文章编号:1000-7601(2020)01-0255-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.33

黑龙江省玉米苗期低温冷害与干旱混发特征及其对产量的影响

姜丽霞[1],李秀芬[1],朱海霞[1],高 明[2],王秋京[1],
闫 平[1],宫丽娟[1],翟 墨[1],纪仰慧[1],王 萍[1]

(1.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;
2.黑龙江省气象局,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 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≥10℃积温距平、水分亏缺指数(K_{CWDI})等指标,分别对玉米出苗~七叶期冷害、干旱进行判识,规定同一站点同一年份内冷害、干旱均有发生为两种灾害混合发生,并分析其时空分布特征,以数理统计方法构建积温距平、K_{CWDI}与玉米单产的关系,同时应用相对产量方法探讨两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~七叶期≥10℃积温距平呈增加趋势($P<0.01$),空间上具有北低南高的纬向特征,K_{CWDI}随时间呈波动式变化,空间上表现为西多东少的经向规律,两种灾害指标的变化对气候变暖趋势及研究区资源分布配置具有明显响应;研究期间,各站玉米出苗~七叶期冷害、干旱混合发生年数为 0~10 a,研究区累计发生 59 a。时间上,两种灾害混合发生呈减少趋势,1990 年代中期以前为高发期,之后发生频率下降。空间分布上,两种灾害混合发生表现为由西至东减少趋势,频发区处于松嫩平原西部;玉米出苗~七叶期≥10℃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 $P<0.01$),前者为正效应影响,后者为负效应影响,表征≥10℃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;玉米出苗~七叶期冷害与干旱混发逆境对玉米产量影响总体以负效应为主。

关键词:≥10℃积温距平;水分亏缺指数;低温冷害;干旱;玉米;产量

中图分类号:S162.5;S513 **文献标志码**:A

Characteristics of combination of cold damage and drought during seedling period and its effects on maize yield in Heilongjang Province

JINAG Lixia[1], LI Xiufen[1], ZHU Haixia[1], GAO Ming[2], WANG Qiujing[1],
YAN Ping[1], GONG Lijuan[1], ZHAI Mo[1], JI Yanghui[1], WANG Ping[1]

(1. *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, Heilongjiang* 150030, *China*;
2. *Heilongjiang Province Meteorological Bureau, Harbin, Heilongjiang* 150030, *China*)

Abstract: Based on the observation data from agro-meteorological stations from 1981 to 2016 in Heilongjiang Province and by using of accumulated temperature anomaly ≥ 10℃ and water deficiency index (K_{CWDI}) indicators from the People's Republic of China meteorological industry standards for assessment of cold damage and drought to maize during seedling-seventh leaf period separately, this paper stipulated that combination emergence of two kinds of disasters, which cold damage and drought year occurred in the same year in the same station, and the temporal and spatial distributions of them were analyzed. The relationship between accumulated temperature anomaly ≥

收稿日期:2019-01-22 **修回日期**:2019-03-17

基金项目: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(31671575,31671576);中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室项目(stqx2019zd01)

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变化研究。E-mail:hljjlx@163.com

通信作者:王萍(1976-),女,辽宁锦州人,高级工程师,硕士,主要从事应用气象和气候变化研究。E-mail:nqzxwp@163.com

10℃, K_{CWDI}, and maize yield was constructed by mathematical and statistical method, and the effects of two kinds of disasters on maize yield were investigated by relative yield method. The results showed that accumulated temperature anomaly ≥10℃ increased($P<0.01$) from 1981 to 2016, and the latitude change was that accumulated temperature anomaly ≥10℃ was low in the north and high in the south, and K_{CWDI} fluctuated, and its longitude change was that K_{CWDI} was high in the west and low in the east during maize seedling-seventh leaf period in the study area, and this two kinds of disaster occurrence was consistent with climate warming trend and resource distribution in the research area. The sum of cold damage and drought years was from 0 to 10 in each station and the total number was 59 years in the whole study area during the research period. The frequency of cold damage and drought year decreased, and its appearance was frequent before mid-1990. After that, the frequency declined. The frequency of cold damage and drought year in the west was higher than that in the east, and there were frequent cold damage and drought years in Songnen Plain. Correlation between accumulated temperature anomaly ≥10℃, K_{CWDI}, and maize yield was significant ($P<0.05$ 或 $P<0.01$) in maize seedling-seventh leaf period, and accumulated temperature anomaly ≥10℃ had a positive impact on maize yield, and K_{CWDI} had a negative effect on maize yield, so the former increased and the latter decreased, which was favorable to maize yield. On the contrary, decrease in temperature and increase in water deficit were disadvantageous to maize yield increase. The effects of cold damage and drought stress on maize yield were mainly negative at maize seedling-seventh leaf stage.

Keywords: accumulated temperature anomaly ≥ 10℃; water deficiency index; cold damage; drought; maize; yield

黑龙江省为中国最大的玉米产区,近年其玉米种植面积和产量均居于全国首位,年种植面积和总产量均占全国15%以上,在保障全国粮食安全中占有举足轻重的地位。但黑龙江省处于中国最北部,受特殊地理位置和气候暖干化双重影响,极易发生低温冷害和干旱,对玉米生产影响较为显著[1-3],常常造成玉米产量下降,其中仅低温冷害就导致玉米减产15%以上[4-7],而低温冷害与干旱叠加的影响问题更为突出。

气候变暖及其引发灾害对农业、生态等领域造成的影响倍受各国政府、学术界乃至社会公众的广泛关注。国内外相关领域专家和学者一直致力于低温冷害、干旱等灾害及其对玉米的影响研究,并已取得显著成果[8-20]。大量研究明确了不同时期两种灾害变化趋势及演变特征[11],修订完善了灾害指标[12-13],建立了灾害监测预测模型及风险评估模型[14-16],分析探讨了两种灾害对玉米生长和产量的影响[17-20]。研究表明,在气候变暖影响下,低温冷害的发生存在不确定性特征,其在未来任何年份发生的可能性依然存在[21],同时,全球干旱大幅增加[8],21世纪干旱风险仍在升高[9],而与气候变暖相伴发生的低温冷害、季节性干旱等频率的增大更是对粮食生产稳定性造成巨大影响,使粮食生产风险进一步增加[22]。从低温冷害、干旱对玉米影响来看,苗期低温胁迫抑制玉米生长,并最终导致玉米生物量与产量下降[6],低温冷害严重时会出现死苗现象[20],当温度低于下限温度(10℃)2℃时,玉米灌浆时间推后1~6 d,减产6.29%~23.56%,低于4℃玉米灌浆时间推后1~7 d,减产率升高,为6.82%~28.12%,可见低温强度越大、持续时间越长,玉米减产越严重[23];干旱影响也体现在诸多方面,春末夏初干旱影响玉米播种、出苗,苗期干旱则抑制秧苗生长,造成植株矮小,发育不良[24],玉米生长期受旱会导致发育期延迟甚至全生育期延长,且较易引发减产[25],出苗期延迟1d即导致玉米单产下降2.9%[7],而2003年黑龙江省的春夏连旱更是导致玉米单产下降至该省1994—2014年间的最低值[24]。

