

# 中国粮食生产的气候变化适应水平及其机制研究

刘东 冯晓龙 司伟\*

**摘要:** 本文利用全国农村固定观察点数据,估计了粮食生产对气候变化的整体适应水平及其机制。研究发现,适应行为整体上缓解了高温对粮食单产不利影响的 52.5%~63.5%。水稻和玉米对高温的适应水平明显高于小麦。值得注意的是,适应行为未有效缓解过量降水的不利影响。农业技术进步与适应技术采纳、要素投入调整是粮食生产有效适应气候变化的重要机制。未来应提升农业技术进步在农业适应气候变化中的贡献,全面提高粮食生产的气候变化适应水平。

**关键词:** 气候变化适应;粮食生产;长差分方法

**DOI:** 10.13821/j.cnki.ceq.2024.05.09

## 一、引言

保障粮食和重要农产品稳定安全供给是加快建设农业强国的头等大事。<sup>①</sup>然而,近年来不断加剧的气候变化风险给中国粮食安全以及农业生产带来诸多隐患,引起了公众和政府部门的高度关注。2023 年联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告《气候变化 2023》指出,全球近 10 年的平均温度比 19 世纪后期上升了 1.1 °C,2020 年地表均温相较 1850—1900 年上升了 1.59 °C。多重证据表明,当前气候变化已经跳出了早期平均状态与变化规律<sup>②</sup>,全球持续变暖、极端天气事件发生频率和强度明显增加。2022 年中央一号文件强调要“加强中长期气候变化对农业影响研究”,凸显出气候变化影响的复杂性和科学认识该影响的必要性。中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区,升温速率高于全球同期平均水平。同时,中国现有的农业资源禀赋和人口大国属性放大了粮食生产面临的自然风险,由此加深了气候变化严峻形势与农业稳产高产客观需求之间的矛盾。对此,中国实施了一系列的适应气候变化行动,提出了有序适应气候变化的理念和路线图。但目前关于气候变化适应水平的研究

\* 刘东,中国农业大学经济管理学院;冯晓龙、司伟,中国农业大学经济管理学院、全球食物经济与政策研究院。通信作者及地址:司伟,北京市海淀区清华东路 17 号中国农业大学东校区,100083;电话:010-62736284;E-mail:siwei@cau.edu.cn。本文得到国家大豆产业技术体系专项建设项目(CARS-04-04A)、国家自然科学基金项目(72373145)和国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(72061147002)的资助。感谢匿名审稿人的宝贵意见,同时感谢陈祁晖、朱晨、周晓时、赵启然、胡哲鹏等老师的有益建议以及王新刚、陈景帅、王雨、李奕聪的帮助,文责自负。

① 资料来源:“为加快建设农业强国而努力奋斗——从中央农村工作会议看新时代新征程‘三农’工作战略部署”,[http://www.gov.cn/xinwen/2022-12/25/content\\_5733431.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2022-12/25/content_5733431.htm),访问时间:2024 年 9 月 11 日。

② 参考 <https://unfccc.int/news/four-key-climate-change-indicators-break-records-in-2021>,访问时间:2024 年 9 月 11 日。

仍比较薄弱(Li, 2023; Burke and Emerick, 2016; Huang et al., 2018),尤其是,关于中国粮食生产对气候变化的整体适应水平的认识仍比较模糊,粮食生产主体的气候变化适应机制没有系统明确,由此导致当前农业部门的气候变化应对工作的理论支撑不足,而深入理解和把握粮食生产对气候变化的适应水平和机制是进一步提高适应能力的前提。

本文利用最近邻匹配法将全国农村固定观察点数据和全国气象站点数据进行匹配,使用长差分方法结合双向固定效应模型,系统估计了中国粮食生产对气候变化的整体适应水平,扩展了长差分方法在研究中国农业适应气候变化中的应用。研究发现,适应行为能缓解高温不利影响的52%~63%,但无法有效缓解过量降水的不利影响。在此基础上,聚焦粮食种植户这一气候变化适应主体,从农户行为视角构建要素投入调整和技术进步与采纳的分析框架,对粮食种植主体的气候变化适应机制进行了实证检验。研究发现,农业技术进步是粮食生产适应高温不利影响的重要机制,同时农户会通过增加机械和化肥农药投入、减少劳动投入的方式应对气候变化。考虑到气候变化影响的地区和品种差异,本文对适应水平的地区和品种异质性进行了分析,发现北方粮食生产对高温的适应水平高于南方,水稻和玉米对高温的适应水平高于小麦。

本文有以下三点主要贡献。首先,科学估计了中国粮食生产的气候变化整体适应水平。数据样本量大和追踪时间长的优势保证了估计结果的整体代表性,长差分方法识别出的适应水平在一定时期内具有相对稳定性,为判断气候变化对中国粮食生产的真实影响提供了科学依据。其次,从粮食产量增长路径构建粮食生产适应气候变化的机制分析框架,是对具体适应措施的科学归纳,有利于清晰理解气候变化影响下粮食生产主体的行为变化;同时,微观农户视角是对已有研究的有益补充和深化,有效避免了使用宏观数据可能导致的估计偏差(Chen and Gong, 2021;高晶晶和史清华,2021;尹朝静等,2016)。最后,对气候变化适应机制的分析具有明确的政策指向性,研究指出应进一步提升农业技术进步与农业技术采纳在适应气候变化中的贡献度,并关注气候变化带来的生产要素投入调整成本问题,这有利于完善和落实国家气候变化适应战略和政策,切实提高粮食生产应对气候风险的能力。

## 二、文献回顾与理论分析

### (一) 气候变化适应水平估计

气候变化适应是指针对现实或预期气候变化及其影响而进行的行为调整过程,适应水平则可以理解为应对气候变化的行为调整所产生的效果。虽然近年来气候变化相关研究呈井喷式增加,但是关于粮食生产对气候变化适应水平的结论却莫衷一是。比如 Li (2023)使用孟加拉国农户数据发现了气温在32℃以下农业生产适应的有效性,而 Burke and Emerick(2016)利用美国县级数据却发现农民适应气候变化的效果非常有限。<sup>①</sup> 这些结论除了受研究数据和方法不同的影响之外,也反映出不同国家和地区之间存在明显的

<sup>①</sup> 学界对于气候变化适应效果的争论不仅限于此二人,持“适应无效论”观点的还有 Schlenker and Roberts (2009)等;持“适应有效论”观点的还包括 Wang et al.(2014)、Xiao and Tao(2014)等。

适应水平差异,气候变化的区域性和适应水平的国家间差异性体现出明确中国粮食生产对气候变化整体适应水平的必要性。具体到中国而言,Huang et al.(2018)利用横截面的地区气候差异和年际天气波动之间的影响差异来测度长期适应水平,发现长期适应能够抵消30%至50%的气候变暖伤害;而Wang et al.(2009)认为未来温度和降水量对农业的损害会随着时间的推移越来越大,农业的适应效果非常有限;Chen et al.(2013)认为未来气候变化对中国农业的影响利大于弊,适应的必要性不大。本文针对已有研究不足,尝试准确估计中国粮食生产对气候变化的整体适应水平,以推动气候变化适应政策的完善与落实。

