

# 1980 年代以来气候变化对吉林省玉米产量的影响

车晓翠, 李洪丽, 张春燕, 郭 聃, 沈海鸥

(吉林农业大学 资源与环境学院, 长春 130118)

**摘 要:**为了研究气候变化对吉林省玉米产量的影响,基于吉林省 1980—2017 年气象和农业数据,运用多种统计方法对吉林省气候、玉米产量变化特征进行了分析,并运用多元线性回归方法确立了产量与气候因子的相关模型。结果表明:研究期内吉林省年均气温显著上升,年均降水量和年均日照时数有所减少,但趋势不显著;玉米实际产量和趋势产量均呈明显上升趋势,说明技术进步、社会经济发展促使粮食单产产量增加作用显著;气象产量差异较大,说明气候因素对吉林省玉米产量的影响较大;相对产量与气象产量变化趋势一致,气候丰年 9 个,气候歉年 3 个,其他为正常年份;气象产量与年均气温、年均降水量、年均日照时数之间呈现正相关,根据拟合回归模型,未来 10 年吉林省玉米产量呈下降趋势。吉林省气候总体呈现以“气温明显升高,降水量、日照时数减少”为特征的暖干化趋势将制约玉米产量的提高。

**关键词:**气候变化; 玉米产量; 多元线性回归; 吉林省

**中图分类号:**P467; S513

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)02-0230-05

## Impacts of Climate Change on Corn Yield in Jilin Province Since 1980s

CHE Xiaocui, LI Hongli, ZHANG Chunyan, GUO Dan, SHEN Haiou

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** In order to study the impact of climate change on corn yield in Jilin Province, based on the meteorological and agricultural data of Jilin Province from 1980 to 2017, we analyzed the characteristics of climate and corn yield changes in Jilin Province by using a variety of statistical methods, and established the correlation model between yield and climate factors by multiple linear regression method. The results showed that during the study period, the annual average temperature increased significantly, the annual average precipitation and sunshine hours decreased, but the trend was not significant; the actual yield and trend yield of corn showed an obvious upward trend, which showed that the technical progress and social and economic development had the significant effect on the increase of grain yield per unit area; the meteorological yield was quite different, indicating that climate factors had the impact on corn yield in Jilin Province; the change trend of relative yield was consistent with that of meteorological yield, with 9 climate rich years, 3 poor climate years, and the others were normal years; the meteorological yield was positively correlated with the annual average temperature, annual average precipitation and sunshine hours. According to the fitting regression model, the corn yield showed a downward trend in the next 10 years. The climate in Jilin Province is characterized by the pattern of the obvious increase of temperature, reduction of the precipitation and sunshine hours, which will restrict the increase of corn yield.

**Keywords:** climate change; corn yield; multiple linear regression; Jilin Province

20 世纪中后期以来,以温度升高为代表的气候变化成为各相关领域研究的热点问题<sup>[1-3]</sup>。农业是对气候变化反应最敏感的部门,气候变化对农业生产的

影响已经引起各国政府、社会和科学界的高度重视,成为重要的研究课题<sup>[4-5]</sup>。光照、热量、降水等农业气候要素发生变化,必然导致农业生产条件与生产水平

收稿日期:2020-05-13

修回日期:2020-05-27

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0202900,2016YFC0501201);国家自然科学基金(41801328)

第一作者:车晓翠(1979—),女,内蒙古赤峰人,副教授,博士,主要从事农业资源可持续利用及水土保持效益评价研究。E-mail: xiaocui@jlau.edu.cn

通信作者:沈海鸥(1986—),女,吉林大安人,讲师,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: shensusan@163.com

发生改变,最终影响农业的量与质<sup>[6]</sup>。研究气候变化对农业作物生产的影响,分析不同气候要素对生产力影响的大小,探究其机理,剖析影响作物产量的关键因素,对增加农作物产量,保障农业可持续发展具有重要的理论意义。

