



张勇翔, 祁应军, 穆月英. 气候冲击下的中国粮食产出损失研究[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(10): 318-335.

ZHANG Yongxiang, QI Yingjun, MU Yueying. China's grain yield loss under climate shocks[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10): 318-335.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.25

气候冲击下的中国粮食产出损失研究

张勇翔 祁应军 穆月英*

(中国农业大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要 基于我国逐日气象数据和县域统计数据, 结合理论模型和实证框架, 系统研究了短期极端气候冲击与长期气候变化等气候冲击对粮食产出的复合影响, 并基于区域异质性和农时异质性探讨了不同气候情境下的粮食生产损失。结果表明: 1) 气候变化对粮食生产的影响呈现显著的极端冲击放大效应: 极端低温的边际抑制力(单产降幅 0.36%/°C)是长期积温变动影响的 18 倍, 干旱灾害的边际破坏性(单产降幅 0.11%/mm)是强降水影响的 3.7 倍。2) 短期冲击的部分损失可被长期适应行为所抵消, 在施加 5% 的年积温正向冲击下, 长期影响导致单产下降 0.40%, 但短期影响加剧至 0.52%。3) 从区域差异来看, 短期极端气候冲击对粮食产出的影响具有显著的空间异质性: 长江中下游、黄土高原等地区对高降水冲击反应最强; 4) 从农时差异来看, 极端气候冲击的时间窗口效应明显, 极端气候在“清明—立夏”和“夏至—小暑”阶段影响最显著, 对春播幼苗期及抽穗灌浆期造成严重冲击。5) 进一步基于 CMIP6 未来气候预测表明, 气候变化将显著削弱我国粮食产出能力, 即使在 SSP126(较乐观)情景下, 2020—2035 年全国平均单位耕地粮食产量预期将下降 23.10%, 随着时间推移, 气候冲击的影响呈现加剧趋势。从区域差异来看, 我国粮食生产重点区域均受到不同程度的冲击, 东北区受到的影响相对较小, 但黄淮海地区即使在相对乐观的 SSP126 情景下, 其产量损失在 2020—2035 年期间仍将下降 31.85%。基于此, 本研究提出了以下政策建议: 加强农业基础设施建设, 优化区域水资源管理, 推广耐候性作物, 提升农业气象预警体系, 完善农业保险与金融支持, 推动智慧农业与适应性技术创新, 以增强粮食生产系统的韧性。

关键词 气候冲击; 极端气候; 粮食生产; 损失与预测; 风险评估

中图分类号 F329.9

文章编号 1007-4333(2025)10-0318-18

文献标志码 A

China's grain yield loss under climate shocks

ZHANG Yongxiang, QI Yingjun, MU Yueying*

(College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Based on daily meteorological data and county-level statistical data in China, this study combines theoretical models and empirical frameworks to systematically examine the compound effects of short-term extreme climate shocks and long-term climate change on grain yields. Considering regional and agricultural time, food production losses under different climatic scenarios are investigated. The study results show that: 1) Climate change significantly amplifies the impact of extreme shocks. The marginal suppressive effect of extreme low temperatures (yield reduction of 0.36% per °C) is 18 times larger than the impact of long-term cumulative temperature changes, while the marginal destructive effect of drought (yield reduction of 0.11% per mm) is 3.7 times greater than that of heavy precipitation. 2) Some of the losses from short-term shocks can be mitigated by long-term adaptation. For example, under a 5% positive annual cumulative temperature shock, the long-term

收稿日期: 2024-11-10

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(18ZDA074); 现代农业产业技术体系北京市产业经济与政策创新团队项目(BAIC11-2023)

第一作者: 张勇翔(ORCID:0000-0002-1654-7786)博士研究生, E-mail: Noahyxzhang@outlook.com

通讯作者: 穆月英(ORCID:0000-0003-3436-4593)教授, 主要从事农业经济理论与政策研究, E-mail: yueyingmu@cau.edu.cn

effect leads to a 0.40% yield decline, while the short-term impact exacerbates this to 0.52%. 3) Regional differences show that the effects of short-term extreme climate shocks on grain yields exhibit significant spatial heterogeneity. The middle and lower reaches of the Yangtze River and the Loess Plateau are the most responsive to heavy precipitation shocks, while the impacts in the Northwest Arid Zone are smaller or even reversed. 4) Timing differences reveal a clear time window effect. Extreme high temperatures have the most significant impact during the 'Qingming-Lixia' and 'Summer Solstice-Xiaoshu' stages, causing severe effects on spring-sown seedlings and the tasseling and grain-filling stages. 5) Future climate projections based on CMIP6 indicate that climate change will significantly reduce China's grain production capacity. Even under the more optimistic SSP126 scenario, from 2020 to 2035, the national grain yield per unit of arable land will decline by 23.10%. The Huanghuaihai region will experience a yield decline of 31.85%. Based on these findings, the following policies are recommended: strengthening agricultural infrastructure, optimizing regional water resource management, promoting climate-resistant grains, enhancing agrometeorological early warning systems, improving agricultural insurance and financial support, and encouraging smart agriculture and adaptive technological innovations to enhance the resilience of the food production system.

Keywords climate change; climate extremes; grain production; losses and prediction; risk assessment

全球气候冲击的加剧已成为当今社会亟待应对的重大挑战,尤其对农业生产这一对气候条件高度敏感的领域构成了严峻威胁。频发且日趋强烈的极端气候与长期的气候变化,不仅直接影响了农作物的生长周期和产量,还通过改变农业生态系统的结构、影响农业基础设施,从根本上威胁到全球粮食安全^[1]。作为拥有广阔农业生产区域且地理气候条件复杂的国家,我国正面临极端气候冲击对粮食生产的严峻挑战。如何有效应对气候变化风险,保障国家粮食安全,已成为亟待解决的核心议题^[2]。

已有研究广泛关注气候冲击对农业生产的影响,从短期极端气候波动到长期气候变化均有探讨。部分学者基于生产函数模型,分析了气候冲击对土地生产率与农业产出的多层次作用机制^[3-4]。气候冲击不仅直接影响作物的生长,还通过资源投入调整与生产策略优化间接制约粮食产量。然而,尽管普遍认为极端气候对农业生产具有负面影响,但针对不同区域和作物类型的差异化量化分析仍显不足,导致研究结论在实践中适用性有限。

近年来,学者们逐渐关注到气候环境变化所带来的生产冲击与适应性措施的抗逆效应,气候冲击所带来的负面影响能够借助包括耐旱品种^[5]在内的技术创新与技术推广得到有效改善^[6],适应性技术将极大促进农户适应和减少气候冲击所带来产量损失的能力^[7]。以极端高温为例,适应性措施对粮食的增产贡献较大^[8],改善灌溉条件会减少因气候冲击而引发的粮食产量波动、增加粮食产量,但采取该措施的预期经济效益却很低^[9],农业灌溉设施

每增加1%,粮食产量会相应的增加1.62%^[10]。长时间序列视角下的因果研究表明,灌溉措施能够有效抵消极端高温对我国粮食产出水平的负向影响^[11],也能够极大缓解极端降水带来的负向效应^[12]。

从针对中国的研究来看,尽管科技进步为农业提供了诸多缓解气候变化的手段^[13],但地域差异、气候类型的多样性以及农业生产的复杂性,使得这一问题在不同地区和不同气候条件下表现出不同的适应性效果。高温冲击对我国北方农业生产的负面影响较为明显,然而,在南方地区的适应性措施较为成熟,更广泛的灌溉技术和作物品种的适应性调节,能够有效缓解极端气温的冲击^[13-14]。此外,气候冲击不仅会作用于农业生产投入与种植方式的决策,甚至会直接冲击农户的种植决策本身^[15]。在此条件下,气候波动所带来的冲击与影响会在不同程度上被农业生产者的适应性行为所抵消^[16-18],这也为合理评估气候波动对农业生产造成的影响和冲击带来了困难与挑战,传统研究倾向于将气候冲击的影响划分为短期和长期2个层面^[19],但对二者间的动态关联,尤其在复杂气候条件下,如何在长期变化背景下应对短期极端气候冲击,探讨不足^[20]。

已有研究指出,理解气候冲击对粮食生产影响的长期与短期效应至关重要,短期效应通常指的是气候冲击在较短的时间跨度内对农业生产造成的直接影响,这些影响通常由天气波动引起。而长期效应则涉及到气候冲击对粮食产出的持续性影响,

这种影响可能通过气候适应能力的改变以及农业实践的调整等途径逐渐显现。短期效应通常表现为年度内天气条件的波动,这些变化直接影响粮食产量。从目前的方法实践来看,最早的气候冲击影响估计通常采用李嘉图模型^[3]。该方法以土地价值作为被解释变量,将作物生长季节的温度、降水等气候变量以及其他农地特征作为自变量进行回归,通过估计参数预测未来气候冲击的影响^[21]。这一模型的核心假设是,农户能够基于过去的气候状态和对未来气候冲击的判断,及时调整生产行为,从而实现利润最大化。这些调整最终会反映在土地价值上。这一分析通过地区间的空间差异来识别气候对农业的影响,为评估气候冲击的经济效应提供了早期框架。然而,由于依赖横截面数据,李嘉图模型存在显著的内生性问题。例如,遗漏变量可能导致估计偏差,而加入更多控制变量并不总能解决问题,反而可能引发“坏控制”或“过度控制”等新问题^[22]。

为克服横截面数据的缺陷,固定效应面板数据模型逐渐成为揭示气候冲击对农业影响的主流方法。该方法通过控制时间不变的区域特征,消除可能混淆气候影响的遗漏变量^[23],但其主要依赖于天气波动进行识别,而非长期气候冲击。因此,该方法被批评无法有效捕捉农业系统对气候冲击的长期适应性^[24]。此外,由于气候变量在时间上的变化有限,固定效应模型可能难以估计长期气候平均值的影响。针对截面数据和面板数据在识别长期适应能力方面的不足,Burke等^[25]提出了长差分模型,通过计算不同时段变量均值的差分,估计长期天气变化对产出的影响。然而,长差分方法存在一些局限。首先,长差分主要依赖跨时间段的变化,无法有效捕捉短期极端天气事件对产量的即时冲击。其次,长差分方法倾向于忽略区域间的差异性,而区域间气候冲击及其影响可能存在显著不同,导致估计结果在某些情况下失真或缺乏代表性。Deschênes等^[26]指出:“在包含县级固定效应的模型中,几乎不可能估计长期气候平均值的影响,因为气候变量在时间上缺乏足够的变化。”