气候变化经济学认为,农户可以根据观察到的天气变化来调整对气候变化的预期,但是适应行为的发生需要一定的学习和调整时间(Kelly et al., 2005; Mendelsohn et al., 1994)。因此,天气变化瞬时影响和气候变化长期影响之间的差异可以用来识别适应水平(Huang and Sim, 2021; Li, 2023),这成为识别气候变化适应水平的基本思路。在李嘉图方法及其扩展的基础上(Mendelsohn and Massetti, 2017; Wang et al., 2009; Deschenes and Greenstone, 2007),Burke and Emerick(2016)提出的长差分模型(long differences, LD)实现了对气候变化适应水平的准确估计,其基本思想是,将一个地区内两个不同时段的变量均值进行差分,消除原始李嘉图方法中可能存在的内生性关联,然后得到长期气候变化(差分)对产出变化(差分)的无偏估计。

图1可视化了气候变化适应水平的识别思路。以气温为例,当气温由 $T_1$ 变化至 $T_2$ 、再至 $T_3$ 时,如果农户不采取适应措施,则农业产出或利润<sup>①</sup>会由A点下降至B点再降至D点(A—B—D),此时气候变化产生的损害(产量或利润损失)可以表示为 $L_1$ ;如果农户认识到气候变化导致的产量或利润损失,并且在 $T_2$ 时点采取适应措施,那么,当气温再变化至 $T_3$ 时,则产量不会下降至D点,而会保持在C点(A—B—C),此时气候变化产生的损害可以表示为 $L_0$ 。因此, $L_1$ 与 $L_0$ 之间的差值即为农业生产对气候变化的适应水平。

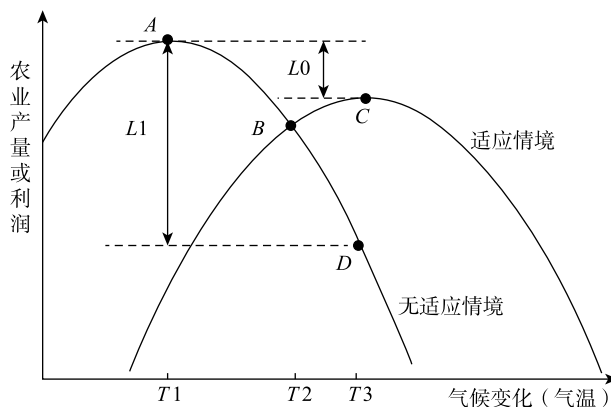


图1 识别气候变化适应水平示意图

① 此处利润为考虑了适应成本之后的均衡水平,详见 Kelly et al.(2005)。

## （二）粮食生产对气候变化的适应机制分析

理论和经验都证明了粮食增产可以分解为农业技术进步和生产要素投入增加两条路径(彭小辉等,2018;Chen and Gong, 2021),这为分析粮食生产对气候变化的适应机制提供了重要思路。从粮食生产主体的行为调整的视角看,适应技术采纳和要素投入调整是应对气候变化的两种主要方式。其中,技术采纳包括对保护性耕作技术、节水灌溉、抗逆品种等多种适应技术的应用(Wang et al., 2024;冯晓龙等,2018;毛慧等,2022;Aragon et al., 2021),要素投入包括对劳动、机械以及化肥农药的调整(Ahmed et al., 2022; Jagnani et al., 2020)。然而,粮食生产主体理论上可以采取多种潜在的适应技术,仅检验某项具体适应技术无法把握适应的整体效果。对此,本文采用全要素生产率(total factor productivity, TFP)作为农业技术进步测度指标,验证整体技术进步在适应气候变化中的作用。同时,作为对技术进步结果分析的补充,进一步选取具有代表性的保护性耕作技术(Ogle et al., 2019),从农户视角验证技术采纳的气候变化适应效果,为机制检验提供现实证据。

首先,技术进步是应对气候变化的重要机制(Long et al., 2016)。我国不断加大气候变化相关科研投入,但要先进技术推广,推动实现粮食生产主体对技术的采纳。作为农业技术进步测度指标,农业 TFP 与气候变化的关系受到广泛关注(白秀广等,2015;尹朝静和高雪,2020)。短期来看,假设农户保持最优的要素投入组合不变,不利的气候条件会阻碍农业 TFP 的增长(Ortiz-Bobea et al., 2021; Sheng and Xu, 2019;高鸣,2018);而长期来看,气候变化会诱致农业技术进步,促使农户采纳适应技术,实现对气候变化的有效适应(易福金等,2021)。

其次,气候变化会引起农户要素投入调整,具体有两种表现形式,一是要素投入总量变化,气候变化改变作物生长环境会导致化肥以及农药使用量增多(尹朝静等,2016; Jagnani et al., 2020)。二是要素投入结构调整,农户会通过调整要素投入结构以应对气候变化的不利影响,比如当高温或极端天气频发时,农户会更多地使用机械来替代劳动(Huang et al., 2018)。综合来看,相较于技术进步与采纳,要素投入增加更可能带来资源环境和生产成本压力,应对气候变化的可持续性受限(Ortiz-Bobea et al., 2021)。因此,明确粮食生产对气候变化的适应机制,对于提升粮食生产的气候变化适应能力具有重要意义。

## 三、数据来源、变量选取与实证模型

### （一）数据说明

农户数据来自农业农村部全国农村固定观察点调查,该数据每年包括 2 万多调研农户、350 多个行政村,覆盖 31 个省(区、市),包含农户详细的农业生产信息,具有权威性和代表性,其长期追踪优势为判断粮食生产的气候变化适应水平提供了支撑。本研究选取

粮食种植户样本,通过缺失值和异常值处理,最终形成横向包含3 000多户、纵向包含25年的平衡面板数据<sup>①</sup>,时间跨度为1995—2019年。气候数据来自国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>),包含全国气象站的详细历史气象信息。根据行政村和气象站的经纬度信息使用最近邻匹配方法将两套数据进行匹配,得到样本村的历史气象数据。

## (二) 变量设定

被解释变量是粮食作物亩均产量,包括稻谷、小麦、玉米、大豆和薯类。农户层面的粮食产量表示为  $a\_yield_{it} = \sum_{j=1}^k yield_{ij} / \sum_{j=1}^k area_{ij}$ ,其中  $a\_yield_{it}$  表示农户  $i$  在第  $t$  年的粮食单产,  $j$  表示粮食作物种类,通过在回归模型中控制作物种类虚拟变量,进一步消除不同作物之间单产、适应性等方面的禀赋差异。同时,本文也针对三大主粮作物进行分组回归,以识别不同主粮作物的适应水平差异,确保估计结果稳健。气温和降水量是影响农业生产和作物生长最重要的气候变量,并且气候变化主要表现为气温上升和降水量变异增强(Deschenes and Greenstone, 2007),所以本文重点分析这两个指标。温度使用积温(growing season degree days, GDD)来表示,它测度了作物在给定温度区间的暴露值,将生长期内<sup>②</sup>的每日暴露值相加,获得年度积温。降水量使用每日全天降水量的年度加总(precipitation, PRE)表示。积温和降水量均通过阈值设定分为阈值上(GDD-above、PRE-above)和阈值下(GDD-below、PRE-below)两段,以拟合气候变化影响的非线性特征。同时,回归中控制了其他气候变量:日照时数、平均风速以及平均相对湿度。其他控制变量包括农户家庭特征<sup>③</sup>、村庄特征变量。各变量的定义整理在表1中,表2是变量的描述性统计。

