作用, K_{CWDI} 则恰好相反,说明水分亏缺量越大,对玉米产量负效应影响越大,总体来看,在一定温度、水分范围内,随着 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平减少、 K_{CWDI} 升高,玉米单产呈下降趋势。

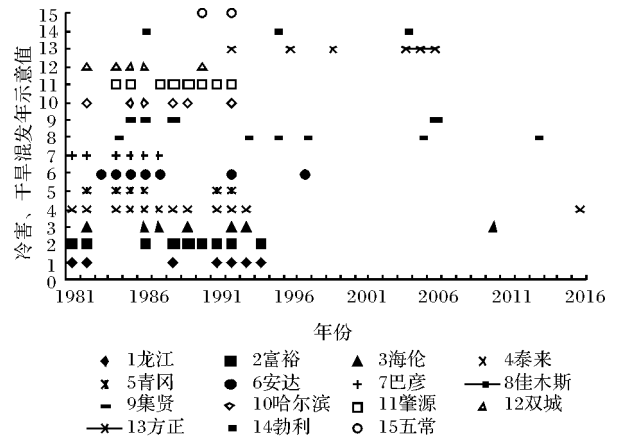


图3 研究区玉米出苗-抽雄期冷害、干旱混合发生年份示意图

表2 研究区玉米出苗-抽雄期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、水分亏缺指数与玉米单产的相关关系

区域(站点)	回归方程	R^2	F	F_0	样本数
全研究区	$y = 12.5x_1 - 77.7x_2 + 8743.4$	0.679**	34.864	7.44	36
松嫩平原	$y = 10.7x_1 - 82.3x_2 + 9080.9$	0.675**	34.224	7.44	36
三江平原	$y = 11.4x_1 + 5359.4$	0.205**	8.764	7.44	36
松嫩平原西部	$y = 4.5x_1 - 62.5x_2 + 7219.0$	0.366**	9.508	7.44	36
松嫩平原北部	$y = 11.9x_1 - 56.7x_2 + 7863.4$	0.557**	20.734	7.44	36
松嫩平原东部	$y = 12.9x_1 - 59.2x_2 + 8465.1$	0.265*	5.962	4.13	36
松嫩平原南部	$y = 10.8x_1 - 74.5x_2 + 9791.0$	0.658**	31.810	7.44	36
龙江	/	/	/	/	36
富裕	$y = 1.8x_1 + 4011.2$	0.118*	4.569	4.13	36
海伦	$y = 11.2x_1 + 6006.7$	0.271**	12.653	7.44	36
泰来	$y = 3.1x_1 + 3167.5$	0.233**	10.020	7.44	36
青冈	$y = 8.8x_1 - 78.3x_2 + 8671.3$	0.626**	26.762	7.50	35
安达	$y = 4.5x_1 - 111.9x_2 + 10911.7$	0.510**	16.648	7.50	35
巴彦	$y = 16.0x_1 + 7721.8$	0.601**	51.287	7.44	36
佳木斯	/	/	/	/	34
集贤	$y = 10.5x_1 + 5917.5$	0.375**	19.169	7.50	34
哈尔滨	$y = 7.2x_1 - 39.0x_2 + 7440.5$	0.553**	20.444	7.44	36
肇源	$y = 4.8x_1 - 124.6x_2 + 11929.8$	0.541**	18.895	7.50	35
双城	$y = 7.4x_1 + 8072.6$	0.281**	13.266	7.44	36
方正	/	/	/	/	36
勃利	/	/	/	/	36
五常	$y = 14.1x_1 + 7480.2$	0.443**	25.420	7.50	34

注: * 和 ** 分别为通过 0.05 和 0.01 显著性检验, “/” 表示未通过 0.05 或 0.01 显著性检验。

3 讨论

本文基于国家气象行业标准规定的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、水分亏缺指数判识玉米冷害、干旱, 判识效果理想, 与已有采用其他方法的研究结果基本一致, 对1983、1987、1989、1992年等冷害年以及1982、2005、2006、2016年等干旱年判识较为准确^[14,25,30]。与单纯气温、降水因子比较, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、 K_{CWDI} 具有双向指示作用, 一方面, 2个指标可用于判识冷害和干旱, 另一方面, 积温距平前低后高的时间特征指示了气候变暖趋势, 北低南高的空间分布准确表征了研究区热量配置, 而 K_{CWDI} 由西向东逐渐减小的变化特征及分区 K_{CWDI} 的高低变化则较好反映了研究区水资源分布状况。

