

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

目录

附录 I 分类估计时阈值和月份的选择	1
附录 II 两时期气温和降水变化	2
附录 III 提高温度阈值后的适应水平变化	3
附录 IV 是否控制要素投入的估计结果对比	4
附录 V 分作物类别估计时的回归表格	5
附录 VI 气温和降水量对粮食单产影响的面板长差分估计	7
附录 VII 地区异质性分析的补充信息	8
附录 VIII 气温和降水量对粮食 TFP 的影响结果	10
附录 IX 粮食 TFP 计算过程说明	11
附录 X 保护性耕作技术采纳相关结果	12
附录 X I 气温和降水量对粮食生产要素投入的影响	14
附录 X II 对种植结构调整的分析	15

附录 I 分类估计时阈值和月份的选择

每种主粮作物内部还包括具体的分类,比如小麦在中国包括冬小麦和春小麦,两者的生长时间存在明显差异。本文根据主粮内部不同子类播种面积所占比重选取进入分析的主粮子类。根据国家统计局对不同粮食作物播种面积的统计信息(<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>),确定小麦(冬小麦)、水稻(早稻、中稻、晚稻)和玉米(春玉米和夏玉米)的生长月份和温度范围。通过查阅中国物候学、作物种植管理相关资料、请教农学领域专家,整理确定三大主粮的生长月份以及耐受温度范围,见表 I 1。

表 I 1 不同主粮作物的生长月份与适宜温度范围

主粮	细分类	生长月份	温度范围
小麦	冬小麦	9~10 月份播种-5~6 月收获	-10°C~25°C
水稻	早稻、中稻、晚稻	早稻 3~4 月栽种-晚稻 10~11 月收获	0°C~32°C
玉米	春玉米、夏玉米	春玉米 3~5 月播种-夏玉米 9~10 月收获	-3°C~30°C

在此基础上,我们分别就每种作物 GDD 端点前后 3 个单位的阈值、PRE=40cm 前后 5 个单位的阈值进行长差分回归,选择残差平方和最小的两个阈值进入最终的模型。举例而言,冬小麦的高温端点是 25°C,则本文遍历 22、23、24 和 26、27、28 共 6 个高温阈值,选择使回归残差平方和最小的数值作为最终报告的阈值。除此之外,GDD 和 PRE 的计算还考虑了不同作物生长月份的差异,比如用来计算冬小麦 GDD 和 PRE 的月份是 9 月至第二年 6 月,水稻 GDD 和 PRE 是 3 月至 11 月,玉米是 3 月至 10 月。

附录 II 两时期气温和降水变化

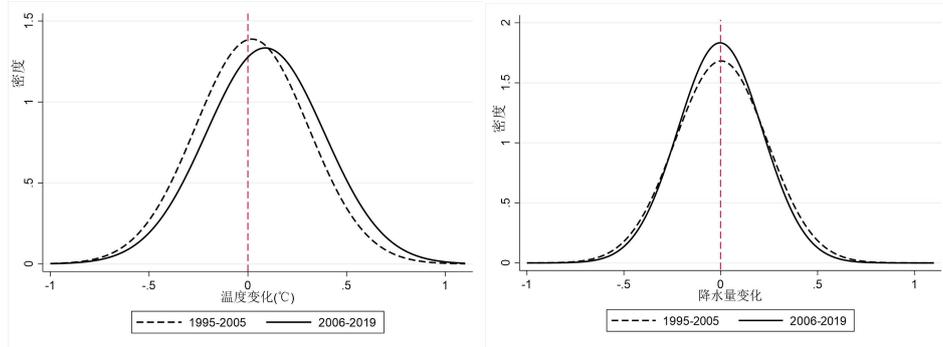


图 II 1 两时期气温和降水变化

附录III 提高温度阈值后的适应水平变化

在对三类粮食作物进行合并分析时,三类作物的温度阈值存在差异,小麦的温度阈值是25°C、水稻的阈值为32°C,玉米温度阈值为30°C,主要粮食作物的温度阈值范围是25°C至32°C之间。当我们设定温度阈值为28°C时,是选取了这个温度范围中的中间值,此时,小麦的适应能力可能会较弱,而水稻和玉米的适应情况会较好,此时的估计系数是各类粮食作物适应水平的加权平均值,即赋予了水稻和玉米较高的比重、小麦较低的比重,这种处理方法也是对所有粮食作物所能适宜的温度范围的平衡。同时,我们对同样作为温度阈值范围中间值的29°C进行了考察。