纵观以往关于低温冷害、干旱及其对玉米的影响研究,发现研究者多选择单一灾害进行分析,获得的结论一般为一种灾害对玉米的影响评估。事实上,在高纬度寒地玉米生长的同一时期,常常会出现低温冷害、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,并且利用更新气象数据、采用中华人民共和国气象行业标准研究黑龙江省低温冷害、干旱混合发生特征及其对玉米产量影响的研究报道基本未见。基于此,针对最易发生低温冷害及春末夏初干旱的黑龙江地区,分析玉米生长初期低温冷害、干旱混合发生的时空演变特征,研究低温冷害、干旱叠加对玉米产量的影响,为深入探讨产量损失的量化细化、揭示多种灾害对作物产量的影响机制提供理论基础,以期为农业防灾减灾及作物种植结构调整提供参考。

1　资料来源与研究方法

1.1　研究区概况

研究区为中国高纬度寒区(47.80°—44.90°N,123.18°—131.12° E),处于东北平原的松嫩平原和三江平原,为一季农作物种植区,主要大宗粮食作物包括玉米、水稻、大豆。气候属高纬度大陆性季风气候,四季分明,为典型的雨热同季,且地势平坦、土壤肥沃,对发展农业生产具有明显优势。春末夏初(5—6 月)平均气温和降水变率大,常常出现低温、少水天气并易形成低温冷害和干旱,玉米出苗~七叶期恰处于该时间段,生长发育和产量形成受到影响[24]。该区 5—6 月平均气温为 16.6 ℃~18.6 ℃,降水量 110.6~158.9 mm,日照时数为 448.6~537.0 h。

1.2　资料来源

受玉米农业气象观测资料限制,选取黑龙江省 15 个玉米农业气象观测站进行研究,15 站均匀分布在黑龙江省玉米主产区内,玉米年种植面积基本在 1.0×10^5 hm^2 以上,可代表黑龙江省玉米生产实际状况,并能够很好反映热量、水分等分布概况和趋势,保证了研究的客观性,同时为了更加细致分析低温冷害、干旱对不同区域玉米的影响,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》[26] 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

Table 1　Situation of the station in the research area

站点名称 Station	纬度/° Latitude	经度/° Longitude	玉米品种熟型 Mature period of variety	区域 Region
富裕 Fuyu	47.80	124.48	中熟 Medium mature variety	松嫩平原西部 Western of Songnen Plain
龙江 Longjiang	47.33	123.18	中熟 Medium mature variety	
泰来 Tailai	46.40	123.42	晚熟 Late mature variety	
安达 Anda	46.38	125.32	晚熟 Late mature variety	
海伦 Hailun	47.43	126.97	中熟 Medium mature variety	松嫩平原北部 Northern of Songnen Plain
青冈 Qinggang	46.68	126.10	晚熟 Late mature variety	
哈尔滨 Harbin	45.75	126.77	晚熟 Late mature variety	松嫩平原南部 Southern of Songnen Plain
双城 Shuangcheng	45.38	126.30	晚熟 Late mature variety	
五常 Wuchang	44.90	127.15	晚熟 Late mature variety	
肇源 Zhaoyuan	45.50	125.08	晚熟 Late mature variety	
巴彦 Bayan	46.08	127.35	晚熟 Late mature variety	松嫩平原东部 Eastern of Songnen Plain
方正 Fangzheng	45.83	128.80	中熟 Medium mature variety	
佳木斯 Jiamusi	46.82	130.28	中熟 Medium mature variety	三江平原 Sanjiang Plain
集贤 Jixian	46.72	131.12	中熟 Medium mature variety	
勃利 Boli	45.75	130.58	晚熟 Late mature variety	

1.3　研究方法

1.3.1　*玉米低温冷害、干旱判识*　杨霏云等、李秀芬等分别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)[27]、北方春玉米干旱等级(QX/T259-2015)[28](以下简称为标准[27]、[28]),2 个标准中规定了玉米生长季内关键发育期冷害、干旱的评估指标,本文以≥10℃积温距平(H)作为指示玉米冷害的指标,以水分亏缺指数(K_{CWDI})作为判识玉米干旱的指标,以玉米出苗~七叶期为研究时间段,该发育期采用中国气象局《农业气象观测规范》[26] 中规定观测的普遍发育期。参照上述 2 个标准,确定玉米出苗~七叶期低温冷害、干旱判识指标:对于冷害,当积温距平 $H<-30$℃ · d、$H<-35$℃ · d、$H<-40$℃ · d时,判识玉米早熟、中熟、晚熟品种分别发生延迟型冷害[27];对于干旱,标准[28]中未考虑作物熟型,即所定指标普适于任意熟型品种,则参考标准[28]规定当水分亏缺指数 $K_{CWDI}>50\%$时即发生干旱。本文依据如上指标对玉米出苗~七叶期的低温冷害、干旱分别进行判识,若在同一站点同一年份内,玉米出苗~七叶期低温冷害、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。

1.3.2　*玉米产量分析*　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,则作物单位面积产量的变化主要是由气象条件差异引起[29]。一般情况下,气象部门在日常业务和科研工作中常以产量比较值评价产量

的增(减)幅度。本文采用产量比较值分析玉米单产变化状况,公式如下:

$$\Delta Y_i = (\frac{Y_i}{Y_N} - 1) \times 100\%$$

式中, ΔY_i 为某站点第 i 个低温冷害和干旱混合发生年份的玉米单产增(减)百分率(%),正值(或负值)代表产量增加(或减少); Y_i 为某站点第 i 个低温冷害和干旱混合发生年份的玉米单产(kg·hm^{-2}); Y_N 为某站点某时间段的玉米平均单产(kg·hm^{-2}),在计算平均单产时,本文参考气象部门在日常业务和科研工作中对年数的取值,即取时间步长为 5 a,本文起始年为 1981 年,终止年为 2015 年,期间每 5 a 求算一个单产平均值。由于较为邻近年份内产量可比性更佳,因此,当某站点第 i 个低温冷害和干旱混合发生年份出现于 1981—1985 年之间时, Y_N 取 1981—1985 年的平均值,出现于 1986—1990 年之间时, Y_N 取 1986—1990 年的平均值,以此类推,当 2016 年出现时, Y_N 取 2011—2015 年的平均值。

1.3.3 *数据处理及分析* 玉米出苗~七叶期≥10℃积温距平及水分亏缺指数的计算方法见中华人民共和国气象行业标准[27]、[28]。利用 2 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[5]、墨西哥帽小波分析[30]等方法,研究玉米≥10℃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≥10℃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 ≥10℃积温距平变化及冷害判识

