

DOI: 10.12357/cjea.20230692

于水, 张晓龙, 王妍, 沈彦军. 气候变化对中国东北三省主要粮食作物影响研究综述[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(6): 970–985

YU S, ZHANG X L, WANG Y, SHEN Y J. Review of research on the impacts of climate change on staple grain crops in the three provinces of Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(6): 970–985

气候变化对中国东北三省主要粮食作物影响研究综述*

于水^{1,2}, 张晓龙¹, 王妍^{1,2,3}, 沈彦军^{1,2**}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 河北师范大学地理科学学院/河北省环境演变与生态建设实验室 石家庄 050024)

摘要: 全球气候变化已经成为事实, 并且导致全球粮食危机和饥饿风险增加。东北三省作为我国主要的粮食生产基地, 对气候变化十分敏感。本文梳理了当前及未来气候变化对东北三省玉米、水稻和大豆生产影响的相关研究, 概括了当前主要研究方法、东北三省主要作物对气候变化的响应以及应对措施, 并进一步评述了当前主要研究方法和研究领域的不足: 1) 研究气候变化和极端气候事件对作物生长发育和产量影响的主要方法包括田间试验法、统计分析法以及作物模型法, 其中田间试验法结果最直观, 统计分析法可操作强、应用范围最广, 作物模型法机理性强。2) 东北三省气候变化明显, 并且随着气候变化, 干旱逐渐取代低温冷害成为当地主要灾害。3) 气候变化对东北三省作物生产整体是有利的。气候变暖改善了东北三省热量资源, 不仅使作物种植区域逐渐北移, 作物品种也逐渐从早中熟向中晚熟转变。4) 随着气候变暖不断加剧, 未来东北地区作物应选择耐高温、抗旱和抗寒等抗逆性强的品种; 加强农田水利设施建设, 增强应对干旱洪涝灾害的能力; 采用新的农业管理措施, 保护土壤健康以及粮食生产安全。5) 未来需要加强对 CO₂ 补偿效应以及病虫害等的研究, 加强对作物模型的完善, 以更好地应对气候变化对粮食安全的不利影响。

关键词: 东北三省; 气候变化; 气象灾害; 主要粮食作物; 热量资源; CO₂ 补偿效应

中图分类号: S162.5+3

Review of research on the impacts of climate change on staple grain crops in the three provinces of Northeast China*

YU Shui^{1,2}, ZHANG Xiaolong¹, WANG Yan^{1,2,3}, SHEN Yanjun^{1,2**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Agricultural Water-Saving, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Geographical Sciences, Hebei Normal University / Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: The reality of global climate change has already led to food crises and increased risk of starvation in some parts of the world. As a major grain production region, the three provinces of Northeast China are particularly vulnerable to climate change. In this article, we categorize the effects of climate change and extreme climate events on the production of maize, rice, and soybean in the three provinces of Northeast China. We then summarize the main research methods used to study climate change and its effects on

* 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA28020503, XDA28020500)、河北省重点研发计划项目 (22377001D) 和河北省创新研究群体项目 (D2021503001) 资助

** 通信作者: 沈彦军, 主要从事流域生态水文模拟与水环境管理研究。E-mail: shenyanjun@sjziam.ac.cn

于水, 主要从事极端气候变化风险对粮食影响研究。E-mail: ysq731811@163.com

收稿日期: 2023-11-23 接受日期: 2024-04-03

* This research was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA28020503, XDA28020500), the Key Research and Development Program of Hebei Province (22377001D), and the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2021503001).

** Corresponding author, E-mail: shenyanjun@sjziam.ac.cn

Received Nov. 23, 2023; accepted Apr. 3, 2024

staple grain crops as well as countermeasures to climate change, and further review the challenges of the major research methodologies and fields. 1) Statistical analysis, crop modeling, and field experiments were the main techniques used to investigate how climate change and extreme climate events affect crop growth and yield. Although crop modeling and field experiments offered the most powerful mechanistic insights, statistical analysis was the most extensively used practical approach. 2) Climate change is evident in the three provinces of Northeast China, whereas drought has steadily replaced low-temperature freezing damage as the main agricultural disaster over time. 3) Climate change has been favorable to crop yield in the three provinces of Northeast China, with global warming improving heat resources. Crop-growing areas are gradually moving northward, and varieties are undergoing a shift from early-medium maturity to medium-late maturity. 4) As global warming continues to intensify, it will be crucial to opt for crop varieties in the future that demonstrate robust resilience to high temperatures, drought, cold, and other environmental challenges. Additionally, agricultural irrigation systems should be enhanced to ensure resilience against drought and flood disasters. To safeguard the health of the soil and ensure food security, new agricultural management techniques should also be considered. 5) Research on CO₂ compensation, pests and diseases, and the improvement of crop models need to be intensified and enhanced to better address the adverse impacts of climate change on food security.

Keywords: Three provinces of Northeast China; Climate change; Meteorological disaster; Staple grain crops; Thermal resources; CO₂ compensation effect

全球气候变暖已成为一个不争的事实,且变暖趋势进一步加剧^[1]。IPCC 第六次评估报告显示,2011—2020 年全球平均气温比工业革命以来上升约 1.1℃。气候变化的主要表现为全球气温升高,降水时空差异增大,以及极端降水和干旱事件频繁发生^[2-4]。气候变化已对人类社会和生态环境造成严重影响,而农业生产是最易受到气候变化影响和最脆弱的活动之一。因此,研究气候变化和极端气候事件对于应对未来气候风险以及保障粮食生产安全具有重要意义,目前已经受到国内外学者的广泛关注^[5-7],降低气候变化对粮食安全的风险成为了 21 世纪面临的重大挑战之一^[8]。

气候变化对农业系统的影响十分复杂,农作物生长发育和产量的形成与温度和降水等气候因子密切相关^[9]。Ray 等^[10]的综述研究发现,温度和降雨变化可以解释全球粮食产量波动的 32%~39%。在高寒地区,温度升高引起作物生育期延长有利于作物增产;而在低纬度热带地区温度升高会缩短作物生长期或加剧干旱导致减产^[11-12]。解伟等^[13]研究发现温度每升高 1℃,中国主要粮食单产会下降 2.6%,而降水每增加 1%,作物产量将增加 0.4%,此外,如果考虑 CO₂ 的肥效作用,粮食单产将平均增加约 16%。中国是遭受极端事件影响最严重的国家之一^[14],我国政府和相关部门对气候变化和极端气候事件对粮食安全的影响给予了高度关注。1980 年以来,中国作物种植区的旱涝灾害愈发严重,相比于 1950 年,年均遭受干旱灾害影响的作物面积增加了近 120%,各地粮食产量也产生较大波动^[15-16]。相比于干旱和洪涝等单个灾害,复合灾害对作物产量影响更剧烈。Feng 等^[17]研究表明,当个别极旱灾害变为复合旱热灾害时,玉米 (*Zea mays*) 减产概率从 7% 上升至 31%。

东北三省是指辽宁省、吉林省和黑龙江省,地形复杂多样,水土条件良好,是我国黑土资源分布最广泛的区域,也是我国主要的粮食生产区和商品粮基地^[18]。东北三省的粮食产量占全国粮食总产量的 20% 左右,是名副其实的“第一粮仓”,也被称为我国粮食安全的“压舱石”。玉米、水稻 (*Oryza sativa*) 和大豆 (*Glycine max*) 是东北三省主要的粮食和经济作物。东北三省拥有著名的黄金玉米带,玉米产量占全国玉米产量的 30% 左右^[19];同时,该地区也是我国最大的大豆产区,2021 年大豆种植面积和产量均占全国总面积和产量的 40% 以上^[20]。但是由于气候条件的影响,东北三省易遭受干旱、洪涝和低温冷害等气象灾害的侵袭,严重威胁当地粮食生产与安全,如 1969 年、1972 年和 1976 年的低温冷害均导致东北地区粮食减产率达 20%^[21]。目前有许多研究就气候变化和极端气候事件对东北地区粮食作物的影响进行了分析,但主要关注单个气象灾害对单一作物的影响,而对东北三省不同作物对气候变化的响应与适应的分析总结较少。基于此,本文综述了我国东北地区气候变化对玉米、水稻和大豆这 3 种主要粮食作物影响的相关研究,分析了东北三省 3 种作物对气候变化和极端气候事件的响应及应对策略,以期对东北三省农业生产和粮食安全提供科学依据。

1 气候变化影响作物产量的主要研究方法

研究气候变化对作物生长发育和产量影响的主要方法包括 3 种:田间试验法、统计分析和作物模型模拟。3 种方法各有优劣,根据数据类型和研究目的的不同可以选择不同的方法。

1.1 田间试验法

田间试验观测可以获得作物生长发育和产量

的原始数据,根据研究目的,可以通过人为控制气象要素和作物品种等分析作物生长发育对气候变化的响应^[22-23],该方法是研究气候变化对作物产量影响的最直观方法。大多数研究是根据研究目的和需求设定独立的田间试验,如:王培娟等^[22]在东北不同地区开展分期播种试验,研究热量资源变化对春玉米生长发育和产量的影响;马树庆等^[24]采用分期播种试验,分析了东北玉米不同生育期对气候变化的反应;张卫建等^[25]和陈金等^[23]采用夜间增温试验,研究了水稻生长发育和产量对夜间增温的响应;Zheng等^[26-28]分析了气温升高对不同施肥处理下大豆产量的影响;郑有飞等^[29]利用改进的开顶式气室和遮荫网研究地表太阳辐射减弱对冬小麦(*Triticum aestivum*)不同生育阶段和产量的影响;Cai等^[30]利用自由空气 CO₂ 富集 (FACE) 系统在太湖流域进行温度和 CO₂ 浓度控制试验,研究发现,CO₂ 浓度升高有利于水稻和小麦产量的形成,而温度升高不利于产量的形成,并且 CO₂ 浓度升高无法抵消温度对作物的负面影响。