目前,国内外针对气候变化对农业的影响已开展了多方面研究。研究内容主要围绕 4 个方面:一是气候变化对农业自然资源要素时空分布的影响及特征<sup>[7-9]</sup>,二是气候变化影响下农作物育种改良适应<sup>[10-11]</sup>,三是气候变化对农作物生产布局与种植制度的影响<sup>[12-13]</sup>,四是气候变化对病虫害、旱涝等灾害的影响<sup>[14]</sup>。研究方法主要有 3 种,一是经验统计模型方法,即通过确定合理指标,运用统计学的多元回归、线性相关分析等方法构建气候变化与作物产量之间的关系模型<sup>[15-16]</sup>;二是农业生态地带模型分析方法,即将作物模型运用到土地管理决策中,基于农业生态区域的划分,分析不同区域作物生长随气候因素变化的研究方法,一般结合 GIS 技术评估土地生产力<sup>[17]</sup>;三是观测试验方法,即通过试验方法,动态模拟气候因素变化与农作物产量的相关关系,探究气候变化对农作物生产影响的内在机理<sup>[18]</sup>,研究多以全球或国家为尺度<sup>[19-20]</sup>。已有的研究成果为进一步研究气候变化对农业生产的影响奠定了重要的理论基础与方法指导。然而,气候变化具有地域性特征,从地区角度分析气候变化对农业产量的影响具有重要的实践意义。

吉林省是我国重要的粮食生产基地,在保障我国粮食安全和农业生产中具有举足轻重的地位。2017 年,吉林省耕地面积约占全国耕地面积的 5.18%,人均耕地面积是全国平均水平的 3.3 倍,粮食产量约占全国粮食产量的 6.28%。吉林省地处享誉世界的“黄金玉米带”,玉米总产量占粮食总产量的比重高达 78.3%。然而,气候变化将使吉林省面临着较高的极端灾害风险和更脆弱的气候变化影响,严重影响到吉林省乃至全国的粮食安全和农业可持续发展。以往的研究主要体现在气候变化对农产品品质影响的研究<sup>[21-23]</sup>,结合玉米产量的研究报道较少。基于此,本文以省域为研究尺度,以吉林省为研究对象,选取年均降水量、年均气温、年均日照时数等为气候指标,利用 5 a 滑动平均法,分析 20 世纪 80 年代以来吉林省气候变化特征,运用数据统计分析方法,建立气候因素与玉米产量的关系模型,定量分析气候变化对吉林省玉米产量的影响及作用机理与特征,基于关系模型,预测未来 10 a 吉林省玉米气象产量的发展趋势,并提出建议与措施,为推进吉林省应对气候变化的玉米生产提供理论依据及决策支持。

## 1 研究区概况

吉林省地处东经 121°38′—131°19′,北纬 40°50′—46°19′,位于中纬度欧亚大陆东侧,属于温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,气温、降水、温度具有明显的季节变化和地域差异。多年平均气温 5.1~6.1℃,多年平均降水量 400~600 mm,多年平均日照时数为 2 259~3 016 h,正常年份,光、热、水分条件可以满足作物生长需要,是国家重要的商品粮生产基地。下辖 9 个地市(州),面积约 18.74 万 km<sup>2</sup>,约占中国国土面积的 2%,2017 年有耕地 689.67 万 hm<sup>2</sup>。吉林省中西部地区是粮食主要产区,主要种植玉米、大豆、水稻等温带农作物和其他经济作物。多年来,吉林省粮食占有量、商品量、玉米出口量和粮食商品率等一直处于全国领先地位<sup>[24]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文的气象数据来源于历年的《吉林年鉴》、《吉林统计年鉴》和吉林省气候公报。玉米产量数据来源于历年的《吉林统计年鉴》。

### 2.2 研究方法

2.2.1 产量分解 粮食产量受各种自然和经济社会因素的综合影响。综合粮食产量与气候因子关系的研究,一般将由技术进步、经济社会发展等因素引起的粮食单产定义为趋势产量,由气候因素影响波动的粮食单产定义为气象产量<sup>[25-27]</sup>。将玉米单产分解为 3 部分:

$$Y = X_t + X_w + X_e \quad (1)$$

式中:Y 为玉米实际单产(kg/hm<sup>2</sup>);X<sub>t</sub>为趋势产量(kg/hm<sup>2</sup>);X<sub>w</sub>为气象产量(kg/hm<sup>2</sup>);X<sub>e</sub>为随机波动产量(kg/hm<sup>2</sup>),因影响相对较小,可忽略不计。