2.1.1 *≥10℃积温距平时空变化* 1981—2016 年,研究区玉米出苗~七叶期≥10℃积温距平总体呈显著升高趋势,增幅为 18.3℃·d·$10a^{-1}$(P<0.01),积温距平呈少—多—少变化趋势,负距平集中于 1980 年代至 1990 年代初期;1990 年代中期至 2000 年代,积温距平多为正值;2010 年代为转折时期,积温距平有所减少,说明近几年温度存在下降趋势(图 1)。利用 Mann-Kendall 法对各区域≥10℃积温距平进行突变检验表明,仅全研究区和松嫩平原西部分别在 1993、1994 年发生 1 次突变。

在空间上,研究区≥10℃积温距平总体呈北低南高趋势,积温距平由北至南"跳跃式"升高,峰值出现在安达站,谷值出现在泰来站;≥10℃积温距平在经向上不存在明显的变化规律,处于西部的站点多为负距平,中东部站点积温距平表现为低—高的间隔式分布(图略)。从两大平原分区平均积温距平大小来看,表现为松嫩平原西部<三江平原<松嫩平原东部<松嫩平原南部<松嫩平原北部。

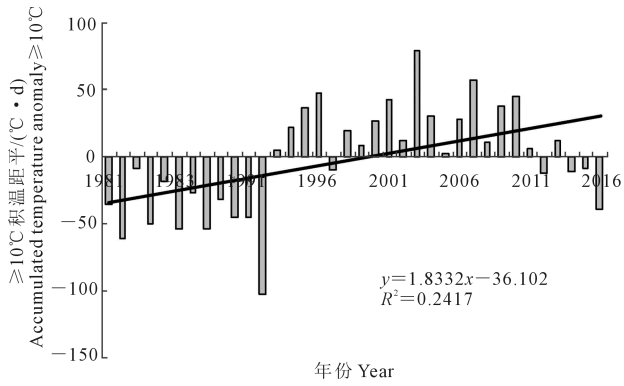


图 1 研究区玉米出苗~七叶期≥10℃积温距平时间变化

Fig.1 Temporal change of accumulated temperature anomaly ≥10℃ during maize seedling to seventh leaf period in the study area

2.1.2 *≥10℃积温距平周期变化* 小波分析方法对于分析时间序列在不同尺度上的演变特征非常有效。图 2 为玉米出苗~七叶期研究区≥10℃积温距平变化的小波变换结果。图 2(a)中正等值线用实线表示,代表积温距平偏高,负等值线用虚线表示,代表积温距平偏低。由图 2 可见,研究区 1981—2016 年玉米出苗~七叶期积温距平存在明显的周期变化,较大尺度变化嵌套着复杂的小尺度变化。由图 2(a)可见,在 10~15 a 时间尺度上,玉米出苗~七叶期积温距平周期振荡表现为明显的低—高 2 个变化过程,1995 年以前偏冷,之后转暖。在小尺度上,2~5 a 左右的周期振荡也很显著,且最近几年处于偏冷期。从积温距平序列存在的主要周期来看,图 2(b)中积温距平小波方差有 1 个峰值,对应的时间尺度为 14 a,说明在 1981—2016 年整个时间域内,玉米出苗~七叶期积温距平 14 a 左右的周期振荡最强,为积温距平变化的主要周期。

2.1.3 *冷害判识* 选取泰来、哈尔滨、青冈、巴彦、集贤站分析单站积温距平变化及对冷害的判识情况,该 5 站分别位于研究区松嫩平原的西部、南部、北部、东部以及三江平原,地理位置具有明显的代

表性,且均为玉米产区内主要种植市(县)。由图 3 可见,研究期间 5 站≥10℃积温距平与研究区同步振荡,基本呈少—多—少变化,各站部分年份的距平值低于指标阈值,即形成冷害,冷害年主要密集于 1990 年代中期前,1990 年代中期至 21 世纪初,积温距平多为正值或高于指标阈值,形成冷害的年份明显减少;进入 2010 年代,冷害发生又呈回升趋势。

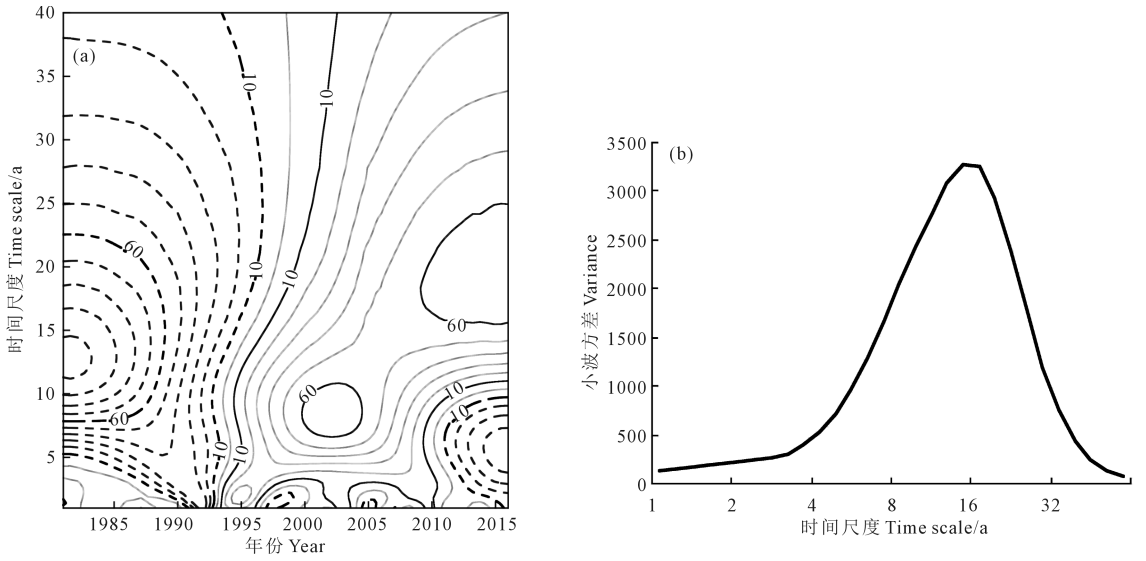


图 2　1981—2016 年研究区玉米出苗~七叶期积温距平小波变换(a)及方差(b)

Fig.2　Wavelet (a) and variance (b) of accumulated temperature anomaly ≥10℃ during maize seedling to seventh leaf period in the study area from 1981 to 2016