表1 各变量定义

变量类型	变量名称	变量定义
被解释变量	$a\_yield$	粮食单产(公斤/亩)
	$GDD-above$	有害积温(高温), 阈值=28℃, 29℃
解释变量	$GDD-below$	正常积温, 阈值=28℃, 29℃
	$PRE-above$	过量降水, 阈值=40 cm, 50 cm
	$PRE-below$	正常降水, 阈值=40 cm, 50 cm

① 数据清理遵循两个原则:一是构建平衡面板数据以保证长差分估计的准确性;二是筛选粮食种植户以判断粮食生产对气候变化的适应能力。该处理不影响样本的全国代表性。

② 气候变量计算的时间尺度是4—10月,这是中国粮食作物的主要生长和收获时段,同时也是既有研究中的普遍做法。考虑到冬小麦的生长期不在该范围内,本文使用全年尺度的气候变量进行回归,结果未有明显差异。分作物类别的回归中是按照不同粮食作物的实际生长月份来计算气候变量。详细处理过程放在附录I中,限于篇幅,附录未在正文列示,感兴趣的读者可在《经济学》(季刊)官网(<https://ceq.ccer.pku.edu.cn>)下载。

③ 固定观察点数据中2003年之前没有种粮收益和成本信息,处理方法是根据1995—2002年历年《全国农产品成本收益资料汇编》中对应地区粮食作物的成本并结合农户播种面积计算得到。粮食成本数据均按1995年不变价进行处理。

(续表)

变量类型	变量名称	变量定义
控制变量	<i>Person</i>	家庭劳动力数(人)
	<i>Edu</i>	户主文化程度(年)
	<i>Age</i>	户主年龄(岁)
	<i>Scale</i>	家庭经营农地规模(亩)
	<i>Terrain</i>	村庄地势(1=平原,2=丘陵,3=山区)
	<i>Road</i>	村庄距公路主干线距离(公里)
	<i>Sunshine</i>	年内平均日照时数(小时)
	<i>Humidity</i>	年内平均相对湿度(%)
机制变量	<i>Windspeed</i>	年内平均风速(m/s)
	<i>Machinery</i>	亩均机械投入(元)
	<i>Labor</i>	亩均劳动投入(日)
	<i>Fertilizer</i>	亩均化肥农药投入(元)

表 2 主要变量描述性统计<sup>①</sup>

变量名称	平均值	标准差	最小值	最大值
<i>a_yield</i>	535.51	342.65	0	2 250
<i>GDD-above_28</i>	38.18	48.74	0	318.24
<i>GDD-below_28</i>	3 268.90	396.97	1 041.81	4 348.21
<i>GDD-above_29</i>	20.38	29.83	0	194.66
<i>GDD-below_29</i>	3 492.12	378.18	1 804.67	4 489.91
<i>PRE-above_45</i>	90.57	113	0	936.30
<i>PRE-below_45</i>	444.12	181.11	70.29	1 203.36
<i>PRE-above_50</i>	62.18	89.91	0	826.34
<i>PRE-below_50</i>	501.39	214.88	70.29	1 372.66
<i>Person</i>	2.57	1.03	0	6
<i>Edu</i>	6.35	2.69	0	15
<i>Age</i>	49.74	10.92	34	74
<i>Scale</i>	8.92	14.83	0.23	705
<i>Fertilizer</i>	217.98	147.05	0	1 591.43
<i>Machinery</i>	72.26	86.97	0	880.56
<i>Labor</i>	48.64	36.85	0	336

① 单产计算中包含薯类,薯类单产较高,因此粮食单产的最大值较大。同时,种植薯类的农户数量占总样本比重不足 5%,种植面积均值不足 1.3 亩,对粮食亩产均值影响微小。粮食单产为 0 表示该户该年粮食绝收。

(续表)

变量名称	平均值	标准差	最小值	最大值
Terrain	2	0.82	1	3
Road	2.37	3.12	0	20
Sunshine	2 025.03	564.42	621.56	3 649.21
Humidity	68.68	10.40	31.25	91.38
Windspeed	2.15	0.88	0.37	7.22

长差分识别气候变化影响的前提是两时期的气候变量有足够的变异性。附录 II 表明 2006—2019 年间的气温相较于 1995—2005 年间有明显增加;降水量均值变化不明显,但方差有所增大,表明降水不确定性增加。

### (三) 实证模型

粮食单产与气候变量之间的关系可以表示为:

$$y_{it} = \alpha + \beta_1 z_{it} + c_i + \theta_t + \varepsilon_{it}, \quad (1)$$

其中,  $y_{it}$  表示农户  $i$  在第  $t$  年的粮食单产,  $z_{it}$  表示第  $t$  年的气温和降水量。  $c_i$  表示个体固定效应,  $\theta_t$  表示年份固定效应,  $\varepsilon_{it}$  为残差项。考虑时期  $a$  和时期  $b$ , 时期  $a$  粮食单产的平均值表示为  $\bar{y}_{ia} = \frac{1}{t} \sum_{t \in a} y_{it}$ , 天气均值表示为  $\bar{z}_{ia} = \frac{1}{t} \sum_{t \in a} z_{it}$ ; 时期  $b$  粮食单产的平均值表示为  $\bar{y}_{ib} = \frac{1}{t} \sum_{t \in b} y_{it}$ , 天气均值表示为  $\bar{z}_{ib} = \frac{1}{t} \sum_{t \in b} z_{it}$ 。将两个时期进行差分得到:

$$\bar{y}_{ib} - \bar{y}_{ia} = \beta_1 (\bar{z}_{ib} - \bar{z}_{ia}) + c_i - c_i + (\bar{\varepsilon}_{ib} - \bar{\varepsilon}_{ia}). \quad (2)$$

将式(2)简写为:

$$\Delta \bar{y}_i = \beta_1 \Delta \bar{z}_i + \Delta \bar{\varepsilon}_i. \quad (3)$$

根据作物学原理,作物单产将线性增加至最适宜的气温和降水阈值,然后在该阈值之后线性下降,本研究通过设定气温和降水量阈值来刻画这种非线性特征,将积温和降水量放到式(3)中:

$$\Delta y_{ic} = \beta_1 \Delta GDD_{c;l_0;l_1} + \beta_2 \Delta GDD_{c;l_1;\infty} + \beta_3 \Delta PRE_{c;p<p_0} + \beta_4 \Delta PRE_{c;p>p_0} + \alpha_p + \Delta \varepsilon_{ic}, \quad (4)$$

