

# 辽宁省生长季气候变化及其对春玉米产量的影响

王蔚丹<sup>1,2</sup>, 孙丽<sup>1,2</sup>, 裴志远<sup>1,2</sup>, 陈媛媛<sup>1,2</sup>, 孙娟英<sup>1,2</sup>, 董沫<sup>1,2</sup>

(1.农业农村部耕地利用遥感重点实验室, 北京 100121; 2.农业农村部规划设计研究院, 北京 100121)

**摘要:**为了明确气候变化对辽宁省春玉米产量的影响,基于 1968—2017 年气象站点数据,结合标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),运用 M-K 趋势分析、相关分析及回归分析等数理统计方法研究了辽宁省春玉米生长季各气候要素、干湿变化特征及其与春玉米产量的关系。结果表明:降水量除丹东呈增加趋势外,其它地区呈现减少趋势;大部分地区温度呈现升高趋势,风速呈显著减弱趋势,相对湿度变化趋势不显著;日照时数除辽阳、本溪呈不显著增加外,其他地区呈减少趋势。降水、最高温和平均温是影响辽宁省春玉米产量的重要因子,尤其是朝阳、葫芦岛、锦州、阜新和大连地区,春玉米对这些要素更敏感,与降水量正相关,与最高温、平均温负相关,未来降水量减少、温度升高将不利于这些地区春玉米生长。随着位置东移降水量逐渐以负效应为主,温度逐渐表现为正效应。除阜新、抚顺、本溪等部分地区呈现干旱化外,其他地区表现为不显著的湿润化趋势。朝阳、葫芦岛、阜新等地区春玉米产量对 6 月、7 月的干湿变化较敏感,易受旱减产;干旱化将使阜新春玉米生产形势变得严峻,朝阳、锦州、大连地区湿润化对春玉米生长有利;沈阳、鞍山、辽阳和营口地区 5—9 月的干湿状况均对春玉米产量有影响,抚顺、本溪、铁岭等地区则易受 6—8 月的干湿状况影响,这些地区当前较适宜春玉米生长;丹东地区易受涝减产,且湿润化趋势将会对该地区玉米生产造成不利影响。辽宁省不同气候要素及干湿变化对不同地区春玉米产量的影响效应有正有负,程度也各不相同,各地应因地制宜采取合理措施促进玉米丰产。

**关键词:**气候变化; SPEI; 产量; 春玉米; 辽宁省

**中图分类号:** P467; S513; S162.5<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2022)02-0281-06

## Climate Change During Growing Season and Its Effects on Spring Maize Yield in Liaoning Province

WANG Weidan<sup>1,2</sup>, SUN Li<sup>1,2</sup>, PEI Zhiyuan<sup>1,2</sup>, CHEN Yuanyuan<sup>1,2</sup>, SUN Juanying<sup>1,2</sup>, DONG Mo<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Cultivated Land Use, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China;

2. Academy of Agricultural Planning & Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China)

**Abstract:** In order to clarify the impact of climate change on spring maize yield in Liaoning Province, based on the meteorological data of 30 stations from 1968 to 2017, and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, M-K trend analysis, correlation analysis and regression analysis were used to analyze the characteristics of climatic factors, dry/wet changes during growing season and the relationship between those and spring maize yield. The results showed that the precipitation presented a decreasing trend except Dandong. In most areas, the temperature showed an increasing trend, the wind speed showed a significant decreasing trend, and the relative humidity showed no significant changing trend. The sunshine hours showed a decreasing trend except Liaoyang and Benxi. Precipitation, the highest temperature and average temperature were important factors which influenced the production of spring corn in Liaoning Province. Especially in Chaoyang, Huludao, Jinzhou, Fuxin and Dalian, spring maize was more sensitive to these factors. Relative meteorological yield was positively related to the precipitation, and negatively correlated with the highest temperature and average temperature during the growth period in these regions. In the future, less precipitation and higher temperature will be detrimental to the growth of spring corn. As moved eastward, precipitation gradually had a negative effect, while temperature gradually showed a positive effect. Apart from an arid trend observed in some areas of Fuxin, Fushun, Benxi, wetness showed an insignificant trend in the other areas.

