

DOI: 10.20103/j.stxb.202409102177

郭珊, 蒋博, 吉雪强. 极端气候对粮食生产的影响及其作用机制——兼论农地流转的调节与门槛效应. 生态学报, 2025, 45(7): 3169-3182.

Guo S, Jiang B, Ji X Q. A study on the impact and mechanisms of extreme climate on grain production: the moderating and threshold effects of farmland transfer. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3169-3182.

极端气候对粮食生产的影响及其作用机制

——兼论农地流转的调节与门槛效应

郭珊*, 蒋博, 吉雪强

中国人民大学公共管理学院, 北京 100872

摘要: 粮食安全对国家稳定和社会福祉至关重要。随着气候变化的不断加剧, 极端天气事件对粮食生产的影响日益严重, 给粮食供应带来了巨大挑战。因此, 深入研究极端气候对粮食生产的具体影响, 并探索有效的应对策略, 具有重要的现实意义。基于理论分析, 研究利用 2007—2020 年中国 296 个城市的面板数据, 实证探讨了极端气候对粮食生产保障的影响, 并分析了农地流转在其中的调节机制与门槛效应。研究发现: (1) 在全国样本中, 极端高温、极端低温和极端降水三大极端气候因子均对粮食生产产生显著的负向影响。其中, 极端高温和极端低温在 1% 的显著性水平上对粮食生产产生负向影响, 极端降水在 5% 的显著性水平上对粮食生产产生负向影响。(2) 从不同粮食生产区域来看, 极端气候对粮食主产区的粮食生产负向影响最大; 在产销平衡区, 极端高温显著抑制了粮食生产; 而在主销区, 极端气候对粮食生产的影响并不显著。(3) 农地流转能显著调节极端降水对粮食生产的影响, 但在调节极端高温和极端低温对粮食生产的影响方面并不显著, 尤其是对粮食生产至关重要的粮食主产区与产销平衡区。(4) 极端气候对粮食生产的影响存在单一门槛效应。当农地流转水平跨过门槛值 10.8905 后, 极端气候对粮食生产的影响不再显著。因此, 为保障粮食生产安全, 提升应对极端气候的能力, 应积极贯彻落实“藏粮于地”方针, 通过农地流转优化种植结构, 实现规模经济, 从而提高农业生产效率。

关键词: 农地流转; 极端气候; 粮食生产; 区域差异; 规模经营

A study on the impact and mechanisms of extreme climate on grain production: the moderating and threshold effects of farmland transfer

GUO Shan*, JIANG Bo, JI Xueqiang

School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China

Abstract: Food security is critically important for national stability and societal well-being. With the acceleration of climate change, extreme weather events have become more frequent and intense, exerting substantial pressure on agricultural productivity and food supply stability. Addressing these challenges requires a comprehensive understanding of how extreme climate conditions affect food production and identifying effective strategies to mitigate and adapt to these impacts. Based on a robust theoretical framework, this study utilizes panel data from 296 Chinese cities from 2007 to 2020 to empirically analyze the effects of extreme climate events on food production security. Furthermore, it examines the moderating role and threshold effects of farmland transfer in mitigating these impacts, providing valuable insights into the mechanisms underlying these relationships. The key findings of the study are summarized as follows: (1) At the national level, all three major extreme climate factors—extreme high temperatures, extreme low temperatures, and extreme precipitation—have a

基金项目: 国家自然科学基金(72004225); 教育部人文社科基金(24YJAZH036); 北京市社会科学基金(23GLB029); 中国人民大学科学研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助)项目成果(19XN0002)

收稿日期: 2024-09-10; 采用日期: 2025-01-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shan.guo@ruc.edu.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

statistically significant negative impact on food production. Extreme high temperatures and extreme low temperatures exhibit negative effects at the 1% significance level, while extreme precipitation negatively affects food production at the 5% significance level; (2) Regional disparities are evident in the impacts of extreme climate conditions on food production. The adverse effects are most pronounced in major grain-producing areas, where extreme climate factors significantly suppress agricultural productivity. In production-consumption-balanced regions, extreme high temperatures exhibit a substantial inhibitory effect on food production. Conversely, in grain-consuming regions, the impacts of extreme climate events are not statistically significant; (3) Farmland transfer serves as an important moderating mechanism in mitigating the negative effects of extreme precipitation on food production. This moderating effect is most pronounced in major grain-producing regions and production-consumption-balanced regions but remains statistically insignificant in grain-consuming regions. However, farmland transfer shows limited moderating effects on the impacts of extreme high and low temperatures, particularly in regions of critical importance to food security; (4) The relationship between extreme climate conditions and food production demonstrates a single-threshold effect. Once farmland transfer exceeds a critical threshold level of 10.8905, the negative impact of extreme climate conditions becomes statistically insignificant. In conclusion, enhancing food security in the face of extreme climate events necessitates proactive and targeted strategies. The effective implementation of the “storing grain in the land” policy is essential for improving agricultural resilience. Promoting farmland transfer to optimize cropping structures can achieve economies of scale and enhance agricultural productivity, thereby mitigating the adverse effects of extreme climate conditions and ensuring long-term food supply stability.

Key Words: farmland transfer; extreme climate; grain production; regional differences; scale operation

粮食安全是实现中国可持续发展的关键因素,坚持并弘扬中国特色的粮食安全道路具有重要的现实意义。习近平总书记多次强调,粮食安全是“国之大者”,保障粮食和重要农产品稳定安全供给始终是建设农业强国的头等大事。在国家层面,《中国粮食安全中长期规划纲要(2008—2020年)》等重要文件明确强调,要坚定走中国特色的粮食安全道路,确保国家粮食安全始终掌握在自己手中。在全球气候变化不断加剧的背景下,中国的粮食生产体系正面临着日益严峻的挑战^[1]。作为世界上受气象灾害影响最严重的国家之一,中国不仅面临种类繁多、强度大的气候灾害,而且这些灾害的发生频率正在不断上升。《中国气候公报》显示,近年来中国呈现出明显的暖干气候特征,极端气候事件呈现多发、频发、并发态势。极端气候事件对农业生产造成了重大影响,尤其是旱涝灾害频发,给粮食安全带来了极大的不确定性。因此,在气候变化加剧的背景下,研究应对极端气候对粮食安全的影响显得尤为紧迫和重要。

现有研究在全球气候变化对粮食生产的影响方面取得了诸多重要成果,采用了包括农业生产系统模拟器、气象产量分离、灰色关联分析、一阶差分法等在内的多种研究方法^[2-5]。这些研究普遍认为,气候变化主要通过四个方面影响粮食生产:一是改变农业种植结构,二是影响农作物生长周期,三是加剧病虫害的发生,四是增强极端气候事件的频率和强度^[6-10]。总体而言,气候变化对全球粮食生产的影响具有显著的负向效应^[11]。然而,相较于前述的三个方面,关于极端气候对粮食生产影响的研究相对滞后,研究视角也较为局限。现有研究多聚焦于全球^[12-13]、地区^[14-15]或省域^[16-17],鲜有文献在中国市域层面提供全面而深入的评估^[18]。在分析极端气候影响时,现有文献主要以定性研究为主,系统阐述了极端气候的变化趋势、对粮食生产的影响机理以及粮食生产体系的响应机制,为理解两者间的复杂关系提供了学术基础。然而,定量研究的重心集中于极端气候所引发的干旱、洪涝及寒潮等自然灾害对玉米、小麦与水稻等重要的粮食作物所造成的直接负面影响^[19-22]。