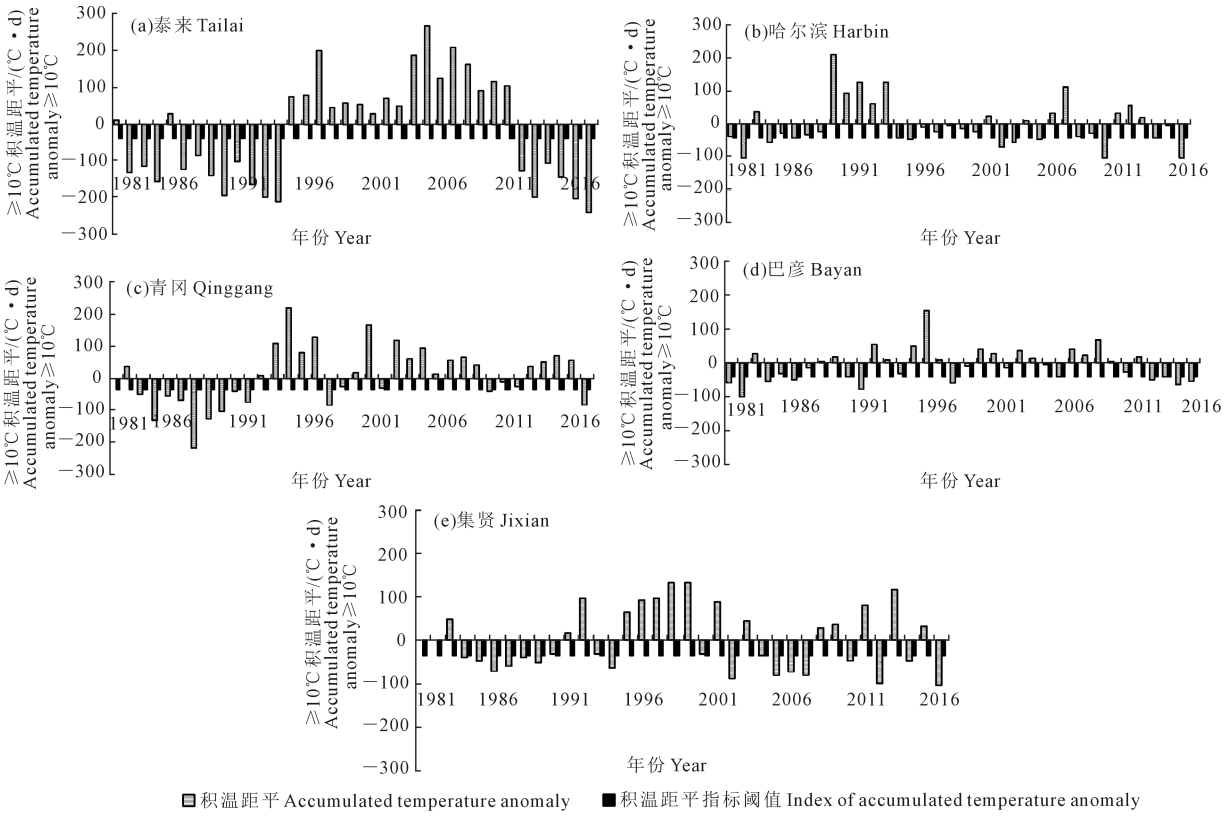


图 3　1981—2016 年代表站玉米出苗~七叶期≥10℃积温距平变化及与指标阈值比较

Fig.3　Temporal change of accumulated temperature anomaly ≥10℃ and comparison with index value during maize seedling to seventh leaf period in the representative station from 1981 to 2016

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~七叶期 K_{CWDI}总体为波动式变化,不存在明显下降趋势($P>0.05$)。年际间波动幅度大,不同时间段呈现不同变化态势,1980 年代 K_{CWDI}波动较大,1990 年代相对稳定,为小幅变化,21 世纪以来,K_{CWDI}振荡较强,年际间变幅大,2003 年的最高值与 2011 年的最低值偏差高达 56.0%,而最近几年波动有所减弱(图 4)。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}在纬向上不存在明显的变化规律,总体上呈高—低—高—低—高的分布趋势;在经向上呈明显的西高东低态势,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(图略)。

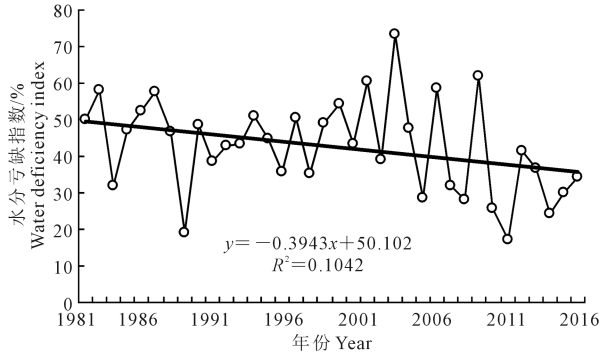


图 4 1981—2016 年研究区玉米出苗~七叶期水分亏缺指数的变化

Fig.4 Change of K_{CWDI} during maize seedling to seventh leaf in the study area in 1981-2016

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>松嫩平原东部>三江平原。

2.2.2 K_{CWDI}周期变化 图 5 为玉米出苗~七叶期研究区 K_{CWDI}变化的小波变换结果。图 5(a)中正等值线用实线表示,代表 K_{CWDI}偏大,负等值线用虚线表示,代表 K_{CWDI}偏小。由图 5 可见,研究区 1981—2016 年玉米出苗~七叶期 K_{CWDI}存在明显的周期变化,较大尺度变化嵌套着复杂的小尺度变化。由图 5(a)可见,在 5~10 a 时间尺度上,玉米出苗~七叶期 K_{CWDI}周期振荡表现为明显的大—小 2 个循环交替,2005 年以前 K_{CWDI}偏大,之后偏小,直到 2016 年等值线未闭合,说明在 2016 年以后的一段时间内 K_{CWDI}仍将偏小。在小尺度上,2~5 a 左右的周期振荡较活跃。从 K_{CWDI}存在的主要周期来看,图 5(b)中 K_{CWDI}小波方差有 1 个峰值,对应的时间尺度为 8 a,说明在 1981—2016 年整个时间域内,玉米出苗~七叶期 K_{CWDI} 8 a 左右的周期振荡最强,为 K_{CWDI}变化的主要周期。

2.2.3 干旱判识 以泰来、哈尔滨、青冈、巴彦、集贤站分析单站 K_{CWDI}变化及对干旱的判识。由图 6 可见,研究期间 5 站 K_{CWDI}下降趋势均不明显($P>0.05$),比较而言,松嫩平原东部的巴彦站和南部的哈尔滨站下降幅度相对较大,青冈站次之,而泰来站、集贤站则较微弱。各站部分年份 K_{CWDI}高于指标阈值,即形成干旱。干旱年在研究期间呈“发散状”分布,不存在明显集中时期,但 2010 年代以来,K_{CWDI}下降较多,干旱发生减少。另外,位于松嫩平原的站点干旱年数明显多于三江平原的站点。

