

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.030

气候变化对黑龙江省生育期内玉米产量的影响

戚颖^{1,2} 白雪峰^{2,3} 李铁男¹

(1. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150006; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

3. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 以玉米为研究对象, 基于黑龙江省长时间的气象站点观测数据, 结合标准化降水蒸散发指数(SPEI), 研究黑龙江省玉米生长季内降水、气温、区域干湿变化特征及对玉米产量的影响。结果表明: 黑龙江省降水变化趋势不显著, 但最高气温、平均气温和最低气温变化趋势显著。湿润化的趋势主要集中在黑龙江省西北部和东南部, 干旱化趋势主要集中在黑龙江省自东向西大部分地区。玉米的气象产量主要受 SPEI₃₋₈ 影响, 气温是影响黑龙江省生育期内玉米产量的主要因素。研究结果可为区域水资源合理规划和优化农业种植结构提供参考。

关键词: 黑龙江省; 玉米; 气候变化; 标准化降水蒸散发指数; 干湿状况; 气象产量

中图分类号: S271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0254-10

Effect of Climate Change on Maize Yield in Maize Growth Period in Heilongjiang Province

QI Ying^{1,2} BAI Xuefeng^{2,3} LI Tienan¹

(1. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150006, China

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Agriculture is directly related to human survival. The stability and sustainability of agricultural yields is the key to agricultural development. Climate factors not only provide material and energy basis for crops, but also restrict the effective implementation of agricultural technology. Taking maize as the main research object, based on the long-term meteorological observation data in Heilongjiang Province, the Mann-Kendall analysis method was used to calculate the variation trend of precipitation and temperature in maize growth stage. The variation characteristics of precipitation and temperature (maximum, average and minimum temperatures) in maize growing season were revealed. And the principal component analysis (PCA) was combined with the standardized precipitation evaporation index (SPEI), the characteristics of regional dry-wet changes in the corn growing season of Heilongjiang Province were revealed. The results indicated that the changing trend of precipitation in Heilongjiang Province was not significant, but the changing trend of maximum temperature, average temperature and minimum temperature was significant. The changing trend of wetting was mainly concentrated in the northwest and southeast of Heilongjiang Province. The changing trend of drought was mainly concentrated in most areas of Heilongjiang Province from east to west. The meteorological production of maize was mainly affected by SPEI₃₋₈. Dry and wet conditions SPEI₃₋₈ in June - August were the main factors affecting maize yield. Compared with precipitation, temperature was the main factor affecting the yield of maize in the growth period of Heilongjiang Province. It provided reference for rational planning of regional water resources and optimizing agricultural planting structure.

Key words: Heilongjiang Province; maize; climate change; standardized precipitation evaporation index; dry and wet conditions; meteorological production

收稿日期: 2019-03-21 修回日期: 2019-05-08

基金项目: 黑龙江省博士后面上资助经费项目(LBH-Z18264)和东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室开放项目(2015001, 2015003)

作者简介: 戚颖(1979—), 女, 博士后, 东北农业大学讲师, 主要从事水土资源高效利用与保护研究, E-mail: qiying@neau.edu.cn

通信作者: 白雪峰(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水土资源高效利用与保护研究, E-mail: baixuefengbisheng@126.com

0 引言

近年来,随着气候变化和大气温度、二氧化碳浓度的升高,主要水文要素的循环也会发生改变。同时,全球温度的持续升高还可能增加干旱、强降水等极端气候事件的发生强度和发生频率^[1],对农业生产力产生影响。世界粮农组织指出气候变化对全球农作物产量和粮食安全将产生巨大影响^[2]。由于气候变暖,明显增加了寒冷地区的有效气温,使无霜期延长,可能会造成种植区的北迁^[3],气候带向北移动,导致寒区的粮食生产与种植结构发生重大改变。一般来说,气温的升高会缩短作物的生育期,尤其是作物的灌浆期会缩短,这大大影响了作物的品质^[4],而且还可能会导致干旱和病虫害的发生^[5]。寒区气温的升高,有利于提高粮食产量,ZHOU等^[6]的研究表明,在寒地地区,水稻产量与气温呈正相关关系,最低温度上升1℃,水稻产量会提高3.6%,MENG等^[7]的研究表明,如果不改变玉米品种,气温的升高不会提高玉米产量,但由于无霜期的增加,更换更为合适的高产量玉米品种,则产量将会明显提高。尽管技术和作物品种不断改进,但天气和气候仍然是影响农业生产的主要不可控制因素。

中国是世界上最大的农业国,虽然近些年农业机械化水平不断提高,但是仍以雨养农业为主,作物产量高度依赖于降水地区的气象干湿状况。如果作物长时间处于不利的干湿状况,就会影响作物的生长发育和最终的产量,进而影响粮食安全。因此研究区域的干湿状况引起世界众多科研工作者和决策者关注。用于评价区域干湿状况的指标比较多,常用的有标准化降水指数(SPI)^[8]、标准化降水蒸散发指数(SPEI)^[9]、帕默尔干旱指数(PDSI)^[10]等,SPI和SPEI均可用于描述不同尺度的干湿事件,但SPI仅通过降水数据来描述区域干湿状况,而SPEI综合了气温和降水评价干湿变化。PDSI和SPEI都考虑了降水和气温对于干湿状况的影响,但PDSI的计算过于繁琐,而SPEI广泛应用于区域干湿状况的研究^[11-13]。

黑龙江省是中国重要的粮食生产基地,玉米是我国北方主要粮食作物之一,虽然黑龙江省农业机械化水平比较高,但仍以雨养农业为主,粮食产量主要受气象因素影响。FU等^[14]对多年来黑龙江省的干湿变化进行了研究,但该地区的干湿条件与粮食产量的关系尚不明确。因此,本文分析1961—2016年黑龙江省降水和气温的变化情况和特定作物生长期的气象干湿状况,以确定影响产量最主要的干湿状况并确定降水、气温和干湿状况对产

量的影响。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黑龙江省位于中国东北部,是中国纬度最高的地区(图1)。东部和北部接壤俄罗斯,西邻内蒙古自治区,南邻吉林省,占地面积47.3万km²。属于温带大陆性季风气候,由南向北可分为温带和寒温带,由东向西可分为湿润地区、半湿润地区和半干旱地区。多年平均降水量为400~800mm,多年平均气温为-4~6℃。黑龙江省是中国耕地面积最大的省份之一,也是世界三大黑土带之一,农业机械化水平较高,是中国粮食产量最高的省份之一。