收稿日期: 2021-04-08

修回日期: 2021-04-17

资助项目: 国家重点研发计划子课题“全球典型区域农作物高时空动态监测应用示范”(2016YFB0501505)

第一作者: 王蔚丹(1985—), 女, 河南开封人, 博士, 主要从事农业干旱研究。E-mail: wangwd52@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 孙丽(1978—), 女, 辽宁辽阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事农情监测研究。E-mail: sunli0618@163.com

The spring corn yield in Chaoyang, Huludao and Fuxin was sensitive to the change of dryness and humidity in June and July, and spring corn was susceptible to drought and yield failure. The trend of dryness in Fuxin would make the situation more severe. The trend of wetness in Chaoyang, Fuxin, Jinzhou and Dalian was favorable to the growth of corn. In Shenyang, Anshan, Liaoyang and Yingkou, the dry and wet conditions from May to September influenced the yield, while the dry and wet conditions from June to August affected the yield in Fushun, Benxi and Tieling. These areas were more suitable for the growth of spring corn. Spring corn was vulnerable to waterlogging in Dandong, and the trend of wetting will have a negative impact on maize production in this area. There are positive and negative effects of different climatic factors and dry/wet changes in different areas on spring maize yield in Liaoning Province, and the degree also varies, so reasonable measures suitable for local circumstances should be taken to promote production of the maize all over the province.

**Keywords:** climate change; standardized precipitation evapotranspiration index; spring maize yield; Liaoning Province

政府间气候变化专门委员会第四次评估报告 (IPCC AR4) 指出, 受全球变化影响, 干旱、强降水等极端气候事件的发生范围和频率有增加风险<sup>[1]</sup>。农业是对气候变化反应最敏感的部门<sup>[2]</sup>, 气候变化对粮食安全的影响越发显著<sup>[3]</sup>。研究气候变化背景下不同气候要素对农作物生产的影响, 以及区域干湿变化与农作物产量之间的关系, 对减少粮食危机十分重要。

目前针对气候变化对产量影响的研究有很多, 刘昌等<sup>[4]</sup>探究了气候变化对山东省冬小麦、夏玉米单产的影响, 结果表明不同气候要素对作物的影响效应及影响程度可能有所不同。陈群等<sup>[5]</sup>分析东北三省春玉米生长季的气候因子 (温度和降水量) 与春玉米生育进程数据和历史产量数据之间的关系, 结果表明平均温、最高温和最低温的变化均会影响春玉米的产量。车晓翠等<sup>[2]</sup>以吉林省为研究对象, 选取年均降水量、年均气温、年均日照时数为气候指标, 建立气候因素与玉米产量的关系模型。陈霞燕等<sup>[6]</sup>发现降水量是影响吉林省西部生产潜力的主要因子, 气温对东部地区更为关键。戚颖等<sup>[7]</sup>研究黑龙江省玉米生长季内降水、气温以及区域干湿变化对玉米产量的影响, 发现气温对黑龙江省玉米产量的影响大于降水。曹永强等<sup>[8]</sup>认为辽宁省春玉米气象产量与生长季内平均温、日照时数呈负相关, 与降水量呈正相关。已有研究多集中在省级行政单元上, 而各气候要素具有地域性差异, 农作物对气候变化的响应也可能存在地域特征。同时伴随着气候变化, 极端天气气候事件频发<sup>[4]</sup>, 气象干湿状况 (旱涝) 对农作物产量的影响不容忽视。标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 考虑水平衡, 具有较强的数学统计机理, 且易于实现, 被广泛应用于描述多时间尺度的干湿状况<sup>[9-11]</sup>。

辽宁省是我国重要的粮食生产基地, 春玉米是该地区广泛种植的粮食作物之一, 气候条件的变化导致年际

间产量波动明显<sup>[12]</sup>。已有的气候变化对农作物产量影响的研究多为省级尺度, 而该地区水分、热量等气候条件存在明显空间差异<sup>[13-14]</sup>, 基于地市级尺度的干湿条件与春玉米产量之间的关系尚不明确<sup>[15-16]</sup>。本研究通过分析降水、气温、日照时数等气候因素变化情况, 结合标准化降水蒸散指数 (SPEI), 基于 M-K 趋势分析、相关分析及回归分析等数理统计方法, 探究辽宁省地市级尺度春玉米生长季的气候要素、干湿状况变化规律及其与历史产量数据之间的关系, 以期为该地区春玉米安全生产管理和农田基础设施建设提供科学依据。