按照上面的逻辑,如果我们的设定温度阈值为32°C及以上,那么高温带来的影响是更为严重且无法被有效适应的,对此,我们将调高气温阈值后的检验结果汇报在表III1中。可以看到,当气温阈值调高至32°C时,对高温的适应显著下降,根据正文中的公式(5) $(\beta_2^{FE} - \beta_2^{LD})/\beta_2^{FE} = 1 - \beta_2^{LD}/\beta_2^{FE}$,此时对高温的适应水平仅为6%,当我们进一步提高气温阈值后,无法在回归结果中发现有效的气候变化适应水平。这一结果验证了我们关于阈值选择的逻辑。

表III1 调整高温阈值后气候变化适应水平检验结果

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	高温阈值 32°C		高温阈值 33°C		高温阈值 34°C	
	FE	LD	FE	LD	FE	LD
<i>GDD-above</i>	-0.066*** (0.008)	-0.062* (0.033)	-0.079*** (0.019)	-0.179*** (0.052)	-0.424* (0.230)	-0.428*** (0.154)
<i>GDD-below</i>	0.023*** (0.005)	0.037** (0.017)	0.019** (0.010)	-0.016* (0.009)	-0.026*** (0.004)	-0.018** (0.008)
<i>PRE-above</i>	-0.040*** (0.006)	-0.039** (0.015)	-0.048*** (0.006)	-0.056*** (0.014)	-0.047*** (0.006)	-0.051** (0.024)
<i>PRE-below</i>	0.000 (0.006)	0.056 (0.048)	0.015** (0.006)	0.062 (0.051)	0.008 (0.006)	0.022 (0.051)
<i>Constant</i>	8.058*** (2.410)	-8.561*** (1.905)	5.239*** (1.146)	-6.422** (2.878)	-3.297* (1.736)	-6.945** (2.913)
<i>Controls</i>	Y	Y	Y	Y	Y	Y
<i>Fixed effects</i>	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
<i>Observations</i>	74796	2001	74796	2001	74796	2001
<i>Adj_R2</i>	0.379	0.091	0.379	0.094	0.379	0.089

注:表中***、**、*分别表示估计系数在1%、5%和10%的水平上显著,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。降水阈值统一设置为50cm。

附录 IV 是否控制要素投入的估计结果对比

作为对机制变量的检验,我们在控制要素投入之后,基准回归结果的估计系数的大小和显著性发生了一定程度的变化,比如 *GDD-above* 和 *PRE-above* 的系数有所减小, *GDD-below* 和 *PRE-below* 的显著性发生了变化;同时估计的拟合优度有所提高。但是否控制要素投入并没有带来估计系数方向的变化,这些变化并没有改变我们的基本研究结论。我们将是否控制机制变量的结果差异对比汇报在表IV1中,可见回归中控制要素投入后,估计结果相对未控制结果稍有减小,但系数方向无变化,符合机制变量的特征(江艇,2022),同时结果也显示,控制要素投入后拟合优度有所提高。

表IV1 是否控制要素投入估计结果比较

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)
	FE	LD	FE	LD
<i>GDD-above</i>	-0.059*** (0.015)	-0.028** (0.013)	-0.048*** (0.018)	-0.019** (0.008)
<i>GDD-below</i>	0.013** (0.005)	0.021* (0.011)	0.011** (0.005)	0.018*** (0.003)
<i>PRE-above</i>	-0.040*** (0.013)	-0.033** (0.015)	-0.034*** (0.011)	-0.021** (0.009)
<i>PRE-below</i>	0.007 (0.006)	0.072* (0.038)	0.002 (0.006)	0.027 (0.038)
<i>Constant</i>	8.058** (2.410)	7.332*** (1.255)	6.799*** (2.012)	8.871*** (2.221)
Controls	Y	Y	Y	Y
要素投入	不控制	不控制	控制	控制
Fixed effects	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
Observations	74796	2961	74796	2961
Adj_R2	0.379	0.084	0.467	0.366
温度阈值	29	29	29	29
降水量阈值	50	50	50	50

注:表中***、**、*分别表示估计系数在1%、5%和10%的水平上显著。括号中为聚类标准误,聚类层级为县。控制变量包含家庭、村庄变量以及其他气候变量。

附录V 分作物类别估计时的回归表格

表V1 气温和降水量对粮食单产的影响(小麦)