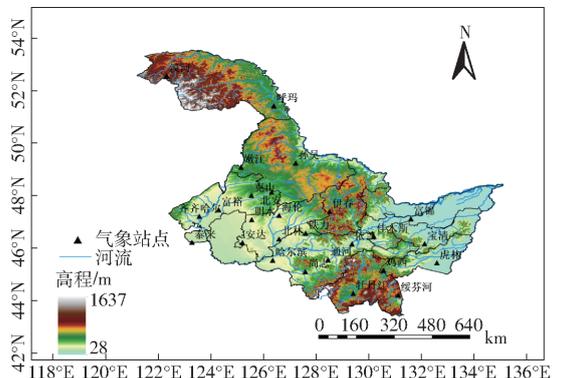


图1 研究区域及站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of stations

1.2 数据来源

研究区域内气象资料的数据来源于中国气象数据网,共选择了数据较为完整的26个站点1961—2016年的月平均降水量、温度(最高气温、平均气温和最低气温)、风速、相对湿度、平均气压和日照时数。1986—2016年玉米产量数据来源于《黑龙江省统计年鉴》。

1.3 标准化降水蒸散发指数

本文利用VICENTE-SERRANO等^[15]提出的标准化降水蒸散发指数(SPEI)来描述区域干湿变化特征,该指数用降水量减去蒸发量的差值来表示水分的盈亏,以此来判断干湿程度。

采用FAO-56PM法计算每个月的潜在蒸散量(PET),具体公式为

$$PET = \frac{0.048\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中 Δ ——饱和水汽压曲线, kPa/K

R_n ——地表净辐射量, MJ/m²

G ——土壤热通量, MJ/m²

γ ——干湿表常数, kPa/K

T ——日均温度, $^{\circ}\text{C}$

u_2 ——2 m 高处风速, m/s

e_s ——饱和水汽压, kPa

e_a ——实际水汽压, kPa

本文各分量计算根据王丽君^[16]所采用的公式。

降水量与潜在蒸散量的差值可定义为

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

式中 P_i ——某月降水量, mm

PET_i ——某月潜在蒸散量, mm

D_i ——某月水分盈亏量^[17], mm

然后对 D_i 进行正态化处理就可得到每个差值对应的 SPEI 指数。由于 D_i 序列中可能存在负值, 因此利用 3 个参数的 Log-logistic 概率分布进行拟合

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma'} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中 α, β, γ' ——尺度参数、形状参数和初始状态参数

其中 α, β, γ' 可用线性矩的方法拟合获得, 因此 SPEI 计算公式为

$$SPEI = \begin{cases} w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} & (p \leq 0.5) \\ - \left(w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \right) & (p > 0.05) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。

概率加权矩 w 的公式为

$$w = \begin{cases} \sqrt{-2 \ln p} & (p \leq 0.5) \\ \sqrt{-2 \ln(1-p)} & (p > 0.5) \end{cases} \quad (5)$$

SPEI 具体计算过程见文献^[15]。

1.4 Mann-Kendall 分析法

Mann-Kendall (MK) 分析法是世界气象组织推荐的趋势分析方法, 已在水文和气象领域得到广泛应用^[18-19]。该方法的优点是不需要样本服从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (6)$$

其中

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (7)$$

假设各变量独立同分布, 则统计变量 S 服从正态分布, 均值为 0, 方差为

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (8)$$

其中, t_i 为任意给定结点的范围, 当 $n > 10$ 时, MK 统计量为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (9)$$

在给定 α 置信度水平上, 查正态分布表, 若 $Z \geq Z_{1-\alpha/2}$ 或 $Z \leq -Z_{1-\alpha/2}$ 则原始时间序列存在明显上升或者下降趋势。

1.5 主成分分析法

主成分分析是一种常用的降维方法, 常用来对水文和气象领域的原始数据进行降维^[20-21]。通过将原始的相关变量减少到几个不相关的新的变量来解释总方差, 新的变量称为主成分 (PC), 由原始变量的线性组合组成。本文应用了 26 个 SPEI6 的序列, 因此有 26 个主成分, 线性关系为

$$\begin{bmatrix} X_{i,1} \\ X_{i,2} \\ \vdots \\ X_{i,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{i,1} \\ Y_{i,2} \\ \vdots \\ Y_{i,k} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{kk})$ 是系数矩阵元素, $(X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,k})$ 为各气象站的原始序列, $Y(Y_{i,1}, Y_{i,2}, \dots, Y_{i,k})$ 是可以解释所有方差的重要变量。为了获得更稳定的局部干/湿模式, 用方差最大的旋转方法^[22]来选择所有主成分 (PCs), 已被证明是更好的降维方法^[23]。

2 结果与分析

2.1 生长季气候变化特征

利用 1.4 节提到的 MK 趋势分析法来描述黑龙江省降水量、平均气温、最低气温和最高气温的变化趋势, MK 趋势分析计算所得的 Z 值, 正值代表时间序列呈现上升趋势, 负值代表时间序列呈现下降趋势, 当 $Z > 1.96$ 或 $Z < -1.96$, 趋势在 95% 的置信度水平上显著。黑龙江省 26 个气象站点玉米生育期内降水量和气温的变化趋势如表 1 所示。

如表 1 所示, 总体而言, 除大兴安岭地区的漠河站降水量呈现显著增长趋势外, 其余地区降水量变化趋势均不显著, 大部分地区降水量呈现不显著增加趋势, 中部部分地区降水量多呈现减小趋势。总体上来看, 除黑龙江省各地区的平均气温呈现显著增长趋势且绝大部分地区的增长趋势超过了 99% 水平的置信度检验, 黑龙江省各地区最高气温均呈现增长趋势, 西部齐齐哈尔、泰来等地区增长趋势不显著; 除漠河站最低气温呈现减小趋势外, 黑龙江省所有地区最低气温呈现增加趋势, 仅呼玛站最低气