## 1 研究区概况

以辽宁省为研究区 (图 1), 该地区位于东北地区南部,  $38^{\circ}43' - 43^{\circ}26'N$  和  $118^{\circ}53' - 125^{\circ}46'E$ , 夏季温和湿润, 冬季严寒漫长, 属于温带大陆性季风气候。辽宁省是东北地区降水量最多的省份, 年降水量为 600~1 100 mm, 年日照时数 2 100~2 600 h, 年平均温为 7~11℃, 最高温达零上 30℃, 极端高温可达 40℃以上, 最低温零下 30℃。受地理位置和季风气候影响, 各地水热差异较大。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源及处理

气象数据来自“中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)” (<https://data.cma.cn/data>), 该数据集已经过严格的质量控制。具体包括 1968—2017 年降水量、最高温、最低温、平均风速、日照时数、相对湿度等日值数据, 选取具有较完整时间序列的台站 30 个 (图 1)。春玉米单产数据来源于辽宁省统计局, 时间为 1993—2017 年。其中盘锦春玉米占比少, 不参与分析。

### 2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水蒸散指数 本文利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 蒸散模型计算潜在蒸散 ( $ET_0$ ), 得到逐

月降水量与潜在蒸散量的差值,对累计概率密度进行正态标准化求得 SPEI,具体计算方法参见文献<sup>[17]</sup>。指数值越小表示越干旱,反之越湿润。本文计算研究区 4—9 月 1~6 个月时间尺度的 SPEI,得到的指数分别记为  $SPEI_{n-M}$ ,  $n$  表示时间尺度,  $M$  表示月份。如  $SPEI_{6-9}$  表示 9 月份 6 个月时间尺度的 SPEI 值。



图 1 辽宁省气象站点分布

2.2.2 相对气象产量 作物统计产量一般包括趋势产量、气候波动产量和随机产量,气候波动产量是气候波动的贡献<sup>[18]</sup>。为了研究气候波动与作物产量之间的关系一般将随机“噪声”略去,对趋势产量进行分离<sup>[12,19]</sup>。本文利用相对气象产量来表示气候波动对春玉米产量的影响。

$$Y_i = Y_{iq} + Y_{ir} \tag{1}$$

$$Y_{it} = Y_{iq} / Y_{ir} \tag{2}$$

式中:  $Y_i$  为统计产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Y_{iq}$  为气象产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Y_{ir}$  为趋势产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),由实际产量序列拟合方程得出;  $Y_{it}$  为相对气象产量。本文采用 HP 滤波方法模拟春玉米趋势产量,具体计算方法参照文献<sup>[20]</sup>。

2.2.3 Mann-Kendall 趋势分析 Mann-Kendall 法是世界气象组织推荐并广泛使用的趋势分析方法,属于非参数统计检验方法,不需要样本服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰。M-K 趋势检验的具体计算过程见文献<sup>[7]</sup>。

3 结果与分析

3.1 生长季气候要素、SPEI 变化趋势分析

3.1.1 生长季气候要素变化趋势分析 利用 M-K 趋势分析方法计算辽宁省生长季降水量、最高温、最低温、平均温以及日照时数等的变化趋势,得到对应

统计量  $Z$ ,当  $Z > 0$  时,气候要素呈现上升趋势,  $Z < 0$  时呈现下降趋势,当  $|Z| > 1.96$ ,达到 95% 的置信度水平。辽宁省降水量和气温等变化趋势如图 2 所示。结果显示,各地区降水量变化趋势均不显著,除丹东呈增加趋势外,大部分地区降水量呈现减少趋势。各地区的平均温均呈现显著升高趋势;最高温呈现升高趋势,朝阳、阜新、锦州、营口等地区升高趋势不显著;最低温除阜新、沈阳变化不显著外,其他地区呈现显著升高趋势。日照时数除辽阳、本溪呈不显著增加外,其他地区呈减少趋势,其中朝阳、阜新、沈阳、鞍山、营口和丹东地区显著减少。除鞍山、辽阳呈显著减小外,其他地区相对湿度变化不显著。风速除阜新、丹东变化不显著外,其他地区呈显著减弱趋势。