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	FE	LD	FE	LD	FE	LD
<i>GDD-above</i>	-0.012*** (0.003)	-0.008*** (0.003)	-0.037*** (0.012)	-0.028** (0.013)	-0.052*** (0.015)	-0.049*** (0.013)
<i>GDD-below</i>	0.008** (0.004)	0.038** (0.018)	0.008* (0.005)	0.080** (0.031)	0.005* (0.003)	0.096*** (0.020)
<i>PRE-above</i>	-0.018*** (0.007)	-0.014** (0.006)	-0.015** (0.007)	-0.014*** (0.005)	-0.016*** (0.004)	-0.013** (0.006)
<i>PRE-below</i>	0.011*** (0.004)	0.071** (0.036)	0.017*** (0.005)	0.023*** (0.006)	0.013*** (0.004)	0.031** (0.014)
<i>Constant</i>	3.749*** (1.296)	3.847*** (0.782)	2.992** (1.386)	5.530** (2.680)	2.292 (1.937)	5.297** (2.187)
Controls	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Fixed effects	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
Observations	31601	1561	31601	1561	31601	1561
Adj_R2	0.476	0.069	0.475	0.061	0.475	0.035
适应水平(高温)	0.333***		0.243*		0.058	
Bootstrap 置信区间	[0.181, 0.474]		[0.058, 0.490]		[-0.038, 0.143]	
适应水平(过量降水)	0.222*		0.067		0.186	
Bootstrap 置信区间	[0.065, 0.379]		[-0.035, 0.169]		[-0.007, 0.373]	
T-threshold	25	25	26	26	27	27
P-threshold	50	50	50	50	50	50

注：表中***、**、*分别表示估计系数在1%、5%和10%的水平上显著。括号中为聚类标准误，聚类层级为县。控制变量包含家庭、村庄变量以及其他气候变量。

表V2 气温和降水对粮食单产的影响(水稻)

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	FE	LD	FE	LD	FE	LD
<i>GDD-above</i>	-0.040 (0.037)	-0.025 (0.029)	-0.065 (0.054)	-0.028 (0.036)	-0.047** (0.022)	-0.022 (0.026)
<i>GDD-below</i>	0.010* (0.005)	0.120*** (0.036)	0.013* (0.007)	0.012 (0.049)	0.008 (0.005)	0.034 (0.042)
<i>PRE-above</i>	-0.068*** (0.026)	-0.055 (0.065)	-0.071*** (0.027)	-0.058** (0.026)	-0.063** (0.026)	-0.049 (0.060)
<i>PRE-below</i>	0.028*** (0.008)	0.035** (0.014)	0.022*** (0.005)	0.036*** (0.012)	0.026*** (0.006)	0.031*** (0.008)
<i>Constant</i>	4.989*** (1.120)	2.220 (5.368)	6.032** (2.512)	1.383 (1.217)	5.368* (2.984)	-0.485 (5.157)
Controls	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Fixed effects	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
Observations	26515	1206	26515	1206	26515	1206
Adj_R2	0.297	0.054	0.297	0.050	0.297	0.060
适应水平(高温)	0.375*		0.569**		0.532***	
Bootstrap 置信区间	[0.008, 0.742]		[0.038, 1.031]		[0.221, 0.843]	
适应水平(过量降水)	0.191		0.183		0.222*	
Bootstrap 置信区间	[-0.007, 0.387]		[-0.016, 0.382]		[0.065, 0.379]	
T-threshold	30	30	31	31	32	32
P-threshold	55	55	55	55	55	55

注：表中***、**、*分别表示估计系数在1%、5%和10%的水平上显著。括号中为聚类标准误，聚类层级为县。控制变量包含家庭、村庄变量以及其他气候变量。

表 V3 气温和降水对粮食单产的影响 (玉米)