2.2.2 趋势产量模拟 趋势产量表示玉米产量的历史演变趋势,一般认为随着技术水平进步、经济社会发展而逐渐上升,本文采用 5 a 滑动平均法模拟。

2.2.3 气象产量 为定量分析气候因素对玉米产量的影响,由公式(1)分离气象产量得到:

$$X_w = Y - X_t \quad (2)$$

式中:X<sub>w</sub>为气象产量(kg/hm<sup>2</sup>);Y 为玉米实际单产(kg/hm<sup>2</sup>),用统计年鉴中玉米单位面积产量的实际数据表示;X<sub>t</sub>为趋势产量(kg/hm<sup>2</sup>),用 5 a 滑动平均方法计算获得。

2.2.4 相对气象产量 相对气象产量能较直观地表征气候变化对玉米产量的影响程度<sup>[28-29]</sup>,公式如下:

$$X_r = \frac{X_w}{X_t} \times 100\% \tag{3}$$

式中： $X_r$ 为相对气象产量(%)，定义当  $X_r > 10\%$  时表示当年的气候因素有利于农作物生长，为气候丰年；当  $X_r < -10\%$  时表示当年的气候因素不利于农作物生长，为气候歉年；其他为正常年份。 $X_t$ 为趋势产量(kg/hm<sup>2</sup>)； $X_w$ 为气象产量(kg/hm<sup>2</sup>)。

2.2.5 多元线性回归模型 模型计算使用 SPSS 21.0 软件。多元线性回归数学模型为：

$$y_i = \beta_i + \beta_{1i}x_{1i} + \beta_{2i}x_{2i} + \beta_{3i}x_{3i} + \epsilon_i \tag{4}$$

式中： $y_i$ 为因变量，即第  $i$  年粮食的气象产量； $x_{1i}$ 、 $x_{2i}$ 、 $x_{3i}$ 为自变量，分别为第  $i$  年的年均气温、年均降水量、年均日照时数； $\beta_i$ 为第  $i$  年的常数项； $\epsilon_i$ 为第  $i$  年的误差项； $\beta_{1i}$ 、 $\beta_{2i}$ 、 $\beta_{3i}$ 为第  $i$  年各自变量的回归系数。

3 结果与分析

3.1 气候变化特征

3.1.1 气温变化特征 由图 1 可知，1980—2017 年，吉林省年平均气温为 3.6~6.9℃，平均值为 5.5℃，最高年均气温 6.9℃(1990 年)比最低年均气温 3.6℃(1980 年)高 3.3℃，气温变化波动明显。38 a 间，气温变化绝大多数以正增长为主，其中，有 30 个年份表现为气温较上一年份升高。平均气温整体上升趋势显著，由 1980 年 3.6℃上升到 2017 年的 6.1℃，拟合曲线的斜率为 0.019 9。结合 5 a 滑动平均进一步分析，吉林省气温变化可以划分 3 个阶段，1980—1988 年为第一阶段，此阶段气温最低，平均气温 4.8℃，低于平均气温水平，但上升趋势明显；1989—2008 年为第二阶段，此阶段整体气温最高，绝大多数年份均高于平均气温水平，平均气温 5.9℃，最高达到 6.9℃；2009—2017 年为第 3 个阶段，连续几年出现气温较低情况，低于平均气温水平，但整体气温呈现明显上升趋势，平均气温为 5.2℃。温度升高会使农作物生长季节积温增加，无霜期延长，适栽作物适宜种植区域明显扩大。