鉴于此,在已有研究范式的基础上,本研究尝试从长期变化与短期极端气候的视角对气候冲击的减产效应进行剥离,探讨考虑农时和区域异质性下的短期极端气候冲击对我国粮食生产的具体影

响。通过结合日度气象数据和县域粮食生产资料,并利用CMIP6的气候预测数据,系统评估未来不同气候模式下气候冲击对粮食产出的风险与影响。以期为提高我国农业应对气候变化的适应能力、保障粮食安全提供理论依据,并为制定更为精准的气候适应政策提供经验支持。

1 理论分析

1.1 短期气候波动及长期气候冲击的影响区分

农业生产同时受到自然条件和人类决策的双重影响。气候条件通过改变温度、降水和土壤状况等基本环境因素直接作用于作物生长,而农业生产者的决策行为则通过间接路径影响产出。农业生产者的投入决策并非外生独立,而是受到气候冲击及其不确定性的显著约束^[27]。具体而言,面对气候不确定性,农户需要动态调整生产投入,以平衡短期风险和长期收益^[28-29]。为应对长期气候冲击,农户可能会通过引入耐旱或耐热的作物品种、改进灌溉技术,或优化化肥和劳动力的投入规模,以降低极端气候对产出的负面影响^[30]。目前,已有研究尝试将短期极端事件与长期气候变化的影响相结合。Schlenker等^[31]通过生产函数模型分析了长期气候变化对农业产出的渐进性影响,并强调了短期气候波动对作物生产的即刻冲击。同时,也有研究关注到气候变化的适应性反应,认为农业生产者在短期内可能通过应急性措施来应对极端气候事件的冲击,而这些短期适应性措施的效果可能受到长期气候变化趋势的限制。基于此,本研究通过效用最大化模型分析农户在不同气候情境下的生产决策逻辑,以生产函数为起点,构建理论模型。

1.1.1 农业生产函数

$$Y=f(X,\beta)\times \text{tfp} \quad (1)$$

式中: Y 为农业产出水平,即每公顷土地的农业产出; $f(X,\beta)$ 表示农业生产过程中各类要素投入与产出之间的关系,包括劳动、化肥、机械等, tfp 为全要素生产率,反映了土地、劳动力、资本等要素在生产过程中所产生的产出能力。气候冲击通过改变生产环境的基础条件直接影响农业全要素生产率。

1.1.2 气候损失函数

基于气候冲击的影响特点,本研究构建气候损失函数 $D(T,P)$,用于定量评估短期极端气候冲击和长期气候冲击对农业产出的综合影响:

$$\Gamma(T_L, P_L) = \frac{1}{\int_{T_0}^{T_0+n} \tau(t) dt} \int_{T_0}^{T_0+n} \tau(t) Z(T_s(t), P_s(t)) dt \quad (2)$$

$$D(T, P) = \Gamma(T_L, P_L) + Z(T_s(t_{\text{current}}), P_s(t_{\text{current}})) \quad (3)$$

式中：气候损失函数 $D(T, P)$ 为短期气候冲击 $Z(T_s, P_s)$ 在时间 t 上的积分； $\tau(t)$ 为时间加权成分， $\tau(t) = e^{\beta(t-T_0)}$ ； $\Gamma(T_L, P_L)$ 表示气候条件的长期变化对作物产出造成的影响。 $Z(T_s, P_s) = \alpha_T \Delta T_s(t) + \alpha_P \Delta P_s(t)$ ，表示气候条件的短期变化对作物产出造成的影响。

1.1.3 气候冲击与生产函数扩展

气候冲击通过直接和间接途径作用于农业生产。一方面，气候条件直接影响土地生产能力；另一方面，通过改变生产要素的使用效率间接影响产出。在传统生产函数的基础上，本研究引入气候冲击因素，修正后的生产函数表示为：

$$Y = f(X^*, N^*) \times g[D(T, P)] = f(X^*, N^*) \times g[D(T, P)] \quad (4)$$

式中： $g[D(T, P)]$ 为气候冲击对土地生产能力的冲击与影响，即气候产量的变化； $X^* = X \times [1 - f_X[\Gamma(T_L, P_L)]]$ 为作物生产的要素投入在短期内难以改变的部分，仅受到气候条件长期变化的影响， $N^* = N \times [1 - f_N[D(T, P)]]$ 则表示农户在短期内可以随时调整的要素投入，同时受到气候的长期变化与短期冲击的影响。

1.1.4 农户效用最大化模型

农户在面对气候冲击时，通常会根据风险偏好调整生产要素的投入规模。基于效用最大化的假设，农户的决策目标为平衡气候冲击对产量和收入的不确定性影响^[32]。效用函数形式如下：

$$\text{Max } U = E[\pi] - \frac{1}{2} \lambda \text{Var}(\pi) \quad (5)$$

式中： $E[\pi] = P_a f(X^*, N^*) E[g[D(T, P)]] - c \times X^* - r \times N^*$ ，表示利润的期望值； $\text{Var}(\pi) = [P_a f(X^*, N^*)]^2 \text{Var}[g[D(T, P)]]$ ，表示利润的方差，反应了气候波动的影响； λ 表示风险厌恶系数。

1.1.5 长期气候冲击与短期冲击的影响

1) 长期气候冲击的效用影响

在没有短期天气冲击时，此时农户对气候冲击

的预期和气候对产出的影响关系确定下较强，即 $\sigma^2 = \text{Var}[g[D(T, P)]] = 0$ ，农户对气候冲击的预期明确，效用的边际变化表示为：

$$\frac{\partial U}{\partial \Gamma(T_L, P_L)} = P_a \times f(X^*, N^*) g[D(T, P)] \frac{\partial D(T, P)}{\partial \Gamma(T_L, P_L)} \quad (6)$$

式(6)表明：长期气候冲击对农业生产者的最终效用的影响仅为气候长期变化冲击对产出的影响，而要素投入的效应对偏导数的贡献在最优条件下相互抵消。

2) 短期极端天气冲击的效用影响

当仅存在当年的短期极端天气冲击时，效用的边际变化为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial Z(T_s, P_s)} &= \frac{\partial U}{\partial D(T, P)} = P_a \times \\ &f(X^*, N^*) E[g[D(T, P)]] + \\ &\lambda P_a^2 f(X^*, N^*) \frac{\partial f(X^*, N^*)}{\partial N^*} \times \\ &f_N'[D(T, P)] N^* \text{Var}[g[D(T, P)]] - \\ &\frac{1}{2} \lambda [P_a f(X^*, N^*)]^2 \frac{\partial \text{Var}[g[D(T, P)]]}{\partial D(T, P)} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)表明：当仅存在短期极端天气冲击时，气候冲击对农户效用的影响包括3个方面，一是对产出水平的直接冲击；二是通过要素投入调整影响产出和成本；三是因气候波动引起收益不确定性的间接影响。

3) 长期与短期气候冲击的叠加效应

当长期变化与短期冲击共同存在时，效用的边际变化为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial D(T, P)} &= P_a \times \\ &f(X^*, N^*) E[g[D(T, P)]] + \\ &\lambda P_a^2 f(X^*, N^*) \left[\frac{\partial f(X^*, N^*)}{\partial N^*} \times \right. \\ &f_N'[D(T, P)] N^* + \frac{\partial f(X^*, N^*)}{\partial X^*} * \\ &f_X'[D(T, P)] X^* \left. \times \text{Var}[g[D(T, P)]] - \right. \\ &\left. \frac{1}{2} \lambda [P_a f(X^*, N^*)]^2 \frac{\partial \text{Var}[g[D(T, P)]]}{\partial D(T, P)} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)表明:当同时存在长期气候冲击与短期天气冲击时,长期变化和短期冲击的叠加效应通过直接冲击、要素调整及不确定性损失3个途径作用于农户效用。农户能够通过要素投入调整,在一定程度上抵消气候带来的效用损失影响,而此时的最优要素投入决策则与式(7)类似,受制于气候对产出的冲击以及气候波动的风险强度。

上述理论模型揭示了气候冲击对农业生产的复杂影响机制。气候冲击不仅通过温度、降水模式的改变和极端天气事件的频发直接冲击农业生产,还导致土地生产率下降和生产成本上升,对农业系统构成直接挑战。同时,农户在应对气候冲击时的要素投入决策呈现出动态特征,并不以完全抵消气候冲击为目标,而是兼顾潜在的产量损失和气候不确定性带来的风险。当气候不确定性较强且短期波动较大时,农户更倾向于缩减投入规模以降低风险;而在气候冲击主要表现为长期可预测的趋势时,农户的投入水平对不确定性的敏感度显著降低。这种适应性调整反映了农户在资源分配中的权衡策略。因此,气候冲击对农业生产的影响既包括直接的环境冲击,也体现为对生产行为和投入决策的间接作用。农户对气候冲击的动态调整能力在一定程度上决定了农业系统应对气候冲击的韧性和适应性。据此,理论推导的结果表明,长期气候变化和短期气候波动的交织影响对农业生产的冲击机制更为复杂。农户的决策行为呈现出对短期风险的敏感性和对长期趋势的适应性。对于长期气候变化,农户更多地依赖长期规划和投入,而短期气候波动则通过产生突发性的冲击扰乱农业生产者稳定的应对策略集合。因此,短期的极端气候冲击能够在一定程度上被长期应对策略所抵消,但抵消能力是有限的。基于此,提出研究假设:

H1:长期气候变化与短期气候冲击对粮食产出能力存在负向影响;

H2:短期气候冲击能在一定程度上被长期适应所抵消。

2 数据来源与变量选取

2.1 数据来源

本研究使用的气象数据来源于1980—2022年国家气象数据共享中心(<https://data.cma.cn/>)的逐日气象观测数据和未来情景气候数据集。历史

数据涵盖全国气象站点的气温、降水等主要气象指标,为解决部分站点个别年份或日度数据的缺失,采用线性回归和邻站平均插值法填补,确保数据连续性。在此基础上,基于气象站点经纬度信息,采用反距离权重插值法将逐日数据进行空间插值,并匹配到全国区县级空间范围,构建1980—2022年全国区县级逐日气象数据库。未来情景气象数据源自国际耦合模式比较计划(CMIP)提供的CMIP6数据,选用5种全球气候模型,涵盖1960—2014年基准期模拟数据和3种不同的排放情景(SSP126、SSP265和SSP585)下至2100年的逐日模拟数据。这些数据广泛应用于气候冲击影响评估、极端事件分析及政策支持研究。

