

DOI: 10.20103/j.stxb.202310152241

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.

Chen Y H, Zeng M Q, Chen B. Impact of climate change on the resilience of food production: research of the moderating effect based on crop diversification. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 6937-6951.

# 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

陈有华<sup>1,2</sup>, 曾梦晴<sup>1,\*</sup>, 陈彬<sup>3</sup>

1 华南农业大学经济管理学院, 广州 510642

2 华南农业大学农业产业发展研究中心, 广州 510642

3 北京师范大学环境学院, 北京 100875

**摘要:**近年来气候灾害频发,给全球粮食生产系统造成了严重影响,气候变化对粮食生产韧性的冲击更是其中需重点关注的问题。据此,基于2000—2020年我国31个省份的面板数据,在剖析气候变化与粮食生产关系的基础上,揭示了气候变化对粮食生产韧性的影响机制。研究发现:首先,气候因子的变化,包括积温的上升以及降雨的亏缺或过量,对粮食生产韧性具有抑制作用;其次,作物多样性在该关系中具有重要的调节作用,具体表现为提高作物多样性程度缓解了积温上升对粮食生产韧性的负向影响,但对降雨的影响并不明显;第三,对主要粮食作物分类回归表明,积温上升对谷物作物具有负向影响,对豆类、薯类作物影响不明显,降雨亏损或过量则对谷物、豆类作物具有负向影响,对薯类作物影响不明显;降雨差异分析表明,降雨亏损对于粮食生产韧性的负向影响较大,降雨过量对粮食生产韧性的影响较不明显,且降雨过量可以缓解高温的不利影响;进一步分区域研究发现,气候变化对粮食主产区和非粮食主产区均有负向影响,但相比粮食主产区,提高作物多样性程度在非粮食主产区发挥的调节作用更强。为保障粮食生产安全,应提升气候监测能力,强化应对气候变化的适应韧性,且不同粮食产区应根据气候条件和土壤特点,因地制宜选择作物多样化程度以发挥区域优势,不同粮食产区应采取不同保障措施,应加强对粮食主产区的政策倾斜和资金投入,为粮食安全提供可靠的保障。

**关键词:**气候变化;积温;降雨;粮食生产韧性;作物多样化

## Impact of climate change on the resilience of food production: research of the moderating effect based on crop diversification

CHEN Youhua<sup>1,2</sup>, ZENG Mengqing<sup>1,\*</sup>, CHEN Bin<sup>3</sup>

1 Collage of Economics and Management, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Agricultural Industry Development Research Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3 School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** The frequent occurrence of extreme climate disasters in recent years has caused serious impacts on the food production systems of various countries around the world, and the impact of climate change on the resilience of food production is one of the issues that needs to be further focused on. Thus, this study purposes to reveal the impact mechanism of climate changes on food production resilience based on the panel data of 31 provinces of China from 2000 to 2020, and since analyzing the relationship between climate change and food production. The results show that: first, changes in climate factors, including increases in cumulative temperature and deficit or excess in precipitation, had an inhibitory effect on the

**基金项目:**国家自然科学基金重大项目(72091511);国家自然科学基金一般项目(72273045);国家社会科学基金重大项目(23&ZD121)

**收稿日期:**2023-10-15; **网络出版日期:**2024-06-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 937106872@qq.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

resilience of food production. Second, crop diversity played an important moderating role in this relationship, as evidenced by the fact that the increased crop diversity mitigated the negative effect of increased temperature on food production resilience, but the moderating role in the impacts of rainfall on production resilience was not as pronounced. Third, classification regression of major cereal crops showed that the increase in accumulated temperature had a greater impact on the production resilience of cereal crops and a non-significant effect on the production resilience of bean crops and potato crops, while precipitation deficit or excess had a greater impact on the production resilience of cereal and bean crops and a non-significant effect on the production resilience of potato crops. Precipitation difference analyses indicated that precipitation deficit had a greater negative impact on food production resilience, the impact of excess rainfall on the resilience of food production was less pronounced and excess precipitation mitigated the adverse effects of high temperatures. Furthermore, this study indicates that climate change had a negative impact on both main food-producing areas and non-main food-producing areas; however, the moderating role played by crop diversity was stronger in the non-major grand-producing areas than in major grand-producing areas. With a view to ensure the security of food production, capacity to monitor climate hazards should be upgraded to strengthen the adaptive resilience to climate change, and the degree of crop diversification in different food-producing areas should be selected according to the climatic conditions and soil characteristics to give full play to the regional advantages, different food-producing regions should adopt different safeguard measures, and policy favoring and financial investment in the main food-producing regions should be strengthened to provide a reliable guarantee for food security.