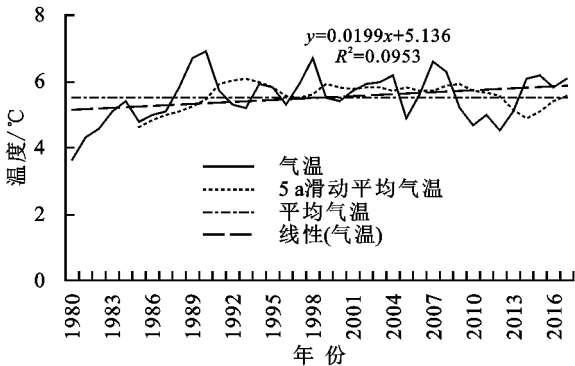


图 1 1980—2017 年吉林省气温变化特征

3.1.2 降水量变化特征 由图 2 可知，1980—2017 年，吉林省年均降水量为 469~821 mm，平均值 620 mm，最高降水量 821 mm(1985 年)比最低降水量 469 mm(2001 年)高 352 mm，降水量变化波动明显。38 a 间，约有 22 个年份较上一年份降水量变化率为负，且年际变化量较大，年均降水量整体下降趋势明显，拟合曲线斜率为-1.34。结合 5 a 滑动平均进一步分析，吉林省降水量变化可划分为 3 个阶段，1980—1998 年为降水量充沛阶段，虽然整体上呈现急剧下降趋势，但其平均降水量(648 mm)高于 1980—2017 年降水量平均值(620 mm)；1999—2009 年，降水量最低，大多数年份降水量均低于 1980—2017 年降水量平均值，到 2001 年下降到最低值，平均降水量仅为 562 mm；2010 年以后降水量有所回升，平均降水量 654 mm。但是，降水量总的趋势是减少，并且降水量波动幅度增大，干旱与降水丰富的年份交替，年际变化降水量差值在增大。

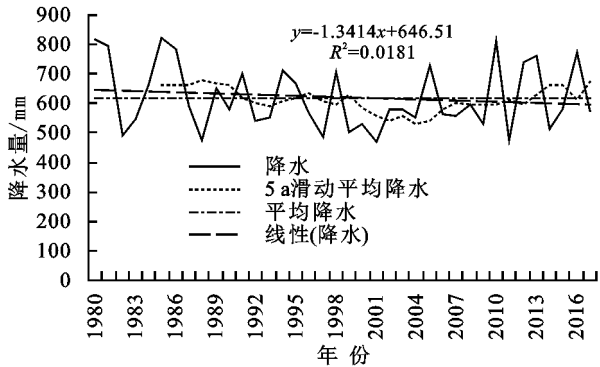


图 2 1980—2017 年吉林省降水量变化特征

3.1.3 日照时数变化特征 由图 3 可知，1980—2017 年，吉林省年平均日照时数为 1 492~3 399 h，平均值为 2 525 h，最高年平均时数 3 398 h(1980 年)比最低年平均时数 2 026 h(2008 年)多 1 362 h。38 a 间，有 20 个年份的日照时数年变化率为负，拟合曲线斜率为-9.79，说明吉林省年平均日照时数整体表现为下降趋势，但趋势不显著。结合 5 a 滑动平均进一步分析日照时数变化特征，可将其变化分为 3 个阶段，第一阶段为 1980—1996 年，日照时数急速下降，从 3 399 h 下降到 2 479 h，11 个年份的平均日照时数低于 1980—2017 年日照时数平均值；第二阶段为 1997—2004 年，表现为日照时数平稳阶段，日照时数基本与 1980—2017 年日照时数平均值相当；第三阶段为 2005—2017 年，日照时数显著下降，平均日照时数 2 362 h，整体低于 1980—2017 年日照时数平均值。

3.2 玉米产量变化特征

3.2.1 实际产量、趋势产量与气象产量变化特征 从表 1 和图 4 可看出，1980—2017 年，吉林省玉米实际

产量年际间不尽相同,在 3 015~7 948 kg/hm<sup>2</sup>波动,总体呈现上升趋势,但期间波动较大。1980—1984 年吉林省玉米实际产量呈现快速上升趋势,但 1985 年又急剧下降,由 1984 年的 5 955 kg/hm<sup>2</sup>下降到 1985 年的 4 725 kg/hm<sup>2</sup>,从 1986 年以后整体上呈现快速上升趋势,最高产量达到 7 948 kg/hm<sup>2</sup>。趋势产量呈现明显上升趋势,由 1985 年的 4 308 kg/hm<sup>2</sup>稳定上升到 2017 年 7 662 kg/hm<sup>2</sup>,说明技术进步、社会经济发展促使玉米单产增加作用显著<sup>[30]</sup>。气象产量差异较大,在-1 400~1 638 kg/hm<sup>2</sup>波动,说明气候因素对吉林省玉米产量的影响很大<sup>[31]</sup>。