粮食产出相关数据基于2000—2023年《中国县域统计年鉴》^[33]及各级地方统计资料,包含耕地面积、主要农作物产量、种植结构、粮食单产、农业机械化水平等指标,同时涵盖人口密度、经济总量、人均收入、基础设施建设及农业从业人口等社会经济变量。农业区划数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所发布的中国农业资源环境分区数据集^[34-35]。

2.2 变量定义及描述性统计

1)核心解释变量。温度与降水是影响农业生产的关键气候因子,也是分析气候冲击对粮食产出水平的重要指标。本研究的核心解释变量基于温度与降水变动进行构建,分别选用作物生长期内的有效积温 GDD_{it} 与作物生长期内的有效降水 $PRCPT_{it}$ 作为核心解释变量。根据极端气候冲击的概念和表现特征,即短期极端气候冲击表现为对长期的正常气候状态的偏离,也是对粮食产出造成冲击与影响的关键因素之一,同时,考虑到不同区域对极端气候冲击的适应能力存在明显差异,以短期降水变动为例,当面对相同幅度的降水偏离时,内蒙古地区的农户与长江中下游地区的农户的反应与适应能力可能不同^[1]。进一步地,仅度量气候因素的偏离幅度并不足以反应极端气候冲击对农业生产的多样性的影响,一方面,已有的研究表明,极端气候冲击的方向并不唯一,即洪涝与干旱在同一地区可能交替出现,单一的均值偏离并不足以全面反应极端气候冲击的异质性特点;另一方面,气候因子与长期均值的偏离幅度在不同地区存在明显差异,这也是不同地区在面临相同程度偏离的反应

与适应能力差异的来源之一。因此,本研究在历史均值水平的离差算法的基础上,结合世界气象组织对极端气候事件的定义,以地区化的历史分位数为标准。具体而言,以每个地区过去 20 年的 1% 和 99% 构成的移动分位数区间作为标准,分别记为 $q_{xit}^{(0.01)} = \text{Quantile}_{0.01}\{X_{it}; r = t - 20, \dots, t - 1\}$ 和 $q_{xit}^{(0.99)} = \text{Quantile}_{0.99}\{X_{it}; r = t - 20, \dots, t - 1\}$, 并将 2000—2023 年每年的气候变量与这 2 个分位数所构成的阈值进行比较,定义极端气候冲击为偏离阈值的幅度 ΔX_{it} 如下:

$$\Delta X_{it}^+ = \max\{X_{it} - q_{xit}^{(0.99)}, 0\} \quad (9)$$

$$\Delta X_{it}^- = \max\{q_{xit}^{(0.01)} - X_{it}, 0\} \quad (10)$$

式中: $X_{it} \in \{\text{GDD}_{it}, \text{PRCPT}_{it}\}$, 即从作物生长积温与降水两个维度评估气候冲击对粮食产出的影响; ΔX_{it}^+ 和 ΔX_{it}^- 分别表示过高和过低的积温或降水冲击, i 和 t 分别表示不同的区县和不同的年份。

由于农业生产在一年内具有明显的阶段性特征,即相同程度的气候冲击在一年中不同的农时下对粮食产出的影响存在明显的差异,仅从全年视角评估气候冲击可能会存在显著的偏差,亟需针对农时特点分析不同节时的农时异质性,但由于农户会根据当年的气候特点调整作物的播种期等关键农时,直接采用作物生长阶段划分可能会引入新的偏差。因此,本研究在分析气候冲击效应的农时差异时,不以逐月或作物生长阶段作为划分农时的参照,而是以回归年等分的视角,采用节气作为年内不同时期的划分,节气的变化完全由地球与太阳的天文学关系决定,与人类行为或社会经济活动无关,具有显著的外生性和时间固定性。这种特性使节气成为研究农业生产与气候关系的理想变量,为分析和比较不同地区、时间段的气候效应提供了科学且可靠的时间框架。此外,节气的统一性增强了区域间气候效应研究的可比性。在全国范围内,节气作为统一的时间划分标准,能够在相同的时间节点上比较不同地区的气候效应,便利横向分析和跨区域研究,从而提升研究结果的普适性。节气框架不仅有效控制了按照作物生长阶段划分的潜在内生性问题,还显著提高了模型对气候冲击长期和短期效应的识别能力。

2) 被解释变量。本研究采用单位耕地面积的粮食作物总产量作为被解释变量。由于我国幅员辽阔,不同地区的粮食作物构成存在差异,不同作

物之间的单产水平亦存在显著差异。同时,作物的品种选择亦受到当地气候冲击的影响,用土地的产出水平而非单一作物的单产水平一方面能够系统性地评估不同地区在气候冲击下的粮食产出能力,单位耕地面积的粮食作物总产量作为一个综合指标,能够全面反映农业生产中土地利用的整体效率。单独考察各作物的单产可能会忽略不同作物之间的种植比例和结构调整,而总产量指标则可以更好地衡量在同一耕地面积上农户整体产出的变化情况。此外,单位耕地面积的粮食作物总产量更能反映一个地区在保障粮食供给方面的整体水平,从而为相关政策提供更有针对性的依据。

3) 控制变量。本研究对其他可能影响粮食产出的变量进行控制。在气象因素方面,除积温与降水外,分别选用了气压、风速、日照时数、相对湿度作为其他气象因子的控制变量,以综合考虑大气压、风速、光照与大气湿度对粮食产出的影响;在农业生产投入方面,分别考虑了地区的农业从业人数、农业机械总动力、农用化肥施用量与耕地面积作为农业劳动力、农业机械、化肥以及土地投入的表征;在社会经济层面,本研究分别控制了设施农业规模、农业增加值、农村人口规模与农民收入等方面。所有变量含义和描述性统计结果详见表 1。

3 模型设定

3.1 气候冲击对农业影响的模型框架

更准确地识别气候冲击对农业产出的短期和长期影响,本研究在固定效应面板回归中引入气候变量的非线性因素^[36],并且允许横截面的短期天气变异纳入模型框架,以此实现长期气候冲击与短期极端气候冲击效应的剥离。假定农户所面临的天气变量 x_{it} 为当地长期气候 μ_i 与短期随机性 $\Delta\epsilon_{it}$ 的组合:

$$x_{it} = \mu_i + \Delta\epsilon_{it} \quad (11)$$

式中: μ_i 为当地的基础气候条件,假定不随时间变化; $\Delta\epsilon_{it}$ 为均值是 0 的随机误差项。通过引入长期气候与短期天气的偏差(即“气候惩罚项”),可以将短期天气对农业产出的影响单独剥离。

经济主体通过长期投入优化生产结果。当短期天气与长期气候条件更接近时,气候惩罚项的影响减小,表现更优。短期内,农业预期产出函数为:

表1 变量选取与描述性统计

Table 1 Variable selection and descriptive statistics

变量 Variable	变量含义和赋值 Variable meaning and assignment	均值 Mean	标准差 SD
粮食产出 Yield	单位耕地面积粮食产量,t/hm ²	1.767 3	0.768 8
积温 Growing degree days	作物在生长季节中接收到的有效温度累计,℃	2 371.164 3	860.772 2
降水 Precipitation	作物生长期内降水量,mm	815.632 8	432.447 6
高积温冲击 High GDD shock	生长期内每一个节气时段积温超过其过去20年移动99%分位数差值的绝对值之和,℃	2.628 6	8.954 7
低积温冲击 Low GDD shock	生长期内每一个节气时段积温低于其过去20年移动1%分位数差值的绝对值之和,℃	0.652 4	1.966 8
高降水冲击 High precipitation shock	生长期内每一个节气时段降水超过其过去20年移动99%分位数差值的绝对值之和,mm	5.007 9	9.629 2
低降水冲击 Low precipitation shock	生长期内每一个节气时段降水低于其过去20年移动1%分位数差值的绝对值之和,mm	0.804 4	1.662 5
设施农业规模 Scale of facility agriculture	设施农业占地面积,hm ²	7 911.305 4	593 470.041 3
农业产业规模 Scale of agricultural industry	第一产业增加值,万元	174 883.308 2	802 007.793 4
农业劳动力供给潜力 Potential of agricultural labor supply	乡村人口,万人	35.998 9	27.362 8
农业资本支出能力 Agricultural capital expenditure capacity	农村居民人均可支配收入,元	8 527.719 6	6 884.122 0
劳动投入 Labor inputs	农林牧渔业从业人员数	11.299 4	0.943 0
机械投入 Machinery inputs	农业机械总动力,万kW	3.084 1	0.980 0
化肥投入 Fertiliser inputs	农用化肥施用量,t	3.894 2	4.722 8
土地投入 Land inputs	常用耕地面积,hm ²	10.143 6	1.229 3
地表高度 DEM	地表距海平面高度,m	63.572 3	1.366 7
大气压 Atmospheric pressure	地表大气压强,Pa	92 837.750 4	10 359.297 9
相对湿度 Relative humidity	地表相对湿度	0.007 7	0.002 9
风速 Wind speed	地表平均风速,m/s	5.029 9	0.981 8
平均气温 Average temperature	地表年平均气温,℃	12.964 8	5.618 2
日照时数 Sunshine hours	地表年均日照时长,h	5.558 8	1.486 1

注:设施农业规模、农业产业规模、农业劳动力供给潜力、农业资本支出能力、劳动投入、机械投入、化肥投入与土地投入变量在估计时均取对数处理。

Note: Values of scale of facility agriculture, scale of agricultural industry, potential of agricultural labor supply, agricultural capital expenditure capacity, labor inputs, machinery inputs, fertiliser inputs, land inputs, are all logarithmically processed.

$$E[y_{it}|\alpha_i,\mu_i,x_{it}]=\alpha_i+\beta_1x_{it}+\beta_2x_{it}^2+\beta_3(x_{it}-\mu_i)$$

(12)

捉天气变量对农业期望产出的非线性效应; β_3 为气候惩罚项的系数,表示当前天气与长期气候之间的偏差程度对期望产出造成的影响。

式中: α_i 为固定效应,用于捕捉不同地区不随时间变化的异质性; β_1 和 β_2 分别为线性和二次项系数,捕

上式可分为两部分:一是当前天气变量对产出

的直接影响,二是当前天气偏离长期气候一般范围的偏差效应。在长期内,农业预期产出可简化为:

$$E[y_{it}|\alpha_i, x_{it}] = \alpha_i + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 \quad (13)$$