在当前全球气候变化趋势未见显著减缓的背景下,农业适应性政策的重要性尤为突出^[23]。频发的极端气候不仅破坏了粮食生产的稳定性,还暴露出中国传统农业生产模式在应对农村劳动力短缺、土地细碎化严重以及土地利用效率低下等方面问题的不足^[24]。作为新时代农村土地制度改革的重要组成部分,农地流转

对粮食生产的影响研究已在学术界取得了显著成果。尽管现有实践中存在一系列不足与挑战^[25],学术界普遍认为,通过规范化的农地流转,可以有效整合细碎化的土地资源,优化耕地利用结构,降低农业生产成本,提高耕地综合产出率与粮食生产的技术效率,从而实现规模经济^[26—28]。然而,关于农地流转对农户影响的讨论在学术界尚存争议。部分学者认为,农地流转有助于提升农户福祉,稳定农户的长期种植预期,从而进一步提高粮食产量^[29—30]。但也有学者指出,农地流转可能会加剧农户的“兼业化”倾向,导致农村劳动力的进一步流失。此外,农户在流转土地上可能更倾向于短期种植经济作物,导致粮食作物种植面积的减少,从而增加“非粮化”风险,对粮食生产产生不利影响^[31]。

综上所述,现有研究为探讨极端气候与粮食生产、农地流转与粮食生产的关系提供了坚实的理论基础,然而在以下几个关键方面尚存不足,亟待进一步探索与深化:(1) 当前研究多侧重于气候变化对粮食生产的宏观影响,而对极端气候事件,特别是其类型多样性与作用时效性在粮食生产过程中的具体影响的探讨尚显不足。多数研究仅关注极端高温和极端降水对粮食生产的影响,忽视了其他类型极端气候事件,如干旱、寒潮等,以及它们在不同时间尺度上的耦合效应。(2) 现有文献探讨农地流转与粮食生产之间的关联时,往往未能将其置于极端气候影响的背景下,缺乏对农地流转如何在极端气候条件下调节粮食生产过程以及其潜在的缓冲与适应作用的深入分析。这一视角的缺失可能掩盖了农地流转在应对极端气候对粮食安全挑战中的重要性及潜在机制。(3) 鉴于不同地区在农地流转制度实施、极端气候事件频率与强度以及粮食生产条件上的显著差异,当前研究未能充分探讨这些因素之间关系的区域异质性。因此,未来研究需深入全面地分析农地流转在调节气候变化影响方面的机制,并探讨其在粮食生产中的保障作用,以增强中国面对极端气候给粮食生产安全带来挑战的应对能力。

为进一步完善现有研究,本文基于 2007—2020 年中国 30 个省份 296 个地级及以上城市的面板数据,在实证分析极端气候与粮食生产关系的基础上,验证不同极端气候因子对粮食生产的影响机制,并探讨农地流转在调节极端气候带来的负面影响方面的作用。通过对中国三大粮食生产区划的异质性分析,进一步精准分析极端气候和农地流转对粮食生产的影响。最后,本文将通过门槛效应的实证检验,深入剖析农地流转水平在极端气候与粮食生产之间的作用机制。

本文相较于现有研究的边际贡献在于:(1) 通过实证研究,深入探讨了各个极端气候因子对粮食生产影响的具体作用机制,填补了现有研究在此领域的不足;(2) 引入农地流转作为调节变量和门槛变量,实证检验农地流转在极端气候和粮食生产间的作用机制,拓宽了研究视角,揭示了新的研究路径;(3) 针对不同粮食区划进行异质性分析,为极端气候背景下粮食生产保障提供科学依据和政策建议,具有重要的现实意义。

1 理论分析与研究假设

1.1 极端气候对粮食生产的影响

极端气候事件对农业生产的影响远远超过气候平均状态的影响^[32]。干旱、极端高温、极端降水和极端低温等极端气候事件破坏农作物的正常生长条件,削弱土壤肥力和水资源的可用性,并显著提高病虫害爆发的风险,对粮食生产造成显著影响,增加了农业生产的不确定性^[33—35]。

极端高温通过抑制植物的光合作用和蒸腾作用,导致作物生长紊乱。高温引发的干旱会加重农业区的粮食减产,并且加剧土地荒漠化和病虫害的蔓延,这些因素共同威胁着粮食生产的稳定性和产量^[36]。极端降水则对农作物的种植、生长和收获环节均有负面影响,过量降水引发的洪涝和泥石流等自然灾害不仅会直接破坏农田和基础设施,还会威胁农民的安全。此外,持续的高湿环境会增加病虫害的发生频率,从而进一步威胁粮食生产^[37]。极端低温会导致土壤冻结,损害农作物根系并降低萌芽率,在华北和东北地区,极端低温对作物产量的影响尤为显著^[38]。同时,极端气候事件还可能导致农户改变种植结构,使其倾向于种植周期更短、收益更高的经济作物,从而加剧“非粮化”现象,甚至可能导致气候移民和土地撂荒^[39]。这些变化不仅对当前粮食生产构成威胁,还对农业的长期可持续性带来挑战。据此,本文提出:

假设 1: 极端气候对粮食生产有负向影响。

1.2 农地流转、极端气候与粮食生产

极端气候事件的频发对农业系统的韧性提出了严峻的挑战, 粮食生产的稳定性与可持续性面临重大威胁^[40-41]。作为一项重要的农业政策工具, 农地流转在应对极端气候、提升农业系统韧性方面展现出了显著的潜力。在农地流转活跃的地区, 土地集中经营有助于实现规模化生产, 使农业生产者更易于采用现代化技术和设备, 如滴灌系统、温室大棚和智能化灌溉设施来应对干旱、极端高温等气候挑战从而提升农业系统的抗风险能力。农地流转促进了农户间的资源共享与合作, 强化了集体应对极端气候带来的不确定性的能力, 提高了病虫害防治与土壤改良的效率。同时, 农地流转优化了土地管理和耕作制度, 通过合理的轮作和土地养护计划, 减少了极端降水和低温对土壤结构及作物生长的不利影响。此外, 在经济较发达的地区, 农地流转为农业创新和新技术应用提供了试验与推广的空间, 通过引进优秀品种, 进一步增强了农业系统对气候变化的适应性与应对能力。然而, 由于地区间在政策执行力度、农业基础设施和气候特征等方面的异质性, 农地流转在提升农业韧性和保障粮食生产稳定性方面的成效也呈现显著差异。因此, 对农地流转在不同区域的调节效应进行研究, 应结合各地经济条件、政策实施情况和农业技术水平, 以更准确评估其在应对极端气候中的有效性与局限性^[42]。据此, 本文提出:

假设 2: 现阶段的农地流转可以削弱极端气候对粮食生产的负面影响且存在区域间差异。

农地流转规模对粮食生产具有重要影响。研究发现, 农地流转水平的变化对粮食生产的影响呈现出非线性特征。匡远配等^[43]研究发现, 农地流转水平中等的省份粮食生产效率低于高水平的省份。马俊凯等^[39]认为, 农地流转对粮食生产的影响存在“U”型趋势, 当规模小于拐点时, 规模扩大会引起种植结构“非粮化”; 而超过拐点后, 规模扩大会引起种植结构“趋粮化”。王倩等^[27]基于实证结果, 呼吁政府鼓励经营土地面积在 16666.7m² 以上的转入户种植粮食作物。基于以上研究, 本文认为农地流转主要通过降低粮食生产成本、提高农业技术效率和增强农户种植意愿来促进粮食生产。由于粮食作物种植周期长、收益低、抗风险能力弱, 在农地流转水平较低的情况下, 农户往往不会轻易改变种植结构, 反而可能更倾向于选择周期较短的经济作物。在这一阶段, 农地流转主要通过降低生产成本和提升技术效率来保障粮食生产, 但其作用较为有限, 难以充分发挥抵御极端气候的调节功能。然而, 随着农地流转水平的进一步提升, 土地细碎化程度减少, 农户可以更高效地利用农业机械, 降低单位粮食生产成本, 并实现规模经济。此外, 高水平流转的农户能够凭借更低的生产成本在市场中获得更强的议价能力, 同时也更容易获得金融支持, 从而进一步增强粮食生产的积极性。因此, 本文认为, 高水平的农地流转不仅能通过降低生产成本和提升农户生产积极性双重途径保障粮食生产, 还能在极端气候影响下, 通过市场价格优势降低粮食生产风险, 提升整体收益, 最终提高粮食产量。据此, 本文提出:

假设 3: 农地流转在极端气候和粮食生产间的作用具有门槛效应。

2 数据来源、模型构建与变量选择

2.1 研究区概况

本文研究区为我国 73°33′—135°05′E, 3°51′—53°33′N 范围。依据《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020)》的标准, 全国被划分为粮食主产区、主销区及产销平衡区三大粮食生产区域。具体而言, 粮食主产区包括辽宁、吉林、黑龙江、河北、山东、内蒙古、安徽、江西、河南、江苏、湖南、四川及湖北 13 个省份; 主销区涵盖北京、天津、上海、浙江、海南、广东及福建 7 个省份(市); 产销平衡区则由山西、陕西、甘肃、青海、广西、重庆、云南、贵州、西藏、宁夏及新疆 11 个省份(市、区)构成。

2.2 数据来源与预处理

本文综合考虑自 2002 年《中华人民共和国农村土地承包法》颁布开始, 我国农村土地流转管理工作迈入法制化、规范化的政策背景; 并基于市级数据的可得性, 最终选取了 2007—2020 年 296 个地级及以上城市

的面板数据,以验证极端气候对粮食生产的影响,并分析农地流转在其中的调节机制与门槛效应。极端气候的原始数据来源于国家气象科学数据中心和美国国家环境信息中心(NCEI),涵盖了各城市逐日最高温度、逐日最低温度和逐日降水量。在数据预处理中,鉴于中国不同地区的气候差异显著,本文参考了潘敏等^[44]的方法,对各城市气象站点的逐日数据进行了分别处理。具体方法如下:首先,确定1971—2000年为气候基准期,将各城市气候基准期内相同日期的逐日最高温度数据和逐日最低温度数据按升序排列,取逐日最高温度数据第90%分位值作为极端高温阈值,取逐日最低温度数据的第10%分位值作为极端低温阈值。同时,将各城市气候基准期内逐日降水量大于0的降水数据,同样按照升序排列,取第95%分位值定义为极端降水阈值。若某城市某日的最高温度超过极端高温阈值,即记录为一次极端高温事件;同理,若最低温度低于极端低温阈值,或降水量超过极端降水阈值,则分别记录为极端低温事件和极端降水事件。最后,将日度层面数据汇总转换为年度层面极端气候发生的天数,以此方法提取年度数据。其他数据来源于《中国农村统计年鉴》、《中国统计年鉴》以及《中国环境统计年鉴》。根据粮食产量和极端气候数据的完整性,本文剔除了青海省的数据,并在进一步整合后保留了296个地级及以上城市的数据。对于部分地区部分年份的数据缺失,本文采用线性插值法进行补齐。

2.3 模型构建

2.3.1 基准回归模型

为验证极端气候对粮食生产的影响,构建以下基本模型:

$$\ln \text{Output}_{it} = \beta_0 + \beta_1 H_{it} + \beta_2 R_{it} + \beta_3 L_{it} + \beta X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中, i 表示第 i 地区, t 表示第 t 年度;被解释变量为地区 i 在第 t 年的粮食产量;核心解释变量 H_{it} 为地区 i 在第 t 年度的极端高温天数; R_{it} 为地区 i 在第 $t-1$ 年度的极端降水天数; L_{it} 为地区 i 在第 $t-1$ 年度的极端低温天数; X_{it} 表示影响粮食生产的控制变量; μ_i 和 γ_t 分别代表个体固定效应和时间固定效应, ε_{it} 表示随机扰动项。

2.3.2 调节效应模型

为更加深入探讨农地流转在极端气候影响粮食生产过程中的调节作用,引入交叉项 $D_{it} \times H_{it}$ 、 $D_{it} \times R_{it}$ 、 $D_{it} \times L_{it}$ 变量以验证每年新增的农地流转面积的调节作用,具体模型如下所示:

$$\ln \text{Output}_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 H_{it} + \alpha_2 R_{it} + \alpha_3 L_{it} + \alpha_4 D_{it} + \alpha_5 D_{it} \times H_{it} + \alpha_6 D_{it} \times R_{it} + \alpha_7 D_{it} \times L_{it} + \alpha X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中, $D_{it} = T_{it} - T_{i(t-1)}$, T_{it} 表示地区 i 在第 t 年度的总农地流转面积的对数值。

2.3.3 门槛效应模型

为进一步剖析农地流转规模在极端气候影响粮食生产过程中作用机制,在模型(1)的基础上,引入门槛变量 T_{it} ,将其拓展为门槛效应模型:

$$\begin{aligned} \ln \text{Output}_{it} = & \alpha_0 + \beta_1 H_{it} I(T_{it} < \theta_1) + \mu_1 R_{it} I(T_{it} < \theta_1) + \sigma_1 L_{it} I(T_{it} < \theta_1) + \tau_1 X_{it} I(T_{it} < \theta_1) + \beta_2 H_{it} I(\theta_1 \leq T_{it} < \theta_2) + \\ & \mu_2 R_{it} I(\theta_1 \leq T_{it} < \theta_2) + \sigma_2 L_{it} I(\theta_1 \leq T_{it} < \theta_2) + \tau_2 X_{it} I(\theta_1 \leq T_{it} < \theta_2) + \beta_3 H_{it} I(T_{it} \geq \theta_2) + \mu_3 R_{it} I(T_{it} \geq \theta_2) + \\ & \sigma_3 L_{it} I(T_{it} \geq \theta_2) + \tau_3 X_{it} I(T_{it} \geq \theta_2) + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (3)$$

2.4 变量设计

2.4.1 被解释变量

粮食年产量。通过粮食年产量直观展现粮食生产状况。

2.4.2 核心解释变量

极端气候发生天数。囿于数据可得性限制以及现有数据极端气候指标构建标准,本文参考了潘敏等^[44]的方法,选取该年极端高温天数、极端低温天数和极端降水天数作为极端气候的衡量因子,在极端降水方面不区分干旱与洪涝。

2.4.3 机制变量

农地流转面积。由于数据可得性限制,本文首先从省级数据中选取各省份各年承包农地流转面积占总经营承包土地面积的比例,然后将这一比例乘以各城市本年度的农作物播种面积,以此作为各地级及以上农地