其中,  $\Delta y_{ic}$  表示  $c$  县农户  $i$  的粮食单产差分值,  $\beta$  是待估系数,  $\alpha_p$  表示省份固定效应,  $\Delta \varepsilon_{ic}$  为误差项。  $GDD_{c;l_0;l_1}$  表示在阈值  $l_0$  至  $l_1$  的正常积温,  $GDD_{c;l_1;\infty}$  表示在阈值  $l_1$  以上的有害积温<sup>①</sup>,也即高温,  $\Delta GDD_{c;l_0;l_1}$  和  $\Delta GDD_{c;l_1;\infty}$  分别表示相应积温在时期  $a$  和时期  $b$  的差分值。  $PRE_{c;p<p_0}$  表示降水量在阈值  $p_0$  以下的正常降水,  $PRE_{c;p>p_0}$  表示高于阈值  $p_0$  的过量降水,  $\Delta PRE_{c;p<p_0}$  和  $\Delta PRE_{c;p>p_0}$  表示相应降水量的差分值<sup>②</sup>。

① 本文设定  $l_0=0$ , 如果设定  $l_1=30$ , 给定一组日平均温度:  $-1, 0, 1, 10, 29, 32, 35$ , 则  $GDD_{c;l_0;l_1}$  对应等于  $0, 0, 1, 10, 29, 30, 30$ ,  $GDD_{c;l_1;\infty}$  对应等于  $0, 0, 0, 0, 1, 5$ 。

② 举例而言,假设一个县的平均降水量从 1995 年的 35 cm 增加到 2019 年的 50 cm, 若降水阈值  $p_0$  为 40 cm, 则  $\Delta PRE_{c;p<p_0} = 5$ ,  $\Delta PRE_{c;p>p_0} = 10$ 。

面板固定效应模型可以表示为：

$$y_{it} = \beta_1 GDD_{ct;l_0,l_1} + \beta_2 GDD_{ct;l_1,\infty} + \beta_3 PRE_{ct;p<p_0} + \beta_4 PRE_{ct;p>p_0} + \alpha_c + \theta_t + \Delta\varepsilon_{it}, \quad (5)$$

其中， $\alpha_c$  表示县固定效应，其余项含义同式(1)和式(4)。将长差分估计得到的  $\beta$  表示为  $\beta^{LD}$ ，将面板固定效应模型(fixed effects, FE)估计得到的  $\beta$  表示为  $\beta^{FE}$ ，借鉴 Burke and Emerick(2016)的研究，农户对气候变量超过阈值部分(以气温为例)的适应水平可以表示为：

$$(\beta_2^{FE} - \beta_2^{LD})/\beta_2^{FE} = 1 - \beta_2^{LD}/\beta_2^{FE}. \quad (6)$$

使用 Bootstrap 在考虑空间相关性的基础上对数据重复抽取 2 000 次，每次迭代重新计算  $1 - \beta_2^{LD}/\beta_2^{FE}$ ，在得到其分布的基础上检验原假设  $1 - \beta_2^{LD}/\beta_2^{FE} = 0$  是否成立，以此保证适应水平估计的显著性和稳健性。

## 四、实证结果分析

### (一) 基础回归结果

表 3 报告了气温和降水量对粮食单产的影响及其适应水平。FE 为使用面板固定效应模型估计的结果，LD 是使用长差分方法估计的结果。可以看到，随着气温阈值升高，高温对粮食单产的不利影响增加，短期影响由 5.2% 增加至 5.9%，长期影响由 1.9% 增加至 2.8%。根据式(6)，粮食生产对高温的适应水平在 52.5%~63.5% 之间，且适应水平随气温阈值提高而下降(由 63.5% 降至 52.5%)。这一估计结果的经济学含义可以理解为粮食单产对超过 28 °C 或 29 °C 积温的平均适应水平<sup>①</sup>。但是，粮食生产对过量降水的适应并不明显，在气温阈值为 28 °C、降水阈值为 50 cm 时，适应仅减缓了过量降水不利影响的 6.8%。对降水的适应主要体现为对正常降水的利用(趋利)，而非对过量降水的缓解(避害)。从中国应急管理部 2018—2022 年发布的自然灾害情况报告来看，旱灾和洪涝灾害造成的影响最广、危害最大，这在很大程度上印证了该结论。因此，提升对过量降水及洪涝灾害的适应能力是当前粮食生产领域适应气候变化工作的重点。

表 3 气温和降水量对中国粮食单产的影响

	FE	LD	FE	LD	FE	LD
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>GDD-above</i>	-0.052** (0.025)	-0.019** (0.009)	-0.059*** (0.015)	-0.028** (0.013)	-0.051*** (0.019)	-0.025*** (0.009)
<i>GDD-below</i>	0.020** (0.009)	0.023*** (0.006)	0.013*** (0.005)	0.021* (0.011)	0.009** (0.003)	0.034*** (0.009)

① 综合自然科学研究结果，当小麦、水稻、玉米和大豆面临的气温环境超过 28 °C 或 29 °C 时，均有可能出现光合作用下降、花粉失活或结实率下降等不良现象。设定温度阈值为 28 °C 和 29 °C，是对几类粮食作物温度阈值范围的平衡。同时，本文检验了 32 °C 及以上阈值情形下的适应水平，报告在附录 III 中，结果显示适应水平明显下降且不再显著。



(续表)

	FE	LD	FE	LD	FE	LD
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>PRE-above</i>	-0.044** (0.021)	-0.041*** (0.015)	-0.040*** (0.013)	-0.033** (0.015)	-0.031* (0.016)	-0.024*** (0.008)
<i>PRE-below</i>	0.010* (0.006)	0.066** (0.033)	0.007 (0.006)	0.072* (0.038)	0.015** (0.006)	0.055** (0.027)
常数项	4.255** (1.739)	8.366*** (2.487)	8.058** (2.410)	7.332*** (1.255)	7.239* (4.146)	4.208*** (0.982)
控制变量	是	是	是	是	是	是
固定效应	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
样本量	74 796	2 001	74 796	2 001	74 796	2 001
Adj. R <sup>2</sup>	0.379	0.081	0.379	0.084	0.379	0.087
适应水平:						
高温		0.635***		0.525***		0.510***
Bootstrap 置信区间		[0.413, 0.822]		[0.356, 0.676]		[0.279, 0.720]
过量降水		0.068		0.175		0.226*
Bootstrap 置信区间		[-0.041, 0.149]		[0.093, 0.257]		[0.148, 0.280]
T-threshold	28	28	29	29	29	29
P-threshold	50	50	50	50	45	45

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示估计系数在1%、5%和10%的水平上显著,Cty表示县固定效应,Pr-Yr表示省×年固定效应,T-threshold和P-threshold分别表示气温和降水阈值,下同。括号中为聚类稳健标准误,聚类层级为县。控制变量包含作物种类虚拟变量,家庭、村庄变量以及其他气候变量,不包括要素投入。作为对机制变量的检验,本文将是否控制要素投入的估计系数进行了对比,结果汇报在附录IV中。