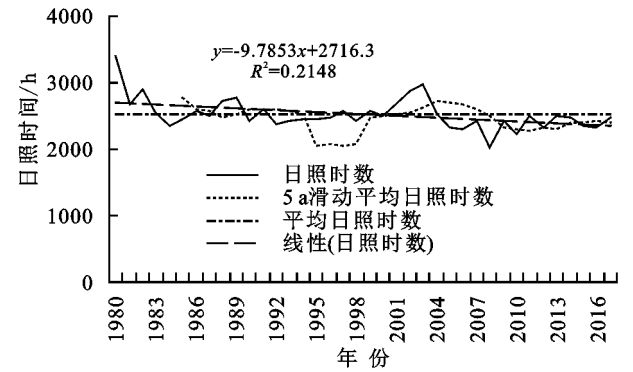


图 3 1980—2017 年吉林省日照时数变化特征

表 1 1985—2017 年吉林省玉米实际产量、趋势产量和气象产量 kg/hm<sup>2</sup>

年份	实际产量	趋势产量	气象产量	年份	实际产量	趋势产量	气象产量
1980	3015	—	—	1999	7125	6800	325
1981	3405	—	—	2000	5454	6854	-1400
1982	3675	—	—	2001	6893	6546	347
1983	5490	—	—	2002	5970	6511	-541
1984	5955	—	—	2003	6148	6678	-530
1985	4725	4308	417	2004	6238	6318	-80
1986	4665	4650	15	2005	6540	6141	399
1987	5805	4902	903	2006	7071	6358	713
1988	6150	5328	822	2007	6308	6393	-85
1989	4965	5460	-495	2008	7121	6461	666
1990	6900	5262	1638	2009	6121	6657	-536
1991	6135	5697	438	2010	6578	66337	-56
1992	5940	5991	-51	2011	7463	6641	822
1993	6330	6018	312	2012	7851	6719	1132
1994	6854	6054	800	2013	7933	7028	905
1995	6994	6432	562	2014	7395	7189	206
1996	7067	6451	616	2015	7384	7444	-60
1997	5135	6637	-1502	2016	7747	7605	142
1998	7949	6476	1473	2017	7806	7662	145

注:“—”代表未发现。

3.2.2 相对产量变化特征 由图 5 可知,1985—2017 年吉林省玉米相对产量与气象产量变化趋势一致,变化幅度较大。粮食产量的丰歉与气象条件密切相关,高温、少雨、多日照的年份表现为丰年,而低温、多

雨、少日照的年份是歉年。33 a 间,吉林省玉米产量气候丰年 9 个,气候歉年 3 个,其他为正常年份。

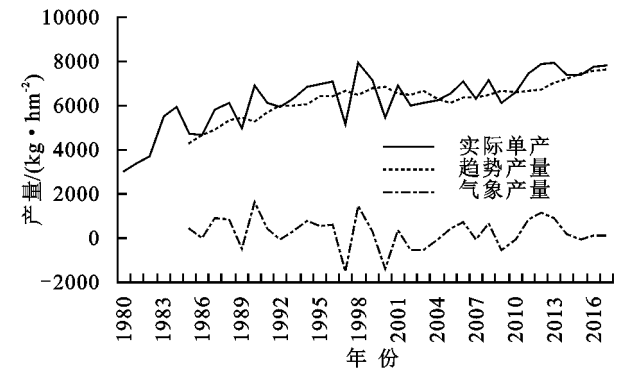


图 4 1980—2017 年吉林省玉米产量变化特征

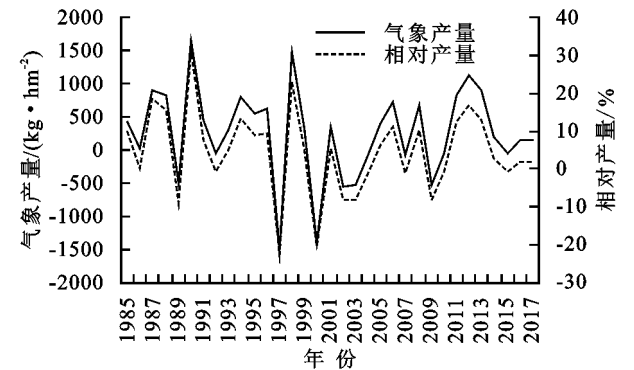


图 5 1985—2017 年吉林省玉米气象产量与相对产量变化特征

3.3 气候变化与吉林省玉米产量相关性分析

3.3.1 气候因子与玉米产量相关性 使用 SPSS 21.0 软件,将气象产量作为因变量,年均气温、年均降水量、年均日照时数作为协变量进行线性回归分析,得到的回归模型为  $y_i = 9.745x_{1i} + 0.34x_{2i} + 0.007x_{3i} - 262.613$ ,即气象产量与年均气温、年均降水量、年均日照时数之间呈现正相关关系。