表1 黑龙江省气候要素 MK 统计量

Tab.1 Changing trend of climatic factors in Heilongjiang Province

站点	降水量	平均气温	最低气温	最高气温	站点	降水量	平均气温	最低气温	最高气温
漠河	1.97	2.55	-0.78	2.28	北林	-0.68	3.07	2.53	2.57
呼玛	-0.86	2.55	1.60	2.64	安达	1.16	2.69	2.35	1.84
嫩江	-0.74	2.83	2.66	2.64	铁力	-0.86	3.05	2.82	2.84
孙吴	-1.02	2.61	2.17	2.31	佳木斯	0.17	3.24	2.49	3.46
北安	0.01	3.13	2.64	2.83	依兰	-0.51	3.31	2.94	3.46
克山	0.81	2.95	2.30	2.43	宝清	-0.68	3.37	2.11	2.90
富裕	0.03	2.64	2.21	1.65	哈尔滨	-0.54	2.49	2.31	2.59
齐齐哈尔	0.38	2.40	2.37	1.60	通河	-1.67	3.12	2.64	2.95
海伦	-0.56	2.40	2.37	1.60	尚志	-1.67	2.72	2.86	3.01
明水	0.72	3.02	2.31	1.52	鸡西	-0.34	2.88	2.42	1.60
伊春	-0.10	2.86	2.76	2.84	虎林	0.82	3.35	2.55	3.42
富锦	-0.77	3.92	2.29	2.73	牡丹江	0.11	2.28	1.97	2.18
泰来	0.16	2.43	2.04	1.44	绥芬河	1.08	2.42	2.24	0.46

温增长趋势不显著,其他地区气温增长趋势同平均气温增长趋势相似,增长趋势显著。

玉米生育期内,黑龙江省各地区的多年平均降水量在 164.8 ~ 1 004.6 mm 之间,降水空间分布不均匀,总体格局为中部和南部降水量最大,东部降水量较大,西部和北部降水量最小。生育期内降水主要集中在 6—9 月,与黑龙江省雨季时间吻合。在气温变化过程中,随着全球的气候变暖,位于寒地地区的黑龙江省玉米生育期内各地区气温也呈现显著增长且变暖率高于全球平均值。

2.2 基于 SPEI6 的黑龙江干湿状况分析

降水和气温所决定的气候干湿状况,是农业发展的重要限制因素,因此对区域水资源干湿评价和确定旱涝发生状况非常重要。为了确定黑龙江省玉米生长季的区域干湿变化特征,基于玉米生长的全生育期,选择 4—9 月尺度的 SPEI6 描述区域的干湿变化。利用旋转主成分分析法对玉米生育期内各站点的 SPEI6 进行划分,将具有相似干湿变化特征的站点划分到一起,在主成分个数的选取上,通常旋转主成分的累计方差达到 70% 以上是合理的,如表 2 所示,累计方差超过了 70%,因此,选择划分成 5 个主成分是合理的。旋转荷载表示 SPEI 序列和其对应的旋转主成分的相关性,对区域内经历相似干湿

表2 前5个主成分的累计方差

Tab.2 Explained variance of the first five principal components %

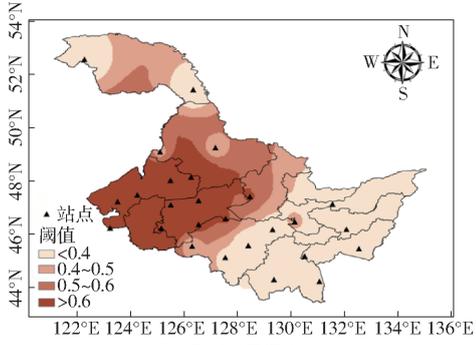
主成分	方差	累计方差
1	24.37	24.37
2	16.55	40.92
3	16.06	56.98
4	9.24	66.22
5	8.53	74.75

变化的子区间进行空间划分时,通常旋转荷载的阈值超过 0.6 被认为是合理的,因此,利用 Arcgis 中的反距离权重法在空间中展示,如图 2 所示。

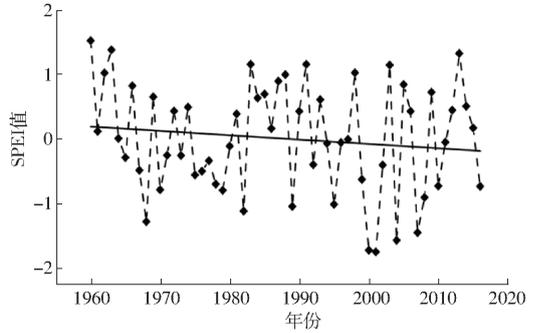
如图 2a、2c、2e、2g、2i 所示,主成分分析法将黑龙江省分为了西部、中部、东部、西北部以及东南部 5 个子区域(第 1 ~ 5 子区域),为更好地了解各子区域的干湿变化情况,统计了各子区域内包含的站点,对区域的干湿状况进行了分析,如图 2b、2d、2f、2h、2j 所示。在玉米生育期内,湿润化的趋势主要集中在黑龙江省西北部和东南部,黑龙江省自东向西大部分地区主要呈现干旱化趋势。干湿变化特征的不同可能是由于黑龙江省复杂的地形特征影响,黑龙江省内全年主要受西南风、东南风和南风的影响,位于东南部的长白山脉,西北部的大兴安岭山脉和东北部的小兴安岭山脉对这些盛行风的屏障作用,使得高海拔山区产生丰富的降水,而位于距离山地较远的地区,尤其是中部平原地区,降水相对较少,因此形成如图 2a、2c、2e、2g、2i 所示的黑龙江省独特的干湿变化特征,主成分分析法能很好地将黑龙江省分为 5 个子区域,因此,在制定玉米种植规划或玉米生育期内的水资源规划时,应该分开考虑这些子区域。

2.3 影响黑龙江省气象产量的主要月 SPEI3 的选择

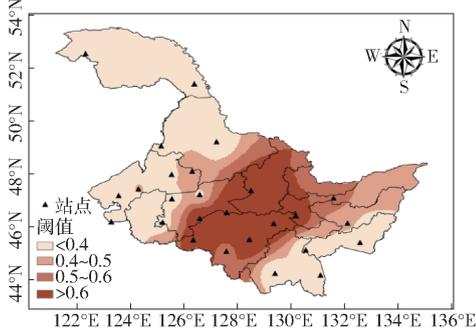
根据黑龙江省玉米的单位面积产量资料,通过滑动平均法将单位面积产量分离成趋势产量和气象产量^[24-25],通过计算所得的气象产量和干旱指数 SPEI 进行相关性分析,研究 1961—2016 年玉米生育期内 SPEI 指数和气象产量之间的关系。根据玉米不同的生育阶段特点,将玉米生长期分为 4 个阶段:生育前期、出苗期-吐丝期、孕穗期-灌浆期和吐丝期-成熟期。东北地区玉米通常在 4 月下旬到 5 月初进行播种,所以生育前期对应玉米的生育期为