上述模型表明, β_3 捕捉了天气变量偏离其长期气候一般范围对结果的影响。模型假设天气对产出的边际效应不仅依赖当前天气,还与其偏离长期气候的程度相关。如果天气数据 x_{it} 无偏,则估计结果更接近真实的长期响应。然而,实际天气数据常呈现正偏或负偏,可能导致某些条件下的估计值偏高或偏低。例如,若长期气候效应是负的($\beta_1 < 0$),面板估计可能高估温度升高对产出的负面影响。为更精确地分离短期天气波动对长期气候效应的影响,本研究假设农业产出与天气变量的关系为:

$$y_{it} = \alpha_i + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 + \beta_3 \Delta X_{it} + \epsilon_{it} \quad (14)$$

式中: ΔX_{it} 代表了当前天气与长期气候一般范围的偏差,用于控制短期冲击对长期估计的干扰。由于长期结果与短期结果之间的垂直距离相同,在 ΔX_{it} 的基础上估计的 $\beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2$ 描述了长期气候冲击的基础影响,并从反事实分析的角度分析县域 i 从 $C_{i0} = (\mu_{i0}, \sigma_{i0})$ 变为 $C_{i1} = (\mu_{i1}, \sigma_{i1})$ 的过程。其中, μ_{ik} 表示县域 i 在气候 k 下的平均天气状况; σ_{ik} 表示天气变量的短期变动,在长期适应的情况下,气候 C_{ik} 下的预期结果为:

$$E[y_i|C_{ik}] = \alpha_i + \beta_1 \mu_{ik} + \beta_2 (\mu_{ik}^2 + \sigma_{ik}) + \beta_3 \sigma_{ik} \quad (15)$$

那么长期气候效应可以表示为:

$$\widehat{\Delta^{LR} E[y_i]} = \hat{b}_1 (\mu_{i1} - \mu_{i0}) + \hat{b}_2 (\mu_{i1}^2 - \mu_{i0}^2) + (\hat{b}_2 + \hat{b}_3) (\sigma_{i1} - \sigma_{i0}) \quad (16)$$

在长期内,生产主体适应气候,但仍然会面临每年的天气变化,长期预期结果中包含 β_3 项。其中,长期适应表现为经济主体逐步从一个短期响应曲线转移至另一个短期响应曲线,但并不完全摆脱短期天气波动的影响。

相应短期效应可以表示为:

$$\widehat{\Delta^{SR} E[y_i]} = \hat{b}_1 (\mu_{i1} - \mu_{i0}) + \hat{b}_2 (\mu_{i1}^2 - \mu_{i0}^2 + \sigma_{i1} - \sigma_{i0}) + \hat{b}_3 (\sigma_{i1} - \sigma_{i0} + (\mu_{i1} - \mu_{i0})^2) = \widehat{\Delta^{LR} E[y_i]} + \hat{b}_3 (\mu_{i1} - \mu_{i0})^2 \quad (17)$$

在这个框架下,如果忽略短期的天气变化,长期效应的响应函数足以反应气候冲击的影响效应。然而,现实中短期波动广泛存在,若不加以控制,可能导致估计结果过于乐观。

3.2 实证模型的设定

我国幅员辽阔,气候条件和变化模式在区域间差异显著,特别是作为季风区,各区域气候的时空特征对农业生产的影响尤为复杂。因此,模型需要充分考虑区域异质性和气候变动特征。基于前述理论模型与长短期效应的推导,本研究假设农业产出与气候变量的关系可扩展为以下形式:

$$y_{it} = \alpha_{it} + \beta_1 \text{GDD}_{it} + \beta_2 \text{GDD}_{it}^2 + \beta_{3+} \Delta \text{GDD}_{it}^+ + \beta_{3-} \Delta \text{GDD}_{it}^- + \varphi_1 \text{PRCPT}_{it} + \varphi_2 \text{PRCPT}_{it}^2 + \varphi_{3+} \Delta \text{PRCPT}_{it}^+ + \varphi_{3-} \Delta \text{PRCPT}_{it}^- + \eta X_{it} + f_r(t) + \epsilon_{it} \quad (18)$$

式中: y_{it} 为县域 i 在时间 t 的单位耕地粮食总产量水平的对数; GDD_{it} 和 PRCPT_{it} 分别为作物生长期积温与降水总量; ΔGDD_{it}^+ 和 ΔGDD_{it}^- 分别为县域 i 在时间 t 面临的短期极端高温冲击和极端低温冲击, $\Delta \text{PRCPT}_{it}^+$ 和 $\Delta \text{PRCPT}_{it}^-$ 分别为县域 i 在时间 t 面临的短期极端降水与干旱冲击; X_{it} 表示一系列控制变量,包括农业生产投入、其他气候因素等; $f_r(t)$ 为时间趋势效应; α_{it} 为县域 $\times$ 年份固定效应; β_1 、 β_2 、 φ_1 、 φ_2 分别为长期的积温与降水对粮食产出水平的影响; β_{3+} 、 β_{3-} 、 φ_{3+} 、 φ_{3-} 分别为短期极端高温、极端低温、极端降水与干旱冲击对粮食产出的影响效应, η 为控制变量的代估参数, ϵ_{it} 为误差项。

由于农业生产受季节性变化显著影响,不同地区的关键物候期存在显著差异,为进一步提高模型精度,本研究基于我国传统节气对时间维度进行细化,将农业产出与气候变量的关系分解如下:

$$y_{it} = \alpha_{it} + \beta_1 \text{GDD}_{it} + \beta_2 \text{GDD}_{it}^2 + \beta_{3s+} \Delta \text{GDD}_{its}^+ (s \in \text{SolarTerm}_s) + \beta_{3s-} \Delta \text{GDD}_{its}^- (s \in \text{SolarTerm}_s) + \varphi_1 \text{PRCPT}_{it} + \varphi_2 \text{PRCPT}_{it}^2 + \varphi_{3s+} \Delta \text{PRCPT}_{its}^+ (s \in \text{SolarTerm}_s) + \varphi_{3s-} \Delta \text{PRCPT}_{its}^- (s \in \text{SolarTerm}_s) + \eta X_{it} + f_r(t) + \epsilon_{it} \quad (19)$$

式中: SolarTerm_s 为一年中的不同节气,节气是我国传统历法中的重要组成部分,将一年划分为 24 个阶段,每个阶段约持续 15 d。其余符号与式(18)相同。为保证估计结果的一致性和稳健性,本研究还进行了以下处理:一是鉴于农业生产投入可能受到遗漏变量干扰,本研究使用上一年度从立冬到大寒节气

的积温与降水同当地过去20年均值的离差作为工具变量,此期间农业生产活动相对减少,是农民进行下一年度种植计划和生产投入决策的重要窗口期,冬季积温和降水的异常情况对下一年度的气候状态往往存在一定的预示作用。本研究还进一步考虑了工具变量的有效性和相关性。由于上一年度冬季的积温与降水变动主要受自然气候因素影响,且与农业生产投入可能的遗漏变量相关性较低,因而可作为较为理想的工具变量。此外,为验证工具变量的合理性,本研究还进行了工具变量的弱工具性检验,以确保工具变量能够有效解释农业生产投入的变动,同时避免弱工具变量问题导致的估计偏误。二是针对气候变量,尤其是表征极端气候的变量的外生性假定进行了进一步检验。已有文献通常假定气候冲击是外生的。尽管如此,本研究通过敏感性分析提供了核心解释变量外生的证据,即通过控制不同的固定效应(将县域固定效应替换为省份固定效应和省份 $\times$ 年份固定效应)得到的气候变量估计系数方向和数值并未发生明显变化,据此可以认为,核心解释变量与误差项相关的可能性较小,即估计结果是一致的。

4 结果与分析

4.1 粮食产出损失

表2报告了使用式(18)双向固定效应模型估计的长期气候冲击与短期极端气候冲击对单位土地粮食产出水平影响的边际效应,并基于Crag-Donald Wald F 统计量进行弱工具变量检验。结果表明工具变量对内生变量具有足够的解释力,Wu-Hausman统计量表明,拒绝了农业生产投入是外生的原假设,即采用工具变量的估计结果更为稳健。

从系数的估计结果来看,作物生长期内的积温对粮食产出水平具有一定的非线性影响,其积温拐点大致位于3 250 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,而生长期内降水量正向变动对粮食产出水平大致存在显著的负向影响关系。

从短期极端气候冲击的边际影响来看,极端低积温与极端降水变动对粮食产出水平均存在显著的负向影响效应,当极端低积温每增加一个单位时,单位耕地面积的粮食产出水平将减少0.36%,而极端强降水与干旱每增加一个单位,粮食产出水平将分别下降0.03%和0.11%。

表2 固定效应模型估计结果
Table 2 Fixed effects model estimation results

变量 Variable	含短期冲击 With short-term impact	无短期冲击 Without short-term impact
积温 Growing degree days	-0.000 2*** (0.000 0)	-0.000 2*** (0.000 0)
降水 Precipitation	0.000 1*** (0.000 0)	0.000 1*** (0.000 0)
积温 平方项 Growing degree days square	0.000 0*** (0.000 0)	0.000 0*** (0.000 0)
降水 平方项 Precipitation square	-0.000 0*** (0.000 0)	-0.000 0*** (0.000 0)
短期高积温冲击 High GDD shock	-0.000 5 (0.000 3)	
短期低积温冲击 Low GDD shock	-0.003 6*** (0.000 5)	
短期高降水冲击 High precipitation shock	-0.000 3*** (0.000 1)	
短期低降水冲击 Low precipitation shock	-0.001 1*** (0.000 4)	
设施农业规模 Scale of facility agriculture	0.004 3*** (0.001 2)	0.004 3*** (0.001 2)

表 2 (续)