田间试验的观测结果是研究作物对气候变化响应的第一手资料,结果准确可靠,并且可以为作物模型提供参考。但是田间观测试验需要花费大量时间,开展长期研究难度较大,一般只进行短期试验观测(几年)。另外,田间试验法依赖单点观测,其结果一般只针对特定区域、品种和管理措施等,在空间尺度拓展上也存在一定的局限性。

1.2 统计分析方法

统计分析有利于获取大范围 and 长时间序列的作物产量变化趋势,是研究气候变化对作物产量影响的主要方法^[31]。大量研究利用该方法分析了区域的温度和降水等气象因子的长期变化及其对作物产量的影响^[32-34]。长时间序列中作物产量不仅受到气候因子的影响,还受到如施肥、灌溉、作物品种和播期等农业管理措施的影响,因此,在数据分析的过程中需要对作物产量进行趋势分离,以消除管理措施变化对作物产量的影响^[35]。趋势分离的方法主要包括最佳拟合最小二乘法^[25]、滑动平均法^[36]、一阶差分法^[37]等。为了量化不同气候因子对作物生长发育和产量的影响,可以通过建立统计模型进行评估。统计模型主要包括 3 种类型:时间序列模型、面板模型和横截面模型^[31]。其中,时间序列模型基于单点或区域的时间序列数据构建,但是该模型易受到多重共线性的影响;面板模型基于时空变化数据构建,需要将所有区域或站点的产量和气象数据综合起来,

该模型可以克服多重共线性的影响;而横截面模型仅基于空间变化数据,是根据多个区域和站点的平均作物产量和平均气象要素建立的模型^[38]。

总体来讲,统计分析法具有简单易操作、时间周期长、范围广以及信息量大等特点,可以进行长时间大范围分析,是目前研究气候变化及其对农作物生长发育影响的有效方法。但是统计分析法过于简化了实际情况,许多影响因素考虑不充分,并且在预测未来气候变化及其对作物的影响等方面存在很大局限性。

1.3 作物模型模拟

作物模型是基于作物生长发育规律和生产力以及气候条件、土壤特性和作物品种等要素构建一系列数学公式,从而对作物生长发育进行动态模拟的系统^[39-40]。20 世纪 90 年代以来,随着多学科不断发展和深入研究,作物模型已成为研究和预测作物生长发育和变化不可或缺的工具^[39]。目前已有众多学者利用作物模型进行相关研究,如:Liu等^[19,41]利用 APSIM (Agricultural Production Systems Simulator)-Maize 模型模拟了 1981—2010 年气候变化对东北地区玉米潜在产量和物候期的影响;葛亚宁等^[42]采用 GAEZ (Global Agro-Ecological Zones) 模型对中国玉米生产潜力进行了估算,并分析了近 50 年来中国玉米生产潜力的时空变化格局演变特征和规律;朱大威等^[43]选取 DSSAT (Decision Support Systems for Agrotechnology Transfer) 中的 SOYGRO (Soybean Growth model)、CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System)-Maize、CERES-Wheat、CERES-Rice 4 种作物生长模型,模拟了气候、土壤、基因型、管理措施以及 CO₂ 浓度对 1961—2000 年东北地区作物生长发育和产量的影响;刘珍环等^[44]利用作物空间分配模型 [SPAM (Spatial Production Allocation Model)-China 模型] 对 1980—2010 年东北地区作物种植结构和空间分布进行了分析;Wang等^[45]通过建立水稻生长模拟模型 [ORYZA (v3)], 模拟了气候变化下东北地区水稻生长发育、产量以及稻田的水氮平衡。作物模型可以较好地模拟作物生长动态变化趋势,常被用于预测未来作物产量的变化。张建平^[46]通过 WOFOST (World Food Studies) 模型结合气候情景资料模拟发现,随着温度的不断上升,东北地区玉米生育期将缩短,产量也会下降。Tao等^[47]将作物生长模型 MCWLA (Model to capture the Crop-Weather relationship over a Large Area)-Rice 和 Super-EPPS (Super Enriched-Plus Precipitation System) 模型

相结合,发现未来平均温度、太阳辐射和CO₂浓度的增加有利于中国东部水稻生产。

作物模型是基于作物生理过程发展起来的,具有较强的机理性,能够较好地模拟气候变化与作物之间的关系,对于未来作物的生长发育也能进行模

拟预测。同时,作物模型可较好地模拟不同地区和不同作物的生长过程,分析不同情景下作物生产的差异。但是作物模型往往比较复杂,需要输入大量气象要素、土壤性质、作物品种以及田间管理措施等数据^[48]。各研究方法的具体优缺点见表1。

表1 气候变化对作物影响的主要研究方法
Table 1 Main methods to study the impact of climate change on crops

研究方法 Study method	应用案例 Application case	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
田间试验法 Field experiment method	分期播种试验 Stage sowing test	热量资源变化对春玉米生长发育和产量的影响 ^[22] Effects of changes in heat resources on the growth and yield of spring maize ^[22]	可操作性强;直接获取有关作物的原始数据;根据目的调整气象要素和作物品种等;结果准确 Strong operability; acquire raw data directly; adjust the climate factors and crop varieties based on the purpose; results are accurate
	开放式增温试验 Free air temperature increase test	夜间增温对水稻生长发育和产量的影响 ^[25] Effects of increasing nighttime temperature on the growth and yield of rice ^[25]	
	太阳辐射控制试验 Solar radiation control test	利用开顶式气室和遮荫网研究地表太阳辐射减弱对冬小麦不同生育阶段和产量的影响 ^[29] Effects of decreasing solar irradiance on the growth stages and yield of winter wheat based on open top chambers and shading net treatments ^[29]	
	CO ₂ 浓度控制试验 CO ₂ concentration control test	利用自由空气CO ₂ 富集(FACE)系统进行温度和CO ₂ 浓度控制试验,研究CO ₂ 对水稻和小麦产量的影响 ^[30] Temperature and CO ₂ concentration control experiments using Free Air CO ₂ Enrichment (FACE) system to study the effect of CO ₂ on rice and wheat yields ^[30]	
统计分析方法 Statistical analysis method	时间序列模型 Time series method	基于单点或区域的时间序列数据构建 ^[31] Constructed based on time series data of single-site or a region ^[31]	客观性和科学性;可操作性强;时间周期长;信息量大;概括性强 Objectivity and scientificity; strong operability; long time period; large amount of information; strong generalizability
	面板模型 Panel method	基于时空变化数据,综合所有区域或站点的产量和气象数据 ^[31] Based on data of spatial and temporal changes, yield and meteorological data are integrated across all regions or sites ^[31]	
	横截面模型 Cross-section method	根据多个区域和站点的平均作物产量和平均气象要素建立的模型 ^[31] Models based on average crop yields and average meteorological elements across multiple regions and sites ^[31]	
作物模型模拟 Crop model simulation method	Agricultural Production Systems Simulator-Maize模型 Agricultural Production Systems Simulator-Maize model	量化模拟1981—2010年期间气候变化对东北地区玉米潜在产量和物候期的影响 ^[19,41] Quantitative modeling of the impacts of climate change on potential yield and phenological period of maize in Northeast China during 1981—2010 ^[19,41]	机理性强,灵活性较强;节约时间和成本,具有一定预测能力 Strong mechanism and flexibility; saving time and cost, with a certain predictive ability
	Global Agro-Ecological Zones模型 Global Agro-Ecological Zones model	对中国玉米生产潜力进行估算,并分析了近50年来中国玉米生产潜力的时空变化格局演变特征和规律 ^[42] Estimated the production potential of maize and analyzed the characteristics of spatial and temporal changes in the production potential of maize in China over the past 50 years ^[42]	
	Clouds and the Earth's Radiant Energy System - (Maize, Wheat, Rice)作物模型 Clouds and the Earth's Radiant Energy System - (Maize, Wheat, Rice) crops model	模拟气候、土壤、管理措施以及CO ₂ 浓度对1961—2000年东北地区作物生长发育和产量的影响 ^[43] Modeling the effects of climate, soil, management practices, and CO ₂ concentration on crop development and yield in Northeast China from 1961 to 2000 ^[43]	
	Spatial Production Allocation Model -China模型 Spatial Production Allocation Model -China model	分析了1980—2010年东北地区作物种植结构和空间分布 ^[44] Analyzed the structure and spatial distribution of crops in Northeast China from 1980 to 2010 ^[44]	
	ORYZA(v3)作物模型 ORYZA(v3) crops model	模拟气候变化下东北地区水稻生长发育、产量以及稻田水氮平衡 ^[45] Modeling growth, development and yield of rice, and water-nitrogen balance in rice fields in Northeast China under climate change ^[45]	

1.4 研究数据来源和分析工具

研究气候变化对作物产量的影响需要收集和处理大量数据,包括气象数据、作物数据和土壤数据等。其中,温度和降水等气象数据可以通过中国气象局、国家气象信息中心、中国气象科学数据共享服务网以及研究区内的气象观测站等渠道获取^[18,24,41,49]。研究所需的作物产量、物候以及生育期数据可以从国家气象信息中心、国家农业农村部、中国作物种质信息网、中国种植业信息网以及国家或地方统计局等得到^[25,50-52]。目前研究所采用的土壤数据基本来自世界土壤数据库(HWSD)^[53-54],也有部分研究采用当地农业气象站和中国科学院土壤研究所等收集的土壤数据^[42,45-46]。另外,其他相关数据,如土地利用数据可以从中国科学院地球系统科学数据共享服务平台^[55]或中国科学院环境数据研究中心^[42]获取。