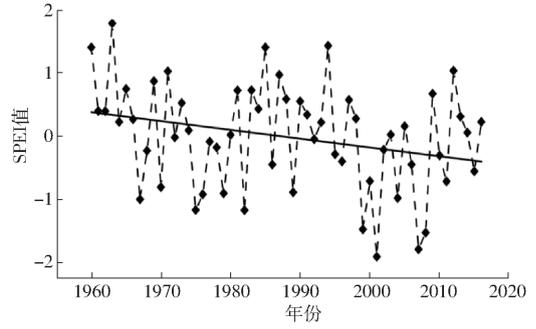
(a) 第1子区域干湿变化特征



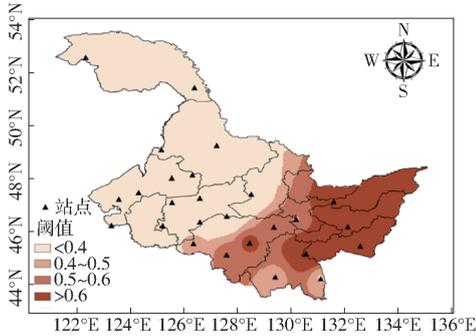
(b) 第1子区域干湿变化趋势



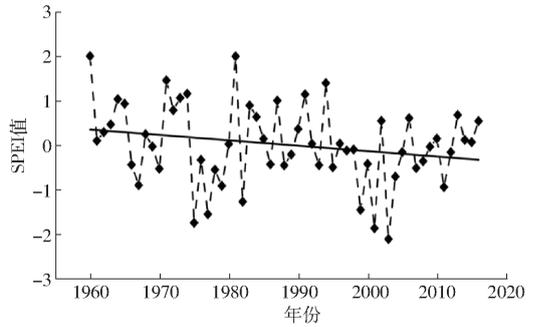
(c) 第2子区域干湿变化特征



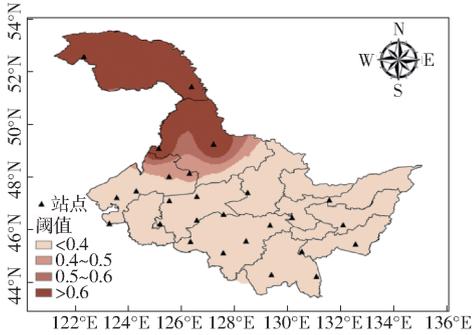
(d) 第2子区域干湿变化趋势



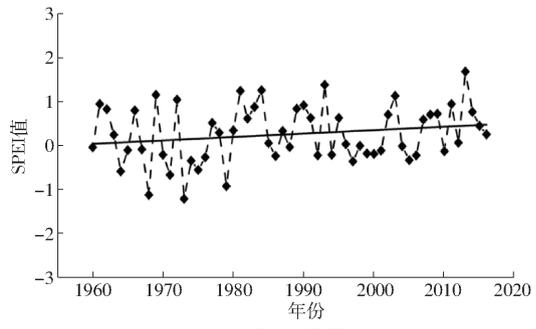
(e) 第3子区域干湿变化特征



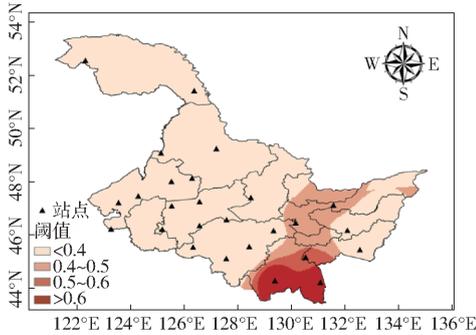
(f) 第3子区域干湿变化趋势



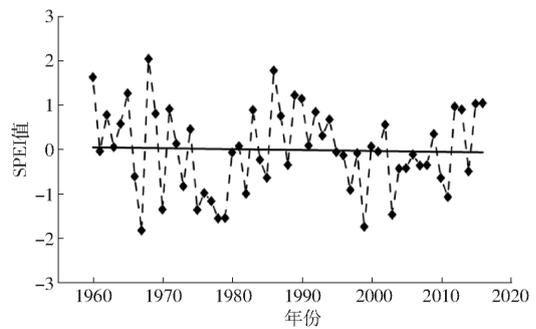
(g) 第4子区域干湿变化特征



(h) 第4子区域干湿变化趋势



(i) 第5子区域干湿变化特征



(j) 第5子区域干湿变化趋势

图2 1961—2016年前5个旋转荷载(子区域)和相应的SPEI6系列

Fig. 2 The first five rotary loads (sub-region) and corresponding SPEI6 series from 1961 to 2016