与过去单一灾害的影响分析相比^[5-6,21,26], 本文探讨分析了同一区域、同一时期两种灾害混发逆境对作物产量的影响模式, 由表2的回归方程可知, 积温距平下降幅度越大(即表征低温程度越重)、 K_{CWDI} 增大幅度越大(表明干旱程度越重), 玉米单产下降越多, 这在一定程度上可以说明玉米出苗-抽雄期低温冷害、干旱的混发逆境对玉米产量影响以负效应为主, 且低温冷害、干旱程度愈重, 负效应影响愈大。进一步分析低温冷害、干旱混发的温水逆境条件, 以龙江县为例, 龙江县位于黑龙江省松嫩平原, 为玉米产粮大县, 玉米年种植面积达27.6万 hm^2 , 代表性较强, 考虑同一站、邻近年份具有更好可比性, 选择龙江站两种灾害混发年份1981、1982年分析玉米出苗-抽雄期的气温、 K_{CWDI} , 由图4可见, 龙江站1981年玉米出苗-抽雄期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平为 $-112.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, K_{CWDI} 呈波动式变化, 期间 $K_{\text{CWDI}} >$ 指标阈值的日数总计44d, 占出苗-抽雄期总日数的79%, 为非持续干旱状态, K_{CWDI} 平均值为53.9%(图4a); 1982年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平为 $-263.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, K_{CWDI} 持续偏大, 出苗-抽雄期 K_{CWDI} 持续大于指标阈值, 表现为持续干旱特征, K_{CWDI} 平均值为75.1%(图4b), 比较两年逆境条件可见, 1982年低温偏低幅度大, 比1981年偏低 $150.9^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 持续干旱时间长, K_{CWDI} 平均值为1981年的1.39倍, 即1981年表现为非持续干旱与低温同步发生, 而1982年表现为持续干旱伴随严重低温同步发生, 可见1982年两种灾害混发程度重于1981年, 再比较两年产量发现, 1982年产量较1981年下降 $308\text{Kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 即减产15.6%, 统计两年玉米抽雄后至成熟期间气象数据, 1981、1982年平均气温

分别为 17.4°C 、 19.1°C , 降水量分别为145.0 mm、147.6 mm, 日照时数分别为568.9 h、619.3 h, 可见两年在玉米抽雄期后总体光、温、水条件基本相当, 1982年甚至略好于1981年, 但由于其前期低温冷害、干旱混发程度重于1981年, 后期弥补作用相对较弱, 因此产量较1981年有所下降, 由此可见, 玉米出苗-抽雄期低温冷害、干旱混发逆境条件不同, 对玉米生长和产量影响不同, 在一定程度上, 持续干旱伴随严重低温同步发生的逆境条件对玉米影响更大。

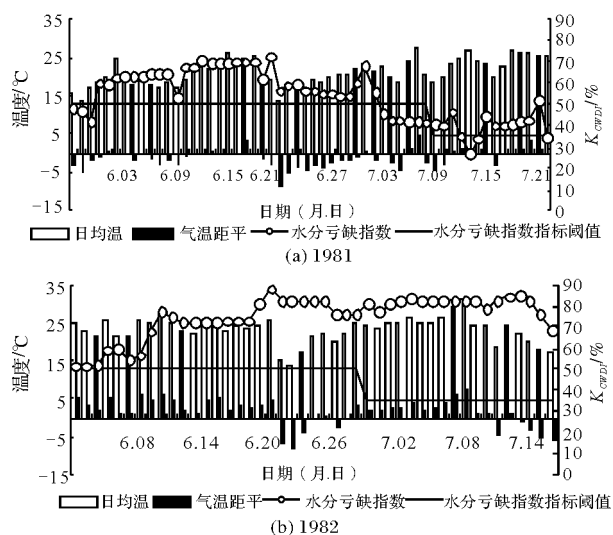


图4 龙江站代表年份1981年(a)、1982年(b)玉米出苗-抽雄期气温与 K_{CWDI} 变化比较

4 结论

(1)1981-2016年间, 研究区玉米出苗-抽雄期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平明显增加($P < 0.01$), 空间上呈北低南高趋势, K_{CWDI} 随时间呈波动式下降变化($P > 0.05$), 空间分布表现为明显的西高东低经向规律, 两种指标变化态势与已有研究结论一致, 对气候变暖趋势具有明显的响应^[30], 并准确反映了研究区热量资源、水分资源的空间配置。