根据研究目的和需求,可以利用不同的分析工具对数据进行分析处理,例如,可以采用 SPSS 软件^[25]、R 软件^[56]和 Python 软件^[54]等对数据进行显著性与相关性分析,利用 Excel 软件进行分析和作图^[51],利用 ArcGIS 软件对数据进行空间插值和分析^[57]。

2 东北三省气候变化和极端气候事件

东北三省是我国纬度最高的区域,对气候变化十分敏感。1961—2021 年期间,东北三省平均增温速率 $[0.32^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ (图 1)明显高于全国 $[0.26^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ 以及全球 $[0.20^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ 平均水平,是世界上增温速率最快的区域之一^[58-59]。王秀兰等^[60]、赵秀兰^[61]和胡琦等^[62]指出,1960 年以来东北三省的气候整体呈

气温升高、降水波动变化和太阳辐射量逐渐下降的趋势。1960—2010 年,东北地区平均气温上升 1.50°C ,并且以夜间增温为主,最低气温的上升速率为 $0.40^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。另外,不同季节的增温也存在一定差异,冬季是增温最明显的季节,夏秋的增温速率为 $0.18^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,低于春冬的 $0.40^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $0.45^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ^[61]。东北三省地处季风气候区,雨热同期。对于降水而言,东北三省大部分地区的降水天数呈减少趋势,但部分地区降水强度呈增强趋势,降水量年际波动较大,时空差异显著^[63]。太阳辐射作为地球能量的主要来源,对作物生长发育、作物布局和种植制度等存在重大影响^[62]。东北三省太阳能资源丰富,但有研究表明,1961—2012 年期间,东北三省太阳辐射呈递减趋势,辐射总量减少 $340.4\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,减小幅度为 $1.1\%\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。太阳辐射的变化存在明显的时空异质性,其中,黑龙江省的太阳辐射呈增加趋势,而吉林省和辽宁省呈减少趋势^[64],春夏季节太阳辐射的下降趋势分别为 $20.1\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $21.0\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$,明显高于秋冬季节的 $8.2\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $5.5\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ^[62]。

气候变暖改善了东北地区的热量资源^[65]。研究指出,气候变暖背景下,东北三省 5—9 月不同程度的低温冷害事件大幅减少,冷害平均发生频率从 20 世纪 70 年代的 60% 以上降低至 20% 以下,并且黑龙江省极端低温天数的下降趋势快于吉林省和辽宁省,同时,下降趋势也随纬度和海拔高度的增加而加快^[66-68]。然而,1961—2014 年,东北三省日最高温度超过 35°C 的天数,以及连续 3 d 超过 35°C 的频率均

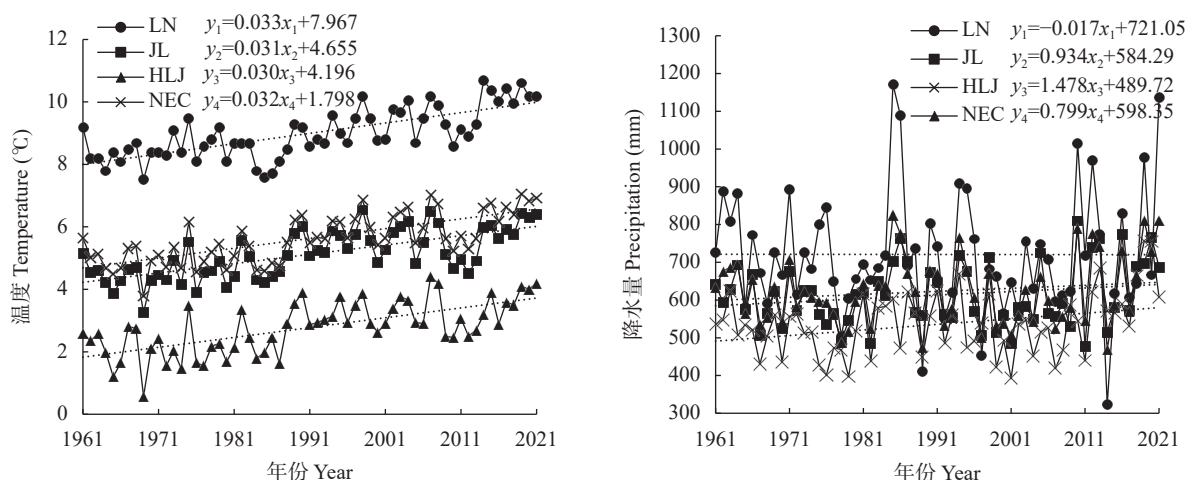


图 1 1960—2021 年东北地区温度和降水变化

Fig. 1 Changes of temperature and precipitation in Northeast China from 1960 to 2021

LN: 辽宁省; JL: 吉林省; HLJ: 黑龙江省; NEC: 东北三省地区。LN: Liaoning Province; JL: Jilin Province; HLJ: Heilongjiang Province; NEC: Three provinces of Northeast China.

呈增加趋势,特别是20世纪末期开始,东北三省的极端高温日数显著增加^[69],且主要集中在东北三省的西部,而其他地区遭受极端高温事件的概率较小^[70]。另外,东北三省降水时空分布不均也导致该地区旱涝灾害易发频发^[61]。20世纪80年代以来,东北三省干旱和洪涝灾害次数明显增多^[71]。Wang等^[72]研究指出,1998—2017年东北三省的干旱频率比1961—1980年提高15.0%,干旱强度增强7.8%。旱涝灾害与东北地区降雨的空间分布基本一致,干旱和洪涝灾害在东北三省自西向东逐渐过渡,干旱主要集中在吉林省中西部、辽宁省西部以及黑龙江省东部地区,而东北三省的东南部则易发生洪涝灾害^[73]。同时,王萍等^[36]研究发现,1971—2016年黑龙江省夏季暴雨量整体呈上升趋势,并且洪涝灾害在1984—2010年间也呈逐年增加趋势。

对2003—2020年《中国气象灾害年鉴》的整理分析发现,自2003年以来,黑龙江省是东北三省受灾最严重的地区,干旱是主要的气象灾害,其次是暴雨洪涝,而低温冷冻害及雪灾对作物影响最小(图2)。总体而言,气候变化背景下,东北地区的干旱和洪涝等极端灾害频发,强度增强,而寒潮、霜冻害和冰雹等极端低温冷害事件减少。

3 气候变化和极端气候事件对作物的影响

农作物生长发育和产量的形成与温度、降水和日照时数等气候因子密切相关,本文从作物产量、种植区域和制度以及作物生长发育进程等几个角度综述了东北地区主要气候因子的变化特征及其对作物的影响(表2)。其中,温度的上升对东北地区玉米、水稻和大豆的影响整体有利^[26,74-75],而太阳辐射的减弱不利于作物生长和产量的形成^[37,77-78];高温干旱发生频率增加,对作物产量产生比较严重的不利影响

响^[27,74,80-81],而低温冷害事件减少,其主要影响作物不同生育阶段的生长发育^[66,81-82]。另外,随着CO₂浓度增加,CO₂肥力效应在一定程度上促进了作物的增产,抵消了一部分气候变化产生的不利影响。

3.1 气候变化及极端气候事件对作物产量的影响

3.1.1 玉米

在过去几十年,东北三省的玉米产量呈波动上升趋势,增加趋势为 $1.3911 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ (图3)。目前,部分学者利用历史气候和作物产量数据分析了气候变化对玉米产量的影响。如Zhang等^[74]研究结果表明,1981—2009年,气候变暖对东北三省玉米增产的贡献率为15.6%,其中,玉米生育期内生长期(日平均温度在10~30℃的积温)的增多对玉米产量的贡献(+29.7%)抵消了极端度日(日平均温度大于30℃的积温)对玉米的不良影响(-14.1%)。通过品种改良和播期调整可以适应气候变暖,提高玉米产量。吕硕等^[77]研究指出,1961—2010年间,若是栽培管理措施和玉米品种不变,生育阶段日照时数的下降会导致玉米生产潜力大幅下降,减产率为22.0%~26.0%;然而,品种更换对玉米产量潜力的贡献率为46.1%~79.0%,完全弥补了气候变化对玉米产生的不利影响。陈群等^[50]对东北地区1989—2009年气象与作物生长发育和产量数据进行研究也得出相似结论。另外,有学者利用作物模型和情景分析模拟预测了未来气候变化和极端气候事件对玉米产量的影响,如Li等^[80]通过APSIM模型与不同代表性浓度路径(RCPs)情景相结合研究发现,未来高温干旱的复合影响会造成玉米的大幅减产,产量损失率达18.8%,并且干旱对产量的不利影响(17.3%)将远超高温的影响(1.3%),而玉米生长所需适宜温度的增加以及太阳辐射的升高可以在一定程度上弥补高温干旱对玉米产量的不利影响。

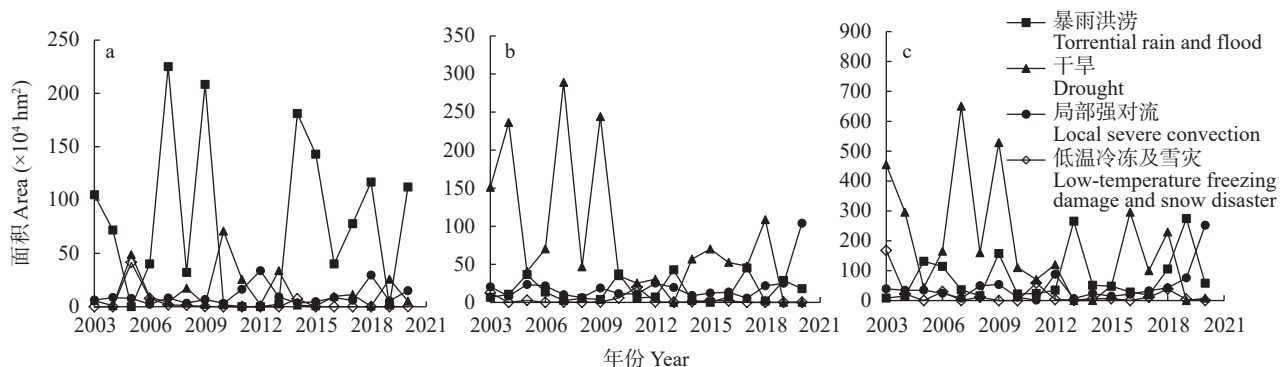


图2 2003—2020年东北三省(a: 辽宁省; b: 吉林省; c: 黑龙江省)农作区气象灾害的受灾面积

Fig. 2 Areas affected by meteorological disasters of agricultural areas in the three provinces of Northeast China (a: Liaoning Province; b: Jilin Province; c: Heilongjiang Province) from 2003 to 2020