3—5月,用 SPEI3-5 表示。玉米通常在7月吐丝,所以出苗期-吐丝期对应玉米生育期5—7月,用 SPEI3-7 表示。孕穗期-灌浆期,对应玉米生育期

6—8月,用 SPEI3-8 表示。吐丝期-成熟期,对应玉米生育期7—9月,用 SPEI3-9 表示。不同玉米生育期 SPEI3 与气象产量的关系如图3所示。

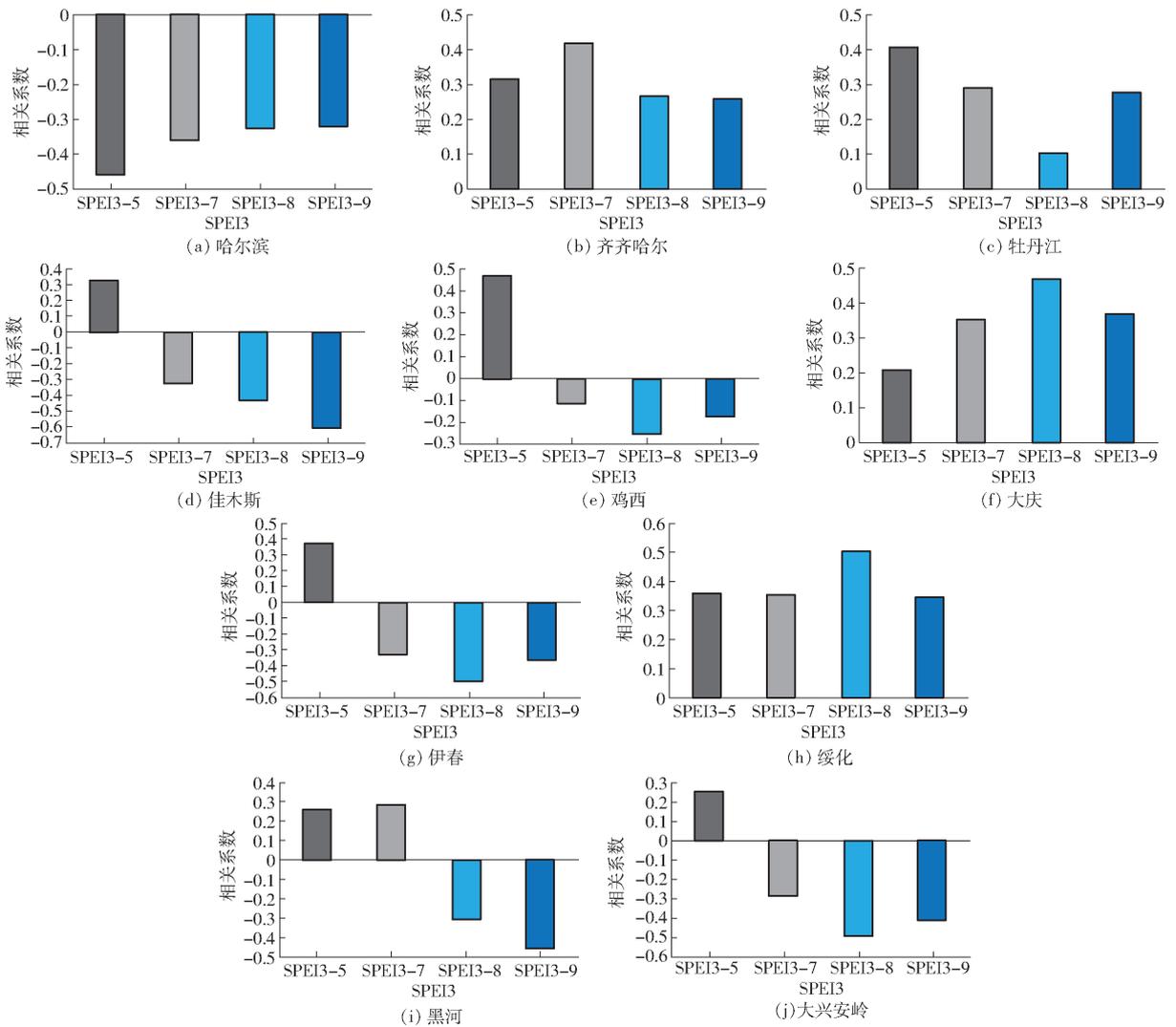


图3 气象产量与干旱指数关系

Fig. 3 Relationship between meteorological yield and drought index

如图3所示,有4个地区(大庆、伊春、绥化和大兴安岭)的气象产量与 SPEI3-8 相关系数最大,有4个地区(哈尔滨、佳木斯、鸡西和黑河)的气象产量与 SPEI3-8 相关系数比较大。而且,由于东北玉米灌浆期较南方稍晚一点(8月左右),这是玉米需水的关键时期,此期间比正常湿润的条件对籽粒灌浆更有利,因此6—8月的干湿状况 SPEI3-8 是影响玉米产量的主要因素。

由图3还可知,气象产量与不同时期干湿状况呈现负相关的地区(哈尔滨、佳木斯、鸡西和伊春)主要分布在黑龙江省东部地区,由于玉米是耐旱喜温作物,黑龙江省东部地区的降水较多,可能影响了玉米的生长发育。气象产量与不同时期干湿状况呈现正相关的地区(齐齐哈尔、牡丹江、大庆和绥化)主要分布在黑龙江省的西部地区,该地区属于干旱—

半干旱化地区,降水较少,因此可能更适合玉米的生长发育。

2.4 降水、气温、干旱状况与作物产量的关系

2.4.1 干湿状况对产量的影响

为进一步探究气象产量与干旱之间的关系,根据2.3节得知不同地区气象产量与其关系最密切的干旱指数 SPEI,对气象产量与关系最密切的 SPEI 进行回归分析。SPEI 与气象产量的回归结果如表3所示。大庆和绥化地区的气象产量与干旱指数的回归方程显著 ($P < 0.01$),齐齐哈尔、黑河和大兴安岭地区的气象产量与干旱指数的回归方程显著 ($P < 0.05$)。

当二次项系数为负值时,曲线与 x 轴的两交点分别代表旱、涝阈值, x 轴正方向与曲线相交的区域为玉米增产区,负轴方向为旱涝灾害造成产量损失

表3 1986—2016年黑龙江省SPEI与玉米气象产量回归分析

Tab.3 Regression analysis of meteorological yield of maize and SPEI in Heilongjiang Province in 1986—2016

地区	回归方程	显著性	R^2	最大增产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	最优旱涝 状况值	旱阈值	涝阈值
哈尔滨	$y = -41.87x^2 - 98.1x + 56.2$		0.035				
齐齐哈尔	$y = -104.01x^2 + 163.24x + 100.47$	*	0.568	267.03	1.27	-0.20	2.73
牡丹江	$y = 103.02x^2 + 136.55x - 102.78$		0.055				
佳木斯	$y = 35.99x^2 - 202.7x - 60.46$		0.096				
鸡西	$y = -47x^2 + 181.88x + 70.6$		0.147				
大庆	$y = -398.48x^2 + 388.57x + 480.75$	**	0.688	575.48	0.49	-0.71	1.69
伊春	$y = -8.7x^2 - 102.69x + 1.56$		0.040				
绥化	$y = -253.61x^2 + 43.53x + 293.96$	**	0.620	295.83	0.09	-0.99	1.17
黑河	$y = -197.36x^2 - 364.85x + 148.99$	*	0.570	327.61	-0.90	-2.19	0.34
大兴安岭	$y = -0.002x^2 + 0.107x + 225.88$	*	0.513	227.31	26.75		

注: * 表示 95% 的置信度水平, ** 表示 99% 的置信度水平。

的区域,顶点为旱涝最优状况值^[26],其纵坐标值为可能的最大增产量。齐齐哈尔地区 SPEI3-8 值位于 $[-0.20, 2.73]$ 区间时增产,当 SPEI3-8 为 1.27 时达到旱涝最优状况,玉米最大增产量为 $267.03 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。绥化地区 SPEI3-8 值位于 $[-0.99, 1.17]$ 区间时增产,当 SPEI3-8 为 0.09 时达到旱涝最优状况,玉米最大增产量为 $295.83 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。大庆地区 SPEI3-8 值位于 $[-0.71, 1.69]$ 区间时增产,当 SPEI3-8 为 0.49 时达到旱涝最优状况,玉米最大增产量为 $575.48 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。黑河地区 SPEI3-8 值位于 $[-2.19, 0.34]$ 区间时增产,当 SPEI3-8 为 -0.9 时达到旱涝最优状况,玉米最大增产量为 $327.61 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