进一步,在基础回归(时间跨度1995—2019年)、2009—2019年、2000—2010年、1997—2012年和1997—2007年等不同时间起点、不同时间跨度的情形下进行Bootstrap检验,以保证适应水平识别的稳健有效。具体方法是在不同时间尺度下对样本分别抽取2000次,抽样时考虑空间相关性且同一样本不重复抽取,分别得到不同时段 $1 - \beta_2^{LD} / \beta_2^{FE}$ 估计值的分布,以检验原假设 $1 - \beta_2^{LD} / \beta_2^{FE} = 0$ 是否可以被拒绝,检验结果报告在图2中,温度阈值是29℃、降水量阈值是50cm。结果显示,模型捕捉到的对高温的适应水平显著不为零,且基本稳定在50%左右,仅有1997—2007年的高温适应水平不显著。与高温不同的是,农户对过量降水不利影响的适应均不显著。

本文进一步估计了三大主粮对气候变化的适应水平。不同作物的温度阈值选择既参考作物自然生长的气温阈值,同时遍历气温和降水阈值前后3个单位进行回归,选取使残差平方和最小的阈值作为报告阈值。将对高温适应的估计结果展示在图3中<sup>①</sup>,可以看到

① 回归结果表格放在附录V中。

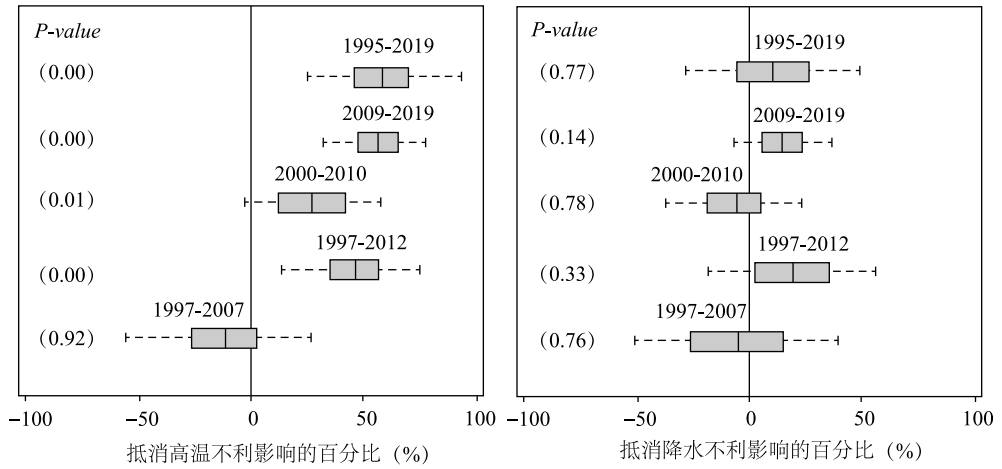


图 2 适应有效性的 Bootstrap 检验结果

水稻和玉米对高温的适应水平高于小麦，当气温阈值调高到 27 °C 时，小麦对高温的适应水平显著下降，水稻和玉米仍能够减缓高温的部分不利影响。品种改良差异很大程度上解释了气候变化适应水平的差异，农业农村部数据显示，2001—2021 年间小麦、稻谷、玉米的国家级审定品种累计分别为 782 个、2 885 个和 3 655 个，稻谷和玉米的品种改良速度明显快于小麦。例如，袁隆平团队开发的“吨两优 900”耐高温水稻能够在 40 °C 高温下保证稳产，这对于提升水稻对高温的适应水平具有关键意义。

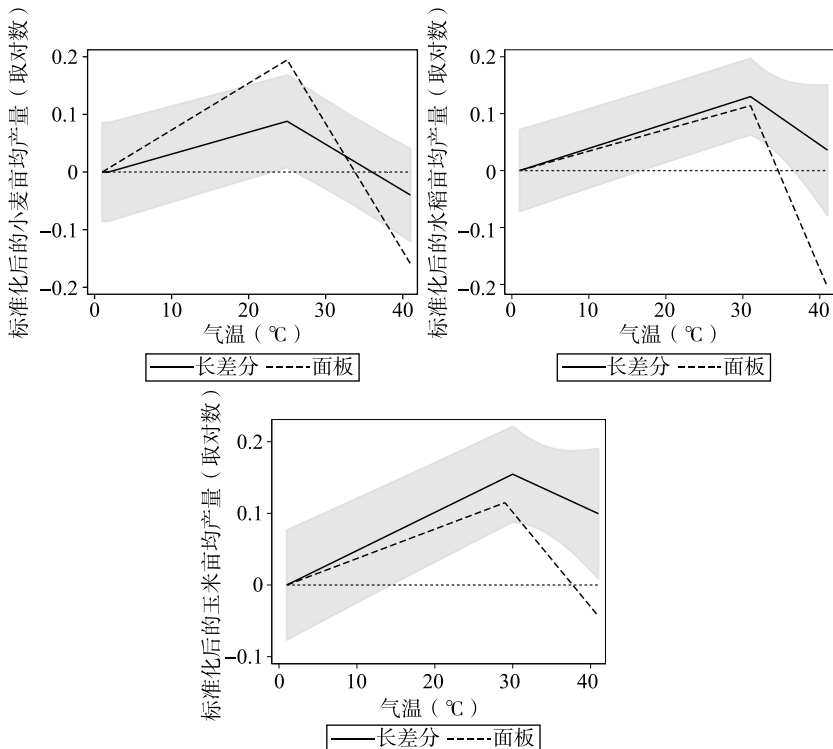


图 3 气温对三大主粮单产的影响与适应结果

## (二) 稳健性检验

### 1. 变换差分时间断点和时段长度

基准回归的差分时段是1995—1999年(时期a)和2015—2019年(时期b),仅由这两个时段得到的估计结果很可能会受到时间端点选取本身及端点附近极端气候事件的影响,也有可能因为忽略2000—2014年间发生的重大气候事件而导致对气候变化适应水平的低估。通过变更端点年份、变更时期长度重复估计,可以排除上述情况对估计结果的干扰。

起始年份依次使用1997年、2000年、2003年、2006年和2010年,时间跨度为5年、10年、15年和20年,对方程(4)进行重复估计<sup>①</sup>。在得到所有模型的 $\beta_2$ 系数之后,本文将其与基准模型 $\beta_2$ 系数的差异进行显著性检验,具体方法为:使用Bootstrap方法随机重复抽取2000个样本进行替换,计算基准模型 $\beta_2$ 与其他模型 $\beta_2$ 之间的差异的显著性,Bootstrap的标准误采用估计系数差异的标准差。图4展示了在5%的显著性水平下,变更起始年份和时段跨度得到的 $\beta_2$ 和基准 $\beta_2$ 之间的差异显著性。运行的15个模型的 $\beta_2$ 的平均估计值为-0.0015,而且几乎所有模型与基准模型在统计上没有显著差异,只有以2006年为起点、8年差分 and 以2000年为起点、3年差分模型的估计结果略有不同。对面板数据模型同样的操作表明高温的影响不随端点和时长的变化而变化。稳健性检验表明,粮食生产对气候变化的适应是一种长期稳定变化,而不是仅围绕端点年份的短期变化。