表 2 气候变化对中国东北地区主要粮食作物的影响
Table 2 Impacts of climate change on major crops in Northeast China

气象要素 Meteorological factor	主要变化特征 Main characteristics of change	玉米 Maize	水稻 Rice	大豆 Soybean
温度 Temperature	增温速率: 最低温度>最高温度, 夏秋>春冬 The warming rate: the minimum temperature > the maximum temperature; summer and autumn > spring and winter	气温上升对增产的贡献率为 15.6%, 日最高温度大于 30℃ 不利于种子灌浆 ^[74] Temperature increase contributed 15.6% to the yield increase, and the maximum daily temperature over 30℃ was unfavorable to grain filling ^[74]	生长季延长对 60% 的区域有正面影响, 产量增加 3.4%; 夜间温度升高有利于籽粒的形成 ^[75] The longer growing season had a positive effect on 60% of total area, with a 3.4% increase in yield. The increase in nighttime temperature favored the formation of kernels ^[75]	平均日最高温度在 20~24℃ 显著有利于种子灌浆 ^[26] Average daily maximum temperature of 20~24℃ was significantly favorable for grain filling ^[26]
降水 Precipitation	整体逐渐增加, 黑龙江省和吉林省呈增加趋势, 辽宁省呈递减趋势 Overall gradually increase with increasing trend in Heilongjiang Province and Jilin Province, and decreasing trend in Liaoning Province	—	—	开花一成熟阶段存在水量不足的风险 ^[76] Risk of insufficient water supply at flowering stage to maturity stage ^[76]
太阳辐射 Solar radiation	下降幅度为 1.1%·(10a) ⁻¹ , 春夏>秋冬; 黑龙江省递增, 吉林省和辽宁省递减 Declining in an average rate of 1.1%·(10a) ⁻¹ , which is higher in spring and summer than that in autumn and winter, with an increasing trend in Heilongjiang, and decreasing trend in Jilin and Liaoning	太阳辐射降低使生产潜力下降 ^[77] The decrease in solar irradiation leads to a reduction in production potential ^[77]	太阳辐射增强可以促进生长, 增产幅度为 1.0%~3.3% ^[78] Enhanced solar radiation can promote growth with an increase in yield of 1.0%~3.3% ^[78]	累积日照时数北增南减, 对产量的贡献率为 -0.1%~0.4% ^[37] Accumulated sunshine hours increase in the north and decrease in the south, with contribution rate to yield ranging from -0.1% to 0.4% ^[37]
高温 Heat wave	日最高温度超过 35℃ 及连续 3 d 超过 35℃ 的频率均呈增加趋势 Both of the frequency of daily maximum temperatures surpassing 35℃ and the consecutive occurrence of temperatures exceeding 35℃ for 3 days show an increasing trend	当生育期内日均温度超过 30℃ 的积温增加时, 产量下降 14.1%, 缩短营养生长期, 降低灌浆速率 ^[74] The increased accumulated temperature of over 30℃ during growing season induced 14.1% yield decrease, vegetative period shortening and grain filling rate decreasing ^[74]	高温不利于产量的形成 ^[79] High temperature is unfavorable for yield formation ^[79]	加快植株蒸散发, 光合作用减弱, 产量下降 ^[27] Accelerating evapotranspiration leads to a weakened photosynthesis, resulting in reduced yields ^[27]
干旱 Drought	频率提高 15%, 强度增强 7.8% The frequency has increased by 15%, and the intensity has strengthened by 7.8%	造成大幅减产, 减产幅度为 17.3% ^[80] Significant yield reduction occurred, with a reduction rate of 17.3% ^[80]	—	春旱影响播种和出苗, 秋旱影响灌浆 ^[81] Spring drought affects seeding and emergence, and fall drought affects grain filling ^[81]
低温冷害 Cold damage	发生频率由 60% 下降至 20% 以下 The frequency has decreased from 60% to below 20%	低温冷害抑制出苗 ^[66] Low-temperature damage inhibits maize emergence ^[66]	7—8 月的冷害会影响水稻从营养生长阶段转为生殖生长阶段 ^[82] The cold damage in July to August can affect the transition of rice from vegetative growth to reproductive growth ^[82]	影响光合作用和呼吸作用, 减缓种子出苗和生长 ^[81] Affects photosynthesis and respiration, and slow down seed emergence and growth ^[81]
CO ₂ 肥效 CO ₂ fertilizer	CO ₂ 浓度逐渐升高 CO ₂ concentration is gradually increasing	水分充足情况下, 有利于提高生产潜力 ^[50] Conducive to increase the production potential under sufficient moisture condition ^[50]	缓解高温的不利影响 Alleviate the adverse effects of high temperatures	—

3.1.2 水稻

气候变化总体上为东北三省水稻的生长发育和产量形成创造了有利条件^[83]。气候变暖使东北地区水稻生育期有效积温增加, 对东北地区 60.0% 以上区域的水稻生产有正面影响, 可促进水稻增产约 3.7%^[75]。张卫建等^[25]指出, 田间温度控制试验下, 水稻生长季最低温度每升高 1℃, 水稻单产可提高 6% 以上。陈金等^[23]指出, 夜间温度升高使水稻地上生

物量和籽粒产量均增加 10.0% 左右, 有效穗数和每穗颗粒数分别提高 7.0% 和 5.7%。气候变暖和太阳辐射增强对东北地区单季稻产量增加有明显的促进作用, 产量增加幅度为 1.0%~3.3%^[78], 自南向北增产幅度呈递增趋势, 黑龙江、吉林和辽宁省每年分别增产 143.7 kg·hm⁻²、93.7 kg·hm⁻² 和 63.2 kg·hm⁻²^[51]。随着未来温度的持续升高, 高温热害等极端事件增加产生的不利影响可能会抵消有效积温增加和低温

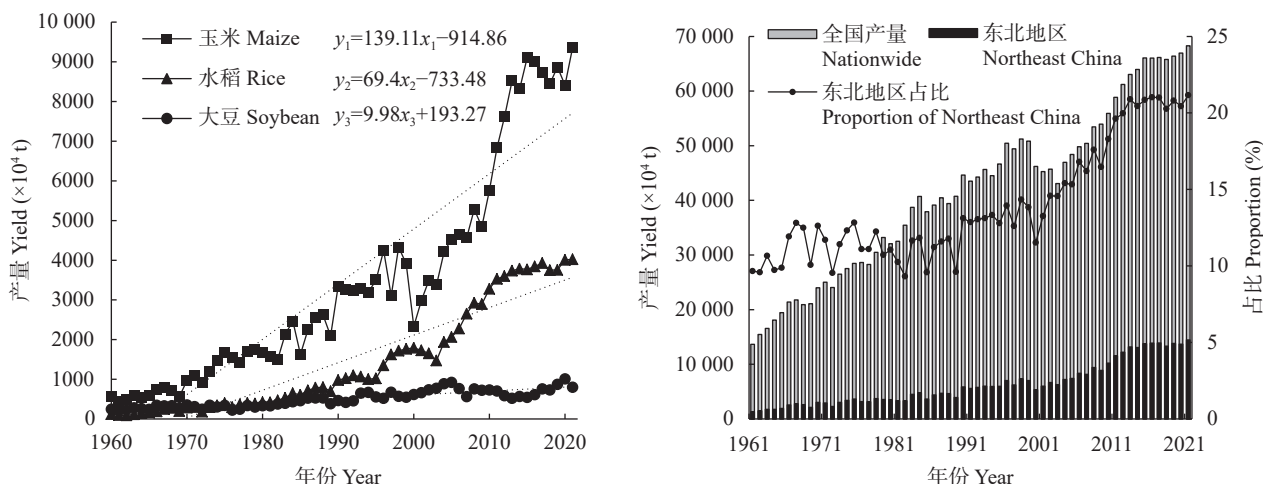


图3 1960—2021年东北地区主要作物产量及粮食生产比重变化

Fig. 3 Changes of major crops yield and the proportion of grain production in Northeast China from 1960 to 2021

冷害事件减少对水稻产生的积极影响^[79]。此外,有学者通过将作物模型与情景模拟结合发现,在未来气候持续变暖的情况下,CO₂肥力效应将有利于水稻产量的形成,可以缓解未来不同生育阶段内温度过高对水稻的不利影响^[84-85]。