流转面积的代理变量。

2.4.4 控制变量

在参考已有文献^[45-46]的基础上,本文选择了有效灌溉面积、农业机械总动力、化肥施用量、农村用电量、城镇化率和农民纯收入作为控制变量。有效灌溉面积是衡量农业水利设施建设水平的重要标准,自 1990 年以来始终与粮食生产保持高度关联。农业机械总动力、农村用电量和化肥施用量都直观反映了粮食生产的现代化水平。农村的电力供给贯穿粮食的生产、加工、储存等多个环节。农业机械的使用能显著解放农村劳动力,提升粮食生产效率。化肥施用对粮食产量的增长有显著促进作用。城镇化率反映了城镇化进程对农村地区的复杂影响:一方面,城镇化引发的劳动力转移可能削弱粮食生产的劳动力基础;另一方面,城镇化的技术进步和经济发展产生的外溢效应为农村地区提供了新的发展动力,进而有助于提升粮食生产效率。农民纯收入是政府农业补贴政策、农户兼业化选择和农户种植结构在经济维度的反映。为减少异方差问题,除了核心解释变量,其他变量均进行了对数化处理,处理前的数据指标测度如表 1 所示。

表 1 变量说明及描述性统计

Table 1 Description of variables and descriptive statistics

变量分类 Variable type	变量含义 Variable meaning	均值 Average value	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value
被解释变量 Explained variable	粮食产量/万 t	206.5553	0.0005	1665.4000
解释变量 Independent variable	极端高温天数/d	54.4211	1.0000	120.0000
	极端降水天数/d	10.7509	1.0000	33.0000
	极端低温天数/d	33.2067	0.0000	78.0000
调节变量 Moderator variable	农地流转面积/千 hm ²	135.5400	0.0510	155.6241
控制变量 Control variable	有效灌溉面积/千 hm ²	192.4309	0.3500	955.4700
	城镇化率/%	53.4742	16.4130	100.0000
	农村用电量/亿 Kw h	29.2095	0.0000	2447.2140
	农业机械总动力/万 kW	335.0345	1.6800	2040.4500
	化肥施用量/万 t	19.3213	0.0378	121.8837
	农民纯收入/元	28291.6000	4871.5030	70759.8900

3 实证结果与分析

3.1 基准回归结果

本文使用 Stata 16.0 软件进行 Hausman 检验,结果显示统计量为 134.4444, P 值小于 0.01, 在 1% 显著性水平下拒绝原假设。这表明固定效应模型更优,因此本文选用双向固定效应模型实证检验极端气候变化对粮食生产的影响。通过数据处理得到的基准结果如表 2 所示。

表 2 基准回归结果

Table 2 Benchmark regression results

变量名称 Variable name	回归系数 Regression coefficient	变量名称 Variable name	回归系数 Regression coefficient
极端高温 Extreme heat	-0.0025 *** (-2.6678)	化肥施用量 Fertilizer usage	0.1574 ** (2.5766)
极端降水 Extreme precipitation	-0.0058 ** (-2.2424)	农民纯收入 Net agricultural income	0.1684 (1.4144)
极端低温 Extreme cold	-0.0036 *** (-2.7067)	常数项 Constant term	11.0861 *** (8.0923)
有效灌溉面积 Effective irrigation area	0.0357 (1.0603)	地区固定效应 Area fixed effect	是
农村用电量 Rural electricity consumption	0.0657 ** (2.0382)	时间固定效应 Time fixed effect	是
城镇化率 Urbanization level	-0.0558 (-0.4210)	观测值数 Number of observations	3504
农业机械总动力 Total agricultural machinery power	0.1366 *** (3.0773)	R^2	0.8420

* $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$

在全国样本下,分析结果显示:极端高温在 1% 的统计水平上对粮食产量产生显著的负向影响,极端降水在 5% 的统计水平上对粮食产量产生显著负向影响,极端低温在 1% 的统计水平上对粮食产量产生显著负向影响;极端高温天数、极端低温天数和极端降水天数增加 1%,粮食产量相对应将减少 0.25%、0.36% 和 0.59%。因此,假设 1 在总体上得到验证,即极端高温天气不仅抑制植物的正常生命活动,还导致农作物生长周期缩短,并显著增加病虫害的发生频率,从而引发粮食减产。极端降水事件则增加了洪涝和地质灾害的发生风险,严重威胁到粮食的供给和有效利用。此外,极端低温天气易导致土壤冻结,进而破坏农作物的根系,严重影响其正常生长过程。同时低温环境往往会降低种子的萌芽率,导致作物发育不良,最终对粮食产量造成显著的负面影响。

控制变量分析表明,农村用电量、农业机械总动力和化肥施用量均显著促进粮食生产。电力普及推动现代农业设备和技术应用,机械化作业提高了生产效率和精确度,合理施肥则增强了土壤肥力,保障农业产出稳定。然而,有效灌溉面积的影响不显著,主要由于灌溉设施老化失修及管理体制不完善,削弱了其对粮食安全的作用^[47-48]。此外,城镇化率对粮食生产呈不显著的负向影响,反映出城镇化进程中劳动力外流削弱了农村粮食生产能力,未产生预期的城市外溢效应。

3.2 稳健性检验

基准回归结果表明,三大极端气候因子对粮食生产存在负向影响。为了进一步分析遗漏变量导致的内生性问题,本文参考了王伟同等^[49]和苏芳等^[47]的研究方法。具体来说,本文通过使用可观测变量的度量,分析未观测变量可能带来的内生性问题,以提高研究结果的准确性和可靠性。

本文首先构建了模型 1 和模型 3 两个受约束模型,在模型中只引入极端高温、极端降水和极端低温三个核心解释变量。在这些受限模型下,定义极端气候因子的估计系数为 β^m 。为了进一步探讨可能的遗漏变量引发的内生性问题,本文引入经济因素对农业生产的潜在影响,这些因素包括农户的兼业化选择、农业基础设施建设和劳动力流动等。因此,模型 3 在原有基础上增加了经济维度变量,即农民纯收入,以检验补贴政策等经济因素对粮食生产的影响。在此基础上,本文构建了模型 2 和模型 4 这两个完整模型,涵盖了所有核心解释变量以及其他控制变量,两个完整模型下极端气候因子的估计系数为 β^n 。通过计算变动系数 $\varepsilon = |\beta^n / (\beta^m - \beta^n)|$,可以间接评估遗漏变量对核心解释变量参数估计值的潜在影响。变动系数 ε 值越大,表明遗漏变量对核心解释变量参数估计值的影响越小。

稳健性检验结果如表 3 所示。计算得到的 ε 值均大于 1,且 ε 均值为 6.4208,即只有当遗漏的变量的解释力不少于已有控制变量的 6.4208 倍时,未观测的变量才会对本文的基准估计结果产生偏误。因此,基本可以排除遗漏变量造成的内生性问题。

表 3 遗漏变量偏误

Table 3 Omitted variable bias

模型 Model	极端高温 Extreme heat	极端低温 Extreme cold	极端降水 Extreme precipitation	其他控 制变量 Other control variables	变动系数 Variation coefficient		
					极端高温 Extreme heat	极端低温 Extreme cold	极端降水 Extreme precipitation
模型 1 Model 1	-0.00334*** (-3.5993)	-0.00388*** (-2.9311)	-0.00476* (-1.8553)	不引入	3.1235	10.7576	5.3273
模型 2 Model 2	-0.00253*** (-2.6787)	-0.00355*** (-2.7008)	-0.00586** (-2.2860)	引入			
模型 3 Model 3	-0.00335*** (-3.5920)	-0.00389*** (-2.9352)	-0.00470* (-1.8230)	不引入	3.1358	10.7879	5.3925
模型 4 Model 4	-0.00254*** (-2.6678)	-0.00356*** (-2.2424)	-0.00577**	引入			