变量 Variable	含短期冲击 With short-term impact	无短期冲击 Without short-term impact
农业产业规模 Scale of agricultural industry	0.112 7*** (0.008 6)	0.113 0*** (0.008 6)
农业劳动力供给潜力 Potential of agricultural labor supply	0.212 7*** (0.041 9)	0.212 5*** (0.041 9)
农业资本支出能力 Agricultural capital expenditure capacity	0.075 7*** (0.010 4)	0.076 8*** (0.010 4)
劳动投入 Labor inputs	-0.197 5 (0.127 2)	-0.193 1 (0.127 6)
机械投入 Machinery inputs	0.098 7* (0.053 0)	0.092 4* (0.053 5)
化肥投入 Fertiliser inputs	0.011 3*** (0.002 2)	0.011 0*** (0.002 2)
土地投入 Land inputs	-0.574 3*** (0.020 8)	-0.574 9*** (0.020 8)
地表高度 DEM	5.845 2** (2.812 0)	5.787 0** (2.801 7)
大气压 Atmospheric pressure	0.000 1*** (0.000 0)	0.000 1 * (0.000 0)
相对湿度 Relative humidity	-176.974 7 (112.165 4)	-172.624 3 (111.770 8)
风速 Wind speed	0.016 1*** (0.005 9)	0.014 9** (0.005 8)
平均气温 Average temperature	-1.297 8** (0.623 2)	-1.285 3** (0.620 9)
日照时数 Sunshine hours	0.006 4** (0.002 5)	0.006 2** (0.002 5)
样本量 Sample size	56 182	56 182
县域×年份固定效应 County×Year fixed effects	已控制	已控制
年份固定效应 Year fixed effects	已控制	已控制
县域固定效应 County fixed effects	已控制	已控制
R^2	0.971 1	0.971 1
Crag-DonaldWald F 统计量	48.8	48.4
豪斯曼检验(P值) Hausman test	0.001 3	0.002 1

注：*、**、***分别代表在 0.1、0.05、0.01 水平上显著。括号内为估计的稳健标准误。

Note: *, **, and *** represent significant at the 0.1, 0.05, and 0.01 levels, respectively. The estimated robust standard errors in parentheses.

表3展示了正负2个方向的5%的气候冲击下,式(18)模型反应的长期效应与短期效应。在施加正向5%的年积温与降水冲击后,长期积温变动对粮食单产的平均影响效应为-0.398 0%,而在考虑短期影响

后,积温变动对粮食单产的平均影响效应为-0.520 4%;在正向5%的降水冲击下,从长期来看,粮食的平均单产将增加0.020 9%,而考虑到短期效应后,粮食单产水平的冲击的边际影响为-0.150 8%。

而当施加负向5%的年积温与降水冲击时,长期积温变动对粮食单产的平均影响效应为1.0016%,而在考虑短期影响后,积温变动对粮食单产的平均影响效应为0.2752%,且随着当地长期积温水平的变化,长期积温下降对粮食单产的边际效应将持续上升;从长期

降水来看,负向5%的降水冲击将导致粮食的平均单产下降0.0323%,而考虑到短期效应后,粮食单产水平的冲击的边际影响为-0.1266%。上述分析表明,在长期的生产适应性行为可以在一定程度上弥补气候波动对粮食生产的负面影响(图1)。

表3 气候冲击下的长期效应与短期效应			
Table 3 Long-term versus short-term effects under climate shocks			%
冲击类型 Shock type	长期效应 Long-term effect	短期效应 Short-term effect	
高积温冲击 High GDD shock	-0.398 0	-0.520 4	
低积温冲击 Low GDD shock	1.001 6	0.275 2	
高降水冲击 High precipitation shock	0.020 9	-0.150 8	
低降水冲击 Low precipitation shock	-0.032 3	-0.126 6	

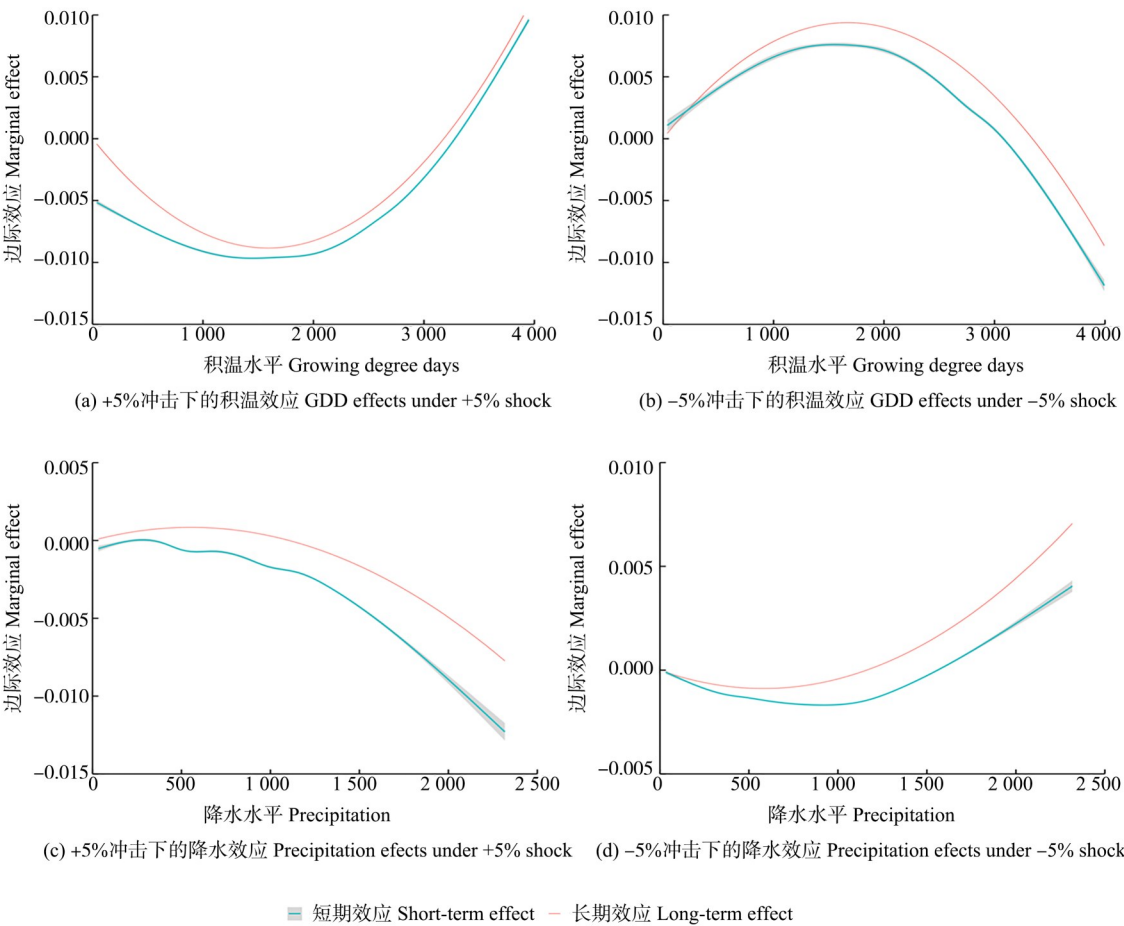


图1 气候波动对粮食产出的长期与短期影响效应

Fig. 1 Long and short term effects of climate volatility on food output

进一步考虑短期气候冲击的区域异质性和不同农时的影响效应,基于式(18)的设定分别将样本

划分为10个不同的地理区域分别进行估计。从极端高温的冲击效果来看,不同地区粮食产出水平对

极端高温的响应基本一致,东南区、长江中下游地区与内蒙古及长城沿线区对极端高温的响应相对敏感,过高的积温水平对上述地区的粮食产出能力存在显著的负向影响关系;从极端低温的冲击效应来看,低温冲击对除东北外全国主要粮食主产区均存在显著的负向影响效应;从降水波动来看,过高

的降水冲击对长江中下游地区、黄淮海地区与黄土高原区的粮食产出负向作用明显,但高降水冲击对西北干旱区具有一定的正向作用,低降水冲击对东北区、长江中下游与黄土高原区具有显著的负向作用,但在一定程度上有利于雨水充沛的东南区(图2)。