**Key Words:** climate change; cumulative temperature; precipitation; food production resilience; crop diversification

全球粮食市场风险和不确定性的增加,为国内粮食供需平衡保障与粮食支持保护政策体系改革带来前所未有的冲击和压力,筑牢国内粮食稳产保供的能力是增强国家粮食安全战略定力的重要基础<sup>[1]</sup>。粮食生产安全问题与气候变化紧密相关。全球气候变暖的趋势越来越明显,极端天气事件如干旱、洪涝、极端高温和龙卷风频繁发生,气候变化特别是极端气候日益影响粮食生产安全<sup>[2]</sup>。粮食安全当前正面临危机。根据《2021年世界粮食安全和营养状况》报告的估计,由于气候变化、自然灾害和虫害等因素的影响,在2014年到2016年间,全球严重缺乏粮食和营养保障的人口迅速增加,到2020年,全球约有8.11亿人口(约占总人口的1/10)面临食物不足的困境<sup>[3]</sup>。为确保中国粮食生产稳定发展,多年来中央“一号文件”一再强调要将保障粮食稳定增产作为各级政府工作的首要任务。目前,中国的粮食产量保持着稳定增长的趋势,并且国内粮食供需基本平衡<sup>[4]</sup>,但土地和水资源受限、气候变化所导致的自然灾害等因素日益严重,中国粮食生产安全面临着较大的不确定性。中国人口规模巨大、人口增长速度较快,且中国的耕地资源有限,近年来城市化、工业化程度加剧,新常态下中国对粮食生产安全具有更高的要求,粮食安全问题不容忽视<sup>[5]</sup>。

气候变化作为一个重要的外部环境因素,对粮食生产以及农业可持续发展构成了严重威胁。在气候变化不断加剧的条件下,如何提高粮食生产韧性成为了全球农业可持续发展的重要议题,提高粮食生产韧性对于保障粮食安全具有重要意义。韧性意味着粮食作物生产能够适应和应对气候变化、自然灾害和其他不确定性因素带来的冲击,提高粮食生产韧性可以减轻粮食产量波动,提高粮食生产的稳定性和可持续性,有助于保护农民的收入来源,减少贫困和饥饿的发生,促进农村经济发展,维护社会稳定<sup>[6]</sup>。随着农业科学、气象和信息通信的进步,人们采用一系列适应性做法以最大程度地减少气候变化对粮食生产的不利影响。在发展中国家,作物多样化是广泛使用的应对气候变化的事前适应措施之一<sup>[7]</sup>。当前对于气候与粮食生产的研究主要集中在气候变化的整体影响上,对于作物多样性如何调节气候变化对粮食生产的影响尚不明晰。因此,本研究将基于2000—2020年31个省份的面板数据,在探究气候变化与粮食生产韧性关系的基础上,揭示气候变化对粮食生产韧性的影响机制,并进一步讨论提高作物多样化程度对于气候变化对粮食生产韧性影响的调节效应。

现有文献关于粮食生产方面的研究,大多聚焦于粮食生产效率<sup>[8]</sup>、粮食生产要素投入效率<sup>[9]</sup>、粮食安全保障<sup>[10]</sup>等方面,而粮食生产韧性方面的研究较为少见。与以往研究不同,本文聚焦于粮食生产韧性,探究了在面对气候变化时,作物多样化对于提高粮食生产韧性的有效性。研究有效拓展了现有研究框架,为了解农业系统在面临不确定性因素时的适应能力提供了新的视角。与现有研究多得出作物多样性在缓冲气候变化对粮食生产的不利影响方面具有普遍的有效性不同<sup>[11]</sup>,本文发现作物多样性在实践中存在一定的局限性。不同区域具备特定的气候和土壤条件,适宜种植特定类型的作物,且不同作物同样具备不同的适应性和生长特征,在不适合种植某一特定作物的地区过度追求作物多样化,可能会加剧气候变化对粮食生产的不利影响,进而损害粮食生产安全。因此,不同粮食产区在选择适应性措施时应充分考虑当地的环境特点以确保因地制宜。研究结果对于制定可持续的农业发展政策和措施具有重要意义。