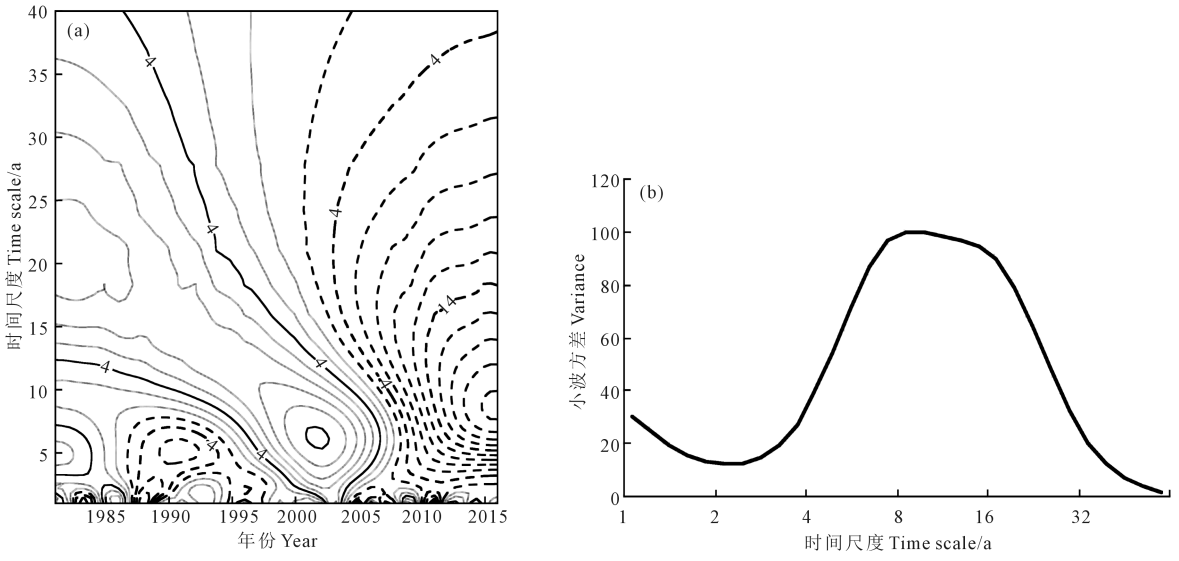


图 5 1981—2016 年研究区玉米出苗~七叶期 K_{CWDI}小波变换(a)及方差(b)

Fig.5 Wavelet (a) and variance (b) of K_{CWDI} during maize seedling to seventh leaf period in the study area from 1981 to 2016

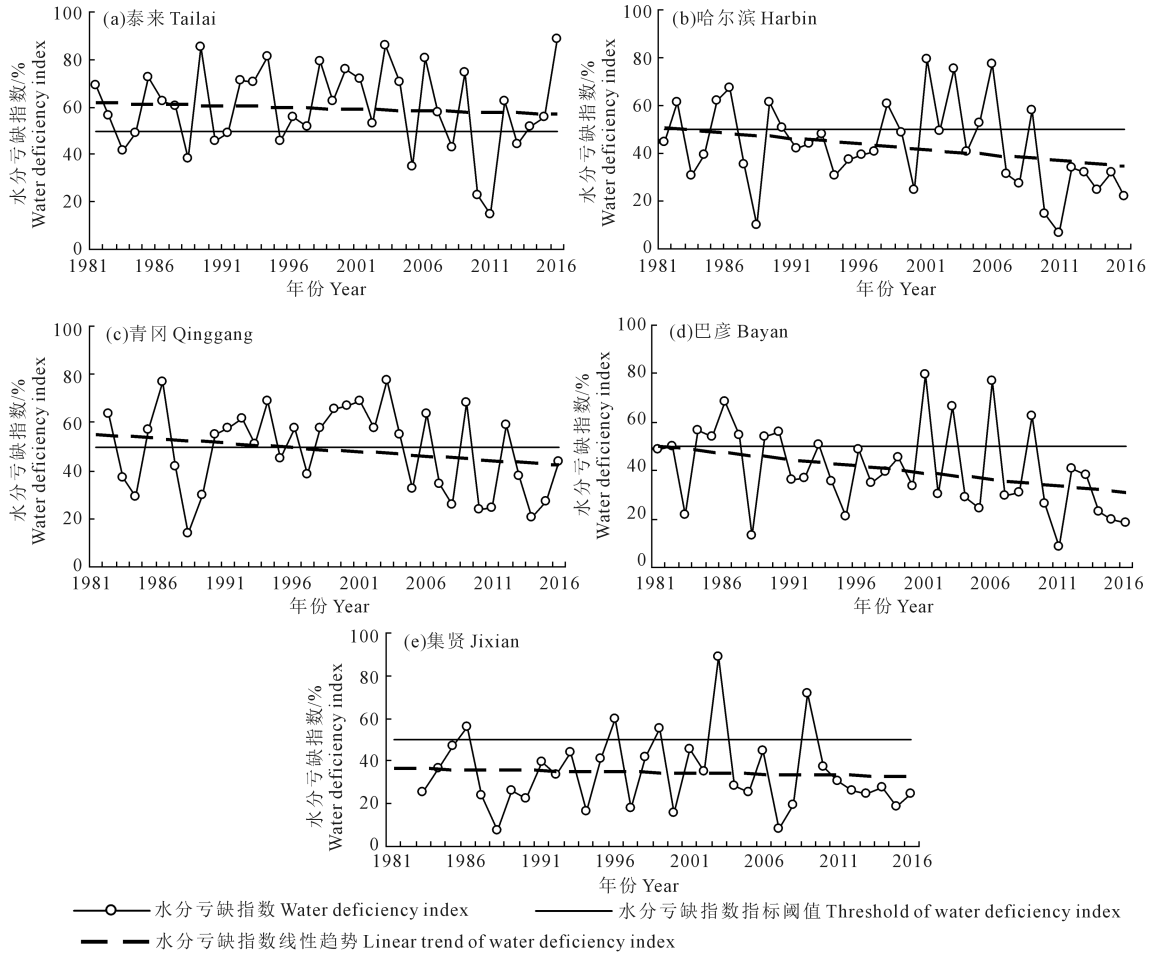


图 6　1981—2016 年代表站玉米出苗~七叶期 K_{CWDI} 变化及与指标阈值比较

Fig.6　Temporal change of K_{CWDI} and comparison with index value during maize seedling to seventh leaf in the representative station from 1981 to 2016

2.3　低温冷害、干旱混合发生特征

如表 2 所示。由表 2 可见,1981—2016 年间,研究区各站玉米冷害、干旱混合发生年数为 0~10 a,全研究区累计 59 a,总体来看,冷害、干旱混合发生呈减少趋势,其发生年份主要密集于 1990 年代中期以前,之后呈零散分布状态,大部分站点 1990 年代中期至 2000 年代末期未发生。在空间上,存在由西至东的减少趋势,发生年数的高值中心处于松嫩平原西部,年数为 8~10a;五常站、方正站一线以东区域为低值区,年数在 0~1 a,其中佳木斯站、方正站未发生;其他区域处于中间状态,年数为 2~6 a。

从年代际变化趋势看,研究期间,玉米出苗~七叶期冷害、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%~19.4%,1990 年代发生频率下降,2000 年代持续偏少,但进入 2010 年代,部分站点冷害、干旱混合发生呈回升趋势(表 3)。