* $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$

为进一步检验度量可能导致的内生性问题,本文采用粮食总产量与农作物播种面积的比值,即单位粮食产量,作为新的被解释变量,稳健性检验结果如表 4 所示。核心解释变量的正负性保持不变,极端低温在 5% 的统计水平上对粮食产量产生显著负向影响,且极端低温天数增加 1%,单位粮食产量降低 0.53%,表明即便在单位粮食产量层面,极端低温的负向影响程度存在一定程度的低估,但总体结论保持一致。

表 4 更换被解释变量衡量方法

Table 4 Replacement of explained variable's measurement method

变量名称 Variable name	回归系数 Regression coefficient	变量名称 Variable name	回归系数 Regression coefficient
极端高温 Extreme heat	-0.0026 ** (-2.3998)	化肥施用量 Fertilizer usage	0.0194 (0.4749)
极端降水 Extreme precipitation	-0.0058 ** (-2.1933)	农民纯收入 Net agricultural income	0.1709 ** (2.0758)
极端低温 Extreme cold	-0.0053 ** (-2.5172)	常数项 Constant term	6.3643 *** (7.4245)
有效灌溉面积 Effective irrigation area	0.0082 (0.2456)	地区固定效应 Area fixed effect	是
农村用电量 Rural electricity consumption	0.0315 (0.9178)	时间固定效应 Time fixed effect	是
城镇化率 Urbanization level	0.0759 (0.8358)	观测值数 Number of observations	3504
农业机械总动力 Total agricultural machinery power	0.0475 * (1.8343)	R^2	0.5096

* $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$

3.3 极端气候对粮食生产影响的区域差异

在全国样本分析的基础上,本文进一步细化了中国粮食生产的区域划分,以探讨极端气候对不同区域粮食生产的具体影响。中国的粮食主产区包括东北平原、黄淮海平原以及长江中下游平原,这些区域是国家粮食生产的核心支柱。根据国家粮食和物资储备局的统计数据,过去十年间,13 个粮食主产区的粮食产量占全国总产量的比重超过 75%,且这一比例呈上升趋势。此外,这些区域贡献了全国约 95% 的增产粮食。而粮食主销区集中在大城市和沿海地区,这些地区具有较高的城镇化水平,并且对粮食需求量巨大。产销平衡区集中在中国的中西部地区,与东部地区相比,这些地区的经济发展和基础设施建设相对滞后,粮食生产的脆弱性较大。极端气候对三个地区的粮食生产的影响如表 5 所示。

结果显示,在粮食主产区,极端高温、极端降水和极端低温均在 1% 的统计水平上对粮食产量产生显著的负向影响,同时极端高温天数、极端低温天数和极端降水天数增加 1%,粮食产量相对应将减少 0.59%、0.91% 和 1.35%。这一结果表明,极端气候对粮食主产区的粮食生产造成了显著的压力与挑战。在主销区,由于粮食生产量相对较少,极端气候对粮食生产的影响并不显著。此外,路雯晶^[48]的研究表明,极端气候对粮食生产的影响存在直接效应和间接效应。作为以城市化和工业化为主导的地区,主销区的粮食播种较少,非粮化现象显著。在此背景下,极端气候对粮食生产的直接影响并不显著,然而,先进的技术和管理经验在这些地区的应用,能够增强邻近粮食生产主体的气候适应能力,从而产生间接的正向空间溢出效应,推动周边地区的粮食产业高质量发展。在产销平衡区,极端高温在 5% 的统计水平上对粮食产量产生显著的负向影响,而极端降水和极端低温则呈现正向影响。这可能由于以下两大原因导致:其一,中西部地区的水资源相对匮乏,极端高温加剧了干旱状况,部分地区种植耐寒性农作物,因此对极端高温的适应性较差,对极端低温的适应性较好。此外,极端降水带来的雨水和降温效果可以有效缓解高温干旱对粮食生产的压力。其二,在数据处理过程中,剔除了一些自治州县的数据,主要聚焦于省会及较发达地区。这一数据筛选策略导致研究结果呈现出与主销区相似的特征,即表现出正向的空间溢出效应。

上述结果表明,极端气候对不同区域粮食生产的影响存在显著差异。极端气候对粮食主产区的影响最为显著;与之相比,主销区由于粮食生产量相对较少且存在正向的空间溢出效应,因此受到的影响并不明显;而产销平衡区则由于水资源匮乏,以及所采用数据主要集中于较发达地区,表现出一定的正向影响趋势。这些发现为制定区域差异化的粮食安全保障政策提供了重要依据。

表 5 极端气候对粮食生产影响的区域差异分析

Table 5 Analysis of regional differences in the impact of extreme climate on grain production

	(1)	(2)	(3)
变量名称 Variable name	主产区 Major grain-producing region	产销平衡区 Grain production and consumption balanced region	主销区 Major grain-consuming region
极端高温 Extreme heat	-0.0059 *** (-3.7681)	-0.0017 ** (-2.1494)	0.0006 (0.3642)
极端降水 Extreme precipitation	-0.0135 *** (-3.1592)	0.0053 *** (2.6636)	-0.0025 (-0.5733)
极端低温 Extreme cold	-0.0091 *** (-4.4991)	0.0018 (1.4510)	-0.0020 (-0.6446)
有效灌溉面积 Effective irrigation area	0.0429 (0.7513)	-0.0162 (-0.6944)	0.0423 (0.6952)
农村用电量 Rural electricity consumption	0.1337 * (1.7404)	-0.1255 *** (-3.1178)	0.0723 ** (2.5713)
城镇化率 Urbanization level	-0.4419 ** (-2.2779)	0.0600 (0.4350)	-0.4557 (-1.1478)
农业机械总动力 Total agricultural machinery power	0.2178 ** (2.2097)	0.0242 (1.0240)	0.3156 *** (2.9688)
化肥施用量 Fertilizer usage	0.1555 (1.2853)	-0.0858 ** (-2.0991)	0.0664 (0.7578)
农民纯收入 Net agricultural income	0.2336 (1.2537)	0.0448 (0.5736)	0.1537 (0.4665)
常数项 Constant term	11.5570 *** (5.2840)	13.9204 *** (16.0543)	9.6914 *** (2.6087)
地区固定效应 Area fixed effect	是	是	是
时间固定效应 Time fixed effect	是	是	是
观测值数 Number of observations	2113	851	553
R ²	0.6903	0.9508	0.9545

* $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$

3.4 农地流转的调节效应分析

如表 6 所示,农地流转在三大粮食生产功能区中的调节作用呈现出显著差异。具体而言,农地流转主要对极端降水影响粮食生产的过程具有显著的调节作用,而在调节极端高温和极端低温对粮食生产的影响方面则表现不显著。在主产区,极端降水对粮食产量的主效应系数显著为负,而农地流转与极端降水的交互项系数在 5% 的统计水平上显著为正,这一结果表明,农地流转有效缓解了极端降水对粮食生产的负面冲击。与上述情况不同,在产销平衡区,极端降水对粮食产量的主效应系数显著为正,同时农地流转与极端降水的交互项在 5% 的统计水平上显著为正,这一结果表明,在极端降水对粮食生产总体产生正面影响的情况下,农地流转进一步增强了这种积极作用。