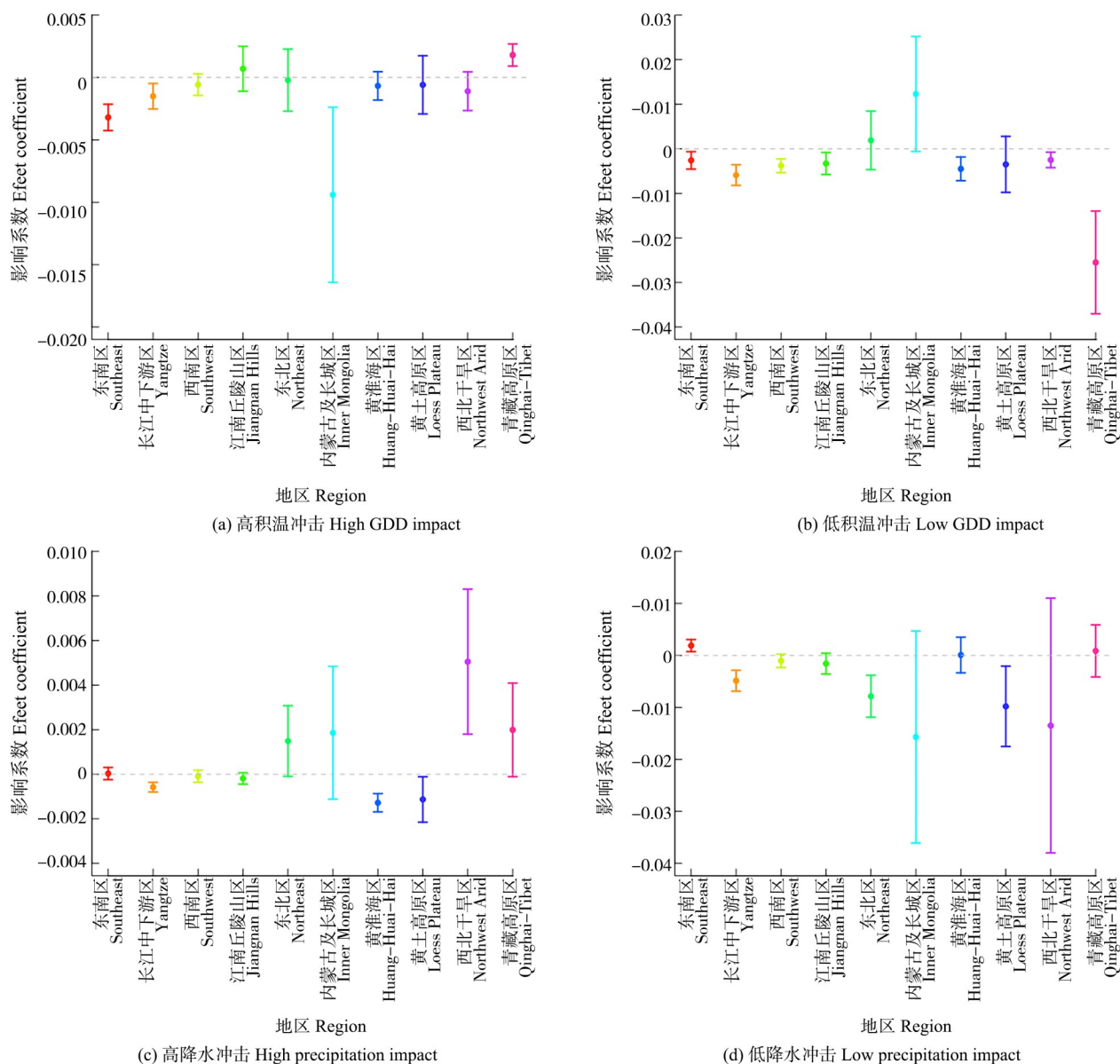
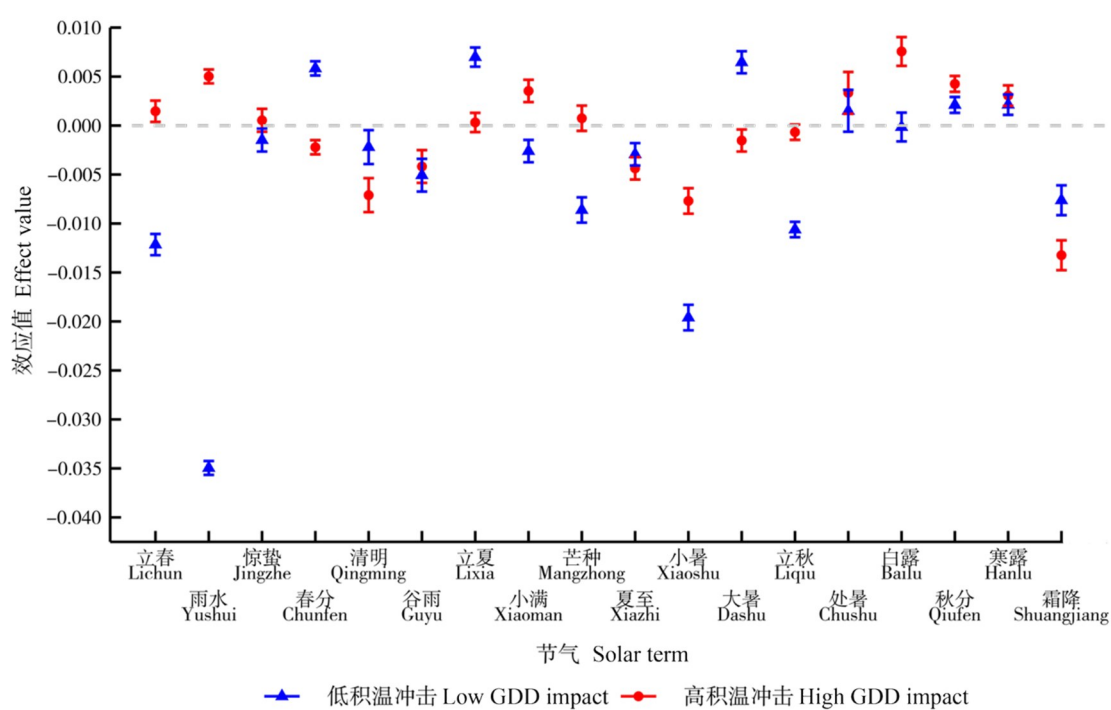


图2 短期气候波动对粮食产出的边际影响效应

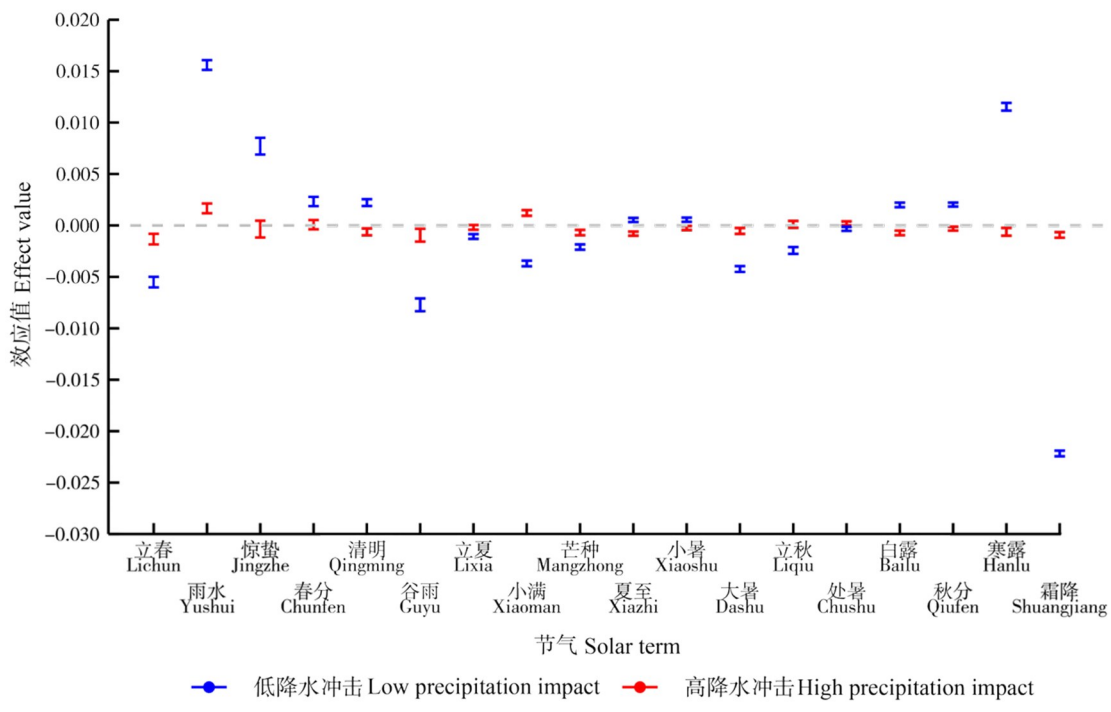
Fig. 2 Marginal impact effects of short-term climate fluctuations on food output

图3展示了式(19)的估计结果,从农时异质性来看,极端温度冲击在不同节气阶段的影响效应具有显著的波动性特征,其中,极端高温对清明—立夏、夏至—小暑2个区间具有显著的负向作用,清明

—立夏阶段对应于华北、长江中下游、东北等主产区的春播和幼苗期,极端高温可能会导致土壤水分蒸发加剧,影响种子萌发和幼苗生长。同时,高温环境可能抑制根系发育,使作物在生长初期就面临



(a) 积温冲击的农时异质性 GDD impact heterogeneity



(b) 降水冲击的农时异质性 Precipitation impact heterogeneity

图3 分农时短期气候波动对粮食产出的边际影响效应

Fig. 3 Marginal effects of short-term climatic fluctuations on food output by farming season

较大的水分和养分胁迫。而夏至—小暑是我国大部分主产区粮食作物的抽穗、开花、灌浆、结实等关键生长期,此阶段的极端高温冲击将显著影响作物的产量水平;从低温冲击的影响效果来看,立春—

雨水、立夏—小暑的低温冲击对作物产量水平具有显著的负向作用,立春—雨水主要涉及冬小麦返青期和早稻育秧期,低温将对冬小麦根系生长与水稻种子萌发产生显著的负面影响,而立夏—小暑阶段主要影响夏玉米、晚稻、大豆等作物的苗期生长,此阶段的低温将显著影响作物最终的籽粒重量,从而影响最终的土地产出水平。从降水冲击的农时异质性来看,谷雨—芒种、处暑—霜降区间发生的极端强降水将对单位土地的粮食产出存在显著的负向作用,谷雨—芒种对应于春播作物的苗期生长阶段以及冬小麦的灌浆期,此时的极端强降水对作物根系生长与籽粒成熟具有显著的阻碍作用,而处暑—霜降阶段是秋粮作物(玉米、水稻、大豆、高粱等)成熟收获期,强降水主要影响作物的成熟收获,导致灌浆受阻、倒伏、穗上发芽霉变等,降低产量和品质。而低降水冲击在小满—芒种期间对粮食作物产出具有显著的负向,在白露—寒露节气对粮食作物产出具有一定的正向作用,其中小满—芒种区间是我国春播作物(玉米、大豆)、冬小麦灌浆、早稻分蘖的重要时期,低降水可能通过土壤干旱、水分供需失衡等途径对粮食作物产出造成显著负向影响,而白露—寒露时段是秋粮作物(玉米、水稻、大豆)成熟收获期,低降水在一定程度上有利于作物的生理成熟、机械化收割和储存。

综上所述,从短期极端气候冲击的区域异质性和农时异质性的估计结果来看,极端气候冲击在特定时间窗口内对作物生长的非线性冲击效应明显,不同地理区域对气候冲击的响应存在显著差异,农业生产尤其是粮食生产的气候脆弱性不仅受制于长期、广泛意义的气候冲击,还受制于当地微气候条件与作物本身的生长周期与规律。

4.2 未来粮食产出预测

4.2.1 交叉验证

将CMIP6的日度预测数据代入式(19)的固定效应模型,以模拟未来不同气候模式下我国各区域的粮食产出状况。在实施预测之前,本研究采用10折交叉验证的方式,对实证模型的预测能力进行检验。10折交叉验证(10-fold cross-validation)是一种常用的模型评估技术,旨在提高模型的泛化能力,其分析过程如下:首先,将整个数据集平均分为10个等份(folds),确保每个子集具有相似的分布。其次,依次选择其中1个子集作为验证集,其余9个子

集作为训练集,重复10次。每次迭代生成一个模型评估指标(如RMSE、 R^2)。最终,取这10次迭代的评估结果的平均值,作为模型的最终性能评估指标。交叉验证结果表明,不同折数的RMSE和模型的 R^2 值均保持稳定,模型具有较好的泛化能力,且预测误差保持在较低的范围内。