## 1 理论分析与研究假设

### 1.1 粮食生产韧性概念定义

韧性的概念来自材料物理学,并在农业和经济学等学科中得到了发展与应用。生态学韧性是生态系统在外部冲击下保持特定状态的能力,或者系统在不丧失功能的情况下可以吸收的最大压力<sup>[12]</sup>。在农业经济学领域,粮食系统的韧性指的是随着时间的推移,在面对各种甚至不可预见的干扰时,能够为所有人提供充足、适当和可获得食物的能力<sup>[13]</sup>。来自 FAO 的最新报告将农业粮食体系韧性定义为农业粮食体系能够抵御任何破坏因素、长期可持续地确保人人能获得并轻松获得充足、安全和营养的食物,并保持农业粮食体系参与者的生计能力<sup>[14]</sup>。总之,韧性是指及时有效地预测、吸收和适应气候变化或变革的能力,而农业系统韧性是指在面对复杂的经济、社会、环境和制度冲击和压力时,通过稳健、适应和可转换的能力,保证提供系统功能的能力<sup>[15]</sup>。部分学者也从抵抗力、适应力和恢复力三个维度对韧性进行了解析<sup>[16]</sup>。

### 1.2 气候变化影响粮食生产韧性

IPCC 2007 年的第四次评估报告表明从 1906 年到 2005 年的 100 年间,全球平均地表温度上升了 0.74℃,北半球高纬度地区气温明显升高。中国年平均气温上升(0.78±0.27)℃,略高于同期全球平均气温<sup>[17]</sup>。有实证研究结果表明中国内陆热带地区、黄淮海平原、华南地区和西北地区等地气温均呈显著升高的趋势<sup>[18]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来,世界粮食生产增长放缓,气候变化将继续影响全球农业和粮食生产。其中,发展中国家更加依赖农业,其土地资源匮乏,缺乏应对冲击的财政资源、技术、基础设施和机构,更容易受到气候冲击的影响<sup>[19]</sup>。在发展中国家,农民经常遭受气候冲击是其农业生产力低下、经济增长缓慢和持续贫困的主要原因之一。有研究发现由玉米生长区域的热胁迫和干旱两个指标组合成的综合压力指数解释了 1980 年至 2010 年期间观测到的全球产量变化的 50%<sup>[20]</sup>。生长季节气候因素(包括平均气候和极端气候)解释了 20%—49% 的产量异常差异<sup>[21]</sup>。李鸣钰等<sup>[22]</sup>的研究发现 1.5℃ 升温背景下中国水稻单产平均减幅 7.49%,减产面积占水稻种植总面积的 68.6%,严重减产面积占水稻种植总面积的 10.3%。Birthal 等<sup>[11]</sup>使用动态面板数据方法评估了降雨不足和热胁迫对印度农业生产力的影响,研究结果表明降雨不足和热胁迫都会损害农业生产力,而且随着其严重程度增加损害程度也会增加。综上,提出以下假说。

H1: 气候变化对粮食生产韧性具有负向影响。

### 1.3 减少气候变化对于粮食生产韧性不利影响的综合办法

农民利用可获得的资源采取适应气候变化的措施来应其对生产风险。风险规避型的农民预计会发生冲击时通常更依赖于事前风险管理策略,例如增加自身储蓄、从事非农业活动以及选择风险较低的作物组合,以实现稳定的收入流。随着负面冲击频发,降低气候变化对于粮食生产的影响、提高粮食生产韧性是一项重要挑战。幸运的是我们可以通过增加作物多样化<sup>[23]</sup>、完善农业补贴政策<sup>[24]</sup>、发展气候智能农业<sup>[25]</sup>等措施提高粮食生产系统抗灾能力,从而降低外部冲击对粮食生产造成的不利影响。其中,作物多样化是农业应对气候变化的一项重要而普遍的事前适应措施,在减轻降雨不足和热胁迫对农业生产力的不利影响方面具有有效

性<sup>[11]</sup>。农业保险补贴则可以促进农业技术进步,引入转基因种子提高农作物品质从而促使生产韧性提高<sup>[26]</sup>。另外,提高灌溉面积有利于降低极端高温天气的负面影响<sup>[27]</sup>,且节水灌溉设施对主要粮食作物小麦、玉米和水稻的全要素生产率均有显著提升作用<sup>[28]</sup>。