表 2　研究区玉米出苗~七叶期冷害、干旱混合发生年份

Table 2　Cold damage and drought years during maize seedling to seventh leaf period in the study area

站名 Station	混合发生年数/a Numbers of cold damage and drought year	混合发生年份 Cold damage and drought years
龙江 Longjiang	8	1981、1982、1985、1986、1991、1994、1997、2016
富裕 Fuyu	5	1982、1986、1991、1992、1994
海伦 Hailun	2	1992、1993
泰来 Tailai	10	1982、1986、1987、1989、1992、1993、2012、2014、2015、2016
青冈 Qinggang	5	1985、1986、1991、1992、2009
安达 Anda	9	1982、1983、1984、1985、1986、1987、1989、1991、1992
巴彦 Bayan	3	1982、1984、1986
佳木斯 Jiamusi	0	/
集贤 Jixian	1	1986
哈尔滨 Harbin	4	1982、1986、2003、2005
肇源 Zhaoyuan	4	1984、1998、2009、2012
双城 Shuangcheng	6	1982、1984、1985、1986、2001、2004
方正 Fangzheng	0	/
勃利 Boli	1	1996
五常 Wuchang	1	2003

2.4 ≥10℃积温距平、K_{CWDI}与玉米单产的关系

采用逐步回归方法分析≥10℃积温距平、K_{CWDI}与玉米单产的相关关系,结果见表 4,表中回归方程 y 为玉米单产,x_1为≥10℃积温距平,x_2为水分亏缺指数。由表 4 可见,研究区≥10℃积温距平、K_{CWDI}与玉米单产相关性呈区域性分布特征,不同区域、不同站点存在差异,相关显著或极显著($P<0.05$ 或 $P<0.01$)的区域或单站,除全研究区外,其余均分布于松嫩平原,分析其原因,可能是由于春末夏初三江平原较松嫩平原温度、水分条件相对适宜而引起。部分区域或单站仅 1 种因子与玉米单产相关显著。位于松嫩平原西部的安达站相关性最好,R^2高达 0.508。表 4 中相关关系一方面表征出玉米出苗~七叶期≥10℃积温距平、K_{CWDI}2 种因子对不同区域玉米产量影响不同,另一方面,由表 4 还可看出≥10℃积温距平对玉米单产为正效应影响作用,K_{CWDI}则为负效应影响作用,随着≥10℃积温距平下降、K_{CWDI}增大,玉米单产呈减少趋势。

表 3 研究区玉米出苗~七叶期冷害和干旱混发频率年代际变化/%

Table 3 Decadal variation of frequency of combined cold damage and drought during maize seedling to seventh leaf period in the study area

时期 Period	龙江 Longjiang	富裕 Fuyu	海伦 Hailun	泰来 Tailai	青冈 Qinggang	安达 Anda	巴彦 Bayan	佳木斯 Jiamusi
1981-1990	11.1	5.6	0.0	11.1	5.6	19.4	8.3	0.0
1991-2000	8.3	8.3	5.6	5.6	5.6	5.6	0.0	0.0
2001-2010	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0
2011-2016	2.8	0.0	0.0	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0

时期 Period	集贤 Jixian	哈尔滨 Harbin	肇源 Zhaoyuan	双城 Shuangcheng	方正 Fangzheng	勃利 Boli	五常 Wuchang
1981-1990	2.8	5.6	2.8	11.1	0.0	0.0	0.0
1991-2000	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	2.8	0.0
2001-2010	0.0	5.6	2.8	5.6	0.0	0.0	2.8
2011-2016	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0

表 4 研究区玉米出苗~七叶期≥10℃积温距平(x_1)、水分亏缺指数(x_2)与玉米单产的相关关系

Table 4 Relationship between the accumulated temperature anomaly ≥10℃ (x_1), K_{CWDI}(x_2) and the maize yield during maize seedling to seventh leaf period in the study area

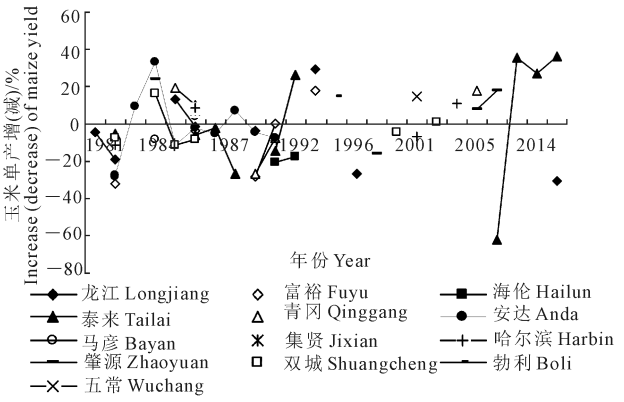
区域(站点) Region (station)	回归方程 Regression equation	R^2	F	F_0	样本数 Number of samples
全研究区 The whole study area	$y = 25.3x_1 - 67.8x_2 + 8744.2$	0.399**	10.942	7.44	36
松嫩平原 Songnen Plain	$y = 22.0x_1 - 69.9x_2 + 9042.1$	0.423**	12.105	7.44	36
三江平原 Sanjiang Plain	/	/	/	/	36
松嫩平原西部 Western of Songnen Plain	$y = -43.4x_2 + 6777.2$	0.146*	5.814	4.13	36
松嫩平原北部 Northern of Songnen Plain	/	/	/	/	36
松嫩平原东部 Eastern of Songnen Plain	$y = 18.7x_1 - 45.2x_2 + 7968.9$	0.220*	4.657	4.13	36
松嫩平原南部 Southern of Songnen Plain	$y = -67.7x_2 + 9958.7$	0.208**	8.906	7.44	36
龙江 Longjiang	/	/	/	/	36
富裕 Fuyu	/	/	/	/	36
海伦 Hailun	/	/	/	/	36
泰来 Tailai	/	/	/	/	36
青冈 Qinggang	/	/	/	/	35
安达 Anda	$y = 6.2x_1 - 75.0x_2 + 9720.9$	0.508**	16.491	7.44	35
巴彦 Bayan	$y = 19.3x_1 + 7958.3$	0.145*	5.788	4.13	36
佳木斯 Jiamusi	/	/	/	/	34
集贤 Jixian	/	/	/	/	34
哈尔滨 Harbin	/	/	/	/	36
肇源 Zhaoyuan	$y = -75.7x_2 + 10263.2$	0.300**	14.166	7.44	35
双城 Shuangcheng	$y = 10.8x_1 + 8044.0$	0.224**	9.828	7.44	36
方正 Fangzheng	$y = -50.0x_2 + 6342.6$	0.167*	6.821	4.13	36
勃利 Boli	/	/	/	/	36
五常 Wuchang	/	/	/	/	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。

Note: * and ** have passing through the test at $\alpha = 0.05$ and $\alpha = 0.01$ significance level, respectively. "/" indicates not significant at the test levels.