3.1.3 大豆

气候变暖对我国大豆生产比较有利,尤其是东北地区^[86]。Zhang等^[37]选取东北三省内23个农业气象站点进行研究,发现1981—2010年85%以上的区域大豆产量逐渐增加,年平均增产速率41.18 kg·hm⁻²,其中,气候变化和农业措施对大豆产量的贡献率分别为0.1%和2.4%。张晓峰等^[87]研究表明,气候变化背景下,东北地区大豆适宜种植面积逐渐扩大,2010年东北地区大豆的生产潜力和生产潜力总量分别为3600 kg·hm⁻²和8.5×10⁷ t,均位于全国大豆适宜种植区的首位。气候变暖不仅可以延长东北地区大豆的生长期,同时减少了低温冷害对大豆的伤害^[38],并且纬度越高,温度上升对大豆产量的促进作用越明显^[37]。Zheng等^[27]通过一系列施肥控制试验研究发现,在单一的气候变暖条件下,大豆产量与日最高温度呈显著负相关关系,而与日最低温度呈正相关关系,这可能是因为温度过高会加快大豆植株的蒸散发,从而造成水分胁迫,导致作物光合作用减弱以及产量的下降。有研究发现平均日最高温度在20~24℃将显著有利于大豆的灌浆,在大豆灌浆期间温度每上升1℃,大豆产量会增加6.0%~10.0%,而日最低温度超过30℃将会造成大豆产量的下降^[26,28]。此外,东北地区大豆对降水和日照时数也表现出较强的敏感性,高纬度地区的降水和累积日照时数与大豆产量呈负相关关系^[37]。

3.2 气候变化及极端气候事件对种植区和种植制度的影响

气候变暖增加了作物生长季内的热量资源,使作物生长发育条件更加适宜^[61],整体上有利于东北地区粮食生产,尤其是对高纬度地区作物的生长更加有利^[75,83]。同时,气候变暖使东北三省适宜种植面积扩大。Liu等^[54]研究发现,1961—2019年,气候变暖使东北地区0℃等温线向北移动了5°,作物种植北界随低温界线的北移而不断向北移动^[5,49,88]。有研究指出,热量资源的增加以及低温冷害事件的减少使东北地区玉米可种植面积以7.2×10⁵ hm²·(10a)⁻¹的速率增加^[52]。同时,也有学者指出,2010年黑龙江省水稻种植面积比1970年扩大了24倍,种植重心向北移动超过100 km^[44,89],整个东北地区的水稻种植面积在1980—2010年间扩大了4.5倍,水稻分布的核心纬度向北推移了1°左右^[57,90]。气候变化使东北地区大豆适宜种植面积扩大的同时,也导致大豆高产稳产区逐渐转变为高产不稳产区和低产稳产区^[52]。此外,刘珍环等^[44]和云雅如等^[89]研究指出,气候变暖下东北三省的作物种植格局和规模发生了变化,原有的小麦种植区不断缩小,逐渐被玉米、大豆和水稻占据,并且水稻种植面积逐渐扩大,已经取代小麦成为东北三省的主导作物之一。

为了充分利用热量资源,提高粮食产量,东北地区农民不仅开始调整作物播种时间,也逐渐将作物品种从早中熟品种更换为中晚熟品种^[90],播种时间的调整以及作物品种的改良对气候变化产生的负面效应具有一定补偿作用^[50]。吉林省将玉米从早熟品种更换为中熟品种,玉米产量可提高9.8%,用晚熟品种替代中熟品种,产量可增加7.1%^[91]。但是,也有研究

表明,作物品种的改变以及播种时间的提前会使作物在生长发育过程中更易暴露在低温冷害中,不利于作物产量的形成^[91]。尽管在气候变暖的情况下,东北地区低温冷害事件呈减少趋势,但仍存在较大的不确定性^[82]。有研究发现,在个别发生严重低温冷害的年份,东北地区平均作物产量减少 15.2%^[33,68,92]。因此,不能盲目扩大中晚熟品种的种植面积,作物品种的选择和栽培措施的实施必须与气候变化相适应,以尽可能减少作物产量的损失,降低粮食的生产风险。

3.3 气候变化及极端气候事件对作物生长发育的影响

气候变化对东北地区作物的生长发育过程和产量形成产生了重要影响,尤其是作物生育期长短发生了显著变化^[93]。研究表明,东北三省玉米和水稻生育期逐渐延长,其中在 1989—2009 年间,黑龙江省、吉林省和辽宁省玉米的平均生育期每年增加 0.49 d、0.17 d 和 0.34 d^[50],水稻的平均生育期每年增加 1.40 d、0.45 d 和 0.51 d^[51],而东北三省大豆的生育期则存在缩短的趋势,邱译萱等^[94]研究指出,随着气候变暖,吉林省大豆生长发育速度加快,1981—2014 年,大豆生育期缩短 5.4 d。

合适的温度有利于作物发育和产量形成,充足的水分则有利于保证粮食产量的稳定性^[28]。然而,随着气候变暖不断加剧,东北三省作物的生长发育易遭受高温和干旱灾害,特别是在东北三省西部和北部地区^[69]。有研究表明东北地区玉米生育期内的高温风险呈增加趋势,是造成东北地区玉米减产的主要气候因子^[76]。7—8 月作为玉米开花与灌浆的关键时期,也是温度最高的时期,玉米生长极易受到高温干旱的影响。其中,高温会导致花粉败育,使雌穗不能受精而形成空粒,结实率下降;并且该时期高温和干旱均会使雄穗分枝数减少,分别比正常条件下减少 17.3% 和 33.9%;同时导致花粉量大幅减少且活力低下,高温和干旱影响下高活力花粉比正常条件下减少 22.0% 和 38.3%。此外,高温和干旱不仅会导致花粉皱缩,药室变形,玉米散粉期缩短(减少 1~2 d)^[95],还会使玉米的营养生长期缩短,作物器官发育不良,同时会降低玉米的灌浆速率,不利于干物质积累^[24,90]。目前,通过提前播种可以在一定程度上减少高温干旱对作物产量的负面影响^[74]。

东北地区玉米、水稻和大豆在生长发育过程中也容易遭受低温冷害的影响^[88,92,96]。有研究表明,东北地区玉米生育期内冷害事件主要发生在出苗期

(5—6 月),这会严重影响玉米的出苗,抑制植株生长,从而造成产量下降^[66]。对于水稻来说,7—8 月的低温冷害会破坏其由营养生长期转变为生殖生长期阶段的过程^[82]。同时,气候变暖的条件下,水稻不同生育阶段积温的增加,会改变水稻的生育进程。有研究表明,东北地区水稻的播种—移栽期和乳熟—成熟期在 1992—2001 年间分别缩短 0.7 d·(10a)⁻¹ 和 1.6 d·(10a)⁻¹,而在 2002—2012 年间则分别延长 2.9 d·(10a)⁻¹ 和 2.8 d·(10a)⁻¹,1992—2012 年间水稻生育期整体延长 3.7 d·(10a)⁻¹^[97]。东北大豆属于雨养种植,生育期内对水分和温度的变化都十分敏感,低温冷害和干旱是东北大豆面临的主要气象灾害^[88]。其中,低温冷害会影响大豆的光合作用和呼吸作用,减缓种子出苗和生长发育,导致产量下降;春季干旱会影响大豆的播种和出苗,而秋季干旱则会影响籽粒灌浆,不利于豆荚的形成^[81]。解文娟等^[98]和胡惠杰等^[56]通过对东北地区历史气象数据分析以及作物模型模拟发现,1961—2010 年间大豆生育期内干旱的频率和强度均呈增加趋势,生育期内有效降水不能满足大豆的需水量,尤其是在开花—成熟阶段存在需水量不足的风险。

4 减缓与适应气候变化影响的农业措施建议

气候变化是一个长期的过程,具有极大的不确定性。东北三省作为我国主要粮食产区,对气候变化十分敏感,气候变暖增加了东北三省的热量资源,改善了作物生长发育条件,但也加剧了东北三省的极端天气,如高温、干旱和洪涝等,会对作物的生长发育产生不良影响。因此,通过文献综述以及对东北地区的实地调研和考察,结合东北三省农业现状和社会经济发展状况,就如何适应气候变化,应对极端气候事件对作物的不利影响提出以下几点农业措施建议。

4.1 培育作物新品种,调整种植时间

引进和选育优良品种是农业应对气候变化最根本的适应对策之一。一方面,气候变化使东北地区的极端气候事件,如高温、干旱和洪涝等灾害发生的频率和强度增加,因此,要选择耐高温、耐盐碱、抗寒和抗旱等抗逆性强的品种^[50],并且积极发展配套的栽培技术和管理措施。另一方面,气候变化增加了东北地区的热量资源,作物生育期内有效积温增加,且生长季的延长使原有作物品种由早中熟向中晚熟方向转变^[90]。在保证种子萌发条件的基础上,可以适当提前播种日期^[51],进一步开发中晚熟品种的生

产潜力。在作物优化育种过程中,要根据种植区的实际情况选择合适的品种,避免出现过度适应和盲目适应,从而导致作物减产。

4.2 调整农业结构,优化种植布局

气候变化不仅增加了东北地区的热量资源,同时也在一定程度上改变了东北地区降水和日照的时空分布格局。气候资源的变化使东北地区适宜作物种植区不断扩大,种植界线不断北移^[5,49,52]。气候资源的变化使原以玉米和大豆为主的种植结构逐渐转变为以玉米、水稻和大豆为主的结构,原有的小麦和大豆种植区逐渐被玉米和水稻占据^[89],以玉米为主的种植区域最大,并且仍在不断扩大,种植结构趋于单一^[99]。在应对气候变化和保证粮食总量安全的前提下,还应根据市场需求对作物进行合理布局和调整,增加优质小麦和油料大豆的种植,并调整水稻种植^[100]。

4.3 加强农田水利设施建设,发展节水灌溉技术

农田水利基础设施是保证粮食安全的重要农业管理措施,是农业抗旱减灾的有力保障。根据实地考察与调研,东北地区部分水稻种植为灌溉农业,玉米和大豆多为雨养农业,当前农田基础设施整体较差,一旦遭遇干旱或洪涝灾害,极易造成作物大规模减产甚至绝收。因此,需要加强东北地区的农田水利建设^[99],通过建设灌排水渠,提高农田生态系统对气候变化的适应性和抗灾能力。同时,为了保障东北地区水资源的合理开发利用,需要大力发展并推广节水灌溉技术^[99],如滴灌和喷灌等,建立以抗旱-防涝-节水为中心的农业体系,以保障粮食产量的稳定性。