#### 1.4 作物多样性减轻气候变化对于粮食生产韧性的影响

有研究发现 2002—2009 年大多数欧洲国家农民田间小麦作物多样性下降导致应对气候变化反应多样性下降,特别对于短期强降水缺乏积极反应<sup>[15]</sup>。农业生态系统在受到严重干旱或降雨量大幅度减少时仍然需要提供粮食生产等重要服务,农业系统中作物生物多样性可以应对环境压力,帮助系统提升恢复力。Birthal 等<sup>[11]</sup>的研究评估了作物多样化在减轻降雨不足和热胁迫对印度农业生产力的不利影响方面的有效性,研究结果表明作物多样化是应对气候冲击的一项重要事前适应措施,适应效益在应对严重冲击和长期冲击时更为明显。作物多样化可通过提高抑制虫害暴发和抑制病原体传播的能力提高农业抗灾能力<sup>[23]</sup>。增加有效作物多样性是应对气候冲击这一挑战的一种有效方式。基于此,提出以下假说。

H2:作物多样化可以削弱气候变化对粮食生产韧性的不利影响。

联合国粮农组织的发布《气候变化对植物病虫害影响的科学综述》显示,气候变暖使得对重要经济作物产生破坏性的植物害虫呈现出愈发严重的态势,其扩散趋势将对粮食生产安全构成威胁,而作物种类多样化,尤其是通过引入多年生作物品种,可抑制农业种植系统中节肢动物害虫的扩散,从而抑制病虫害<sup>[29]</sup>。气候变化直接作用于生态系统,气温上升影响土壤微生物多样性,改变土壤理化性质从而破坏土壤生态环境<sup>[30]</sup>,作物多样性通过提高土壤碳、氮和微生物量来改善土壤的结构和质量,从而提高土壤的保水能力和抗旱能力<sup>[31]</sup>。基于此,提出假说 H2a。

H2a:作物多样化可以削弱积温上升对粮食生产韧性的不利影响。

气候变化引起降雨异常,粮食生产的水分条件无法得到保障,造成粮食减产<sup>[32]</sup>。降雨减少将导致土壤湿度下降,抑制作物生长和微生物活动<sup>[33]</sup>,作物多样性通过增加土壤碳、氮和微生物量来改善土壤结构和质量,进而提高土壤的保水能力和抵抗干旱的能力<sup>[31]</sup>。过度降雨会导致作物受淹,从而对粮食产量造成减损<sup>[34]</sup>,作物多样性可以引入适应性强的作物品种,特别是耐湿或抗水涝能力较强的品种,可以在极端降水情况下更有效地利用水资源<sup>[35]</sup>。基于此,提出假说 H2b。

H2b:作物多样化可以削弱降雨亏损或过量对粮食生产韧性的不利影响。

## 2 研究设计

### 2.1 模型构建

#### 2.1.1 基本模型

在全球气候变暖以及极端天气频发的背景下,气候变化对粮食生产韧性造成了重要影响。了解和评估气候冲击对粮食生产韧性的影响是当今重要的研究议题。本文关注气候变化对粮食生产韧性的影响,旨在深入探究如何减少气候变化对粮食生产韧性的不利影响。粮食生产与自然条件(气候等)、人类行为(灌溉、施用化肥等)和经济信号(农业投入等)相关<sup>[36-37]</sup>,因此,除了本文实证研究所关注的气候变化要素外,还必须控制既与气候相关,又影响粮食生产韧性的内生因素,以避免遗漏变量偏误<sup>[38]</sup>。为验证假说 H1,本文借鉴现有文献的变量设定<sup>[39]</sup>,构建实证分析模型如式(1)所示:

$$\text{Resilience}_{it} = A + \alpha_1 |RD|_{it} + \alpha_2 AD_{it} + \theta X_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中, $i$ 代表地区, $t$ 代表时间, $u_i$ 是地区固定效应, $v_t$ 是时间固定效应, $\varepsilon_{it}$ 是随机扰动项, $\text{Resilience}_{it}$ 表示 $t$ 时期 $i$ 地区的粮食生产韧性, $|RD|_{it}$ 为 $t$ 时期 $i$ 地区的降雨压力指数的绝对值, $AD_{it}$ 表示 $t$ 时期 $i$ 地区的年平均积温, $X_{it}$ 为一系列控制变量。