2.5　低温冷害、干旱混合发生对玉米产量的影响

以 1.3.2 节中产量比较值方法分析研究区各站低温冷害、干旱混合发生年份的产量增(减)状况,进而分析两种灾害混发的逆境条件对玉米产量的影响趋势。由图 7 可见(剔除研究区未出现低温冷害、干旱混合发生的年份),大部站点 $\Delta Y<0\%$ 的年份居多,表明低温冷害、干旱混合发生年份的玉米产量与邻近 5 年平均产量相比,多数年份产量表现为下降,$\Delta Y<0\%$ 的累计年份较 $\Delta Y>0\%$ 的年份偏多 36%。统计各减产年玉米七叶期至成熟期间气象数据,结合气象灾害大典[31]分析,除 1982、1989、1992 年等减产年外,大部站点多数冷害、干旱混合发生年份玉米七叶期后总体的光、温、水条件基本正常,未出现严重灾害,则在一定程度上可以说明玉米出苗~七叶期低温冷害、干旱的混发逆境对玉米产量的影响以负效应为主,总体为减产趋势。



注:不同站点同一年份的 ΔY 偏差很小,在图中有重叠现象

Note: The difference of ΔY between different stations in the same year was small and there was overlap in the figure.

图 7　研究区玉米出苗~七叶期低温冷害、干旱混合发生年份增(减)产百分率/%

Fig.7　Increase (decrease) percentage of maize yield in cold damage and drought years during maize seedling to seventh leaf stage in the study area

进一步分析低温冷害、干旱混发的逆境条件,因泰来站在 2012 年出现最大减产率,则以泰来站为例,考虑同一站具有更好可比性,再选择该站最小减产率的 1987 年,比较分析上述 2 年玉米出苗~七叶期的气温、K_{CWDI},由图 8 可见,泰来站 2012 年玉米出苗~七叶期低温累计时间长,偏低幅度大,≥10℃积温距平达 -209.6℃ · d,K_{CWDI} 持续偏大,均高于 57.0%,即低温冷害、干旱混发的逆境条件表现为持续干旱伴随严重低温同步发生(图 8a);1987 年则表现为低温时间短,偏低幅度小,≥10℃积温距平为 -95.5℃ · d,K_{CWDI} 波动较大,有部分时间在 50.0% 左右变化,即低温冷害、干旱混发的逆境条件表现为间断性干旱与低温同时发生(图 8b),由此可见,玉米出苗~七叶期低温冷害、干旱混发的逆境条件不同,对玉米生长影响不同,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较大。

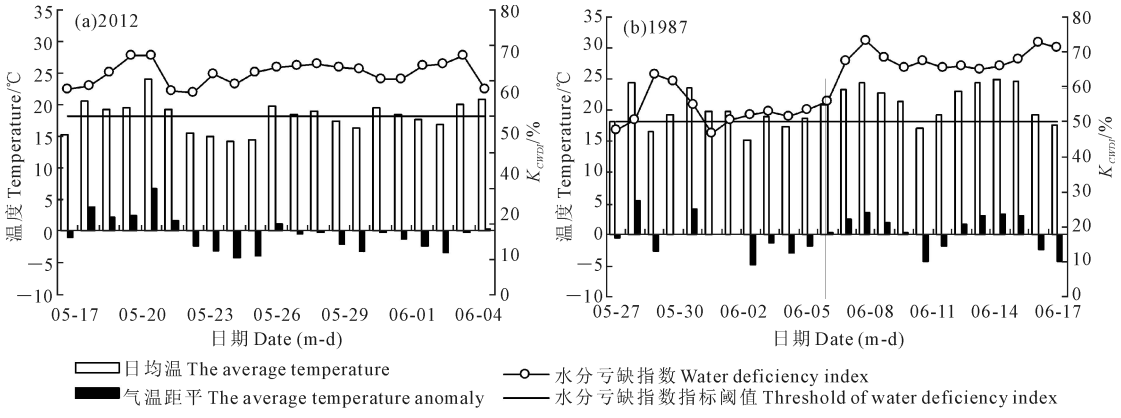


图 8　泰来站减产代表年份玉米出苗~七叶期气温与 K_{CWDI} 的变化

Fig.8　The change of temperature and K_{CWDI} in the typical years of maize yield reduction during maize seedling to seven leaves stage in Tailai station

3　讨　论

本文以气候—作物—灾害间的相互影响关系为着眼点,引进中华人民共和国气象行业标准规定的≥10℃积温距平、水分亏缺指数判识玉米冷害、干旱,2 个指标同时具备生物学、农学和气象学意义,使作物灾害辨识性及科学性显著提升。

以往研究多以气温升降、降水多少等直接表达气候的“暖、冷、湿、干”,气温、降水等因子的距平、倾向率、气候变率等在表达气候变化特征上极为有效[4-5,11-12]。与之比较,本文采用的≥10℃积温距平、K_{CWDI} 更具有双重作用。2 个指标对冷害、干旱判

识效果理想,与郭建平等[12]、姜丽霞等[5]、杨卫东[24]、李廷全等[32]采用其他研究方法的判识结果基本一致,对 1983、1987、1989、1992 年等比较有代表性的冷害年以及 1982、2001、2003、2006 年等干旱年判识较为准确。另一方面,积温距平对气候变暖存在明显的指示作用,从本文研究结果看,1990 年代初期以来,≥10℃积温距平显著增加,在一定程度上表明自 1990 年代开始气温明显升高,这与姜丽霞等[5]分析提出的 1992 年气温明显升高的研究结论一致。充分印证了气候变暖态势。同时,K_{CWDI}能够较好反映研究区水资源分布状况,其由西向东逐渐减小的变化形势及分区 K_{CWDI}的高低变化准确表达了黑龙江省玉米生长初期松嫩平原西部和南部偏干易旱特点,与已有研究所提出的该区素有“十年九旱”之说相吻合[33]。由此可见,≥10℃积温距平、K_{CWDI}是气候变化及灾害分析方面较为精准的指标,其在甄别气候变化态势及农业气候资源分布配置上效果显著,可为科学合理地进行农业种植结构调整提供技术指标。

本文探讨了≥10℃积温距平、K_{CWDI}与玉米产量的关系,与过去单一灾害的影响分析相比[6-7,17-20],初步建立了同一区域同一时期 2 种灾害混发逆境对作物产量的影响模式。对于低温冷害、干旱出现在玉米不同生长期时对玉米的影响,从以往大量研究来看,玉米在生长过程中先后出现低温冷害或干旱时,其对最终产量的影响往往体现出 2 种因素的共同影响。研究表明,玉米抽雄时仅遭遇低温冷害会减产 25.80%,仅受干旱影响会减产 25.51%,而抽雄前干旱、抽雄时低温却导致玉米减产高达 61.12%,由此可见,在玉米不同生长期先后出现低温冷害或干旱对玉米的影响存在一定的关联性[24-25,34-38],换言之,玉米在不同生长时期先后遭遇不同灾害的影响,玉米产量损失在一定程度上可能会加重,但不同灾害出现的间隔时间不同、发育时段不同,其影响也不同,且其影响机制也较为复杂,此部分工作有待进一步深入研究。