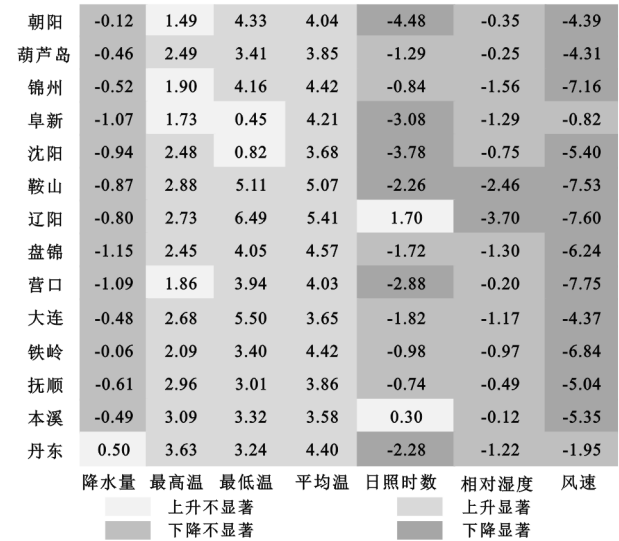


图 2 辽宁省各地市气候要素 M-K 趋势分析统计量

3.1.2 SPEI 变化趋势分析 干湿状况是影响区域农业发展的重要因素。为研究辽宁省春玉米生长季的干湿变化特征,选取 9 月份 6 个月时间尺度的 SPEI ( $SPEI_{6-9}$ )表征该区域的干湿变化。利用 M-K 趋势分析计算各个站点的  $Z$  值,再基于反距离权重法进行空间插值,得到辽宁省干湿变化趋势空间分布(图 3)。可以看出,大部分地区 SPEI 表现为上升趋势,即湿润化,阜新、抚顺、本溪等部分地区呈现干旱化趋势,但均不显著。

3.2 气候要素、SPEI 与春玉米相对产量关系分析

3.2.1 气候要素与春玉米相对产量关系分析 为研究主要气象因子在不同地区对气象产量的影响情况,对降水、气温、日照时数等与春玉米相对气象产量进行相关分析,以确定各地区影响春玉米产量更显著的因素,其关系见表 1。

从降水情况看,朝阳、葫芦岛、锦州、阜新、大连等地区春玉米气象产量与降水量呈正相关,表明这些地区降水对产量产生的正效应多于负效应,降水量减少对春玉米增产不利。沈阳、鞍山、抚顺、本溪、丹东等地区春玉

米相对气象产量与降水呈负相关但不显著,表明这些地区降水满足玉米生长需要,不是影响产量的制约性因子。辽阳春玉米相对气象产量与降水呈显著负相关,表明降水对该地玉米产量的影响以负效应为主。