#### 2.1.2 调节效应模型

根据前文理论分析,气候冲击、作物多样性与粮食生产韧性之间存在多重作用关系,为更深入探讨作物多

样性在气候变化影响粮食生产韧性过程中的调节作用,借鉴现有文献的调节效应模型设定<sup>[40]</sup>,引入作物多样性指数  $SID_{it}$  以及交乘项  $|RD|_{it} \times SID_{it}$ 、 $AD_{it} \times SID_{it}$ ,通过引入气候变化变量与作物多样性的交乘项,可以定量评估作物多样化的调节效应,揭示其在减轻气候变化对粮食生产的不利影响方面的有效性。验证假说 H2 的具体模型设定如式(2)所示。

$$\text{Resilience}_{it} = B + \beta_1 |RD|_{it} + \beta_2 AD_{it} + \beta_3 SID_{it} + \beta_3 |RD|_{it} \times SID_{it} + \beta_4 AD_{it} \times SID_{it} + \gamma X_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中,  $SID_{it}$  表示  $t$  时期  $i$  地区的作物多样性指数。

## 2.2 变量定义与说明

### 2.2.1 被解释变量

被解释变量为粮食生产韧性。依据韧性相关理论及其定义,可以将粮食生产韧性定义为:粮食生产在受到外部扰动与冲击后,通过抵抗、适应、恢复或变革以维持其生产功能的能力。本文基于气候对于粮食生产影响的角度,主要聚焦于韧性的抵抗能力。计算方法如下:将中国各省份历年粮食生产数据进行平滑化处理  $P_i = \text{lowess}(p_i)$ <sup>[41]</sup>,通过对历年粮食产量数据进行平滑化处理,可以减少因季节性、气候变化等因素导致的波动,更好地反应粮食生产长期趋势的变化;在刘晓星等<sup>[42]</sup>方法基础上,构建如下反映粮食生产韧性的指标:计算实际粮食产量数据  $p_i$  与平滑化后的粮食产量数据  $P_i$  的比值得出粮食生产韧性:  $\text{Resilience} = p_i/P_i$ 。将实际粮食产量数据与平滑化后的粮食产量数据进行比值计算,可以评估粮食生产的韧性。比值接近 1 或大于 1,表明粮食生产具有较好的韧性;比值偏离小于 1,则说明实际产量可能存在较大的风险,粮食生产韧性较差。

### 2.2.2 核心解释变量

气候变化为核心解释变量,选取年平均积温 ( $AD$ )<sup>[40]</sup>、降雨压力指数 ( $RD$ )<sup>[11]</sup> 作为气候变化的衡量因子。

已有研究衡量气温的指标主要包括年平均气温<sup>[43]</sup>、高温日天数<sup>[11]</sup>等,这些指标较为直观且能反映整体气温情况,但在反映气温变化趋势、作物生长等方面具有局限性,无法提供温度积累信息。积温多在农业气候研究中运用,本文聚焦于粮食生产,使用积温作为衡量气温的指标,能够从强度和作用时间两个方面表示温度对生物有机体生长发育的影响。积温表示某一段时间内逐日平均气温  $\geq 10^\circ\text{C}$  持续期间日平均气温的总和,即活动温度总和。在数据处理中,首先对各个省份的主要城市气象站点逐日气温数据进行逐月处理,计算得出月均积温,其次根据月均积温计算得出年均积温。实证分析模型估计积温变量对粮食生产韧性的影响,通过积温的边际影响,间接建立起对应的气温水平与粮食生产韧性之间的映射关系。

已有研究衡量降雨的指标主要包括年降雨量<sup>[43]</sup>、标准化降水蒸散指数<sup>[20]</sup>等指标,这些指标具有较强的直观性,可以反映一年内降水的总量和频次,有助于评估降水的一般水平和趋势,但没有考虑降雨量与长期平均值之间的关系。这意味着即使降雨略高于或低于长期平均水平,也无法得知是否出现了极端降雨情况。降雨压力指数为年降雨量与其该省份降雨量长期平均值的标准偏差,使用降雨压力指数作为衡量降雨量的指标,在时间和空间上更具有可比性,可以更全面地反映降雨异常情况。对于每个省份  $i$ ,我们从年降雨量中减去去年降雨量的长期平均值,然后除以其标准差:  $RD_{it} = (\text{RAIN}_{it} - \overline{\text{RAIN}_{it}}) / \sqrt{E[\text{RAIN}_{it} - \overline{\text{RAIN}_{it}}]^2}$ 。为衡量省份降雨量平均偏离程度,我们对降雨压力指数取绝对值 ( $|RD|$ ),该值越大,地区出现降雨亏损或降雨过量的程度越严重。