从区域特征来看,主产区是粮食生产的关键功能区,具备高度的粮食生产规模化与机械化水平,辅以完善的农业基础设施和强有力的政策支持。这些有利条件使得农地流转在主产区能够显著削弱极端降水对粮食生产的负面影响,从而增强粮食生产的气候适应性。而在产销平衡区,农地流转同样发挥了积极作用,但其作用机制有所不同。农地流转通过优化农业生产布局,有效利用降水,进一步增加降水对粮食产量增加的正面效应。

综上所述,农地流转主要通过调节极端降水对粮食生产的影响来发挥其调节作用,而在调节极端高温和极端低温对粮食生产的影响方面,整体表现不显著,尤其是对粮食生产至关重要的粮食主产区和产销平衡区。

因此,建议加大农地流转政策的执行力度,特别是在粮食主产区和产销平衡区的极端降水频发地区,以期提高粮食生产的适应力和抗风险能力。

表 6 农地流转的调节作用及区域差异

Table 6 Moderating effect of farmland transfer and analysis of regional differences

变量名称 Variable name	(1)	(2)	(3)
	主产区 Major grain-producing region	产销平衡区 Grain production and consumption balanced region	主销区 Major grain-consuming region
极端高温 Extreme heat	-0.0067 *** (-2.8602)	-0.0015 ** (-2.0227)	-0.0014 (-1.0092)
极端降水 Extreme precipitation	-0.0140 *** (-2.7149)	0.0043 ** (2.2113)	-0.0022 (-0.5564)
极端低温 Extreme cold	-0.0127 *** (-3.1465)	0.0009 (0.8966)	-0.0024 (-0.6594)
农地流转 Farmland transfer	-0.0601 (-1.1308)	0.0232 (0.6179)	0.2189 (1.2671)
农地流转×极端降水 Farmland transfer×Extreme precipitation	0.0161 ** (2.2981)	0.0157 ** (2.3963)	-0.0301 (-1.0670)
农地流转×极端高温 Farmland transfer×Extreme heat	0.0013 (0.3497)	-0.0021 (-0.8437)	-0.0146 * (-1.6809)
农地流转×极端低温 Farmland transfer×Extreme cold	-0.0122 (-1.6138)	-0.0034 (-1.3262)	-0.0321 ** (-2.3730)
有效灌溉面积 Effective irrigation area	0.0298 (0.4383)	-0.0163 (-1.3082)	0.0475 (0.8332)
农村用电量 Rural electricity consumption	0.1821 ** (2.4231)	-0.0993 *** (-3.4088)	0.1585 * (1.6493)
城镇化率 Urbanization level	-0.3724 ** (-2.1875)	-0.0091 (-0.0789)	-1.1553 (-1.1817)
农业机械总动力 Total agricultural machinery power	0.2718 *** (3.4702)	0.0352 * (1.8618)	0.3408 *** (3.4643)
化肥施用量 Fertilizer usage	0.0718 (0.6084)	-0.0911 ** (-2.1721)	0.0469 (0.8271)
农民纯收入 Net agricultural income	0.2166 (1.5385)	0.0592 (1.2367)	0.0284 (0.0876)
常数项 Constant term	11.1259 *** (6.9986)	13.8320 *** (22.6175)	13.1776 *** (2.7336)
地区固定效应 Area fixed effect	是	是	是
时间固定效应 Time fixed effect	是	是	是
观测值数 Number of observations	1944	773	508
R ²	0.6822	0.9506	0.9530

* $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$

3.5 农地流转的门槛效应分析

参考杨少华等^[50]对于门槛效应分析的思路,本文首先确定是否存在门槛及门槛个数,以此来界定影响区间。在此基础上,本文基于门槛效应模型进行参数估计。根据表 7 中单一门槛和双重门槛的检验结果,极端气候对粮食生产的影响在农地流转作为门槛变量的维度上显著拒绝了原假设。因此,本文在后续分析中采用单一门槛模型进行探究。

表 7 农地流转的门槛效应检验

Table 7 Threshold effect test of farmland transfer

门槛类别 Threshold category	<i>F</i>	<i>P</i>	10%	5%	1%	门槛估计值 Estimated threshold value	
单门槛 Single threshold	63.4000	0.0000	21.8303	29.0452	45.6978	10.8905	
双门槛 Double threshold	12.6600	0.4133	53.3235	62.8631	79.0046	4.8763	10.8905

根据农地流转的门槛值,将样本数据进行分段回归分析,结果发现极端气候对粮食生产的影响存在显著的单一门槛效应,门槛值为 10.8905。分析结果如表 8 所示,当农地流转水平未达到门槛值(10.8905)时,极端高温和极端低温在 1% 的统计水平上对粮食产量产生显著负向影响,极端降水在 5% 的统计水平上对粮食产量产生显著负向影响。然而,当农地流转水平超过该门槛值时,极端气候因子对粮食产量的影响发生了变化。此时,极端气候对粮食生产的影响不再显著。此结果验证了假设 3,表明在农地流转水平较高的情况下,粮食生产能够实现规模经济效应。在面对极端气候时,这些地区能够通过资源优化配置、基础设施建设强化、集约化管理实施、多样化种植结构和更多金融支持的共同作用,相较于农地流转水平较低的地区,展现出更大的优势,为粮食生产提供更为有效的保障。

表 8 农地流转的门槛效应的回归结果

Table 8 Regression results of the threshold effect of farmland transfer

变量名称 Variable name	(1) 门槛前 Pre-threshold	(2) 门槛后 Post-threshold
极端高温 Extreme heat	-0.0026 *** (-2.6837)	0.0026(1.6132)
极端降水 Extreme precipitation	-0.0059 ** (-2.2241)	-0.0009(-0.2269)
极端低温 Extreme cold	-0.0038 *** (-2.7673)	0.0022(1.4744)
有效灌溉面积 Effective irrigation area	0.0433(1.2356)	-0.1128 ** (-2.3590)
农村用电量 Rural electricity consumption	0.0651 ** (1.9909)	-0.3670(-1.2713)
城镇化率 Urbanization level	-0.0421(-0.3089)	-0.4261 ** (-2.1411)
农业机械总动力 Total agricultural machinery power	0.1348 *** (2.9854)	-0.0026(-0.0129)
化肥施用量 Fertilizer usage	0.1482 ** (2.3783)	-0.1814(-0.9343)
农民纯收入 Net agricultural income	0.1591(1.2987)	-3.3438(-1.0283)
常数项 Constant term	11.1460 *** (7.9222)	39.1972(0.7665)
地区固定效应 Area fixed effect	是	是
时间固定效应 Time fixed effect	是	是
观测值数 Number of observations	3415	119
R^2	0.8460	0.9530

* $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$

4 讨论

4.1 理论贡献

相比已有研究,本文的创新之处主要表现为以下三个方面:(1)实证检验三大极端气候因子影响粮食生产的作用机制。尽管已有研究广泛探讨了气候变化对粮食生产的影响,但针对极端气候的研究相对较少,且大多集中于极端降水和极端高温影响。本文考虑到近年来极端低温发生频率和强度的增加,通过引入极端低温作为极端气候因子,拓展了研究视角。在数据分析中,本文采用当期极端高温以及极端降水和极端低温的前一期数据作为核心解释变量,深入揭示了极端气候对粮食生产的作用时间和机制。(2)将农地流转作为调节变量和门槛变量纳入研究框架。与现有研究将农地流转作为影响粮食生产的自变量不同,本文将其作为调节极端气候影响粮食生产的调节变量,从而阐明了农地流转在此过程中的具体作用机制。此外,本文进一步