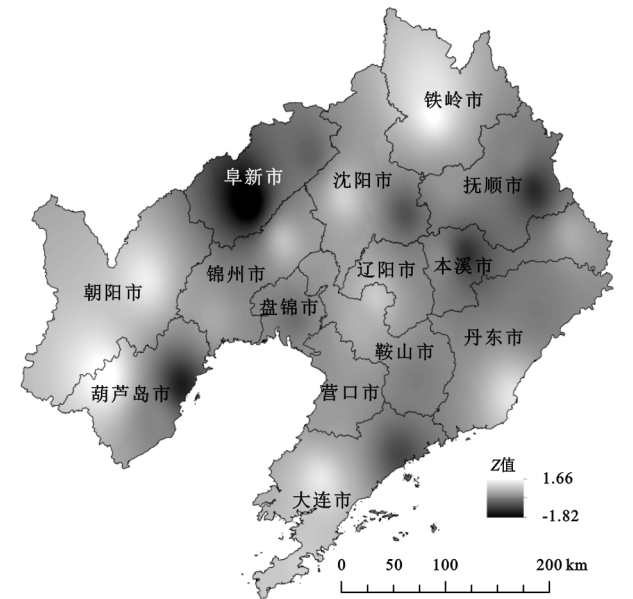


图 3 春玉米生长季 SPEI 指数 M-K 趋势空间分布

表 1 气候要素与春玉米相对气象产量的关系

生长季	朝阳	葫芦岛	锦州	阜新	大连	沈阳	鞍山	辽阳	营口	铁岭	抚顺	本溪	丹东
降水量	0.54 **	0.36 *	0.24	0.55 **	0.26	-0.26	-0.33	-0.51 **	0.05	-0.03	-0.22	-0.32	-0.29
最高温	-0.49 **	-0.38 *	-0.47 *	-0.64 **	-0.40 *	-0.18	-0.11	0.15	-0.31	-0.24	0.15	0.05	0.08
最低温	0.07	0.26	0.13	-0.05	-0.31	-0.11	-0.36	-0.17	-0.01	-0.30	-0.01	0.00	-0.18
平均温	-0.45 *	-0.40 *	-0.46 *	-0.47 *	-0.47 *	-0.25	-0.21	0.06	-0.43 *	-0.27	0.36	0.26	-0.03
日照时数	-0.31	-0.26	-0.24	-0.65 **	-0.51 **	-0.15	-0.10	-0.07	-0.34	-0.25	0.09	-0.01	0.30

注: \* 表示 95% 的置信度水平, \*\* 表示 99% 的置信度水平,下同。

3.2.2 SPEI 与春玉米相对气象产量关系分析 由于气象干湿状况对作物的生长发育及产量的影响不一定表现为线性关系,因此,用二次回归方程  $Y_{it} = ax^2 + bx + c$  对相对气象产量  $Y_{it}$  与多时间尺度 SPEI 进行拟合。拟合方程的决定系数越大,表明拟合效果越好,即产量对干湿变化的敏感性越强。选取 9 个有代表性的地级市,拟合方程的决定系数见图 4。在朝阳、葫芦岛等西部地区,春玉米气象产量与  $SPEI_{1-8}$  决定系数普遍偏小,与  $SPEI_{1-7}$  决定系数比较大,表明其对 8 月份干湿状况不敏感,6—7 月的干湿状况对春玉米产量影响最大,尤其是 7 月份。位于南部的大连也表现出相似特征。在沈阳、鞍山、营口等中部地区,相对气象产量与  $SPEI_{1-8}$  二次曲线拟合显著,决定系数随月份及时间尺度的增加整体上表现出增大趋势。抚顺、铁岭等地区相对气象产量与  $SPEI_{3-8}$  拟合方程的决定系数最大。丹东地区相对气象产量与  $SPEI_{1-8}$  拟合系数最大,表明该地区玉米产量对 8 月份干湿状况敏感。

从气温情况看,最高温、平均温与春玉米气象产量呈负相关关系,夏季温度过高不利于玉米的开花授粉及水分积累<sup>[8]</sup>。朝阳、葫芦岛、锦州、阜新、大连与最高温、平均温呈显著负相关关系,表明这些地区对最高温、平均温比较敏感,最高温和平均温的升高可能不利于这些地区春玉米的生长。营口表现出类似的特征。抚顺、本溪平均温与玉米相对气象产量呈正相关关系,随着气温升高产量可能提高。辽阳和丹东地区春玉米相对气象产量与平均温的相关系数接近 0,表明这些地区平均温不是限制玉米生长的因子。最低温与各地区相对气象产量的关系均不显著,表明最低温对辽宁省玉米产量影响有限。

从日照时数情况看,整体上玉米产量与日照时数负相关,尤其是阜新、大连地区达到 99% 的置信水平,这些地区日照时数呈现减小趋势,有利于玉米正常生长。丹东地区玉米产量与日照时数以正效应为主,日照时数减小可能导致玉米减产。鞍山、辽阳、本溪、抚顺一线日照时数与相对气象产量相关性低,说明这些地区日照适宜玉米生长。