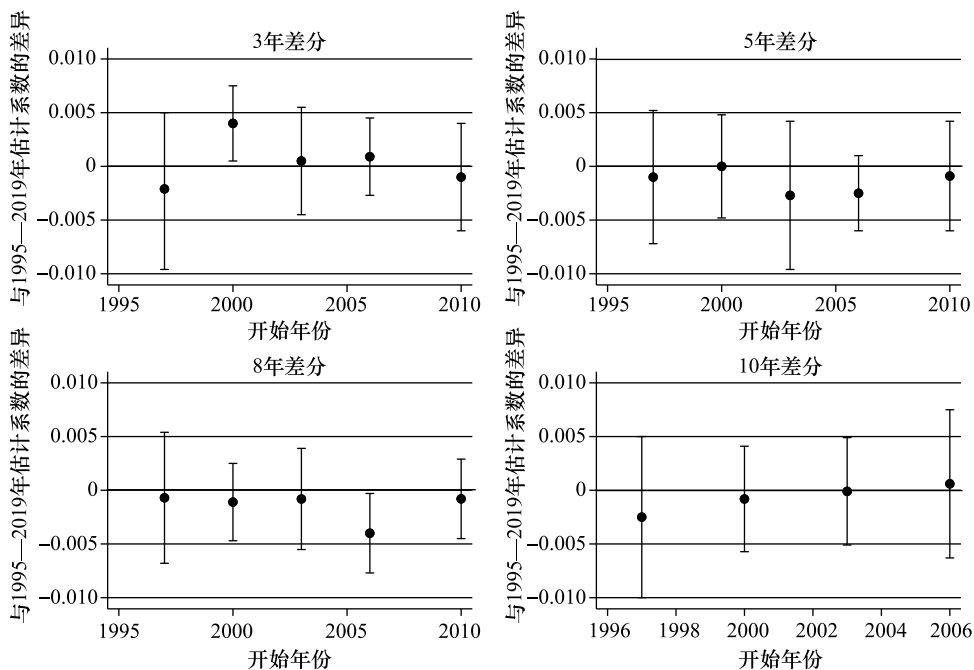


图4 改变长差分端点和时长后与基准估计系数差异的显著性

<sup>①</sup> 部分模型由于数据样本的年份长度无法支撑时段跨度而无法运行,比如计算10年差分时,最晚的年份起始点只能是2009年。

2. 面板长差分估计

在长差分模型中,得到 $\beta$ 系数无偏估计的前提是两时期之间的气候变量与随时间变化且不可观测因素不相关。本文进一步构建面板长差分模型,即在长差分中加入时间固定效应,以消除时变不可观测因素对估计结果的干扰。具体方法是(以划分 4 个时段为例),将前两个时段的均值进行差分,再将后两个时段的均值进行差分,将两期差分纵向合并之后得到两期的面板长差分数据集,使用双向固定效应模型可以消除时期内气候变化与时变不可观测因素之间可能相关而导致的估计偏误。模型设定如下:

$$\Delta y_{it} = \beta_1 \Delta GDD_{ct;t_0,t_1} + \beta_2 \Delta GDD_{ct;t_1,\infty} + \beta_3 \Delta PRE_{ct;p < p_0} + \beta_4 \Delta PRE_{ct;p > p_0} + \alpha_c + \theta_t + \Delta \epsilon_{it}, \tag{7}$$

其中,式(7)中的  $t$  不再表示年份,而是表示时段, $\theta_t$  表示时间趋势,其余项同上文。

附录 VI 报告了 1995—2014 年间和 2000—2019 年间的估计系数。在所有模型中,高温和过量降水的影响系数均显著为负值,系数变化趋势基本与表 3 中报告的基准回归结果相似,证实了不存在与气候变化趋势相关的、随时间变化的不可观测因素对估计结果的干扰。

(三) 空间差异分析

中国的气候变化与农业生产特征均存在明显的地区差异,本文进一步分析粮食生产的气候变化适应水平在南北方的差异特征。将农业生产区域按照秦岭淮河一线划分为南方和北方,将使用 FE 和 LD 模型估计得到的结果报告在附录 VII 中,并将估计系数展示在图 5 中。短期来看,高温对北方粮食单产造成的不利影响高于南方。结合长期适应情形,北方农户的适应行为缓解了高温不利影响的 51.1%,而南方对高温不利影响的缓解效果为 15.3%,北方粮食生产的气候变化适应水平整体高于南方。该结果的启示在于:虽然短期来看,高温对南方地区的粮食生产影响较小,但同时适应水平也相对较低;短期高温对北方地区的不利影响更为明显,但适应水平相对较高。因此,就地区空间而言,当前农业领域的适应重点是提高南方地区粮食生产的高温适应能力。过量降水的不利影响在南北方均未被有效缓解。

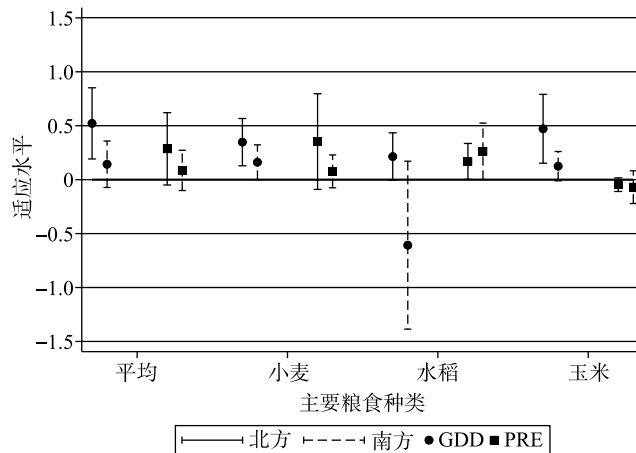


图 5 粮食生产的气候变化适应水平的空间差异

## 五、粮食生产适应气候变化的机制分析

### (一) 农业技术进步与适应技术采纳

首先,粮食 TFP 是包括气候变化适应技术在内的粮食生产技术进步的综合结果,使用长差分 and 固定效应模型估计气候变化对粮食 TFP 的影响,可以识别技术进步在粮食生产适应气候变化中的作用。使用超越对数函数(Tans-Log)和柯布-道格拉斯函数(C-D)计算的粮食 TFP 对气候变化的适应结果<sup>①</sup>,估计结果报告在附录 VIII 中,结果表明,高温和过量降水对粮食 TFP 的短期不利影响明显高于长期,表明技术进步在粮食生产适应气候变化过程中具有显著作用。根据式(6),技术进步可以缓解高温不利影响的 31.8%,此系数略小于 Chen and Gong(2021)使用县级数据估计得到的 37.9%,其原因可能是数据层级差异所导致。县级数据体现着县域内农业技术的较高水平,由于技术扩散不均匀,导致文中估计的适应水平相对略低。但是,农业技术进步对缓解过量降水不利影响的效果并不显著。

其次,从微观农户视角来看,技术采纳是技术进步作用于生产力的关键环节。保护性耕作技术在适应气候变化方面的作用被学界普遍认可,被认为是适应气候变化、确保粮食安全的科学方法(Ogle et al., 2019),其中秸秆覆盖的蓄水保墒功能对于缓解高温干旱的不利影响具有关键作用(Abolanle et al., 2015)。作为对技术进步结果分析的补充,本文进一步分析农户适应技术采纳行为在适应气候变化中的作用。根据农户保护性耕作面积构建是否采纳保护性耕作的虚拟变量  $CTA$ ,来刻画农户技术采纳行为,如果保护性耕作面积大于 0,  $CTA=1$ ,否则  $CTA=0$ 。为更清楚地体现粮食生产、气候变化与保护性耕作之间的关系,本文采用交互项模型进行机制检验(江艇,2022),估计结果报告在附录 X 中<sup>②</sup>。