绥化地区的回归方程对称轴 SPEI 在 0 附近,说明绥化地区玉米的生长发育与当地的气候比较匹配,能够保证正常的生产或增产,若进一步提高水资源利用效率和更高效的水资源优化配置则可进一步提高玉米产量。齐齐哈尔、鸡西、大庆、伊春和大兴安岭地区对称轴的 SPEI 值为正值,说明这些地区的玉米生产与当地气候不匹配,鸡西、伊春、大兴安岭地区对称轴 SPEI 值很大,为保证玉米正常产量可能需要投入大量水资源。哈尔滨、牡丹江、佳木斯、黑河地区对称轴的 SPEI 值为负值,这些地区的玉米生产与当地气候也不匹配,和齐齐哈尔等地区不同,为保证区域玉米正常的生产或增产,需进行良好的田间管理措施和合理的水资源优化配置。

2.4.2 降水量和气温对产量的影响

降水量和气温是影响作物生长发育的重要因素,因此对降水量和气温与玉米气象产量进行相关性分析,确定影响作物产量更为主要的因素。降水量和气温与玉米气象产量关系如图 4 所示。

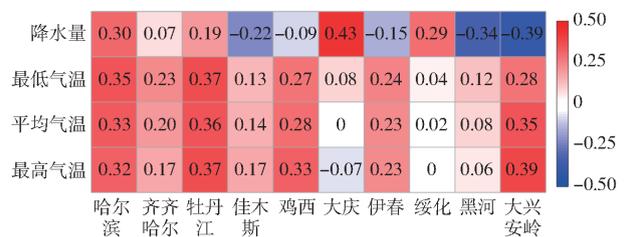


图4 降水量和气温与玉米气象产量关系

Fig.4 Relationship between precipitation, temperature and maize meteorological yield

由图 4 可以得出,哈尔滨、齐齐哈尔、大庆、绥化和牡丹江地区与降水量呈正相关,佳木斯、鸡西、伊春、黑河、大兴安岭地区呈负相关,由于玉米是耐旱作物,佳木斯等地区位于黑龙江省降水多值区,因此降水比较多,可能会影响玉米的生长发育,而哈尔滨、齐齐哈尔、大庆、绥化等地区位于黑龙江省西部干旱-半干旱化地区,降水偏少,因此可能更适合玉米的生长发育。

大部分地区玉米气象产量与平均气温、最高气温和最低气温均呈现正相关关系,哈尔滨地区玉米气象产量与平均气温和最低气温相关关系显著,与最高气温相关系数也很大;牡丹江地区与平均气温和最高气温相关关系显著;大兴安岭地区与最高气温相关关系显著。大庆和绥化地区玉米气象产量与气温相关关系不大,说明该地区温度比较适宜玉米生长。由于玉米是喜温作物,所以大部分地区玉米气象产量与气温呈现正相关关系,气温的增长可能利于黑龙江省玉米的生长。

3 讨论

一般来说,玉米作为喜温作物,在不同的生育阶段对温度有不同的要求,玉米种子在 $10 \sim 12^\circ\text{C}$ 时发芽;开花期不仅要求温度达到 $25 \sim 28^\circ\text{C}$,还要求湿

度适宜;在籽粒形成阶段和灌浆阶段最适宜的温度是20~24℃。玉米生育期内温度过高或过低均会在不同程度上影响玉米的最终产量。LIU等^[27]对黄淮海地区玉米产量的研究发现,短期的极端气温变化对作物生长至关重要,尤其是极端气温变化发生在作物主要生育时期时。陈鹏狮等^[28]的研究表明,玉米在三叶-七叶期的叶面积指数与平均气温相关性显著。王晓群等^[29]的研究表明,在玉米的吐丝至乳熟期最低温度、平均温度和最高温度的升高使玉米的秃尖比减小,穗粒数和颗粒质量增加。本研究中发现黑龙江省气温变化是影响玉米产量的关键因素。

玉米的生长发育也需要大量的水,而且很容易形成田间水涝,尤其在玉米的孕穗灌浆期,需水量达到最大,此时气温较高,若在此时发生大雨,则可能会造成玉米根系缺氧,对产量的影响很大。WAHA等^[30]研究表明,在撒哈拉以南的非洲地区,雨季降水的减少将严重影响玉米的产量,甚至超过气温对玉米产量的影响。梁烜赫等^[31]利用灰色关联法分析了吉林省气象因子与作物产量之间的关系,发现在吉林省西部干旱地区,降水量与作物产量相关关系显著。陈鹏狮等^[28]的研究发现,辽宁省玉米地上干质量与降水量相关关系最显著。本研究中,发现降水对黑龙江省玉米产量的影响比较小,这可能是由于位于高纬度寒区的黑龙江省在大多数情况下,由于气温相对较低,降水量通常大于植被的蒸散发量,因此造成降水对作物影响比较小,气温是影响作物生长的主要因素^[32]。

国内外已有一些专家学者进行了区域干湿状况对作物产量影响的研究,LI等^[33]利用SPEI确定了影响伊犁河流域小麦产量的最主要的月份及尺度,SPEI值增加0.5,伊犁地区小麦产量约上升3%。MING等^[34]研究结果表明6—8月干旱是影响华北平原玉米产量的主要时期。PENA-GALLARDO等^[35]利用SPEI分析了美国5种主要旱地作物的年产量对不同时间尺度干旱的响应,得出在潮湿环境中,作物产量与干旱严重程度之间的关系较弱,而且这种反应往往发生在较长的时间尺度上。本研究中,发现黑龙江省玉米产量主要与6—8月的SPEI3-8关系密切,由于6—8月是玉米需水量最高的时期也是生长最旺盛的时期,而且黑龙江省降水主要集中在6—8月,所以用来反映这一阶段干湿状况的SPEI3-8能够准确地量化区域干湿状况对玉米产量的影响^[36]。