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	FE	LD	FE	LD	FE	LD
<i>GDD-above</i>	-0.050** (0.022)	-0.027** (0.013)	-0.053** (0.027)	-0.025** (0.009)	-0.058** (0.025)	-0.030** (0.008)
<i>GDD-below</i>	0.007 (0.006)	0.063 (0.040)	0.048** (0.019)	0.053* (0.029)	0.003 (0.005)	0.038** (0.013)
<i>PRE-above</i>	-0.049*** (0.016)	-0.042** (0.019)	-0.043*** (0.016)	-0.034* (0.018)	-0.043*** (0.016)	-0.036*** (0.014)
<i>PRE-below</i>	0.015* (0.009)	0.096** (0.050)	0.027*** (0.009)	0.044 (0.041)	0.007 (0.009)	0.078** (0.039)
<i>Constant</i>	5.126** (2.148)	8.895*** (2.044)	9.492* (5.165)	8.334*** (3.055)	6.729* (3.927)	8.995*** (2.021)
Controls	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Fixed effects	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
Observations	36702	1603	36702	1603	36702	1603
Adj_R2	0.355	0.047	0.355	0.040	0.356	0.048
适应水平 (高温)	0.460**		0.528***		0.483***	
Bootstrap 置信区间	[0.080, 0.825]		[0.306, 0.759]		[0.284, 0.677]	
适应水平 (过量降水)	0.143		0.209*		0.163	
Bootstrap 置信区间	[-0.039, 0.325]		[0.005, 0.410]		[-0.011, 0.337]	
T-threshold	29	29	30	30	31	31
P-threshold	45	45	45	45	45	45

注：表中***、**、*分别表示估计系数在 1%、5%和 10%的水平上显著。括号中为聚类标准误，聚类层级为县。控制变量包含家庭、村庄变量以及其他气候变量。

附录 VI 气温和降水量对粮食单产影响的面板长差分估计

表 VI1 气温和降水量对粮食单产影响的面板长差分估计

	(1)	(2)	(3)	(4)
	1995-2014	1995-2014	2000-2019	2000-2019
<i>GDD-above</i>	-0.017*** (0.004)	-0.015*** (0.004)	-0.016* (0.009)	-0.019*** (0.005)
<i>GDD-below</i>	0.019 (0.017)	0.030*** (0.005)	0.019*** (0.06)	0.032*** (0.009)
<i>PRE-above</i>	-0.021* (0.010)	-0.016** (0.007)	-0.015* (0.008)	-0.011*** (0.004)
<i>PRE-below</i>	0.037** (0.018)	0.036*** (0.004)	0.022 (0.019)	0.024** (0.011)
控制变量	Y	Y	Y	Y
固定效应	Cty, Yr	Cty, Yr	Cty, Yr	Cty, Yr
样本量	3334	3334	3326	3326
Adj_R ²	0.204	0.298	0.161	0.057
T-threshold	28	29	28	29
P-threshold	50	45	50	45

注：回归中的被解释变量均为粮食产量取对数后的差分。数据是一个覆盖 25 年差分的两期面板，第(1)、(2)列包含的 4 个时期是 1995-1999，2000-2004，2005-2009，2010-2014；第(3)、(4)列包含的 4 个时期是 2000-2004，2005-2009，2010-2014，2015-2019；回归均控制了县和年份固定效应；标准误聚类到县级层面。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。

附录 VII 地区异质性分析的补充信息

将农业生产区域按照秦岭淮河一线划分为南方和北方，北方地区包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、北京、天津、陕西、山西、宁夏、甘肃、青海、新疆、河南、山东，南方地区包括江苏、安徽、浙江、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州、江西、浙江、福建、广东、广西、海南。

首先，使用平均粮食生产能力指标进行估计，选取基准回归中适应效果最好的气温阈值（28°C）和降水量阈值（50cm），将使用面板固定效应模型和长期差分模型得到的估计结果汇报在表 VII 1 中。短期来看，高温对北方的粮食单产造成了显著不利的影响，GDD-above 每增加一单位，粮食单产下降 2.3%，短期高温冲击对南方地区粮食单产的影响较小，GDD-above 每增加一单位，粮食单产下降 1.4%（显著性水平 10%）。结合长期适应情形，北方地区农户的适应行为缓解了高温不利影响的 51.1%，而南方农户的适应行为对于高温不利影响的缓解比例是 15.3%。这一估计结果具有重要的启示：虽然短期来看，高温对南方地区的农业生产的影响较小，但实际上其适应空间已经十分有限；短期高温冲击对北方地区的不利影响是显著的，但长期来看，适应的效果较为明显。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的高温适应能力。过量降水的不利影响并未被有效缓解。