4.2.2 预测结果

表4展示了我国未来在3种典型共享社会经济路径情景(SSP126、SSP245和SSP585)下,不同区域单位土地产粮食产量的变化情况(以2020年为基期)。从全国平均水平来看,相对乐观的SSP126情景下,气候冲击将导致全国单位耕地粮食产量水平在2020—2035年平均下降23.1%,随着时间的推移,下降幅度呈现扩大趋势。从区域角度来看,青藏高原区受气候冲击的影响始终最大,在SSP585情景下,2020—2035年期间,气候冲击将使青藏高原区粮食产出下降42.83%。内蒙古及长城沿线区、西北干旱区等干旱和半干旱地区的降幅也较大,这些区域的粮食生产对气候冲击的脆弱性较高。

从主要粮食产区来看,东北区受气候冲击的影响相对较小,在不同气候预测情景下受到的冲击均低于全国平均水平,SSP245情景下单位土地粮食产出损失为8.99%,长江中下游干流平原丘陵区的降幅相对较小。但是,黄淮海地区作为另一重要粮食主产区,其受气候冲击的产量损失凸显,在相对乐观的SSP126情景下,黄淮海地区单位耕地的粮食产量损失在2020—2035年期间将下降31.85%,随着时间的推移,降幅将不断扩大(图4)。

5 结论与启示

本研究系统探讨了气候冲击对我国粮食产出影响效应。从生产者理性行为决策出发,数理推导了长期气候变化与短期极端气候对粮食产量影响的边际作用,基于1980—2022年县域多源数据集,运用双向固定效应模型分析剥离了短期极端气候冲击与长期气候变化对粮食产出的边际影响,并基于区域异质性和回归年等分视角的农时异质性探究了短期极端高温、低温、干旱与极端降水对产量的边际效应。在此基础上,利用CMIP6的日度预测数据,量化了未来情景下我国不同区域粮食产出的潜在损失。研究主要结论如下:

表4 未来情景下气候冲击导致的粮食产出损失
Table 4 Loss of grain yields due to climate shocks under future scenarios %

区域 Region	SSP126			SSP245			SSP585		
	2020— 2035年	2035— 2050年	2050— 2100年	2020— 2035年	2035— 2050年	2050— 2100年	2020— 2035年	2035— 2050年	2050— 2100年
全国平均 National average	−23.10	−22.30	−32.20	−16.90	−16.90	−22.40	−15.60	−18.30	−36.10
东北区 Northeast region	−10.53	−9.14	−14.41	−8.99	−8.10	−12.54	−9.58	−8.37	−33.92
东南区 Southeast region	−13.69	−16.49	−33.55	−10.84	−11.74	−18.45	−9.54	−12.32	−26.66
内蒙古及长城沿线区 Inner Mongolia and the Great Wall	−18.79	−16.74	−23.77	−20.42	−25.32	−33.02	−20.46	−22.04	−47.88
江南丘陵山区 Hilly areas of Jiangnan	−21.42	−20.93	−40.27	−14.71	−14.04	−19.25	−13.74	−15.87	−27.00
西北干旱区 Northwest arid region	−21.13	−22.22	−32.29	−27.99	−32.10	−33.55	−28.25	−30.78	−45.20
西南区 Southwest region	−33.55	−32.58	−41.79	−24.04	−22.06	−27.02	−23.96	−23.46	−38.61
长江中下游干流平原丘陵区 Hilly Plains of the Yangtze River	−13.69	−14.51	−26.32	−8.45	−6.40	−13.22	−6.12	−9.85	−24.73
青藏高原区 Qinghai-Tibet Plateau	−46.73	−45.85	−48.04	−42.24	−41.34	−42.37	−42.83	−41.98	−43.25
黄土高原区 Loess Plateau	−19.67	−16.68	−19.09	−19.30	−20.54	−24.83	−16.31	−20.03	−41.76
黄淮海区 Huanghuaihai region	−31.85	−28.88	−38.45	−15.39	−15.86	−22.90	−12.13	−19.01	−43.61

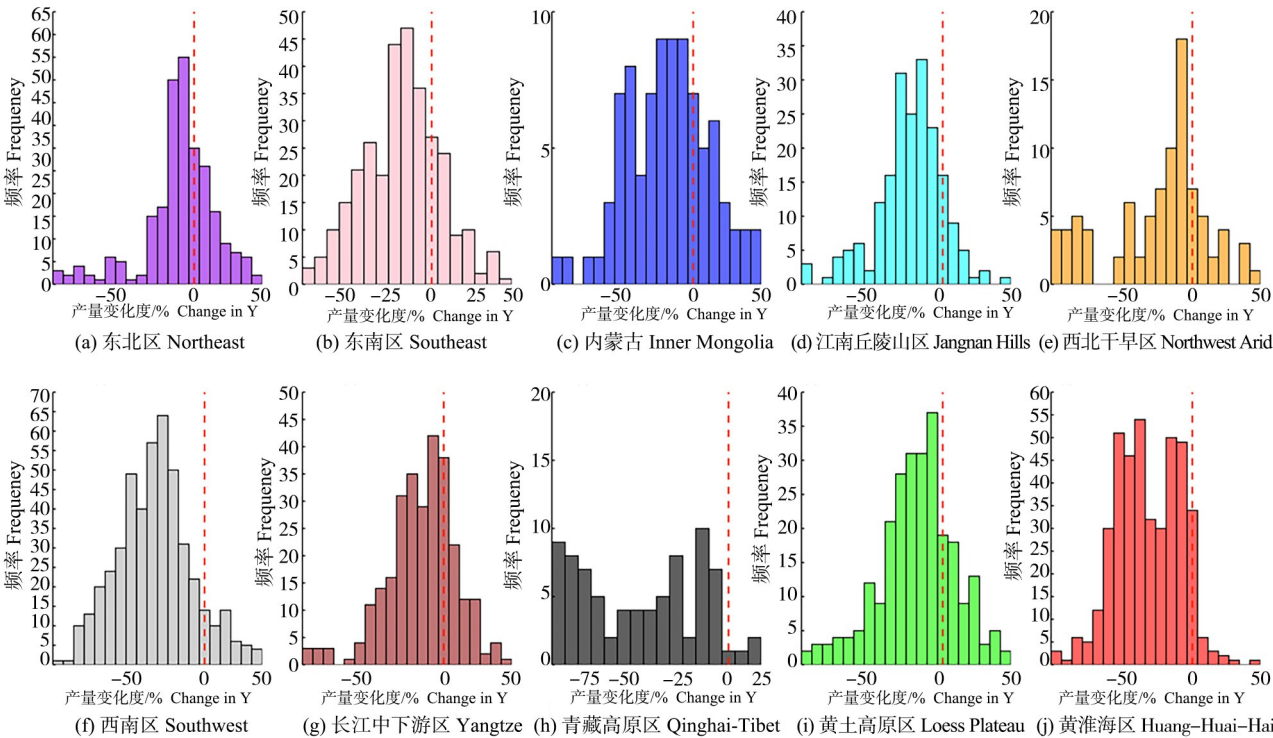


图4 未来气候情景下气候波动对粮食单产的预测 (SSP126 2035—2050)

Fig. 4 Projections of climate fluctuations on grain yields under future climate scenarios (SSP126 2035–2050)

第一、长期气候变化与短期极端气候冲击对粮食产出存在复合影响。双向固定效应模型估计结果表明,气候变化对粮食生产的影响呈现显著的极端冲击放大效应:极端低温的边际抑制力(单产降幅0.36%/℃)是长期积温变动影响的18倍,干旱灾害的边际破坏性(单产降幅0.11%/mm)是强降水影响的3.7倍。极端气候冲击对粮食生产的影响远超持续性气候变化的累积效应。但是短期极端冲击的影响能够部分被长期适应行为所抵消,在5%的年积温正向冲击下,长期影响导致单产下降0.398 0%,但短期影响加剧至0.520 4%,而5%的年积温负向冲击,长期影响单产上升1.001 6%,短期影响却降低至0.275 2%。说明农户的长期适应行为可缓解气候波动对粮食生产的负面冲击,但抵消能力有限。

第二、极端气候冲击的在不同区域与不同农时的影响效应存在显著差异。长江中下游、黄土高原等地区对高降水的负向响应最强,而西北干旱区则受高降水冲击影响较小甚至有所提升。极端高温对东南、长江中下游及内蒙古等地的负向影响尤为明显,而低温冲击对除东北以外的所有主要产粮区均存在显著负向作用。从农时差异来看,高温冲击在“清明—立夏”和“夏至—小暑”期间对产出影响最为显著,分别对应春播幼苗期及抽穗灌浆期;低温冲击对“立春—雨水”和“立夏—小暑”时段影响较大,分别对应冬小麦返青及夏粮苗期;极端强降水主要影响“谷雨—芒种”和“处暑—霜降”2个阶段,对春播苗期及秋粮成熟收获造成不利影响。

第三、气候变化将显著削弱我国粮食产出能力。在SSP126(较乐观)情景下,2020—2035年全国粮食产出平均下降23.1%,在SSP585(高排放)情景下,2050—2100年产出下降36.1%,随着时间推移,气候冲击的影响呈现加剧趋势。从区域差异来看,我国粮食生产重点区域均受到不同程度的冲击,东北区受到的影响相对较小,但黄淮海地区即使在相对乐观的SSP126情景下,其单位耕地的粮食产量损失在2020—2035年期间将下降31.85%。青藏高原、内蒙古及西北干旱区的粮食产出受气候波动的影响最为明显,SSP126情景下2020—2035年青藏高原的产出下降达46.73%。

为此,本研究提出了相适宜的可能的对策建议:

第一、发展区域适应性策略。基于不同区域的气候特征和粮食产出特点,应制定有针对性的区域性适应策略。对于受气候冲击影响较为严重的区域,加强农业基础设施建设,改进灌溉系统,提升抗旱、抗灾能力;而在南方和东部粮食主产区,应积极应对收获期高温和强降水等极端天气的威胁,通过调整作物结构和优化耕作方式降低气候风险。

第二、优化区域性农业水资源管理体系。改善灌溉和排水系统,尤其是在降水不均或极端降雨频发的地区,确保农田能够快速应对过量降水或干旱。通过农田水利工程建设提高水资源管理效率,以应对气候冲击带来的不确定性。引进更为耐旱、耐热和抗灾的农作物品种,根据气候冲击趋势,优化农作物的种植时间和空间分布。在应对短期极端气候事件时,及时调整作物播种和收获时间,利用高效农业技术降低极端天气对粮食产量的冲击。