(2)1981-2016年间, 研究区各站玉米出苗-抽雄期冷害、干旱混合发生年数为2~12年, 全区累计94年。冷害、干旱混合发生总体呈减少趋势, 1990年代中期以前为高发期, 之后骤然减少, 但部分站点2010年代开始有回升趋势。在空间上存在由西至东减少趋势, 松嫩平原西部为频发区, 其他区域发生较少。

(3)研究期间, 玉米出苗-抽雄期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平、 K_{CWDI} 与玉米单产存在显著或极显著的相关关系($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 2个因子对玉米产量

影响表现为正、负反向性作用,在一定温度、水分条件范围内, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平升高、 K_{CWDI} 减小,玉米产量呈升高趋势,反之呈下降趋势,表明温度升高、水分充沛利于玉米增产。

(4)玉米出苗—抽雄期自然条件下低温冷害、干旱混发逆境对玉米产量影响表征为复杂性,总体以负效应为主,两种灾害混合发生时程度不同、时间相同或不同等情况,均会对产量造成不同影响,在一定程度上,严重低温伴随持续干旱混合发生的逆境条件对玉米影响更大。目前来看,黑龙江省仍为“靠天吃饭”的农业大省,在进行作物种植布局时,应基于作物生育特性及对气象条件需求,重新分析气候持续变暖背景下区域气候资源匹配特征,开展区域易发频发农业气象灾害风险区划,研究评估气候条件及气象灾害对作物的影响,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,这部分内容应在今后工作中进行深入研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈莉,方丽娟,李帅. 东北地区近 50 年农作物生长季干旱趋势研究[J]. 灾害学, 2010, 25(4): 5–10.
- [3] Ali F, Bano A, Fazal A. Recent methods of drought stress tolerance in plants[J]. Plant Growth Regulation, 2017, 82(3): 363–375.
- [4] YIN X, Olesen J E, WANG M, et al. Impacts and adaptation of the cropping systems to climate change in the Northeast farming region of China[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 78: 60–72.
- [5] 马树庆,袁祝香,王琪. 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, 2003, 12(3): 137–141.
- [6] 马树庆,王琪,陈凤涛,等. 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, 2015, 31(S1): 171–179.
- [7] Hussain H A, Saddam H, Abdul K, et al. Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross talk, and potential management opportunities[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1–21.
- [8] 陈振林,张建平,王春乙,等. 应用 WOFOST 模型模拟低温与干旱对玉米产量的综合影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(4): 440–442, 445.
- [9] Anjum S A, Umair A, Mohsin T, et al. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1–12.
- [10] Beck E H, Fettig S, Knake C, et al. Specific and unspecific responses of plants to cold and drought stress[J]. Journal of Biosciences (Bangalore), 2007, 32(3): 501–510.
- [11] 刘航,蒋尚明,金菊良,等. 基于 GIS 的区域干旱灾害风险区划研究[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 198–203.
- [12] 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.
- [13] 刘笑,何学敏,游松财. 1986–2015 年华北平原农业气象灾害的变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 257–263.
- [14] 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.
- [15] 李秀芬,马树庆,姜丽霞,等. 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, 2017, 43(11): 1420–1430.
- [16] 张建平,刘宗元,王靖,等. 西南地区综合干旱监测模型构建与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 102–107.
- [17] 张建平,赵艳霞,王春乙,等. 不同时段低温冷害对玉米灌浆和产量的影响模拟[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(9): 115–121, 127.
- [18] 王春乙,蔡菁菁,张继权. 基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 238–245.
- [19] Creencia R P, Bramlage W J. Reversibility of chilling injury to corn seedlings[J]. Plant Physiology, 1971, 47(3): 389–392.
- [20] J Kościelniak, J Biesaga-Kościelniak. The effect of short warm breaks during chilling on water status, intensity of photosynthesis of maize seedlings and final grain yield[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2000, 184(1): 1–12.
- [21] 孙琳丽,侯琼,赵慧颖,等. 河套灌区不同强度低温冷害对玉米生物量累积和产量的影响[J]. 生态杂志, 2016, 35(1): 17–25.
- [22] 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[J]. 应用气象学报, 2018, 29(4): 505–512.
- [23] 张建平,赵艳霞,王春乙,等. 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, 2012, 28(36): 176–182.
- [24] 王静,杨晓光,李勇,等. 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, 2011, 22(6): 1511–1522.
- [25] 杨卫东. 黑龙江省气象灾害防御技术手册[M]. 北京:气象出版社, 2017: 97–102.
- [26] 马晓刚,李凝,周斌,等. 干旱对阜新粮食产量的影响研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 139–144.
- [27] 杨霏云,郭建平,马树庆,等. QX/T 167–2012 北方春玉米冷害评估技术规范[S]. 气象出版社, 2012: 1–6.
- [28] 李秀芬,马树庆,姜丽霞,等. QX/T 259–2015 北方春玉米干旱等级[S]. 气象出版社, 2015: 1–8.
- [29] 姜丽霞,王育光,孙孟梅,等. 黑龙江省玉米产量预报模式的研究[J]. 中国农业气象, 2004, 25(1): 13–16.
- [30] 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.