表 VII 1 粮食生产气候变化适应水平南北方差异

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)
	北方		南方	
	固定效应	长期差分	固定效应	长期差分
<i>GDD-above</i>	-0.023** (0.010)	-0.011*** (0.003)	-0.014* (0.007)	-0.012*** (0.004)
<i>GDD-below</i>	0.004 (0.006)	0.225*** (0.052)	0.009 (0.008)	0.236*** (0.049)
<i>PRE-above</i>	-0.042*** (0.011)	-0.030*** (0.011)	-0.035*** (0.007)	-0.032* (0.018)
<i>PRE-below</i>	0.001 (0.008)	0.308*** (0.077)	0.011 (0.008)	0.101 (0.068)
<i>Constant</i>	7.504*** (2.028)	-3.316 (3.743)	6.527** (2.147)	-12.843*** (3.437)
<i>Controls</i>	Y	Y	Y	Y
<i>Fixed effects</i>	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
<i>Observations</i>	34010	910	40786	1091
<i>Adj_R2</i>	0.460	0.095	0.380	0.075
<i>T-threshold</i>	28	28	28	28
<i>P-threshold</i>	50	50	50	50

注：表中***、**、*分别表示估计系数在 1%、5%和 10%的水平上显著。括号中为聚类标准误，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。

进一步，针对三类主要粮食作物气候变化适应水平的南北方差异进行分析。此处，分别

选取小麦、水稻和玉米三类作物的温度和降水量阈值,选取过程首先划定自然科学研究中三类主粮作物的适宜阈值范围,然后遍历范围内所有阈值,选取使残差平方和最小的阈值进行分析。此处仅汇报对阈值外气温和降水的适应情况。**表VII2**结果显示,三种主粮作物对高温和过量降水的适应存在明显的南北方差异。就小麦而言,适应水平的南北方差异主要体现在过量降水上,在北方过量降水的不利影响能够被一定程度地缓解,但在南方并不明显。对水稻而言,在北方,高温的不利影响并不显著;而在南方,短期高温对水稻单产的影响为-5.1%,虽然长期来看,这种不利影响在统计上不显著,但其估计系数较大。短期降水的不利影响南方高于北方,长期过量降水的影响不显著。对玉米而言,对高温不利影响的适应同样更多地体现在北方而非南方,但玉米对过量降水的适应是不显著的,这与玉米收获期与我国降雨期高度重合密切相关。综合来看,分主粮品种的地区异质性分析与我们构建的综合平均指标的结果趋于一致。

表VII2 气候变化适应水平的南北方差异(分主粮品种)

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)
	北方		南方	
	固定效应	长期差分	固定效应	长期差分
Panel A: 小麦(气温阈值为25°C,降水阈值为50cm)				
<i>GDD-above</i>	-0.023** (0.012)	-0.015* (0.008)	-0.031*** (0.005)	-0.026*** (0.009)
<i>PRE-above</i>	-0.017** (0.007)	-0.011*** (0.004)	-0.039*** (0.010)	-0.036*** (0.007)
<i>Observations</i>	14369	710	17232	851
<i>Adj_R2</i>	0.423	0.093	0.495	0.182
Panel B: 水稻(气温阈值为31°C,降水阈值为55cm)				
<i>GDD-above</i>	-0.014 (0.010)	-0.011 (0.009)	-0.051** (0.019)	-0.182 (0.310)
<i>PRE-above</i>	-0.059*** (0.007)	-0.049 (0.062)	-0.198*** (0.029)	-0.146 (0.286)
<i>Observations</i>	12056	548	14459	658
<i>Adj_R2</i>	0.240	0.051	0.402	0.101
Panel C: 玉米(气温阈值为30°C,降水阈值为45cm)				
<i>GDD-above</i>	-0.053*** (0.009)	-0.028** (0.012)	-0.048*** (0.064)	-0.042* (0.024)
<i>PRE-above</i>	-0.043*** (0.010)	-0.045** (0.022)	-0.072*** (0.014)	-0.077** (0.038)
<i>Observations</i>	16688	729	20014	874
<i>Adj_R2</i>	0.285	0.037	0.369	0.091
<i>Controls</i>	Y	Y	Y	Y
<i>Fixed effects</i>	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr

注:表中***、**、*分别表示估计系数在1%、5%和10%的水平上显著。括号中为聚类标准误,聚类层级为县。控制变量包含家庭、村庄变量以及其他气候变量,不包括要素投入。