相较于不采纳保护性耕作技术,农户采纳该技术能够显著缓解高温对粮食单产的不利影响,这在小麦和玉米以及平均粮食单产中均是显著的(除水稻外)。不过,过量降水与  $CTA$  的交互项系数较小且不显著,说明保护性耕作技术对过量降水的调节作用有限,这从保护性耕作的技术内容角度很容易理解,但保护性耕作在正常降水范围内能够加强降水对玉米和整体粮食作物的正向效果,强化蓄水保墒的功能。综合来看,保护性耕作技术提供了“技术适应机制”的微观现实证据。

### (二) 生产要素投入调整

要素投入调整是粮食生产适应气候变化的另一重要机制。通过估计气候变化对亩均劳动、机械和化肥农药投入的长短期影响,可以分析要素投入调整在气候变化适应中的作用。估计结果报告在附录 XI 中,结果表明,农户会投入更多机械以适应高温的不利影响,而正常积温和降水量的上升同样会增加机械投入,这是因为阈值内水热条件的改善有利

<sup>①</sup> 粮食 TFP 的详细计算过程说明放在附录 IX 中。

<sup>②</sup> 对保护性耕作的调查从 2019 年开始,因此,本文使用 2019 年、2020 年和 2021 三年的面板数据,通过双向固定效应模型进行分析。关于保护性耕作技术采纳的描述性分析补充在附录 X 中。本文还构建保护性耕作采纳强度变量,以保证结果稳健性,相关结果在附录 X(表 X2)中。

于粮食作物生长,从而增加机械使用。短期高温和过量降水会增加劳动投入,原因可能是短期劳动投入能够部分缓解高温和过量降水带来的瞬时损失,但是,农户在长期会大幅度减少劳动投入,以降低气温上升对劳动力本身的不利影响。气温上升和过量降水显著增加了化肥农药的使用量,这与过量降水、气温变暖导致的病虫害增加直接相关。总的来看,要素投入调整对气候变化的适应主要体现为机械化肥农药投入的增加、劳动投入的减少。

### (三) 对其他可能适应机制的讨论

除了要素投入调整、技术进步与采纳外,种植结构调整和退出农业生产对于气候变化的适应也受到学界关注。比如 Cui(2020)使用美国的县级数据证实了种植结构调整在气候变化适应中的作用,Li and Pan(2021)研究发现了农户通过由农业部门转向非农业部门来应对高温的不利影响。本文对这两种可能的适应机制做进一步讨论。

#### 1. 种植结构调整

在本文研究期内(1995—2019年),粮食种植结构变化最显著的特点是玉米播种面积的增长,相比之下其他粮食作物则相对稳定,玉米面积的扩大除经济和政策因素外,也可能是由气候变化部分驱动。本文使用玉米播种面积占粮食作物总播种面积的比重作为被解释变量,考察了种植结构调整在粮食生产适应气候变化中的作用机制,估计结果详见附录Ⅹ。结果显示,高温和过量降水明显不利于玉米播种面积扩大,但估计系数极小。这也说明了虽然种植结构调整被认为是适应气候变化的重要方式(Cui and Zhong, 2024),但通过粮食生产内部的种植结构调整适应气候变化的潜力并不大。

#### 2. 农业生产退出

当理性农户认为气候条件不再适宜农业生产时,可能会做出退出农业生产的决策。本文从两个角度来讨论农业生产退出对粮食生产适应水平的影响:首先,退出农业生产可以被视为一种劳动力配置行为,即农户减少了粮食生产中劳动要素的投入。本文对生产要素投入调整的机制分析发现,减少劳动投入以适应气候变化是农户重要的策略选择,因此,农业生产退出实际上也是一种要素投入调整方式。

其次,虽然完全退出农业生产与农户劳动投入调整存在一些差别,但当农户完全退出之后,实际上已不再是粮食生产主体。而本文研究重点是估计中国粮食生产的气候变化适应水平及其机制,意味着适应的行为主体是一直真正从事粮食生产的农户。而且,从现实来看,农户完全退出后一般会农地流转给农业生产经营主体,即退出行为对粮食生产的气候变化适应水平影响不大。

## 六、政策含义与未来拓展

本文对中国粮食生产的气候变化适应水平和适应机制的分析,为进一步提高粮食生产的气候变化适应能力提供了政策启示。一是充分认识过量降水对粮食生产不利影响的

严重性和提升该适应水平的现实迫切性。应该切实改善农业基础设施建设水平,加强水资源管理和调度,以减少过量降水对粮食生产的不利影响。二是提升农业技术进步和技术推广在适应气候变化中的贡献水平,加大农业科研投入,推广现代农业技术,依靠提升粮食全要素生产率实现粮食生产对气候变化的长期有效适应。三是将气候变化适应成本纳入农业支持政策体系中,对农户的气候变化适应行为进行政策引导和补贴支持,具体包括适当提高农机作业补贴,以支持农户为应对气候变化而进行的要素投入调整(如增加机械投入、减少劳动投入)。

气候变化给中国农业部门带来的威胁不容忽视,本文系统估计了粮食生产对气候变化的适应水平及其机制,未来的研究可拓展到种植业其他部门、畜牧业以及渔业等研究相对薄弱的领域,以全面提升食物供给体系的气候变化适应能力。此外,虽然近年来关于气候变化与农业生产的实证研究成果不断涌现,但在研究成果的政策性转化方面仍存在较大的提升空间,未来应注重研究结论向具有现实应用意义的政策建议转化,并强化农业生产领域气候变化适应政策的协同发展。

## 参考文献

- [1] Abolanle, B. M., K. S. Singh, K. Amanpreet, B. Rajan, and D. A. Ally, "Conservation Tillage Impacts on Soil, Crop and the Environment", *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(2), 119-129.
- [2] Ahmed, M. H., W. M. Tesfaye, and F. Gassmann, "Early Growing Season Weather Variation, Expectation Formation and Agricultural Land Allocation Decisions in Ethiopia", *Journal of Agricultural Economics*, 2022, 74(1), 255-272.
- [3] Aragon, F. M., F. Oteiza, and J. P. Rud, "Climate Change and Agriculture: Subsistence Farmers' Response to Extreme Heat", *American Economic Journal-Economic Policy*, 2021, 13(1), 1-35.
- [4] 白秀广、陈晓楠、霍学喜, "气候变化对苹果主产区单产及全要素生产率增长的影响研究", 《农业技术经济》, 2015年第8期, 第98—111页。
- [5] Burke, M., and K. Emerick. "Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture", *American Economic Journal-Economic Policy*, 2016, 8(3), 106-140.
- [6] Chen, S., and B. Gong, "Response and Adaptation of Agriculture to Climate Change: Evidence from China", *Journal of Development Economics*, 2021, 148, 102557.
- [7] Chen, Y., Z. Wu, K. Okamoto, X. Han, G. Ma, H. Chien, and J. Zhao, "The Impacts of Climate Change on Crops in China: A Ricardian Analysis", *Global and Planetary Change*, 2013, 104, 61-74.
- [8] Cui, X., and Q. Tang, "Extreme Heat and Rural Household Adaptation: Evidence from Northeast China", *Journal of Development Economics*, 2024, 167.
- [9] Cui, X., and Z. Zhong, "Climate Change, Cropland Adjustments, and Food Security: Evidence from China", *Journal of Development Economics*, 2024, 167.
- [10] Cui, X., "Climate Change and Adaptation in Agriculture: Evidence from US Cropping Patterns", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2020, 101, 102306.
- [11] Deschenes, O., and M. Greenstone, "The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather", *American Economic Review*, 2007, 97(1), 354-385.
- [12] 冯晓龙、刘明月、仇焕广、霍学喜, "资产专用性与专业农户气候变化适应性生产行为——基于苹果种植户的微观