4.4 提升农业管理措施,维持恢复土壤健康

东北三省拥有我国面积最大的黑土区,黑土中富含大量有机质,对农作物的生长发育和产量形成具有重要影响^[91]。但是,由于近年来东北三省黑土区的不合理耕作以及过度开垦^[101],黑土中的有机质和氮磷等营养物质流失^[102],黑土地正在“变薄、变瘦、变硬”^[103]。因此,采取科学合理的农业管理措施恢复黑土健康已经成为当务之急^[101,104],如完善和推广“梨树模式”和“龙江模式”等^[105],采用保护性耕作措施增加土壤有机质(秸秆还田)和减少土壤扰动(减少翻耕频率),但是为了保证作物种子存活和出苗以及土壤保墒,可以将秸秆与有机肥混合耙碎翻埋,并且进行玉米-大豆轮作,从而培育肥沃耕作层^[106]。此外,要制定黑土相关的法律法规和保护政策,建立黑土地长效保护机制。

4.5 加强农业灾害监测、预警和风险管理

气候变化导致东北地区气象灾害发生的频率和强度增加,给农业生产造成严重损失。因此,提高农业灾害监测预报的准确性,加强灾害预警及灾害风险管理是保证粮食安全的重要方面。卫星遥感技术是一种可以全天时全天候进行地面监测的技术,在灾害监测和预警方面被广泛应用^[107],将其与地面监测相结合,可以更好地构建农业灾害风险评估和防御体系,建立动态化和精准化的灾害监测预警系统,增强农业生产应对气候变化和极端气候事件以及病虫害的抵御能力。同时,加强灾害管理和救助系统,如完善目前东北部分地区采用的农作物受灾保险或加强政府财政补贴,提高农民种植作物和应对灾害的积极性。

5 总结与展望

本文通过总结气候变化对中国东北三省玉米、水稻和大豆生产影响的相关文献,系统总结了研究气候变化对作物影响的主要方法、气候变暖对东北三省主要作物的影响以及应对措施。东北三省是遭受全球气候变暖影响最严重的地区之一,当地温度持续升高使霜冻和寒潮等低温冷害减少,而高温干旱灾害逐渐增多,特别是干旱事件已经取代低温冷害成为影响东北三省作物的主要灾害。但是整体上,气候变暖对东北三省作物生产是有利的,主要是因为温度升高改善了东北三省的热量资源,作物适宜种植区向北扩大,作物品种逐渐由早中熟向中晚熟转变。在气候变暖不断加剧的情况下,东北三省作物可能面临减产的风险,因此,需要采取一定措施保障粮食生产,如更换作物品种和加强农业基础设施建设以应对极端灾害和保护黑土地,进而维持黑土的可持续发展,同时要加强灾害监测预警和提高农民应对灾害的积极性。

气候变化对产量的影响在作物、区域和适应策略等方面均存在差异。在气候变化的影响下,东北三省作物产量、种植规模和制度均发生了一定程度的改变,并且利弊并存。尽管目前已存在许多相关研究,但气候变化对作物的影响仍存在一些不明确的方面:1) CO₂ 浓度上升对农业生产的影响。CO₂ 作为植物光合作用的原料在作物生长发育过程中起着十分重要的作用,CO₂ 浓度上升在一定程度上可以抵消气候变化对作物的负面影响^[107-108]。但是,CO₂ 浓度的变化对不同地区及作物可能会产生复杂的影响,这可能与水分、温度和土壤肥力等其他环境因子有关^[109],

如在高纬度地区, CO_2 的补偿效应更加明显, 而在低纬度地区几乎不存在 CO_2 的补偿效应^[110]。2) 气候变化可能会改变病虫害的季节性和分布, 从而对作物产量造成影响。因此, 了解气候变化对病虫害传播和生命周期的影响具有十分关键的作用。3) 培育新品种是应对气候变化最有效的方法, 研究作物在遗传水平上对气候变化的适应性以及相应的基因表达, 可以为育种工作提供重要信息。

此外, 不同区域气候、作物、土壤和管理数据的可用性和质量差异也会增加研究结果的不确定性^[109]。目前, 作物模型虽已广泛应用于气候变化对作物产量的影响研究以及未来粮食产量预测中, 但是其往往忽略多种压力因素对作物生长的相互作用, 并且由于现实中影响要素变化速度较快, 用于模型校准的试验可能会低估气候要素对作物产量的影响。尽管模型目前仍然存在不足, 但随着计算机和人工智能的发展可以将作物模型与机器学习等数据驱动算法以及试验相结合, 可以有效捕捉影响作物生长过程的多种胁迫因子之间的相互作用, 同时提高参数化性能^[109]。除了需要解决方法技术上的问题外, 在应对气候变化的过程中还需要不同学科和部门之间的相互配合, 积极应对所要面临的挑战和机遇。

参考文献 References

- [1] ARA BEGUM R, LEMPERT R, ELHAM A, et al. Point of departure and key concepts[M]//Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2022: 121–196
- [2] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713–718
ZHOU B T, QIAN J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713–718
- [3] DUAN W L, TAKARA K T. Extreme precipitation events, floods, and associated socio-economic damages in China in recent decades[M]//DUAN W L, TAKARA K T. Impacts of Climate and Human Activities on Water Resources and Quality. Singapore: Springer, 2020: 11–29
- [4] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Assessing the impacts of extreme agricultural droughts in China under climate and socioeconomic changes[J]. *Earth's Future*, 2018, 6(5): 689–703
- [5] LESK C, ROWHANI P, RAMANKUTTY N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. *Nature*, 2016, 529: 84–87
- [6] DERYNG D, CONWAY D, RAMANKUTTY N, et al. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(3): 034011
- [7] CHEN Y, ZHANG Z, TAO F L. Impacts of climate change and climate extremes on major crops productivity in China at a global warming of 1.5 and 2.0 °C[J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(2): 543–562
- [8] CAMPBELL B M, VERMEULEN S J, AGGARWAL P K, et al. Reducing risks to food security from climate change[J]. *Global Food Security*, 2016, 11: 34–43
- [9] YANG X G, CHEN F, LIN X M, et al. Potential benefits of climate change for crop productivity in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 208: 76–84
- [10] RAY D K, GERBER J S, MACDONALD G K, et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5989
- [11] HEINO M, PUMA M J, WARD P J, et al. Two-thirds of global cropland area impacted by climate oscillations[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1257
- [12] RAY D K, WEST P C, CLARK M, et al. Climate change has likely already affected global food production[J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e0217148
- [13] 解伟, 魏玮, 崔琦. 气候变化对中国主要粮食作物单产影响的文献计量 Meta 分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(1): 79–85
XIE W, WEI W, CUI Q. The impacts of climate change on the yield of staple crops in China: a Meta-analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(1): 79–85
- [14] 张书睿. 气象灾害对中国农业生产的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2023: 1–2
ZHANG S R. The Impacts of meteorological disasters on agricultural production in China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023: 1–2
- [15] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 2012[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 35–38
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of Flood and Drought Disaster in China 2012[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012: 35–38
- [16] 刘颖杰, 林而达. 气候变暖对中国不同地区农业的影响[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 229–233
LIU Y J, LIN E D. Effects of climate change on agriculture in different regions of China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(4): 229–233
- [17] FENG S F, HAO Z C, ZHANG X, et al. Probabilistic evaluation of the impact of compound dry-hot events on global maize yields[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 689: 1228–1234
- [18] 王晓煜, 杨晓光, 孙爽, 等. 气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3091–3102
WANG X Y, YANG X G, SUN S, et al. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food crops in three provinces of Northeast China under climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3091–3102
- [19] LIU Z J, YANG X G, HUBBARD K G, et al. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of Northeast China[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(11): 3441–3454