附录VIII 气温和降水量对粮食 TFP 的影响结果

表VIII1 气温和降水量对粮食 TFP 的影响

	(1)	(2)	(3)	(4)
	Trans-Log		C-D	
	FE	LD	FE	LD
<i>GDD-above</i>	-0.022** (0.010)	-0.015*** (0.005)	-0.033*** (0.012)	-0.024** (0.011)
<i>GDD-below</i>	0.036 (0.029)	0.025** (0.011)	0.027 (0.022)	0.019** (0.009)
<i>PRE-above</i>	-0.016* (0.009)	-0.015** (0.007)	-0.014*** (0.003)	-0.015* (0.009)
<i>PRE-below</i>	0.017*** (0.005)	0.020*** (0.005)	0.045** (0.021)	0.046** (0.021)
常数项	5.338*** (1.953)	6.522*** (1.406)	4.350 (2.771)	5.962*** (1.006)
控制变量	Y	Y	Y	Y
固定效应	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
样本量	74796	2961	74796	2961
Adj_R ²	0.105	0.098	0.116	0.125

注：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。

附录 IX 粮食 TFP 计算过程说明

参考高鸣和魏佳朔(2022)的研究,本文对粮食 TFP 的估计是基于超越对数模型的随机前沿方法(BC92 模型)实现的,构建超越对数生产函数(同时使用柯布道格拉斯生产函数进行稳健性检验)如下:

$$\ln y_{i,t} = \ln f(x_{i,t}, t; \beta) + v_{i,t} - u_{i,t}$$

其中 $y_{i,t}$ 表示粮食单产, $f(x_{i,t}, t; \beta)$ 表示一系列要素投入组合 $x_{i,t}$ 在时间 t 上所能达到的潜在产量, $v_{i,t}$ 是随机统计误差, $u_{i,t}$ 是技术无效率项,且服从截断正态分布, $\exp(-u_{i,t})$ 表示农户 i 在时间 t 特定的效率水平。

重点考虑劳动、机械和化肥农药投入(将机械化肥农药合并处理),构建超越对数生产函数如下:

$$\begin{aligned} \ln y_{i,t} = & \beta_0 + \beta_l \ln l_{i,t} + \beta_k \ln k_{i,t} + \frac{1}{2} \beta_{ll} (\ln l_{i,t})^2 + \frac{1}{2} \beta_{kk} (\ln k_{i,t})^2 + \frac{1}{2} \beta_{lk} \ln l_{i,t} \ln k_{i,t} \\ & + \beta_T T + \frac{1}{2} \beta_{TT} T^2 + \beta_{Tl} T \ln l_{i,t} + v_{i,t} - u_{i,t} \end{aligned}$$

其中, $\ln y_{i,t}$ 表示粮食单产的自然对数, $l_{i,t}$ 和 $k_{i,t}$ 表示亩均劳动投入、亩均机械和化肥农药投入, T 表示时间趋势, β 表示一系列待估参数。在此基础上,粮食 TFP 可以近似表达为

$$\ln TFP_{i,t} \approx \beta_0 + \beta_T T + \frac{1}{2} \beta_{TT} T^2 + \beta_{Tl} T \ln l_{i,t} + \beta_{Tk} T \ln k_{i,t} - u_{i,t}$$

附录 X 保护性耕作技术采纳相关结果

我们使用 CTA 来表示农户是否采纳保护性耕作技术。在我们的样本中，是否采纳保护性耕作技术的农户分布如下表：

变量	数量	占比 (%)	累积占比 (%)
采纳保护性耕作技术	4242	20.14	20.14
未采纳保护性耕作技术	16820	79.86	100
合计	21062	100	