将总的农地流转规模作为门槛变量进行分析,实证检验了不同水平下农地流转对粮食生产的影响差异,突显了高水平农地流转在抵御极端气候影响方面的优势。(3)针对不同粮食区划进行异质性分析。本文通过对粮食主产区、产销平衡区、主销区的实证检验,揭示了极端气候对我国粮食生产的负向影响,特别强调了主产区和产销平衡区粮食生产受到的极端气候影响,以及农地流转在调节极端降水对粮食生产影响方面的重要作用。这一分析为在极端气候背景下制定粮食生产保障政策提供了科学依据和有力支持。

4.2 局限性和研究展望

现有研究仍存在以下不足:(1)本文主要聚集于总体粮食生产的分析,尚未深入探讨极端气候对不同粮食品种的具体影响,未来研究应基于各类粮食品种获得更细化的分析结果;(2)本文选取了极端高温、极端降水和极端低温作为极端气候的衡量因子,但未全面涵盖如极端干旱、洪涝等其他类型的极端气候事件,未来研究应考虑纳入更多类型的极端气候事件,以全面评估其对农业生产的影响;(3)本文主要采用了静态分析方法,未能探讨极端气候对农地流转和粮食生产的动态影响,未来研究可考虑使用更复杂的动态模型和长时间序列数据,分析极端气候影响的累积效应。

展望未来,本文还可以从以下几方面进行深化:(1)细化粮食品种分析,以更准确评估极端气候对不同粮食品种的影响;(2)扩展极端气候因子的范围,涵盖更多类型的极端气候事件,以提供更全面的评估;(3)采用动态分析方法,探讨极端气候对农地流转和粮食生产的长期累积效应;(4)扩展研究视角,鉴于极端气候变化的全球性特征,将中国的粮食生产置于全球粮食安全的大体系中进行深入剖析,旨在为全球粮食安全提供更具参考价值的洞见。

5 结论与建议

5.1 主要结论

(1)在全国范围内,三大极端气候因子均对粮食生产产生了不利影响。其中,极端高温和极端低温在 1% 的显著性水平上抑制了粮食生产,极端降水在 5% 的显著性水平上对粮食生产产生了负面影响。

(2)从区域差异来看,极端气候对粮食生产的影响存在显著差异。在主产区,极端气候的负面影响最为显著;在产销平衡区,极端高温对粮食生产有明显的抑制作用;而在主销区,极端气候对粮食生产的影响则相对不显著。

(3)农地流转的调节效应主要体现在调节极端降水对粮食生产的影响,这种调节效应在粮食主产区和产销平衡区尤为明显。

(4)极端气候对粮食生产的影响存在单一门槛效应。当农地流转水平达到并超过门槛值 10.8905 后,极端气候对粮食生产的影响不再显著。

5.2 政策建议

针对极端气候对粮食生产构成的严重威胁,本文基于实证数据分析结果,提出以下政策建议,旨在构建一个更加稳健高效的农业防御体系,从而确保国家粮食安全。

(1)为有效应对日益严峻的极端气候冲击,政府应加大对农业基础设施的投入,尤其是在防灾减灾设施的建设方面,如加固防洪堤坝、完善农田排水系统等,以增强农田抵御极端天气的能力。同时,政府应优化并扩大农业保险制度的覆盖范围,提高保险赔付标准,旨在有效分散气候风险,保障农民经济安全。此外,政府应大力推广现代农业技术,如精准农业与智能灌溉系统,借助科技手段提升农业生产的抗灾韧性,确保极端气候条件下粮食生产的持续性和稳定性。

(2)鉴于农地流转在减缓极端气候对粮食生产负面影响中的核心作用,应持续深化“藏粮于地”战略的实施,积极推动农地高质量流转,以实现规模化经营,从而增强农户抵御极端气候威胁的能力。鼓励探索创新的农地流转模式,如土地股份合作制、土地托管服务等,以吸引社会资本与新型农业经营主体参与其中,进而提升农业资源配置效率与生产效益。同时,政府应提供必要的金融支持与技术服务指导,确保农地流转后的农

业经营主体能够获取现代化农业设备,并接受相关技术培训,以此来有效降低农业生产“非粮化”风险,增强其生产能力与防灾韧性。

(3) 鉴于中国三大粮食生产区域(即主产区、产销平衡区和主销区)在基本状况与战略定位上存在差异,以及极端气候对粮食生产影响的空间异质性特征,政策制定应该考虑地域特点,实施差异化措施。对于粮食主产区,其作为保障国家粮食生产的支柱,受极端气候的影响最为显著。因此,应重点推进现代化农业的发展,积极选用抗逆性强的作物品种,以提升作物对极端气候的适应能力;同时,强化农地流转机制以提高农业生产效率和资源利用效率;此外,建立健全的农业气象服务体系,为农民提供及时、准确的极端气候预警信息,以增强农民应对极端气候的主动性,确保粮食生产安全。对于产销平衡区,需加强基础设施建设与现代农业技术应用,加强防洪排涝设施建设,完善灌溉系统等,提升抗灾能力;同时,强化农地流转机制,助于促进农业生产的规模化、集约化,增强农户抵抗极端气候威胁的能力;此外,通过财政投入与区域合作机制,促进信息共享与资源互补,从而增强整个粮食生产体系的韧性。对于主销区,应利用经济与科技优势,大力发展现代化农业,提高粮食自给率;同时,加强粮食供应链管理,建立健全的粮食储备与调配机制,以应对极端气候带来的市场波动,确保粮食市场的长期稳定。

参考文献 (References):