本研究以黑龙江省玉米为研究对象,主要研究了玉米生育期内气候变量的时空变化和气候变量与

玉米气象产量之间的关系,研究结果为黑龙江省玉米生产适应未来气候变化提供了科学依据,为地方政府部门制定抗旱减灾和作物空间布局规划提供了科学技术支持。但研究中也存在不足,除降水、气温以及干湿状况以外的影响玉米产量的因素,如生育期内霜冻^[37]、覆膜条件的不同^[38]、不同类型土壤^[39]、不同时期的补充灌溉^[40]都会对玉米的产量产生影响,张耘铨等^[41]研究结果表明,除丰水年外,有效降雨量难以满足玉米的需水要求,在农业生产中应根据不同降雨年型在抽雄期和灌浆期进行适量灌溉。聂堂哲等^[42]的研究指出,黑龙江省玉米生育期内有效降水量和玉米需水量总体呈下降趋势,但有效降水量的下降幅度大于玉米需水量下降幅度,使得玉米灌溉需水形势愈发严峻。因此,应在玉米生育期对黑龙江省玉米进行补充灌溉,以保证玉米正常的生长发育,但黑龙江省玉米补充灌溉的研究不足,有待进一步研究。此外,不同的玉米品种对当地气候^[43]和灌溉制度^[44]的响应也不尽相同。因此,准确分析气候变量对玉米产量的影响,构建多因素评价模型来评价气候变量及其对产量影响,是未来重要的研究方向。

4 结论

(1)黑龙江省大部分地区降水呈现增长趋势,中部分地区降水多呈现减小趋势。除大兴安岭地区的漠河站降水呈现显著增长趋势外,其余地区降水变化趋势均不显著。

(2)在玉米生育期内,湿润化的趋势主要集中在黑龙江省西北部和东南部,黑龙江省自东向西大部分地区主要呈现干旱化趋势。

(3)黑龙江省大部分地区玉米气象产量与SPEI3-8相关关系显著。负相关站点主要分布在降水量较大的东部地区,正相关主要分布在降水量较小的西部地区,黑龙江省西部地区气候条件更适合玉米生长。

(4)绥化地区玉米的生长发育与当地的气候比较匹配,能够保证正常的生产或增产;齐齐哈尔、鸡西、大庆、伊春和大兴安岭地区为保证玉米正常产量可能需要投入大量水资源;哈尔滨、牡丹江、佳木斯、黑河地区为保证区域玉米正常的生产或增产,需进行良好的田间管理措施和合理的水资源优化配置。

(5)相对于气温与玉米气象产量的相关关系,降水对玉米产量的影响较小,由于黑龙江省地处高纬度寒区,受全球气候变化影响,气温增长比较显著,降水变化相对较小,且由于玉米的喜温耐旱性,因此黑龙江省气温变化是影响玉米产量的主要因素。

参 考 文 献

- [1] TONG Siqin, LI Xiangqian, ZHANG Jiquan, et al. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960—2017[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649:75–89.
- [2] BLATE G M, JOYCE L A, LITTELL J S, et al. Adapting to climate change in United States national forests[J]. *Unasylva*, 2009, 60(231):57–62.
- [3] 张卫建,陈金,徐志宇,等.东北稻作系统对气候变暖的实际响应与适应[J].*中国农业科学*,2012,45(7):1265–1273.
ZHANG Weijian, CHEN Jin, XU Zhiyu, et al. Actual responses and adaptations of rice cropping system to global warming in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2012,45(7):1265–1273. (in Chinese)
- [4] 赵海燕,姚凤梅,张勇,等.长江中下游水稻开花灌浆期气象要素与结实率和粒重的相关性分析[J].*中国农业科学*,2006,39(9):1765–1771.
ZHAO Haiyan, YAO Fengmei, ZHANG Yong, et al. Correlation analysis of rice seed setting rate and weight of 1000-grain and agro-meteorology over the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006,39(9):1765–1771. (in Chinese)
- [5] 邓振镛,张强,王润元,等.农作物主要病虫害对甘肃气候暖干化的响应及应对技术的研究进展[J].*地球科学进展*,2012,27(11):1281–1287.
DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Runyuan, et al. The response of plant diseases and pests to climatic warmer-drying and its adaptive technique in the Northwest China[J]. *Advances in Earth Science*,2012,27(11):1281–1287. (in Chinese)
- [6] ZHOU Y, LI N, DONG G, et al. Impact assessment of recent climate change on rice yields in the Heilongjiang reclamation area of Northeast China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013,93(11):2698–2706.
- [7] MENG Q, HOU P, LOBELL D B, et al. The benefits of recent warming for maize production in high latitude China[J]. *Climatic Change*, 2013,122(1):341–349.
- [8] GÜNER B Ü. Trend analysis of precipitation and drought in the Aegean region, Turkey[J]. *Meteorological Applications*, 2017, 24(2):239–249.
- [9] TA Z J, YU R D, CHEN X, et al. Analysis of the spatio-temporal patterns of dry and wet conditions in Central Asia[J]. *Atmosphere*,2018,9(1):7.
- [10] GUO H, BAO A M, LIU T, et al. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966—2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624:1523–1538.
- [11] HUANG Q, ZHANG Q, SINGH V P, et al. Variations of dryness/wetness across China: changing properties, drought risks, and causes[J]. *Global and Planetary Change*, 2017,155:1–15.
- [12] ZHANG Q, HU Z. Assessment of drought during corn growing season in Northeast China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133(4):1315–1321.
- [13] SHI W, TAO F. Vulnerability of African maize yield to climate change and variability during 1961—2010[J]. *Food Security*, 2014, 6(4):471–481.
- [14] FU Q, ZHOU Z, LI T, et al. Spatiotemporal characteristics of droughts and floods in northeastern China and their impacts on agriculture[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018,30(10):2913–2931.
- [15] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7):1696–1718.
- [16] 王丽君. 黄淮海平原夏玉米季干旱、高温的发生特征及对产量的影响[D].北京:中国农业大学,2018.
WANG Lijun. Spatiotemporal characteristics of drought, heat and its effect on yield for summer maize in Huang-Huai-Hai Plain, China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [17] 罗登泽,靳晓言,强皓凡,等.基于SPEI的若尔盖湿地干湿时空演变特征分析[J].*水土保持研究*,2019,26(2):227–233.
LUO Dengze, JIN Xiaoyan, QIANG Haofan, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of wet and dry Zoige wetland based on SPEI[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2019, 26(2):227–233. (in Chinese)
- [18] BURN D H, TALEGHANI A. Estimates of changes in design rainfall values for Canada[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(11):1590–1599.
- [19] SONG X Y, SONG S B, SUN W Y, et al. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960—2013[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 157:137–152.
- [20] HUANG J, SUN S L, XUE Y, et al. Spatial and temporal variability of precipitation and dryness/wetness during 1961—2008 in Sichuan Province, west China[J]. *Water Resources Management*, 2014,28(6):1655–1670.
- [21] LENA B D, VERGNI L, ANTENUCCI F, et al. Analysis of drought in the region of Abruzzo (Central Italy) by the standardized precipitation index[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 115(1–2):41–52.
- [22] SANTOS J F, PULIDO-CALVO I, PORTELA M M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal[J]. *Water Resource Research*, 2010, 46(3):742–750.
- [23] LI C, WANG R H. Recent changes of precipitation in Gansu, Northwest China: an index-based analysis[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 129(1–2):1–16.
- [24] 李秀芬,陈莉,姜丽霞.近50年气候变暖对黑龙江省玉米增产贡献的研究[J].*气候变化研究进展*,2011,7(5):336–341.
LI Xiufen, CHEN Li, JIANG Lixia. Study on contribution of climate warming to maize yield increase in Heilongjiang Province in recent 50 years[J]. *Advances in Climate Change Research*,2011,7(5):336–341. (in Chinese)
- [25] 雷光宇. 黑龙江省近44年来气候时空变化趋势及其对玉米生产的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.