表 X1 是否采纳保护性耕作在气候变化影响粮食单产中的调节效应

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)
	小麦单产	水稻单产	玉米单产	加总后平均单产
<i>CTA = 1</i>	0.019** (0.007)	-0.017 (0.027)	0.015*** (0.005)	0.084*** (0.024)
<i>GDD - above</i>	-0.034*** (0.005)	-0.081* (0.047)	-0.036 (0.079)	-0.001*** (0.000)
<i>GDD - above * CTA</i>	0.043*** (0.010)	0.001 (0.002)	0.047* (0.024)	0.034*** (0.013)
<i>GDD - below</i>	0.002 (0.002)	0.003*** (0.001)	-0.002 (0.001)	0.009** (0.005)
<i>GDD - below * CTA</i>	0.003 (0.005)	-0.000 (0.001)	0.001 (0.001)	0.038*** (0.005)
<i>PRE - above</i>	-0.022* (0.014)	-0.028** (0.012)	-0.006* (0.004)	-0.001*** (0.000)
<i>PRE - above * CTA</i>	-0.011 (0.019)	0.029 (0.024)	0.033* (0.018)	0.018 (0.039)
<i>PRE - below</i>	0.021*** (0.006)	0.019*** (0.005)	0.026*** (0.003)	0.086*** (0.012)
<i>PRE - below * CTA</i>	0.026 (0.036)	0.009 (0.006)	0.013** (0.005)	0.011*** (0.003)
Constant	5.897*** (0.573)	6.445*** (0.733)	6.452*** (0.672)	2.521*** (0.831)
Controls	Y	Y	Y	Y
Fixed Effect	Cty, Pr-Yr	Cty, Pr-Yr	Cty, Pr-Yr	Cty, Pr-Yr
Observations	4529	4996	10565	21062
Adj_R2	0.241	0.174	0.152	0.193
T-threshold	25	32	30	29
P-threshold	50	55	45	50

注：括号中为聚类稳健标准误，聚类层级为县。控制变量包括要素投入、家庭、村庄变量以及其他气候变量。第（4）列的控制变量还包括作物种类虚拟变量。

我们使用 de-CTA 来表示农户采纳保护性耕作的强度，其样本分布特征如下表：

变量	数量	均值	标准差	最小值	最大值
----	----	----	-----	-----	-----

保护性耕作面积占比	21062	0.27	0.44	0	1
-----------	-------	------	------	---	---

使用气候变化适应性技术强度变量进行估计的结果汇报在表 X2 中,从交互项的估计系数来看,保护性耕作技术采纳强度与是否采纳该适应技术的影响效果是一致的,表明了适应性技术采纳在适应过程中效果的稳健性。

表 X2 保护性耕作技术采纳强度在粮食单产适应气候变化中的调节效应

变量名称	(1) 小麦单产	(2) 水稻单产	(3) 玉米单产	(4) 加总后平均单产
<i>de-CTA</i>	0.035*** (0.011)	-0.076 (0.049)	0.019** (0.009)	0.051*** (0.009)
<i>GDD-above</i>	-0.023* (0.012)	-0.017 (0.027)	-0.015* (0.008)	-0.019** (0.008)
<i>GDD-above*de-CTA</i>	0.040*** (0.010)	0.015 (0.027)	0.035** (0.016)	0.026** (0.012)
<i>GDD-below</i>	0.003* (0.002)	0.003*** (0.001)	0.002* (0.001)	0.012*** (0.001)
<i>GDD-below*de-CTA</i>	0.004*** (0.001)	-0.000 (0.001)	-0.001 (0.001)	-0.001* (0.001)
<i>PRE-above</i>	-0.023 (0.015)	-0.028** (0.012)	-0.008 (0.009)	-0.020* (0.012)
<i>PRE-above*de-CTA</i>	-0.009 (0.019)	0.027* (0.014)	0.039** (0.018)	0.020 (0.019)
<i>PRE-below</i>	0.022*** (0.006)	0.019*** (0.005)	0.026*** (0.003)	0.017*** (0.005)
<i>PRE-below*de-CTA</i>	0.024*** (0.006)	0.008 (0.006)	0.016*** (0.005)	0.025*** (0.006)
<i>Constant</i>	3.443*** (0.574)	4.860*** (0.909)	4.300*** (1.059)	5.805*** (0.059)
<i>Controls</i>	Y	Y	Y	Y
<i>Fixed Effect</i>	Cty, Pr-Yr	Cty, Pr-Yr	Cty, Pr-Yr	Cty, Pr-Yr
<i>Observations</i>	4529	4996	10565	21062
<i>Adj_R2</i>	0.242	0.174	0.153	0.103
<i>T-threshold</i>	25	32	30	29
<i>P-threshold</i>	50	55	45	50