- [1] 马恩朴, 蔡建明, 林静, 郭华, 韩燕, 廖柳文. 2000—2014 年全球粮食安全格局的时空演化及影响因素. *地理学报*, 2020, 75(2): 332-347.
- [2] 姜彤, 翟建青, 罗勇, 苏布达, 巢清尘, 王艳君, 王国杰, 黄金龙, 徐润宏, 高妙妮, 缪丽娟. 气候变化影响适应和脆弱性评估报告进展: IPCC AR5 到 AR6 的新认知. *大气科学学报*, 2022, 45(4): 502-511.
- [3] 丑清明, 叶笃正. 构建一个经济-气候新模型评价气候变化对粮食产量的影响. *气候与环境研究*, 2006, 11(3): 347-353.
- [4] Zhou S, Yu B F, Zhang Y. Global concurrent climate extremes exacerbated by anthropogenic climate change. *Science Advances*, 2023, 9(10): eab01638.
- [5] Siddik M A, Zhang J, Chen J, Qian H Y, Jiang Y, Raheem A K, Deng A X, Song Z W, Zheng C Y, Zhang W J. Responses of indica rice yield and quality to extreme high and low temperatures during the reproductive period. *European Journal of Agronomy*, 2019, 106: 30-38.
- [6] 王亚飞, 廖顺宝. 气候变化对粮食产量影响的研究方法综述. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(12): 54-63.
- [7] 覃志豪, 唐华俊, 李文娟. 气候变化对我国粮食生产系统影响的研究前沿. *中国农业资源与区划*, 2015, 36(1): 1-8.
- [8] Cai W J, Borlace S, Lengaigne M, van Rensch P, Collins M, Vecchi G, Timmermann A, Santoso A, McPhaden M J, Wu L X, England M H, Wang G J, Guilyardi E, Jin F F. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 2014, 4(2): 111-116.
- [9] Zhao C, Liu B, Piao S L, Wang X H, Lobell D B, Huang Y, Huang M T, Yao Y T, Bassu S, Ciais P, Durand J L, Elliott J, Ewert F, Janssens I A, Li T, Lin E D, Liu Q, Martre P, Müller C, Peng S S, Peñuelas J, Ruane A C, Wallach D, Wang T, Wu D H, Liu Z, Zhu Y, Zhu Z C, Asseng S. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(35): 9326-9331.
- [10] 陈睿山, 郭晓娜, 熊波, 王尧, 陈琼. 气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径. *生态学报*, 2021, 41(7): 2918-2929.
- [11] 周曙东, 朱红根. 气候变化对中国南方水稻产量的经济影响及其适应策略. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10): 152-157.
- [12] Heino M, Kinnunen P, Anderson W, Ray D K, Puma M J, Varis O, Siebert S, Kummu M. Increased probability of hot and dry weather extremes during the growing season threatens global crop yields. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 3583.
- [13] Chavez E, Conway G, Ghil M, Sadler M. An end-to-end assessment of extreme weather impacts on food security. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 997-1001.
- [14] 邓振镛, 张强, 蒲金涌, 刘德祥, 郭慧, 王全福, 赵鸿, 王鹤龄. 气候变暖对中国西北地区农作物种植的影响(英文). *生态学报*, 2008, 28(8): 3760-3768.
- [15] Song C X, Huang X, Les O, Ma H Y, Liu R F. The economic impact of climate change on wheat and maize yields in the North China Plain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(9): 5707.
- [16] 曹永强, 冯兴兴, 王菲, 齐静威. 农业气象灾害对辽宁省粮食产量的影响. *灾害学*, 2020, 35(02): 1-7.
- [17] 高雁鹏, 陈文俊. 1984—2020 年辽宁省极端气温时空变化及粮食产量响应研究. *地理科学*, 2021, 41(11): 2052-2062.
- [18] 刘杰, 许小峰, 罗慧. 极端天气气候事件影响我国农业经济产出的实证研究. *中国科学(地球科学)*, 2012, 42(7): 1076-1082.
- [19] 韩芳玉, 张俊彪, 程琳琳, 童庆蒙, 刘勇. 气候变化对中国水稻产量及其区域差异性的影响. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 283-289.
- [20] Fu J, Jian Y W, Wang X H, Li L, Ciais P, Zscheischler J, Wang Y, Tang Y H, Müller C, Webber H, Yang B, Wu Y L, Wang Q H, Cui X Q,

- Huang W C, Liu Y Q, Zhao P J, Piao S L, Zhou F. Extreme rainfall reduces one-twelfth of China's rice yield over the last two decades. *Nature Food*, 2023, 4(5): 416-426.
- [21] 徐建文, 居辉, 刘勤, 杨建堂. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2014, 34(2): 460-470.
- [22] 赵俊芳, 杨晓光, 刘志娟. 气候变暖对东北三省春玉米严重低温冷害及种植布局的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6544-6551.
- [23] 李红莉, 张俊彪, 张露, 罗斯炫. 气候变化认知对农户适应性耕作行为的影响——基于湖北省“十县千户”的田野调查. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(2): 236-248.
- [24] 韦燕飞. 新农村建设中我国农村土地集约化利用问题探析. *农业经济*, 2016, (8): 93-95.
- [25] 何欣, 蒋涛, 郭良燕, 甘犁. 中国农地流转市场的发展与农户流转农地行为研究——基于2013-2015年29省的农户调查数据. *管理世界*, 2016, (6): 79-89.
- [26] 许庆, 尹荣梁, 章辉. 规模经济、规模报酬与农业适度规模经营——基于我国粮食生产的实证研究. *经济研究*, 2011, 46(3): 59-71.
- [27] 王倩, 余劲. 农地流转对粮食生产投入产出的冲击效应. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2015, 15(4): 27-33.
- [28] 刘涛, 曲福田, 金晶, 石晓平. 土地细碎化、土地流转对农户土地利用效率的影响. *资源科学*, 2008, 30(10): 1511-1516.
- [29] 周京奎, 王文波, 龚明远, 黄征学. 农地流转、职业分层与减贫效应. *经济研究*, 2020, 55(6): 155-171.
- [30] 钱忠好, 王兴稳. 农地流转何以促进农户收入增加——基于苏、桂、鄂、黑四省(区)农户调查数据的实证分析. *中国农村经济*, 2016, (10): 39-50.
- [31] 胡新艳, 罗必良, 王晓海. 农地流转与农户经营方式转变——以广东省为例. *农村经济*, 2013, (4): 28-32.
- [32] 贺大兴. 极端气候对中国粮食产量影响的定量分析. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(4): 28-34.
- [33] Vogel E, Donat M G, Alexander L V, Meinshausen M, Ray D K, Karoly D, Meinshausen N, Frieler K. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(5): 054010.
- [34] Ning G C, Luo M, Zhang W, Liu Z, Wang S G, Gao T. Rising risks of compound extreme heat-precipitation events in China. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(11): 5785-5795.
- [35] Zscheischler J, Seneviratne S I. Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Science Advances*, 2017, 3(6): e1700263.
- [36] Thompson V, Mitchell D, Hegerl G C, Collins M, Leach N J, Slingo J M. The most at-risk regions in the world for high-impact heatwaves. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2152.
- [37] 刘昌新, 张海玲, 吴静. 基于SSPs情景的中国极端降水影响评估. *环境保护*, 2021, 49(8): 29-34.
- [38] 王艳华, 任传友, 韩亚东, 张菁. 东北地区活动积温和极端持续低温的时空分布特征及其对粮食产量的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1742-1748.
- [39] 马俊凯, 李光泗, 李宁. “非粮化”还是“趋粮化”: 农地经营规模对种植结构的影响. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(9): 90-100.
- [40] 张帅, 于宏源. 气候极端化背景下的全球粮食体系韧性治理及对中国的启示. *上海交通大学学报: 哲学社会科学版*, 2023, 31(7): 79-93.
- [41] 陈有华, 曾梦晴, 陈彬. 气候变化对粮食生产韧性的影响——基于作物多样化的调节效应研究. *生态学报*, 2024, 44(16): 6937-6951.
- [42] 包宗顺, 徐志明, 高珊, 周春芳. 农村土地流转的区域差异与影响因素——以江苏省为例. *中国农村经济*, 2009, (4): 23-30.
- [43] 匡远配, 张容. 农地流转对粮食生产生态效率的影响. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(4): 172-180.
- [44] 潘敏, 刘红艳, 程子帅. 极端气候对商业银行风险承担的影响——来自中国地方性商业银行的经验证据. *金融研究*, 2022, 508(10): 39-57.
- [45] 周博, 翟印礼, 钱巍, 余志刚. 农业可持续发展视角下的我国粮食安全影响因素分析——基于结构方程模型的实证分析. *农村经济*, 2015, (11): 15-19.
- [46] 田红宇, 祝志勇. 中国粮食生产效率及影响因素分析——基于DEA-Tobit两步法研究. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(12): 161-168.
- [47] 苏芳, 刘钰, 汪三贵, 尚海洋. 气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(8): 140-152.
- [48] 路雯晶. 极端气候对粮食产业高质量发展的影响研究. *运筹与模糊学*, 2023, 13(6): 6784-6800.
- [49] 王伟同, 谢佳松, 张玲. 人口迁移的地区代际流动偏好: 微观证据与影响机制. *管理世界*, 2019, 35(7): 89-103.
- [50] 杨少华, 王凯. 规模经营对中国生猪生产波动的稳定效应研究——基于调节效应和门槛效应模型的双重检验. *农业经济问题*, 2022, (7): 81-96.