为进一步探究产量与 SPEI 之间的关系,根据得到的不同地区相对气象产量和与其关系比较密切的 SPEI,将二者回归方程列出(表 2)。SPEI 与相对气象产量的回归方程均显著,  $a < 0$ , 呈开口向下的抛物线,其与  $x$  轴的两个交点为旱、涝阈值,当 SPEI 位于交点之间时增产,顶点对应的横坐标值为最优水分状况,纵坐标值为最高相对气象产量。朝阳、阜新、大连等地区回归方程对称轴 SPEI 大于 1.0,说明这些地区的春玉米易受旱减产。沈阳、鞍山、辽阳、营口、铁岭、抚顺、本溪等地区回归方程对称轴 SPEI 在  $-0.5 \sim 0.5$  之间,表明这些地区干湿状况较适宜春玉米生长,正常年份即可高产增收,但偏旱、偏涝都可能造成玉米减产。丹东地区回归方程对称轴 SPEI 值为负值,表明过湿影响了春玉米生长,易受涝减产,宜加强农田基础设施建设并采取合理的田间管理措施以保证春玉米正常生产。阜新地区主要受旱减产,由于同时表现出干旱化趋势,未来可能面临更严峻的形势,而西部其他地区的湿润化趋势对玉米增产有利。丹东湿润化趋势对玉米生产不利。