第三、强化即时气象预警系统。针对短期极端气候的农时差异性影响,建议加强精准农业气象监测,构建区域化、智能化的气象预警系统,提高农户对极端天气的应对能力。同时,推广“智慧农业”管理技术,利用大数据、人工智能分析农时气象数据,指导农户合理安排播种、灌溉、施肥和收割时间,减少气候冲击带来的损失。

第四、完善农业保险与金融支持政策支持。完善农业保险制度,扩大农业保险覆盖面,增强农户应对气候冲击和极端天气事件的风险承受能力,减轻灾害带来的经济损失。加快发展气候指数农业保险,特别是在受短期极端降水和高温冲击严重的区域推广适用于不同作物的气象保险产品,提高农户风险管理能力。同时,加大对农业生产的财政补贴力度,鼓励农户采用耐候性农艺措施,如免耕技术、轮作制度等,以降低长期气候变化的负面影响。

第五、推动气候适应型农业技术创新和技术推广。加强对不同气候条件下农业生产模式的研究,支持农业科技创新,研发高产、抗逆性强的作物新品种,优化种植模式,提高农业系统的适应能力。此外,应推动农业机械化、智能化发展,提高农业生产效率,以降低气候变化带来的不确定性风险。

参考文献 References

- [1] 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[J].中国人口·资源与环境,2022,32(8):140-152

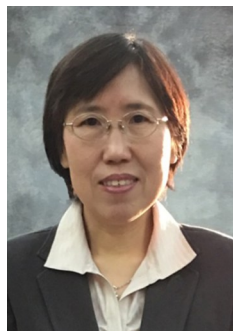
- Su F, Liu Y, Wang S G, Shang H Y. Impact of climate change on food security in different grain producing areas in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(8): 140-152 (in Chinese)
- [2] 张玉周. 气候变化背景下我国粮食安全面临挑战及其应对[J]. 中州学刊, 2018(9): 43-46
- Zhang Y Z. The challenges and countermeasures of China's food security under the background of climate change [J]. *Academic Journal of Zhongzhou*, 2018(9): 43-46 (in Chinese)
- [3] Seo S N N, Mendelsohn R, Munasinghe M. Climate change and agriculture in Sri Lanka: A Ricardian valuation[J]. *Environment and Development Economics*, 2005, 10(5): 581-596
- [4] Huang J K, Wang Y J, Wang J X. Farmers' adaptation to extreme weather events through farm management and its impacts on the mean and risk of rice yield in China[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2015, 97(2): 602-617
- [5] Carter E K, Riha S J, Melkonian J, Steinschneider S. Yield response to climate, management, and genotype: A large-scale observational analysis to identify climate-adaptive crop management practices in high-input maize systems[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(11): 114006. DOI: 10.1088/1748-9326/aae7a8
- [6] Zhang W F, Cao G X, Li X L, Zhang H Y, Wang C, Liu Q Q, Chen X P, Cui Z L, Shen J B, Jiang R F, Mi G H, Miao Y X, Zhang F S, Dou Z X. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. *Nature*, 2016, 537(7622): 671-674
- [7] Adenle A A, Azadi H, Arbiol J. Global assessment of technological innovation for climate change adaptation and mitigation in developing world[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 161: 261-275
- [8] 杜开阳, 施生锦, 郑大玮. 气候变化适应性措施的综合效应: 以吉林省玉米生产为例[J]. 中国农业气象, 2009, 30(S1): 6-9
- Du K Y, Shi S J, Zheng D W. Comprehensive impacts of adaptation measures to climate change: Based on maize production in Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(S1): 6-9 (in Chinese)
- [9] Finger R, Swinton S M, El Benni N, Walter A. Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment[J]. *Annual Review of Resource Economics*, 2019, 11(1): 313-335
- [10] Adger W N, Barnett J, Brown K, Marshall N, O'Brien, K. Cultural dimensions of climate change impacts and adaptation[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(2): 112-117
- [11] Wang D, Zhang P, Chen S, Zhang N. Adaptation to temperature extremes in Chinese agriculture, 1981 to 2010[J]. *Journal of Development Economics*, 2024, 166: 103196. DOI: 10.1016/j.jdevec. 2023. 103196
- [12] Gatti N, Baylis K, Crost B. Can irrigation infrastructure mitigate the effect of rainfall shocks on conflict: Evidence from Indonesia[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2021, 103(1): 211-231
- [13] Deschênes O, Greenstone M. The economic impacts of climate change: Evidence from agricultural output and random fluctuations in weather[J]. *American Economic Review*, 2007, 97(1): 354-385
- [14] Xie W, Zhu A F, Ali T, Zhang Z T, Chen X G, Wu F, Huang J K, Davis K F. Crop switching can enhance environmental sustainability and farmer incomes in China[J]. *Nature*, 2023, 616(7956): 300-305
- [15] Chen X G, Cui X, Gao J. Differentiated agricultural sensitivity and adaptability to rising temperatures across regions and sectors in China[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2023, 119: 102801. DOI: 10.1016/j.jeem. 2023. 102801
- [16] Wang J H, Zhang J J, Zhang P. Rising temperature threatens China's cropland[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(8): 084042. DOI: 10.1088/1748-9326/ac84f1
- [17] 高雪, 李谷成, 尹朝静. 气候变化下的农户适应性行为及其对粮食单产的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(3): 240-248
- Gao X, Li G C, Yin C J. Farmers' adaptation to climate change and its impact on grain yield[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(3): 240-248 (in Chinese)
- [18] Cui X M, Zhong Z. Climate change, cropland adjustments, and food security: Evidence from China[J]. *Journal of Development Economics*, 2024, 167: 103245. DOI: 10.1016/j.jdevec. 2023. 103245
- [19] 刘东, 陈景帅, 冯晓龙, 赵启然, 司伟. 气候变化对农户农地流转行为的影响: 来自全国农村固定观察点的证据[J]. 中国农村经济, 2024(5): 40-61
- Liu D, Chen J S, Feng X L, Zhao Q R, Si W. The impact of climate change on farmland transfer behavior: Evidence from the national rural fixed observation points survey[J]. *China Rural Economy*, 2024(5): 40-61 (in Chinese)
- [20] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023
- [21] Dominitz J, Manski C F. Eliciting student expectations of the returns to schooling[J]. *Journal of Human Resources*, 1996, 31(1): 1-26
- [22] 冯晓龙, 刘明月, 霍学喜, 陈宗兴. 农户气候变化适应性决策对农业产出的影响效应: 以陕西苹果种植户为例[J]. 中国农村经济, 2017(3): 31-45
- Feng X L, Liu M Y, Huo X X, Chen Z X. The effects of farmers' adaptation to climate change on agricultural production: A case study on apple farmers in Shaanxi[J]. *Chinese Rural Economy*, 2017(3): 31-45 (in Chinese)
- [23] Auffhammer M, Hsiang S M, Schlenker W, Sobel A. Using weather data and climate model output in economic analyses of climate change[J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2013, 7(2): 181-198
- [24] Gudmundsson J, Hougaard J L, Ko C Y. Decentralized mechanisms for river sharing[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2019, 94: 67-81
- [25] Burke M, Emerick K. Adaptation to climate change: Evidence from US agriculture[J]. *American Economic Journal: Economic Policy*, 2016, 8(3): 106-140
- [26] Deschênes O, Greenstone M. The economic impacts of climate change: Evidence from agricultural output and random fluctuations in weather[J]. *American Economic Review*, 2007, 97(1): 354-385
- [27] 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
- [28] Antle J M, Capalbo S M. Adaptation of agricultural and food systems to climate change: An economic and policy perspective[J]. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 2010, 32(3): 386-416
- [29] Lobell D B, Burke M B, Tebaldi C, Mastrandrea M D, Falcon W P, Naylor R L. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030 [J]. *Science*, 2008, 319(5863): 607-610
- [30] Deressa T T, Hassan R M, Ringler C, Alemu T, Yesuf M. Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia [J]. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 2009, 19(2): 248-255
- [31] Schlenker W, Roberts M J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(37): 15594-15598
- [32] 段存儒, 武照亮, 曾贤刚. 气候变化感知对农户生计策略的影响: 基于云南

- 省农村居民调查数据[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(7): 251-264
- Duan C R, Wu Z L, Zeng X G. Impact of climate change perception on rural households' livelihood strategies: Based on the survey data of residents in Yunnan Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(7): 251-264 (in Chinese)
- [33] 国家统计局农村社会经济调查司, 中国县域统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000-2023
- Department of Rural Social and Economic Survey, National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook: County-Level*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000-2023 (in Chinese)
- [34] Xu E Q. Dataset of agricultural resource and environment zoning of China [DS/OL]. [2025-02-11]. [http://www.geodoi.ac.cn/edoi.aspx? DOI=10.3974/geodb.2021.02.07.V1](http://www.geodoi.ac.cn/edoi.aspx?DOI=10.3974/geodb.2021.02.07.V1)
- [35] Xu E Q. Zoning of agricultural resource and environment in China[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2018, 20(5): 57
- [36] Mérel P, Gammans M. Climate econometrics: Can the panel approach account for long-run adaptation [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2021, 103(4): 1207-1238

责任编辑: 王岩



第一作者简介: 张勇翔, 中国农业大学经济管理学院博士研究生, 专业方向为农业经济理论与政策。曾参与国家社会科学基金重大项目、国家自然科学基金面上项目等多项研究, 主要内容涉及气候风险、农业生产效率、农户适应性行为及粮食安全政策评估等领域。累计发表6篇CSCD、SCI论文, 研究兴趣包括气候模式分析、农业政策评估、农户行为经济学。热爱数据分析, 擅长应用计量经济学方法进行实证研究, 同时对极端气候和农业生产实践具有浓厚兴趣。



通讯作者简介: 穆月英, 中国农业大学经济管理学院农业经济系教授, 博士生导师, 中国农业大学“人才培养支持计划”领军教授。主要研究方向: 农业经济理论与政策、农业资源经济与政策。国家社会科学基金重大项目“我国粮食生产水资源的时空匹配与优化路径研究”首席专家。主持国家自然科学基金项目2项, 教育部博士点基金博导类项目1项、教育部人文社会科学一般项目2项、北京市社会科学基金重点项目等。2010年起至今, 担任现代农业产业技术体系北京市蔬菜产业经济岗位专家。兼任中国农业风险管理研究会常务理事等社会职务。在《数量经济技术经济研究》《中国农村经济》《农业经济问题》等发表论文, 获得第二次全国农业普查招标课题评审二等奖, 中国农业大学优秀研究生导师等荣誉。