注:括号中为聚类稳健标准误,聚类层级为县。控制变量包括要素投入、家庭、村庄变量以及其他气候变量。第(4)列的控制变量还包括作物种类虚拟变量。

附录 X I 气温和降水量对粮食生产要素投入的影响

表 X I 1 气温和降水量对粮食生产要素投入的影响

	机械作业费 (元)		投工量 (日)		化肥农药费 (元)	
	FE	LD	FE	LD	FE	LD
<i>GDD-above</i>	6.998*** (0.881)	15.873** (7.661)	2.849*** (0.239)	-6.014*** (1.532)	8.673*** (1.345)	20.134** (8.874)
<i>GDD-below</i>	1.238*** (0.120)	9.058* (4.657)	0.027 (0.030)	-1.170*** (0.222)	0.183 (0.185)	6.849*** (1.866)
<i>PRE-above</i>	0.951 (0.722)	-9.542 (10.502)	0.147** (0.064)	-2.442*** (0.500)	0.352 (0.262)	8.686*** (2.938)
<i>PRE-below</i>	1.026*** (0.157)	9.552* (5.336)	-0.165*** (0.046)	-1.057*** (0.390)	0.662 (0.640)	-2.122 (2.602)
常数项	-13.539*** (4.081)	95.720*** (26.703)	-31.882*** (10.682)	96.775*** (39.667)	-92.820*** (21.242)	78.453*** (29.980)
固定效应	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
作物种类	控制	控制	控制	控制	控制	控制
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y
样本量	74796	2961	74796	2961	74796	2961
Adj-R2	0.425	0.085	0.384	0.104	0.508	0.115
T-threshold	28	28	29	29	29	29
P-threshold	50	50	50	50	45	45

注：括号中为聚类稳健标准误，聚类层级为县。控制变量包括家庭、村庄变量以及其他气候变量。

附录 X II 对种植结构调整的分析

种植结构调整是农户适应气候变化的重要方式，Cui (2020) 使用美国的县级数据证实了种植结构调整在适应气候变化中的作用。参照 Burke and Emerick (2016) 和 Cui (2020)，我们使用玉米种植面积占比对气候变化的反应来验证种植结构调整在中国粮食生产适应气候变化中的作用。在我们的时间跨度内 (1995-2019)，玉米的播种面积呈现出明显的增长趋势，而其他粮食作物的播种面积则相对稳定。被解释变量玉米播种面积占比 $corn_per_{it}$ ，使用该农户该年的玉米播种面积除以当年粮食作物播种总面积。由于该变量是处于 0-1 (包含端点) 的连续变量，我们使用 Arcsine 函数进行转换，从而使该变量近似服从正态分布。温度和降水阈值继续采用估计玉米单产时使用的阈值。从表 X II 1 可见，高温和过量降水显著不利于玉米播种面积的扩大，适量降水的增加有利于玉米播种面积的增长。但总体而言，气温和降水对玉米种植结构的影响系数极小，经济显著性不高。其实，虽然种植结构调整是一种应对气候变化的重要方式，但是就粮食生产而言，调整其内部结构以适应气候变化的潜力不大。

表 X II 1 气温和降水对玉米种植结构的影响

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	FE	LD	FE	LD	FE	LD
<i>GDD-above</i>	-0.000 (0.000)	-0.000*** (0.000)	-0.005*** (0.001)	-0.001*** (0.000)	-0.005*** (0.001)	-0.000 (0.001)
<i>GDD-below</i>	-0.000 (0.000)	0.000 (0.000)	0.000*** (0.000)	-0.000 (0.000)	0.000** (0.000)	0.000*** (0.000)
<i>PRE-above</i>	-0.000*** (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000*** (0.000)	-0.000** (0.000)	-0.000*** (0.000)	-0.000 (0.000)
<i>PRE-below</i>	0.000** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.000*** (0.000)	0.000*** (0.000)	0.000*** (0.000)	0.000*** (0.000)
Constant	0.411*** (0.012)	0.241*** (0.005)	0.350*** (0.025)	0.245*** (0.005)	0.360*** (0.025)	0.241*** (0.006)
Controls	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Fixed effects	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr	Cty, Pr-Yr	Pr
Observations	36702	1603	36702	1603	36702	1603
Adj_R2	0.280	0.009	0.241	0.011	0.196	0.016
T-threshold	29	29	30	30	31	31
P-threshold	45	45	45	45	45	45

注：表中***、**、*分别表示估计系数在 1%、5%和 10%的水平上显著。括号中为聚类标准误，聚类层级为县。控制变量包含家庭、村庄变量以及其他气候变量。

参考文献

- [1] 高鸣、魏佳朔，“收入性补贴与粮食全要素生产率增长”，《经济研究》，2022 年第 57 卷第 12 期，第 143-161 页。

注：该附录是期刊所发表论文的组成部分，同样视为作者公开发表的内容。如研究中使用该附录中的内容，请务必在研究成果上注明附录下载出处。