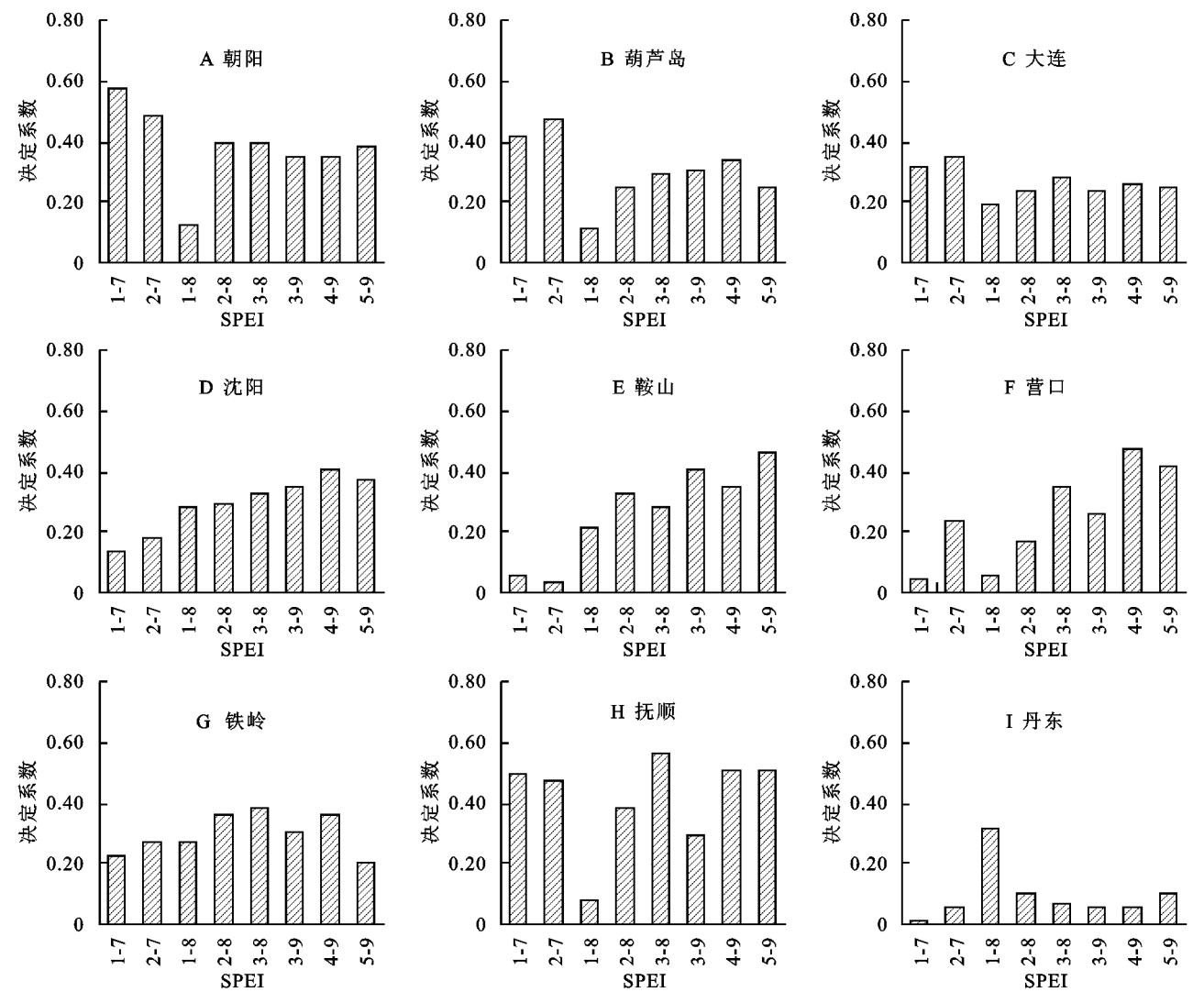


图 4 多时间尺度 SPEI 与相对气象产量拟合方程的决定系数

表 2 辽宁省 SPEI 与春玉米相对气象产量回归分析

SPEI	地区	回归方程	显著性	$R^2$	涝阈值	旱阈值	最优水分状况	最高相对气象产量
SPEI <sub>2-7</sub>	朝阳	$-0.11x^2+0.28x+0.04$	**	0.48	2.63	-0.14	1.24	0.22
	葫芦岛	$-0.12x^2+0.24x+0.09$	**	0.47	2.26	-0.33	0.97	0.20
	锦州	$-0.07x^2+0.14x+0.05$	**	0.48	2.35	-0.30	1.03	0.12
	阜新	$-0.05x^2+0.17x+0.05$	**	0.50	3.52	-0.26	1.63	0.18
	大连	$-0.02x^2+0.12x+0.03$	**	0.35	5.27	-0.22	2.52	0.18
SPEI <sub>5-9</sub>	沈阳	$-0.09x^2+0.01x+0.09$	**	0.37	1.05	-0.93	0.06	0.09
	鞍山	$-0.13x^2-0.03x+0.11$	**	0.46	0.81	-1.08	-0.14	0.12
	辽阳	$-0.16x^2-0.05x+0.16$	**	0.67	0.84	-1.18	-0.17	0.16
	营口	$-0.09x^2+0.06x+0.08$	**	0.42	1.34	-0.68	0.33	0.09
	铁岭	$-0.10x^2+0.05x+0.10$	**	0.39	1.21	-0.76	0.23	0.10
SPEI <sub>3-8</sub>	抚顺	$-0.13x^2+0.03x+0.12$	**	0.56	1.10	-0.86	0.12	0.12
	本溪	$-0.06x^2+0.01x+0.06$	**	0.42	1.03	-0.85	0.09	0.06
SPEI <sub>1-8</sub>	丹东	$-0.04x^2-0.08x+0.03$	**	0.32	0.31	-2.56	-1.12	0.08

4 讨论与结论

(1) 各地区降水量变化趋势均不显著,降水的年际间变异差异较大。除丹东呈增加趋势外,其他地区降水量呈现减少趋势。大部分地区的平均温、最高温、最低温均呈现显著升高趋势。日照时数除辽阳、

本溪呈不显著增加外,其他地区呈减少趋势。大部分地区相对湿度变化不显著,风速呈显著减弱趋势。

(2) 大部分地区表现出湿润化趋势,阜新、抚顺、本溪等部分地区呈现干旱化趋势,但均不显著。

(3) 降水、最高温、平均温是影响辽宁省春玉米产量的重要因子,日照时数次之,与最低温关系不显著。

朝阳、葫芦岛、锦州、阜新、大连等地区春玉米对这些要素更敏感,与降水量呈正相关,与最高温、平均温、日照时数呈负相关,未来降水量减少、最高温、平均温升高将对这些地区玉米增产不利,而日照时数减少将有利于春玉米生长。降水过多严重影响辽阳地区玉米产量,营口则对温度反应敏感,过高的温度对玉米生长不利。抚顺、本溪地区随着平均温升高玉米产量可能提高。

(4) 朝阳、葫芦岛、阜新等地区春玉米产量对 6 月、7 月的干湿变化较敏感,在沈阳、鞍山、营口等中部地区,5—9 月的干湿变化均对产量有影响。抚顺、铁岭等地区气象产量对 6—8 月干湿状况敏感,丹东地区对 8 月份干湿状况更为敏感。

(5) 朝阳、葫芦岛、阜新等地区为保证春玉米正常产量可能需要加大水资源保障力度,阜新干旱化趋势将使该地区形势更为严峻,朝阳、锦州、大连湿润化有利于玉米生长。沈阳、鞍山、辽阳、营口、铁岭、抚顺、本溪等地区玉米生长发育与当地干湿状况较为匹配,但偏旱、偏涝均可能造成玉米减产。丹东地区易受涝减产,湿润化将对玉米生产更为不利。