Effect of Hybrid Occurrence of Cold Damage and Drought on Maize Yield in Heilongjiang Province

JINAG Lixia^{1, 2}, LV Jiajia², QU Huihui², YANG Xiaoqiang²,

JI Shengtai³, LI Xiufen², ZHANG Xuemei⁴, WANG Ming² and WANG Ping²

(1. *The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China;*

2. *Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science/Innovation and Opening Laboratory of Regional Eco-Meteorology in Northeast, China Meteorological Administration/Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China;* 3. *Heilongjiang Ecometeorological Center, Harbin 150030, China;*

4. *Harbin Meteorological Bureau, Harbin 150028, China*)

Abstract: Based on the data of corn Agrometeorological Observatory in Heilongjiang Province from 1981 to 2016, the accumulated temperature anomaly ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) and water deficit index (K_{CWDI}) in the national meteorological industry standard were used to distinguish the cold injury and drought during the period of maize emergence and tasseling. It was stipulated that the cold injury and drought occurred in the same station in the same year should be a mixture of two disasters. The relationship between accumulated temperature anomaly, K_{CWDI} and maize yield was constructed by stepwise regression analysis, and the effects of mixed disaster adversity on maize yield were discussed. The results showed that during 1981-2016, the accumulated temperature anomaly of Maize at Seedling-heading stage ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) in the study area responded significantly to climate warming, showing a significant increasing trend ($P < 0.01$), showing the characteristics of low in the north and high in the south in space. K_{CWDI} fluctuated with time ($P > 0.05$). Spatially, K_{CWDI} tended to be more in the West and less in the east, which better reflected the characteristics of water resources allocation in the study area. During the analysis period, the number of years of cold injury and drought mixed occurrence in Maize emergence-heading period was 2-12 years. The cumulative occurrence of the two disasters in the study area was 94 years. The mixed occurrence of the two disasters tended to decrease with time. It occurred intensively before the mid-1990s and then decreased in frequency. Spatially, the mixed occurrence of the two disasters decreased from west to east. Less trend, the western Songnen Plain is a frequent area; the accumulated temperature anomaly of Maize at Seedling-heading stage ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), K_{CWDI} and maize yield have significant or extremely significant correlation ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature anomaly decreased, K_{CWDI} increased, maize yield showed a downward trend; the cold injury and drought mixed adversity at Maize Seedling-heading stage. The negative effect of environment on maize yield was dominant.

Key words: cold injury; drought; maize yield; accumulated temperature anomaly ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$); water deficit index; Heilongjiang Province