- LEI Guangyu. Temporal and spatial variation trend of climate and its impact on maize production in Heilongjiang Province in recent 44 years [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [26] 杨晓晨, 明博, 陶洪斌, 等. 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, 2015, 23(6): 758-767.
- YANG Xiaochen, MING Bo, TAO Hongbin, et al. Spatial distribution characteristics and impact on spring maize yield of drought in northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 758-767. (in Chinese)
- [27] LIU S X, MO X G, LIN Z H. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Agriculture Water Management, 2010, 97(8): 1195-1209.
- [28] 陈鹏狮, 于文颖, 纪瑞鹏, 等. 辽宁地区玉米生长发育及产量对温度和降水的响应[J]. 中国农学通报, 2014, 30(27): 175-181.
- CHEN Pengshi, YU Wenyong, JI Ruipeng, et al. The responses of maize growth and yield to temperature and precipitation in Liaoning[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(27): 175-181. (in Chinese)
- [29] 王晓群, 杨彦龙, 张宇, 等. 不同生育阶段气象因子对玉米产量及构成要素的影响分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(30): 68-73.
- WANG Xiaoqun, YANG Yanlong, ZHANG Yu, et al. Analysis of the effects of meteorological factors at different growth stages on yield and yield components of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(30): 68-73. (in Chinese)
- [30] WAHA K, MULLER C, ROLINSKI S. Separate and combined effects of temperature and precipitation change on maize yields in sub-Saharan Africa for mid- to late-21st century[J]. Global and Planetary Change, 2013, 106: 1-12.
- [31] 梁烜赫, 徐晨, 王冰, 等. 吉林省不同生态区气象因子对玉米产量影响的评价[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(4): 17-20.
- LIANG Xuanhe, XU Chen, WANG Bing, et al. Evaluation of effect of climatic factors on maize yield in different ecological regions of Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2015, 40(4): 17-20. (in Chinese)
- [32] ZHAO J F, YAN X D, GUO J P. Evaluating spatial-temporal dynamics of net primary productivity of different forest types in northeastern China based on improved FORCCHN[J]. PLoS One, 2012, 7(11): e48131.
- [33] LI C, WANG R, XU J, et al. Analysis of meteorological dryness/wetness features for spring wheat production in the Ili River basin, China[J]. International Journal of Biometeorology, 2018, 62(12): 2197-2204.
- [34] MING B, GUO Y Q, TAO H B, et al. SPEIPM-based research on drought impact on maize yield in North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(4): 660-669.
- [35] PENA-GALLARDO M, VICENTE-SERRANO S M, QUIRING S, et al. Response of crop yield to different time-scales of drought in the United States: spatio-temporal patterns and climatic and environmental drivers[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 264: 40-55.
- [36] 明博, 陶洪斌, 王璞. 基于标准化降水蒸散指数研究干旱对北京地区作物产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(5): 28-36.
- MING Bo, TAO Hongbin, WANG Pu. Impact of drought on grain yield in Beijing investigated by SPEI-based methods[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(5): 28-36. (in Chinese)
- [37] 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.
- YANG Ruozhi, ZHOU Guangsheng. Comprehensive risk assessment of major agrometeorological disasters of maize in northeast China [J]. Journal of Meteorology, 2015, 73(6): 1141-1153. (in Chinese)
- [38] QIN Xiaoliang, LI Yuze, HAN Yunliang, et al. Ridge-furrow mulching with black plastic film improves maize yield more than white plastic film in dry areas with adequate accumulated temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 262: 206-214.
- [39] 杨青华, 高尔明, 马新明, 等. 不同土壤类型对玉米干物质积累动态及其分布的影响[J]. 玉米科学, 2000, 8(1): 55-57.
- YANG Qinghua, GAO Erming, MA Xinming, et al. Effects of different soil types on dry matter accumulation dynamics and distribution in maize [J]. Corn Science, 2000, 8(1): 55-57. (in Chinese)
- [40] 胡铁民, 王增丽, 董平国. 西北旱区制种玉米不同灌溉制度对土壤水分及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2014(1): 27-31.
- HU Tiemin, WANG Zengli, DONG Pingguo. Effects of different irrigation systems on soil moisture and yield of seeding maize in northwest dry region [J]. Water-saving Irrigation, 2014(1): 27-31. (in Chinese)
- [41] 张耘铨, 刘继龙, 聂堂哲. 基于CROPWAT模型的玉米需水量及灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 67-75.
- ZHANG Yunquan, LIU Jilong, NIE Tangzhe. Corn water requirement and irrigation schedule based on CROPWAT model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(7): 67-75. (in Chinese)
- [42] 聂堂哲, 张忠学, 林彦宇, 等. 1959—2015年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 217-227.
- NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, LIN Yanyu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water demand in Heilongjiang Province from 1959 to 2015 [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 217-227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180726&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.026. (in Chinese)
- [43] 程伟东, 杜青, 张刘其, 等. 不同地理气候条件对玉米杂交新组合产量及相关性状的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(1): 29-36.
- CHENG Weidong, DU Qing, ZHANG Liuqi, et al. Effects of different geographical and climatic conditions on yield and related traits of new maize hybrid combinations [J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(1): 29-36. (in Chinese)
- [44] 巩文军. 灌水方式对华北不同品种玉米产量形成和水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 18-22.
- GONG Wenjun. Effects of irrigation methods on yield formation and water use of different maize varieties in North China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 18-22. (in Chinese)