### 2.2.3 调节变量

作物多样化作为调节变量。使用辛普森多样化指数 ( $SID$ )<sup>[11]</sup> 来衡量粮食种植的多样化程度,主要考察了稻谷、小麦、玉米、高粱、豆类(大豆)、薯类(马铃薯、甘薯、木薯)八类农作物,该指数考虑了生产组合中作物的数量及其相对份额。具体可以表示为  $SID = 1 - \sum s_i^2$ 。其中,  $s_i$  是作物  $i$  在总种植面积中的面积份额。辛普

森多样化指数以 0 和 1 为界;0 表示完全专业化,1 表示完全多样化。SID 的值可以直观地解释作物多样性。SID 的结果在 0 到 1 之间变化,可以直观地表示粮食种植的多样性水平。越接近 1,意味着作物的分布更加均匀,多样性程度越高。这种标准化的结果使得不同地区或不同时间段的粮食种植多样性可以进行比较和对比分析。SID 将物种丰度作为权重因素,更多关注丰度较高的物种,常见和主要作物更加能够反映地区的作物多样性情况。

#### 2.2.4 控制变量

借鉴已有研究<sup>[44]</sup>,文章考虑了一系列可能影响粮食生产韧性或与之相关的特征变量,以此缓解遗漏变量带来的内生性问题。包括了有效灌溉面积、化肥施用量、农业从业人口数、农用机械总动力、涉农支出金额。各变量具体定义见表 1。

表 1 变量描述性统计及说明

Table 1 Descriptive statistics and description of variables

变量类型 Variable type	变量名称 Variable name	均值 Average value	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	变量说明 Description of variables
被解释变量 Implicit variable	Resilience	0.99	0.06	0.75	1.11	粮食生产韧性
解释变量 Independent variable	RD	0.80	0.61	0.01	2.53	降雨压力指数的绝对值
调节变量 Moderator variable	AD	13.35	4.64	4.20	24.88	年平均积温
控制变量 Control variable	SID	0.62	0.18	0.09	0.96	作物多样性指数
	Irrigation	7.16	1.04	4.96	8.61	有效灌溉面积(千公顷)的对数值
	Fertilizer	4.64	1.21	1.48	6.53	化肥施用量(万吨)的对数值
	Labour	6.37	1.13	3.09	8.01	农业从业人口(万人)的对数值
	Tractors	7.43	1.11	4.58	9.36	农用机械总动力(万千瓦)的对数值
	Investment	3.66	1.07	0.80	5.53	涉农支出金额(亿元)的对数值

Resilience:粮食生产韧性 Food production resilience; RD:降雨压力指数 Rainfall's standardized deviation; AD:年平均积温 Average annual cumulative temperature; SID:作物多样性指数 Simpson index of diversification; Irrigation:有效灌溉面积 Effective irrigation area; Fertilizer:化肥施用量 Fertilizer application rate; Labor:农业从业人口 Agricultural labour force; Tractors:农用机械总动力 total tractor power in agriculture; Investment:涉农支出金额 Agricultural investment amount

### 2.3 数据来源与处理

基于数据的可获得性和确保样本的合理性,本文使用 2000—2020 年我国 31 个省级行政单位的平衡面板数据作为研究样本进行实证分析。2000 年以前各个省份的降雨数据存在缺失和不完整的情况,且降雨与气候因素、地理位置和地形等因素密切相关,在时间和空间上表现出较大的变异性,不同地区以及不同年份的降雨分布存在明显差异,自行补全数据可能对研究的可靠性和可解释性产生影响。选择 2000 年作为起始年份,提升了数据的准确性和可比性,为进行跨区域和跨年度的比较研究提供了较为稳定和可靠的数据基础。限于数据可得性等原因,研究未涉及香港、澳门和台湾地区。数据主要来源于《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《中国人口与就业统计年鉴》以及各省统计年鉴、中国国家统计局、国家气象科学数据共享服务平台等。部分缺失数据使用线性插值和 ARIMA 模型方法进行补全。为消除极端值对结果的过度影响,并提高模型的稳定性和可靠性,对变量数据进行了 1% 和 99% 的缩尾。