4 结 论

1)1981—2016 年间,研究区玉米出苗~七叶期≥10℃积温距平的上升变化($P<0.01$)对气候变暖趋势具有明显的响应,表现为 1990 年代中期以前偏冷、之后偏暖,但最近几年处于偏冷期,全区及松嫩平原西部分别在 1993、1994 年发生一次突变。在空间上,≥10℃积温距平纬向上的北低南高趋势反映了研究区热量资源的空间配置。K_{CWDI}随时间呈波动式变化($P>0.05$),不同时间段变化幅度不同,21 世纪以来振荡较剧烈,但在整个研究期内未发生突变,在空间上,K_{CWDI}分布表现为明显的经向规律,其由西至东逐渐减小的特征准确表达了研究区水资源分布状况。

2)1981—2016 年间,基于 2 种指标判识研究区各站玉米出苗~七叶期冷害、干旱混合发生年数为 0~10 a,全区累计 59 a。在时间上,冷害、干旱混合发生呈减少趋势,1990 年代中期以前为高发期, 1990 年代中期至 2000 年代末期为低发期,2010 年代开始有回升趋势。在空间上呈由西至东减少趋势,松嫩平原西部为频发区,其他区域发生较少甚至未发生。

3)研究期间,≥10℃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 种因子对玉米单产呈反向性影响作用,≥10℃积温距平为正效应,K_{CWDI}则为负效应,表明在一定温度、水分条件范围内,≥10℃积温距平升高、K_{CWDI}减小,则玉米产量呈升高趋势。从产量增(减)状况来看,玉米出苗~七叶期低温冷害、干旱的混发逆境对玉米产量的影响以负效应为主,总体为减产趋势。

目前,农业种植结构调整是深入实施“藏粮于地,藏粮于技”战略的一项重要工作。在进行作物种植格局优化时,应基于作物生育特性及对气象条件需求,细致分析气候持续变暖背景下区域气候资源匹配特征,开展区域农业气象灾害风险区划,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] 郭建平.农业气象灾害监测预测技术研究进展[J].应用气象学报,2016,27(5):620-630.

[2] 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.

[3] 张桂华,王艳秋,郑红,等.气候变暖对黑龙江省作物生产的影响及其对策[J].自然灾害学报,2004,13(3):95-100.

[4] 孙凤华,杨素英,陈鹏狮. 东北地区近 44 年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J].生态学杂志, 2005,24(7):751-755.

[5] 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.

[6] 于文颖,冯锐,纪瑞鹏,等.苗期低温胁迫对玉米生长发育及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2013, 31(5):220-226.

[7] 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(增刊 1):171-179.

[8] Dai A. Drought under global warming: a review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, 2011, 2:45-65.

[9] Dai, Aiguo. Increasing drought under global warming in observations

and models [J]. Nature Climate Change, 2012, 3:52-58.
[10] Fenza M D , Hogg B , Grant J , et al.Transcriptomic response of maize primary roots to low temperatures at seedling emergence [J]. Peer J, 2017, 5:1-17.
[11] 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.
[12] 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.
[13] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等.气象、农业干旱指标综述[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):185-189.
[14] 马玉平,王石立,李维京.基于作物生长模型的东北玉米冷害监测预测[J].作物学报,2011,37(10): 1868-1878.
[15] 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.
[16] 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.
[17] 张强,韩兰英,王胜,等.影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征[J].科学通报,2018,63(23): 2378-2392.
[18] 马力文,刘静.厄尔尼诺对宁夏干旱山区农作物的影响初探[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):265-272.
[19] 陈鹏狮,纪瑞鹏,谢艳兵,等.东北春玉米不同发育期干旱胁迫对根系生长的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):156-163.
[20] 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.
[21] 姜丽霞,季生太,李帅,等.黑龙江省水稻空壳率与孕穗期低温的关系[J].应用生态学报,2010,21(7): 1725-1730.
[22] 徐志宇,宋振伟,邓艾兴,等.近 30 年我国主要粮食作物生产的驱动因素及空间格局变化研究[J].南京农业大学学报,2013,36(1): 79-86.
[23] 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.
[24] 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.
[25] 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.
[26] 国家气象局.农业气象观测规范(上卷)[M].北京:气象出版社,1993:1-74.
[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].北京: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].北京: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] 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.
[31] 温克刚.中国气象灾害大典黑龙江卷[M].北京:气象出版社,2007:7-259.
[32] 李廷全,那济海,王萍,等.松嫩平原近年春旱特点浅析[J].中国农业气象,2006,27(1):53-55.
[33] 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.
[34] 杨若子,周广胜.东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性评估[J].气象学报,2015,73(6):1141-1153.
[35] 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.
[36] 王永杰.常见自然灾害对玉米生长的影响及应对措施[J].河北农业,2017,8:23-24.
[37] 周松涛.玉米气象灾害及其防御措施[J].吉林农业,2015,24:114.
[38] 蔡菁菁.东北地区玉米干旱、冷害风险评价[D].北京:中国气象科学研究院,2013.

(上接第 254 页)

[31] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等.中国主要农作物分生育期 Jensen 模型研究[J].节水灌溉, 2008(7):1-3,8.
[32] 郑永丹.中国主要粮食作物生育期时空格局及其变化[D]. 武汉:华中师范大学,2015.
[33] 王胜,田红,张存杰,等.安徽冬麦区 4 种干旱指数应用对比[J].气象科技, 2015, 43(2):295-301.
[34] 李斌,李丽娟,李海滨,等.澜沧江流域干旱变化的时空特征[J].农业工程学报, 2011, 27(5):87-92,393.
[35] Zhang X , Chen N C, Li J Z, et al. Multi-sensor Integrated Framework and index for agricultural drought monitoring [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 188:141-163.
[36] Zhang A I, Jia G S. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave Remote Sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134:12-23.
[37] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection [J]. Advances in Space Research, 1995, 15(11):91-100.
[38] Sandholt I, Andersen J, Rasmussen K. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of soil moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213-224.
[39] 赵杰鹏,张显峰,廖眷华,等.基于 TVDI 的大范围干旱区土壤水分遥感反演模型研究[J].遥感技术与应用, 2011, 26(6):742-750.
[40] Hao C, Zhang J H, Yao F M. Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 35(2):270-283.
[41] Zhang X, Wei C H, Obringer R, et al. Gauging the Severity of the 2012 Midwestern U. S. drought for agriculture [J]. Remote Sens, 2017, 9(8), 767.
[42] 檀竹平,高雪萍.1997—2016 年中国小麦种植区域比较优势及空间分布[J].河南农业大学学报, 2018, 52(5):825-838.