由表 2 可知,气温、降水量、日照对于玉米气象产量影响均不显著。可能的原因归于以下几方面:气温是农作物生长的重要因素<sup>[32]</sup>,虽然吉林省气温整体上升趋势明显,但年际间波动幅度不大,所以气象产量对气温变化响应不显著;由于降水量增减变化逐年更替,所以降水量对气象产量的影响表现为不显著<sup>[33]</sup>;充分的日照有利于农作物的生长,虽然吉林省日照时数呈下降趋势,但由于玉米为短日照作物,日照时数在 12 h 内,成熟提早,所以下降的日照时数对玉米气象产量影响不显著<sup>[34]</sup>。

表 2 吉林省玉米气象产量多元线性回归结果

变量	偏回归 系数 $\beta$	标准 误差 SE	$t$ 检验值	显著性 $p$ 值	膨胀 系数 VIF
年均气温	0.08	31.28	0.31	0.76	2.04
年均降水量	0.30	0.29	1.16	0.26	2.09
年均日照时数	0.03	0.04	0.16	0.88	1.07



3.3.2 未来 10 a 吉林省玉米产量趋势分析 根据吉林省气温、降水量和日照时数变化趋势,并结合拟合回归模型,可以预测未来 10 a 吉林省玉米气象产量(图 6)。结果表明,到 2030 年气象产量为 9.7 kg/hm<sup>2</sup>,因此,吉林省的气温升高、降水量与日照减少的变化趋势会使蒸发量速率加大,带来的一系列变化导致农作物水分亏缺,易形成干旱,将制约吉林省玉米产量的提高<sup>[35-36]</sup>。

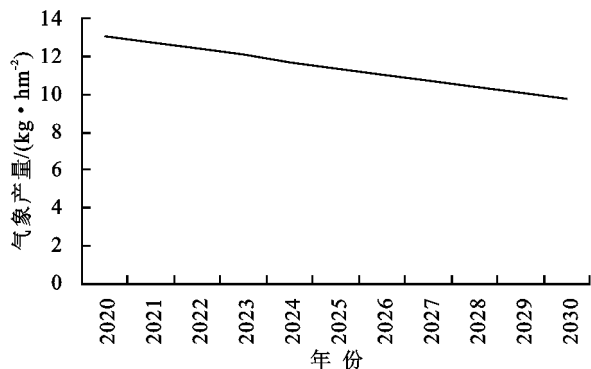


图 6 吉林省玉米气象产量变化趋势

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1) 1980 年以来吉林省年均气温波动上升,整体上升趋势显著。年均降水量总体呈减少趋势,波动亦明显。年均日照时数的多年平均值为 2 525 h,38 a 间年均日照时数整体呈下降趋势,但趋势不明显。吉林省气候总体以“气温明显升高、降水量、日照时数减少”为特征的暖干化趋势。

(2) 吉林省玉米单产呈现上升趋势,且上升趋势明显。趋势产量呈现快速上升趋势,说明技术进步、社会经济发展促使玉米单产产量增加作用显著。气象产量差异较大,说明气候因素对吉林省玉米产量的影响很大。相对产量与气象产量变化趋势一致,1985—2017 年气候丰年 9 个、气候歉年 3 个,其他为正常年份。

(3) 吉林省玉米气象产量与年均气温、年均降水量、年均日照时数之间呈现正相关关系。根据气温、降水量和日照变化趋势,并结合拟合回归模型,预测未来 10 a 吉林省玉米气象产量将呈下降趋势。