本文分析辽宁省地市级尺度不同气候要素及干湿状况对春玉米生产的影响,发现西部地区降水量与气象产量呈正相关,随着东移逐渐以负效应为主,这符合辽宁省降水空间上呈东南—西北递减趋势的规律<sup>[13-14]</sup>,降水过少或过多均不利于玉米正常生长。随着全球变暖,辽宁省极端低温天气的出现频率相对降低<sup>[8]</sup>,这与最低温与春玉米气象产量的关系在各地均不显著的结论是一致的。辽宁省降水量除丹东呈增加趋势外,其他地区呈现减少趋势,看似与大部分地区表现为湿润化趋势相矛盾,这是由于风速和日照时数的减少对  $ET_0$  的减小作用掩盖了由温度上升引起  $ET_0$  的增大作用<sup>[21]</sup>,  $ET_0$  下降的幅度大于降水量减少的幅度,使得气候变湿。

本文对生育期内各月多时间尺度的 SPEI 与相对气象产量的关系进行了分析,发现不同地区敏感月份及时间尺度有所不同,但篇幅所限,尚未对各地区分月或分生育期各气候要素与玉米产量的关系进行探讨,后续可加强这方面的研究,以期合理利用各地气候资源以促进当地农业生产发展提供更详实的依据。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report[R]. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2007.
- [2] 车晓翠,李洪丽,张春燕,等.1980 年代以来气候变化对吉林省玉米产量的影响[J].水土保持研究,2021,28(2): 230-234,241.
- [3] Global Network Against Food Crisis. Global Report on Food Crises 2020[R]. Brussels/Rome/New York: Food Security Information Network, 2020.
- [4] 刘昌,张红日,赵相伟,等.山东省气候变化及其对冬小麦-夏玉米产量的影响[J].水土保持研究,2020,140(3): 383-388.
- [5] 陈群,耿婷,侯雯嘉,等.近 20 年东北气候变暖对春玉米生长发育及产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):1904-1916.
- [6] 陈霞燕,王连喜,任景全,等.吉林省春玉米生产潜力及其敏感性分析[J].作物杂志,2016,32(6):91-98.
- [7] 戚颖,白雪峰,李铁男.气候变化对黑龙江省生育期内玉米产量的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):254-263.
- [8] 曹永强,李玲慧,路洁,等.气候变化对辽宁省玉米产量的影响[J].中国农村水利水电,2020,457(11):138-143.
- [9] 蔡思扬,左德鹏,徐宗学,等.基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J].南水北调与水利科技,2017,15(5):15-21.
- [10] 沈国强,郑海峰,雷振锋.基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究[J].生态学报,2017,37(17):5882-5893.
- [11] Yu X Y, He X Y, Zheng H F, et al. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over Northeast China[J]. Natural Hazards, 2014,71(1):275-289.
- [12] 刘维,李祎君,何亮,等.基于 SPI 判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):121-127.
- [13] 杨国范,吴永玉,林茂森. GPM 卫星降水数据在辽宁地区的适用性评价[J].沈阳农业大学学报,2020,51(5):52-60.
- [14] 曹永强,冯兴兴,李玲慧,等.气候变化下辽宁省春玉米水热时空特征及干旱风险研究[J].生态学报,2021,41(3):1092-1105.
- [15] 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.
- [16] 韩冬荟,赵金媛,胡琦.东北地区粮食作物产量变化特征及其对气象干旱的响应研究[J].中国农业大学学报,2021,26(3):188-200.
- [17] Vicente S M, Begueria S, Lopez J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [18] Zhang Q, Yu H, Sun P, et al. Multisource data based agricultural drought monitoring and agricultural loss in China[J]. Global and Planetary Change, 2019,172(1): 298-306.
- [19] Potopova V, Boroneant C, Boincean B, et al. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova[J]. Int. J. Climatol., 2015,36(4):2063-2082.
- [20] 王桂芝,陆金帅,陈克堋,等.基于 HP 滤波的气候产量分离方法探讨[J].中国农业气象,2014,35(2):195-199.
- [21] 胡琦,胡莉婷,董蓓,等.1961—2014 年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J].农业工程学报,2017,33(6):124-132.