- 证据”,《中国农村观察》,2018年第4期,第74—85页。
- [13] 高晶晶、史清华,“中国农业生产方式的变迁探究——基于微观农户要素投入视角”,《管理世界》,2021年第12期第37卷,第124—134页。
- [14] 高鸣,“气候变化下的农业生产率再估计”,《中国软科学》,2018年第9期,第26—39页。
- [15] Huang, K., and N. Sim,“Adaptation May Reduce Climate Damage in Agriculture by Two Thirds”, *Journal of Agricultural Economics*, 2021, 72(1), 47-71.
- [16] Huang, K., J. Wang, J. Huang, and C. Findlay,“The Potential Benefits of Agricultural Adaptation to Warming in China in the Long Run”, *Environment and Development Economics*, 2018, 23(2), 139-160.
- [17] Jagnani, M., C. B. Barrett, Y. Liu, and L. You,“Within-Season Producer Response to Warmer Temperatures: Defensive Investments by Kenyan Farmers”, *Economic Journal*, 2020, 131(633), 392-419.
- [18] 江艇,“因果推断经验研究中的中介效应与调节效应”,《中国工业经济》,2022年第5期,第100—120页。
- [19] Kelly, D. L., C. D. Kolstad, and G. T. Mitchell.“Adjustment Costs from Environmental Change”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2005, 50(3), 468-495.
- [20] Li, C., and Z. Pan.“How do Extremely High Temperatures Affect Labor Market Performance? Evidence from Rural China”, *Empirical Economics*, 2021, 61, 2265-2291.
- [21] Li, M.“Adaptation to Expected and Unexpected Weather Fluctuations: Evidence from Bangladeshi Smallholder Farmers”, *World Development*, 2023, 161, 106066.
- [22] Long, T. B., V. Blok, and I. Coninx.“Barriers to the Adoption and Diffusion of Technological Innovations for Climate-Smart Agriculture in Europe: Evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy”, *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112, 9-21.
- [23] 毛慧、付咏、彭澎、柴宇佳,“风险厌恶与农户气候适应性技术采用行为——基于新疆植棉农户的实证分析”,《中国农村观察》,2022年第1期,第126—145页。
- [24] Mendelsohn, R. O., and E. Massetti,“The Use of Cross-Sectional Analysis to Measure Climate Impacts on Agriculture: Theory and Evidence”, *Review of Environmental Economics and Policy*, 2017, 11(2), 280-298.
- [25] Mendelsohn, R., W. Nordhaus, and D. Shaw,“The Impact of Global Warming on Agriculture-A Ricardian Analysis”, *American Economic Review*, 1994, 84(4), 753-771.
- [26] Ogle, S. M., C. Alsaker, J. Baldock, M. Bernoux, F. J. Breidt, B. McConkey, K. Regina, and G. G. Vazquez-Amabile,“Climate and Soil Characteristics Determine Where No-Till Management Can Store Carbon in Soils and Mitigate Greenhouse Gas Emissions”, *Scientific Reports*, 2019, 9.
- [27] Ortiz-Bobea, A., T. R. Ault, C. M. Carrillo, R. G. Chambers, and D. B. Lobel,“Anthropogenic Climate Change Has Slowed Global Agricultural Productivity Growth”, *Nature Climate Change*, 2021, 11(4), 306-328.
- [28] 彭小辉、史清华、朱喜,“中国粮食产量连续增长的源泉”,《农业经济问题》,2018年第1期,第97—109页。
- [29] Schlenker, W., and M. J. Roberts,“Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to US. Crop Yields under Climate Change”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(37), 15594-15598.
- [30] Sheng, Y., and X. Xu,“The Productivity Impact of Climate Change: Evidence from Australia’s Millennium Drought”, *Economic Modelling*, 2019, 76, 182-191.
- [31] Wang, D., P. Zhang, S. Chen, and N. Zhang,“Adaptation to Temperature Extremes in Chinese Agriculture, 1981 to 2010”, *Journal of Development Economics*, 2024, 166.
- [32] Wang, J., J. Huang, and J. Yang,“Overview of Impacts of Climate Change and Adaptation in China’s Agriculture”, *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1), 1-17.
- [33] Wang, J., R. Mendelsohn, A. Dinar, J. Huang, S. Rozelle, and L. Zhang,“The Impact of Climate Change on China’s Agriculture”, *Agricultural Economics*, 2009, 40(3), 323-337.
- [34] Xiao, D., and F. Tao.“Contributions of Cultivars, Management and Climate Change to Winter Wheat Yield in the



North China Plain in the Past Three Decades”, *European Journal of Agronomy*, 2014, 52, 112-122.

- [35] 易福金、周甜甜、陈晓光,“气候变化、农业科研投入与农业全要素生产率”,《南京农业大学学报(社会科学版)》, 2021年第4期第21卷,第155—167页。
- [36] 尹朝静、高雪,“纳入气候因素的中国农业全要素生产率再测算”,《中南财经政法大学学报》,2020年第1期,第110—122页。
- [37] 尹朝静、李谷成、范丽霞、高雪,“气候变化、科技存量与农业生产率增长”,《中国农村经济》,2016年第5期,第16—28页。

## The Adaptation Level and Mechanism of Grain Production to Climate Change in China

LIU Dong FENG Xiaolong SI Wei\*  
(China Agricultural University)

**Abstract:** The overall adaptation level and mechanisms of grain production to climate change is estimated using national rural fixed observation points data. Adaptive behaviors have alleviated 52.5%-63.5% of the adverse impact of high temperatures, with rice and maize more adaptable than wheat. However, adaptive behavior has not effectively mitigated excessive precipitation impacts. Technological progress, adaptive technology adoption, and input adjustments are key adaptation mechanisms. Future efforts should enhance agricultural technological contributions to comprehensively strengthen grain production's climate change adaptation capacity.

**Keywords:** climate change adaptation; grain production; long differences method

**JEL Classification:** Q10, Q51, Q54

---

\* Corresponding Author: SI Wei, China Agricultural University, Haidian District, Beijing 100083, China; Tel: 86-10-62736284; E-mail: siwei@cau.edu.cn.