### 4.2 建议

(1) 气候变暖对吉林省农业生产具有正效应,应充分适应和利用这一变化趋势,通过适时调整玉米品种布局及种植比例,从而达到增产增收的目的。

(2) 吉林省气候变暖、降水量与日照减少会产生气候变干、水资源减少、病虫害严重等不利因素,需通过选育抗逆性强的作物品种,调整播期等适应性措施,缓解未来气候变化对吉林省玉米生长发育的负面影响。

### 参考文献:

- [1] 许吟隆,郑大玮,刘晓英,等.中国农业适应气候变化关键问题研究[M].北京:气象出版社,2014.
- [2] 秦大河,陈振林,罗勇,等.气候变化科学的最新认识[J].气候变化研究进展,2007,3(2):63-73.
- [3] 覃志豪,唐华俊,李文娟,等.气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J].中国农业资源与区域,2013,34(5):1-7.
- [4] 刘立涛,刘晓洁,伦飞,等.全球气候变化下的中国粮食安全问题研究[J].自然资源学报,2018,33(6):927-939.
- [5] 李虎,邱建军,王立刚,等.适应气候变化:中国农业面临的新挑战[J].中国农业资源与区划,2012,33(6):23-28.
- [6] 初征,郭建平,赵俊芳.东北地区未来气候变化对农业资源的影响[J].地理学报,2017,72(7):1248-1260.
- [7] 唐国平,李秀彬,Fischer G,等.气候变化对中国农业生产的影响[J].地理学报,2000,55(2):129-139.
- [8] 郭建平.气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J].应用气象学报,2015,26(1):1-11.
- [9] 孔令颖,扶松林,韩晓阳,等.基于传统干湿指数的省域长历时气象干旱变化特征及其对旱作粮食单产的影响[J].水土保持研究,2020,27(3):159-167.
- [10] 张建平,赵艳霞,王春乙,等.气候变化对我国南方双季稻发育和产量的影响[J].气候变化研究进展,2005,1(4):151-156.
- [11] 张建平,赵艳霞,王春乙,等.气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响[J].应用生态学报,2006,17(7):1179-1184.
- [12] 李祎君,王春乙.气候变化对我国农作物种植结构的影响[J].气候变化研究进展,2010,6(2):123-129.
- [13] 杨晓光,刘志娟,陈阜.全球气候变暖对中国种植制度可能影响[J].中国农业科学,2010,43(2):329-336.
- [14] 王春乙,娄秀荣,王建林.中国农业气象灾害对作物产量的影响[J].自然灾害学报,2007,16(5):37-43.
- [15] 宋建新.气候变化对农业生产影响的研究方法进展[J].科技促进发展,2016,12(6):765-776.
- [16] 房茜,吴文祥,周扬.气候变化对农作物产量影响的研究方法综述[J].江苏农业科学,2012,40(4):12-16.
- [17] 熊伟,许吟隆,林而达,等.区域气候模式与作物模型联接的影响评估模拟实验及不确定性分析[J].生态学报,2005,24(7):741-746.
- [18] 冯琳,庞玉亭,名琪,等.1980—2016 年气候变化对湖南省农业产量的影响[J].资源科学,2019,41(3):582-590.
- [19] Kim H Y, Horie T, Nakagawa H, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and high temperature on growth and yield of rice[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1996, 65(4):634-643.
- [20] 林而达,张厚宣,王京华.全球气候变化对中国农业影响的模拟[M].北京:中国农业科学技术出版社,1997.

[2] 周娟,陈丽华,郭文体,等.大辽河流域水源涵养林枯落物持水特性研究[J].水土保持通报,2013,33(4):136-141.

[3] Vitale M, Savi F, Daniela B, et al. Modeling of early stage litter decomposition in *Mediterranean* mixed forests: Functional aspects affected by local climate[J]. Journal of Biogeosciences and Forestry, 2015,8(4):517-525.

[4] Arunachalam A, Kusum A, Pandey H N. Fine litter fall and nutrient dynamics during forest regrowth in the humid subtropics of north-eastern India[J]. Forest Ecology and Management, 1998,110(1/3):209-219.

[5] 顾宇书,邢兆凯,韩友志,等.浑河上游 4 种典型林分类型枯落物持水特征[J].南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(1):31-36.

[6] 郑金萍,郭忠玲,徐程扬,等.长白山主要次生林的枯落物现存量组成及持水特性[J].林业科学研究,2011,24(6):736-742.