- [20] GUO S B, GUO E J, ZHANG Z T, et al. Impacts of mean climate and extreme climate indices on soybean yield and yield components in Northeast China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 838(Pt 3): 156284
- [21] 高晓容. 东北地区玉米主要气象灾害风险评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012: 29–30
GAO X R. Study on the risk assessment of the main meteorological disasters for maize in Northeast China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012: 29–30
- [22] 王培娟, 梁宏, 白月明, 等. 基于分期播种的气候变暖对东北春玉米生长发育与产量的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(18): 71–78
WANG P J, LIANG H, BAI Y M, et al. Effects of climate change on spring maize growth and yield based on stage sowing methods[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(18): 71–78
- [23] 陈金, 田云录, 董文军, 等. 东北水稻生长发育和产量对夜间升温的响应[J]. *中国水稻科学*, 2013, 27(1): 84–90
CHEN J, TIAN Y L, DONG W J, et al. Responses of rice growth and grain yield to nighttime warming in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(1): 84–90
- [24] 马树庆, 王琪, 罗新兰. 基于分期播种的气候变化对东北地区玉米 (*Zea mays*) 生长发育和产量的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2131–2139
MA S Q, WANG Q, LUO X L. Effect of climate change on maize (*Zea mays*) growth and yield based on stage sowing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2131–2139
- [25] 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 W J, CHEN J, XU Z Y, 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
- [26] ZHENG H F, CHEN L D, HAN X Z. Response of soybean yield to daytime temperature change during seed filling: a long-term field study in Northeast China[J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(4): 526–532
- [27] ZHENG H F, CHEN L D, HAN X Z. The effects of global warming on soybean yields in a long-term fertilization experiment in Northeast China[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2009, 147(5): 569–580
- [28] ZHENG H F, CHEN L D, HAN X Z. Response and adaptation of soybean systems to climate warming in Northeast China: insights gained from long-term field trials[J]. *Crop and Pasture Science*, 2011, 62(10): 876–882
- [29] 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等. 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 532–541
ZHENG Y F, HU H F, WU R J, et al. Combined effects of elevated O_3 and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 532–541
- [30] CAI C, YIN X Y, HE S Q, et al. Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO_2 and temperature in FACE experiments[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 856–874
- [31] LOBELL D B, BURKE M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1443–1452
- [32] GUO E L, LIU X P, ZHANG J Q, et al. Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in Northeast China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 231–247
- [33] 余弘泳, 赵俊芳, 余会康. 气候变化对年代际东北玉米冷害影响分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(5): 113–122
YU H Y, ZHAO J F, YU H K. Impact of climate change on decadal chilling injury of corn in northeastern China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(5): 113–122
- [34] ZHAO J F, GUO J P, MU J. Exploring the relationships between climatic variables and climate-induced yield of spring maize in Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 207: 79–90
- [35] NICHOLLS N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends[J]. *Nature*, 1997, 387: 484–485
- [36] 王萍, 李秀芬, 杨晓强, 等. 生长季降水对黑龙江省水稻生产的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(6): 62–69
WANG P, LI X F, YANG X Q, et al. Growing season precipitation affects rice production in Heilongjiang Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(6): 62–69
- [37] ZHANG J, LIU Y J, DAI L. Agricultural practice contributed more to changes in soybean yield than climate change from 1981 to 2010 in Northeast China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(6): 2387–2395
- [38] 赵彦茜, 肖登攀, 唐建昭, 等. 气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 317–326
ZHAO Y X, XIAO D P, TANG J Z, et al. Effects of climate change on the yield of major grain crops and its adaptation measures in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 317–326
- [39] 杨靖民, 杨靖一, 姜旭, 等. 作物模型研究进展[J]. *吉林农业大学学报*, 2012, 34(5): 553–561
YANG J M, YANG J Y, JIANG X, et al. Progress of crop model research[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2012, 34(5): 553–561
- [40] 朱艳, 汤亮, 刘蕾蕾, 等. 作物生长模型 (CropGrow) 研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(16): 3235–3256
ZHU Y, TANG L, LIU L L, et al. Research progress on the crop growth model CropGrow[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(16): 3235–3256
- [41] LIU Z J, HUBBARD K G, LIN X M, et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(11): 3481–3492
- [42] 葛亚宁, 刘洛, 徐新良, 等. 近 50a 气候变化背景下我国玉米生产潜力时空演变特征[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(5):

- 784–795
GE Y N, LIU L, XU X L, et al. Temporal and spatial variations of Chinese maize production potential on the background of climate change during 1960–2010[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 784–795
- [43] 朱大威, 金之庆. 气候及其变率变化对东北地区粮食生产的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(9): 1588–1597
ZHU D W, JIN Z Q. Impacts of changes in both climate and its variability on food production in Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(9): 1588–1597
- [44] 刘珍珠, 唐鹏钦, 范玲玲, 等. 1980—2010 年东北地区种植结构时空变化特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(21): 4107–4119
LIU Z H, TANG P Q, FAN L L, et al. Spatio-temporal changes of cropping types in Northeast China during 1980–2010[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4107–4119
- [45] WANG X Y, LI T, YANG X G, et al. Rice yield potential, gaps and constraints during the past three decades in a climate-changing Northeast China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 173–183
- [46] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化情景下东北地区玉米产量变化模拟[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1448–1452
ZHANG J P, ZHAO Y X, WANG C Y, et al. Simulation of maize production under climate change scenario in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1448–1452
- [47] TAO F L, ZHANG Z. Climate change, high-temperature stress, rice productivity, and water use in eastern China: a new superensemble-based probabilistic projection[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(3): 531–551
- [48] 孙扬越, 申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(7): 444–459
SUN Y Y, SHEN S H. Research progress in application of crop growth models[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(7): 444–459
- [49] 王培娟, 梁宏, 李伟君, 等. 气候变暖对东北三省春玉米发育期及种植布局的影响[J]. *资源科学*, 2011, 33(10): 1976–1983
WANG P J, LIANG H, LI Y J, et al. Influences of climate warming on key growth stages and cultivated patterns of spring maize in Northeast China[J]. *Resources Science*, 2011, 33(10): 1976–1983
- [50] 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
CHEN Q, GENG T, HOU W J, et al. Impacts of climate warming on growth and yield of spring maize in recent 20 years in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10): 1904–1916
- [51] 侯雯嘉, 耿婷, 陈群, 等. 近 20 年气候变暖对东北水稻生育期和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 249–259
HOU W J, GENG T, CHEN Q, et al. Impacts of climate warming on growth period and yield of rice in Northeast China during recent two decades[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 249–259
- [52] 纪瑞鹏, 张玉书, 姜丽霞, 等. 气候变化对东北地区玉米生产的影响[J]. *地理研究*, 2012, 31(2): 290–298
JI R P, ZHANG Y S, JIANG L X, et al. Effect of climate change on maize production in Northeast China[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(2): 290–298
- [53] PU L M, ZHANG S W, YANG J C, et al. Spatio-temporal dynamics of maize potential yield and yield gaps in Northeast China from 1990 to 2015[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7): 1211
- [54] LIU Y S, LIU X Q, LIU Z J. Effects of climate change on paddy expansion and potential adaption strategies for sustainable agriculture development across Northeast China[J]. *Applied Geography*, 2022, 141: 102667
- [55] LI Z G, TAN J Y, TANG P Q, et al. Spatial distribution of maize in response to climate change in Northeast China during 1980–2010[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(1): 3–14
- [56] 胡惠杰, 王猛, 尹小刚, 等. 气候变化下东北农作区大豆需水量时空变化特征分析[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(2): 21–31
HU H J, WANG M, YIN X G, et al. Spatial and temporal changes of soybean water requirement under climate changes in the Northeast Farming Region of China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(2): 21–31
- [57] 陈浩, 李正国, 唐鹏钦, 等. 气候变化背景下东北水稻的时空分布特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2571–2579
CHEN H, LI Z G, TANG P Q, et al. Rice area change in Northeast China and its correlation with climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2571–2579
- [58] 吴鹏, 谷星月, 王朋岭. 中国气候变化蓝皮书(2022)发布[N]. *中国气象报*, 2022-08-04(001)
WU P, GU X Y, WANG P L. Blue book on climate change in China 2022 released[N]. *China Meteorological Newspaper*, 2022-08-04(001)
- [59] 李彪. 国家气候中心: 全球气温每十年升高 0.2℃[N]. *每日经济新闻*, 2021-08-20(002)
LI B. National Climate Centre: global temperature increases by 0.2℃ per decade[N]. *National Business Daily*, 2021-08-20(002)
- [60] 王秀兰, 王秀芬, 刘洋. 1961—2014 年东北三省水稻生长季极端降水事件分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(6): 222–230
WANG X L, WANG X F, LIU Y. Analysis of extreme precipitation events in rice growing period in three provinces of Northeast China from 1961 to 2014[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(6): 222–230
- [61] 赵秀兰. 近 50 年中国东北地区气候变化对农业的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41(9): 144–149
ZHAO X L. Influence of climate change on agriculture in Northeast China in recent 50 years[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(9): 144–149
- [62] 胡琦, 潘学标, 李秋月, 等. 气候变化背景下东北地区太阳能资源多时间尺度空间分布与变化特征[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(10): 2647–2652
HU Q, PAN X B, LI Q Y, et al. Multi-time scale and spatial

- distribution and variation characteristics of solar energy resources in Northeast China in context of climate change[J]. *Acta Energae Solaris Sinica*, 2016, 37(10): 2647–2652
- [63] 姜晓剑, 汤亮, 刘小军, 等. 中国主要稻作区水稻生产气候资源的时空特征[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 238–245, 395–396
- JIANG X J, TANG L, LIU X J, et al. Spatial and temporal characteristics of rice production climatic resources in main growing regions of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7): 238–245, 395–396
- [64] 何永坤, 郭建平. 1961—2006年东北地区农业气候资源变化特征[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(7): 1199–1208
- HE Y K, GUO J P. Characteristics of agricultural climate resources in the three provinces of Northeast China from 1961 to 2006[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7): 1199–1208
- [65] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2199–2206
- LIU Z J, YANG X G, WANG W F, et al. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2199–2206
- [66] 张梦婷, 刘志娟, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征 [I]: 东北春玉米延迟型冷害[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(5): 599–610
- ZHANG M T, LIU Z J, YANG X G, et al. Temporal and spatial variations of agro-meteorological disasters of major crops in China under the background of climate change [I]: delayed chilling damage of spring maize in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(5): 599–610
- [67] 高晓容, 王春乙, 张继权. 气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2110–2118
- GAO X R, WANG C Y, ZHANG J Q. The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2110–2118
- [68] XIAO F J, SONG L C. Analysis of extreme low-temperature events during the warm season in Northeast China[J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(3): 1333–1344
- [69] 周梦子, 王会军, 霍治国. 极端高温天气对玉米产量的影响及其与大气环流和海温的关系[J]. *气候与环境研究*, 2017, 22(2): 134–148
- ZHOU M Z, WANG H J, HUO Z G. The influence of heat stress on maize yield and its association with atmospheric general circulation and sea surface temperature[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2017, 22(2): 134–148
- [70] 王秀芬, 王春艳, 尤飞. 1961—2014年东北三省水稻生长季极端高温事件分析[J]. *灾害学*, 2019, 34(2): 97–102
- WANG X F, WANG C Y, YOU F. Extreme high temperature events in growth season in three provinces of Northeast China from 1961 to 2014[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(2): 97–102
- [71] 高晓容, 王春乙, 张继权, 等. 近 50 年东北玉米生育阶段需水量及旱涝时空变化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 101–109
- GAO X R, WANG C Y, ZHANG J Q, et al. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12): 101–109
- [72] WANG C Y, LINDERHOLM H W, SONG Y L, et al. Impacts of drought on maize and soybean production in Northeast China during the past five decades[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7): 2459
- [73] 任宗悦, 刘晓静, 刘家福, 等. 近 60 年东北地区春玉米旱涝趋势演变研究[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2020, 28(2): 179–190
- REN Z Y, LIU X J, LIU J F, et al. Evolution of drought and flood trend in the growth period of spring maize in Northeast China in the past 60 years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(2): 179–190
- [74] ZHANG Y, ZHAO Y X, SUN Q. Increasing maize yields in Northeast China are more closely associated with changes in crop timing than with climate warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(5): 054052
- [75] LIU Z H, ZHANG G J, YANG P. Geographical variation of climate change impact on rice yield in the rice-cropping areas of Northeast China during 1980–2008[J]. *Sustainability*, 2016, 8(7): 670
- [76] 尹小刚, 王猛, 孔箫铨, 等. 东北地区高温对玉米生产的影响及对策[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 186–198
- YIN X G, WANG M, KONG Q X, et al. Impacts of high temperature on maize production and adaptation measures in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 186–198
- [77] 吕硕, 杨晓光, 赵锦, 等. 气候变化和品种更替对东北地区春玉米产量潜力的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 179–190
- LYU S, YANG X G, ZHAO J, et al. Effects of climate change and variety alternative on potential yield of spring maize in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(18): 179–190
- [78] TAO F L, ZHANG Z, SHI W J, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981–2009 in China, and late rice was just opposite[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 3200–3209
- [79] ZHANG S, TAO F L, ZHANG Z. Changes in extreme temperatures and their impacts on rice yields in southern China from 1981 to 2009[J]. *Field Crops Research*, 2016, 189: 43–50
- [80] LI E, ZHAO J, PULLENS J W M, et al. The compound effects of drought and high temperature stresses will be the main constraints on maize yield in Northeast China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 812: 152461
- [81] LIU X B, JIN J, HERBERT S. Soybean yield physiology and development of high-yielding practices in Northeast China[J]. *Field Crops Research*, 2008, 105(3): 157–171
- [82] 梁立江, 武永峰, 刘聪, 等. 东北地区不同熟性水稻适宜种植