[7] 胡静霞,杨新兵,朱辰光,等.冀西北地区 4 种纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持研究,2017,24(4):304-310.

[8] 梁晓娇,王树力,阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J].水土保持学报,2017,31(1):140-145,152.

[9] 王磊,贾炜玮,李凤日.孟家岗林场森林景观结构动态分析[J].植物研究,2008,28(4):497-502.

[10] 冯楷斌,张暘暘,郭敬丽,等.冀北山地不同类型白桦林枯落物及土壤持水性能研究[J].林业资源管理,2016,35(2):74-80.

[11] 韩友志,邢兆凯,顾宇书,等.浑河上游白桦冷杉等 4 种林分枯落物储量及持水特性[J].东北林业大学学报,2011,39(11):15-18.

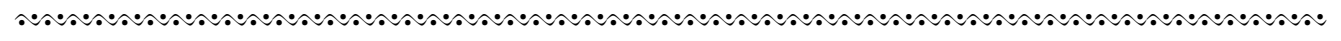
[12] 朱丽晖,李冬,邢宝振.辽东山区天然次生林枯落物层的水文生态功能[J].辽宁林业科技,2001,28(1):35-37.

[13] 吕刚,曹小平,卢慧,等.辽西海棠山森林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J].水土保持学报,2010,24(3):203-208.

[14] 杨洪学,蒙宽宏,孟祥楠,等.阿什河流域不同林分类型枯落物持水能力研究[J].防护林科技,2005,22(5):14-17.

[15] 赵雨森,韩春华,张宏光,等.阿什河上游小流域主要林分类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2012,26(2):203-208.

[16] 杨弘,李忠,裴铁藩,等.长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性质[J].应用生态学报,2007,18(2):272-276.



(上接第 234 页)

[21] 廉毅,高枫亭,沈柏竹,等.吉林省气候变化及其对粮食生产的影响[J].气候变化研究进展,2007,3(1):46-50.

[22] 杨慧,王永军,吕艳杰,等.吉林省半干旱区 45 年气候变化及基于 Hybrid-Maize 的玉米品种成熟期选择[J].玉米科学,2017,25(6):51-57.

[23] 郭春明,任景全,刘玉汐,等.气候变化下吉林省春玉米冷害特征研究[J].中国农学通报,2018,34(7):104-110.

[24] 祝小琳.吉林省生态型农业建设研究[D].长春:吉林大学,2016.

[25] 房世波.分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J].自然灾害学报,2011,20(6):13-18.

[26] 曹士亮,于芳兰,王成波,等.降水量与积温对玉米气象产量影响的综合分析[J].作物杂志,2009(3):62-65.

[27] 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,2020,27(3):379-384.

[28] 方文松,刘荣花,马志红,等.河南省冬小麦干旱评估指标初探[J].气象与环境科学,2008,3(16):12-14.

[29] 薛昌颖,霍治国,李世奎,等.华北北部冬小麦干旱和产量灾损的风险评估[J].自然灾害学报,2003,12(1):131-140.

[30] 卢明湘,李林,贾国娟.区域气候变化与人为因素对农业生产的影响[J].湖北农业科学,2012,51(8):1569-1572.

[31] 郭建平,高素华,刘玲.气象条件对作物品质和产量影响的试验研究[J].气候与环境研究,2001,6(3):361-367.

[32] 李喜明,黄德林,李向阳.气候变化引起的玉米产量变化的影响分析:基于中国农业多区域 CGE 模型[J].新疆农垦经济,2013(8):1-6.

[33] 杨俊玲,梁凤霞,王晓腾.吉林地区气候变化对农业生产的影响[J].吉林农业科学,2012,37(2):55-58.

[34] 李永华,高阳华,廖良兵,等.重庆地区玉米气象产量变化及气候影响因子科析[J].西南大学学报:自然科学版,2007,29(3):104-109.

[35] 陈素英,张喜英,邵立威,等.农业技术和气候变化对农作物产量和蒸散量的影响[J].中国生态学报,2011,19(5):1039-2047.

[36] 熊伟,杨婕,林而达,等.未来不同气候变化情景下我国玉米产量的初步预测[J].地球科学进展,2008,23(10):1092-1101.