- 区障碍型冷害时空变化[J]. 中国农业气象, 2020, 41(5): 308–319
- LIANG L J, WU Y F, LIU C, et al. Temporal and spatial distribution of sterile-type chilling damage in rice growth-suited areas with different maturity in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(5): 308–319
- [83] TANG P Q, YANG P, CHEN Z X, et al. The impact of climate change on rice spatial distribution in the Northeast China Plain[C]//2012 First International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). Shanghai: IEEE, 2012: 1–4
- [84] WU W X, FANG Q, GE Q S, et al. CERES-Rice model-based simulations of climate change impacts on rice yields and efficacy of adaptive options in Northeast China[J]. *Crop and Pasture Science*, 2014, 65(12): 1267
- [85] ZHANG H, ZHOU G S, LIU D L, et al. Climate-associated rice yield change in the Northeast China Plain: a simulation analysis based on CMIP5 multi-model ensemble projection[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 666: 126–138
- [86] TAO F, YOKOZAWA M, LIU J, et al. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends[J]. *Climate Research*, 2008, 38: 83–94
- [87] 张晓峰, 王宏志, 刘洛, 等. 近 50 年来气候变化背景下中国大豆生产潜力时空演变特征[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(10): 1414–1423
- ZHANG X F, WANG H Z, LIU L, et al. Spatial-temporal characteristics of soybean production potential change under the background of climate change over the past 50 years in China[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(10): 1414–1423
- [88] 郭世博, 张方亮, 张镇涛, 等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响 XIV. 东北大豆高产稳产区及农业气象灾害分析[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(9): 1763–1780
- GUO S B, ZHANG F L, ZHANG Z T, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China XIV. Distribution of high-stable-yield zones and agro-meteorological disasters of soybean in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(9): 1763–1780
- [89] 云雅如, 方修琦, 王媛, 等. 黑龙江省过去 20 年粮食作物种植格局变化及其气候背景[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 697–705
- YUN Y R, FANG X Q, WANG Y, et al. Main grain crops structural change and its climate background in Heilongjiang Province during the past two decades[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 697–705
- [90] LIU Z J, YANG X G, CHEN F, et al. The effects of past climate change on the northern limits of maize planting in Northeast China[J]. *Climatic Change*, 2013, 117(4): 891–902
- [91] ZHAO J, YANG X G, LV S, et al. Variability of available climate resources and disaster risks for different maturity types of spring maize in Northeast China[J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 17–26
- [92] SONG Y L, LINDERHOLM H W, LUO Y, et al. Climatic causes of maize production loss under global warming in Northeast China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7829
- [93] 高江波, 刘路路, 郭灵辉, 等. 气候变化和物候变动对东北黑土区农业生产的协同作用及未来粮食生产风险[J]. *地理学报*, 2022, 77(7): 1681–1700
- GAO J B, LIU L L, GUO L H, et al. Synergic effects of climate change and phenological variation on agricultural production and its risk pattern in black soil region of Northeast China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1681–1700
- [94] 邱泽莹, 马树庆, 李秀芬. 吉林春大豆生育期变化及其对气候变暖的响应[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(11): 715–724
- QIU Y X, MA S Q, LI X F. Changes of growth stage for spring soybean in Jilin Province and its response to climate warming[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(11): 715–724
- [95] 闫振华, 刘东尧, 贾绪存, 等. 花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(17): 3592–3608
- YAN Z H, LIU D Y, JIA X C, et al. Maize tassel development, physiological traits and yield under heat and drought stress during flowering stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3592–3608
- [96] 胡春丽, 李辑, 林蓉, 等. 东北水稻障碍型低温冷害变化特征及其与关键生育期温度的关系[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(3): 323–329
- HU C L, LI J, LIN R, et al. Characters of sterile-type chilling damage in rice and its relationship with temperature at key growth stage in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(3): 323–329
- [97] 高孟磊, 许吟隆, 殷红, 等. 1992—2012 年东北水稻生育期变化分析[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(5): 495–504
- GAO M S, XU Y L, YIN H, et al. Analysis on the changes of rice growth period over Northeast China in 1992–2012[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(5): 495–504
- [98] 解文娟, 杨晓光, 杨婕, 等. 气候变化背景下东北三省大豆干旱时空特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6232–6243
- XIE W J, YANG X G, YANG J, et al. Spatio-temporal characteristics of drought for soybean under climate change in the three provinces of Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6232–6243
- [99] 崔宁波, 殷琪荔. 气候变化对东北地区粮食生产的影响及对策响应[J]. *灾害学*, 2022, 37(1): 52–57
- CUI N B, YIN Q L. Impacts of climate change on grain production in Northeast China and countermeasures[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(1): 52–57
- [100] 新浪财经. 李春生: 东北农业产业结构升级应注重做好种植业结构调整[EB/OL]. [2020-09-06]. https://finance.sina.com.cn/money/bank/bank_hydt/2020-09-06/doc-iivhuipp2853773.shtml
- SINA Finance. LI ChunSheng: Upgrading the structure of the agricultural industry in Northeast China should focus on good structural adjustment of the planting industry[EB/OL]. [2020-09-06]. https://finance.sina.com.cn/money/bank/bank_hydt/2020-09-06/doc-iivhuipp2853773.shtml
- [101] 杜国明, 梁常安, 张树文, 等. 黑土地保护的对象特性、面临形势与应对策略[J]. *资源科学*, 2023, 45(5): 887–899
- DU G M, LIANG C A, ZHANG S W, et al. The object characteristics, facing situations and countermeasures of black

- soil protection[J]. *Resources Science*, 2023, 45(5): 887–899
- [102] 银敏华, 李援农, 陈朋朋, 等. 基于 Meta-analysis 的中国北方地区免耕玉米产量效应研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(5): 843–857
- YIN M H, LI Y N, CHEN P P, et al. Effect of no-tillage on maize yield in northern region of China — a Meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(5): 843–857
- [103] 姜明, 文亚, 孙命, 等. 用好养好黑土地的科技战略思考与实施路径——中国科学院“黑土粮仓”战略性先导科技专项的总体思路与实施方案[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(10): 1146–1154
- JIANG M, WEN Y, SUN M, et al. Thinking and implementation approach of science and technology strategy of well raising black soil — Overall idea and implementation planning of strategy priority research program of Chinese Academy of Sciences on black soil conservation and utilization[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1146–1154
- [104] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. *地理科学*, 2022, 42(8): 1325–1335
- LIANG A Z, ZHANG Y, CHEN X W, et al. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8): 1325–1335
- [105] 徐鹏杰, 邓磊. 遥感技术在减灾救灾中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(4): 512–519
- XU P J, DENG L. Application of remote sensing in the field of disaster reduction and response[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(4): 512–519
- [106] 陈俊, 郎秋红, 薛钦峰. 黑土层厚度已减少了 30% 至 50%, 东北黑土地如何保护?[EB/OL]. 澎湃新闻. [2021-10-04]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_14779859
- CHEN J, LANG Q H, XUE Q F. The thickness of the black soil layer has been reduced by 30% to 50%, how can protect the black soil in the Northeast?[EB/OL]. *The Paper*. [2021-10-04]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_14779859
- [107] SEPPELT R, KLOTZ S, PEITER E, et al. Agriculture and food security under a changing climate: an underestimated challenge[J]. *iScience*, 2022, 25(12): 105551
- [108] HASEGAWA T, SAKURAI G, FUJIMORI S, et al. Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs[J]. *Nature Food*, 2021, 2: 587–595
- [109] REZAEI E E, WEBBER H, ASSENG S, et al. Climate change impacts on crop yields[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4: 831–846
- [110] ANDERSON R, BAYER P E, EDWARDS D. Climate change and the need for agricultural adaptation[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2020, 56: 197–202