## 3 实证分析

### 3.1 现状分析

#### 3.1.1 粮食生产韧性变化趋势

通过对粮食生产韧性数据处理,得到 2000—2020 年粮食生产韧性趋势(图 1)。由图 1 可得,2000—2020 年全国、粮食主产区以及非粮食主产区的粮食生产韧性指数均在 0.85—1.05 之间浮动。总体上看,全国粮食

生产韧性指数变动相对平缓,整体呈现上升趋势,原因可能是农业生产部门适应性做法的改善、农业技术进步提高了农作物对气候变化和环境压力的适应性。全国以及两大粮食产区均在 2003 年出现较为明显的低峰值,原因可能是当年我国受到了严重旱灾的影响。两大粮食生产区总体趋势大致相同,整体都呈现上升趋势。其中主产区相对于非主产区粮食生产韧性波动较大,上升幅度较为明显。相比非粮食主产区,粮食主产区通常具有种植结构更加单一、地理条件更加优越、农业发展水平更加先进的特点。在面临日益加剧的气候变化时,粮食主产区种植结构的单一化可能导致粮食生产韧性波动更大。与此同时,粮食主产区通常拥有适宜作物生长的地理条件,农业技术进步发展较为迅速,这使得其相对于非粮食主产区的粮食生产韧性上升幅度也较为明显。

### 3.1.2 气候变化发展趋势

通过对两大气候因子进行数据整理,得到 2000—2020 年全国气候变化趋势(图 2)。由图 2 所示,全国降雨压力指数的绝对值波动较为明显,在 2001、2003、2011、2016 年均出现高峰值,说明这些年份降雨量严重偏离长期降雨平均水平,出现降雨亏损或过多的情况。全国年均积温在 13—14℃ 区间内浮动,总体呈现上升趋势变化,在 2006、2014、2016、2018 年出现四个较为明显的年均积温高峰值,在 2003、2011 年出现两个低峰。2000—2020 年全国气候变化的主要特征是积温呈现上升趋势变化,降雨变化极为不稳定。气温上升是气候变化最直接的特征,这为农作物熟制北移、冬季冻害减轻带来有利影响<sup>[45]</sup>,但同时会加剧干旱、影响农作物品质、引发病虫害、导致极端天气增加,对粮食生产造成威胁。

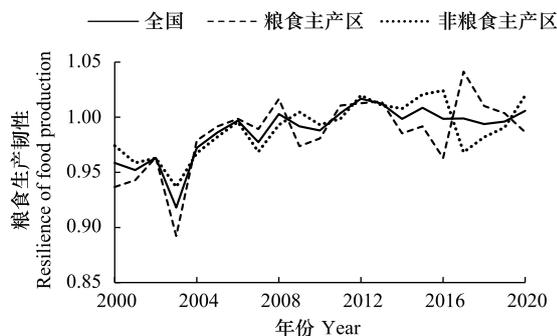


图 1 2000—2020 年粮食生产韧性变化趋势

Fig.1 Trends in food production resilience, 2000—2020

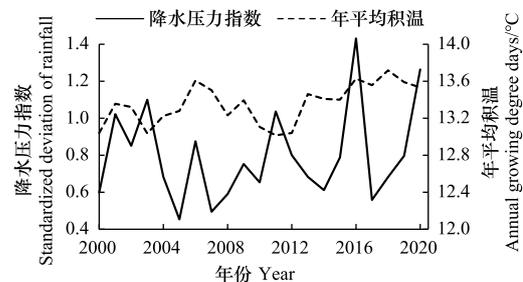


图 2 2000—2020 年全国气候变化趋势

Fig.2 National climate trends, 2000—2020

### 3.2 基准回归结果分析

通过数据分析得到基准回归结果(表 2)。表 2 中,模型 1 表示在固定效应模型中,以粮食生产韧性为被解释变量,以积温和降雨压力指数的绝对值作为被解释变量并且不引入其他控制变量的回归结果;模型 2 在模型 1 的基础上引入了农业生产要素控制变量。表 2 显示,在控制地区固定效应和时间固定效应以及加入其他控制变量的基础上,核心解释变量积温和降雨压力指数的绝对值在 1% 的显著性水平上对粮食生产韧性具有抑制作用。表明气候变化两大因子对粮食生产韧性具有显著的负向影响。假说 H1 得到验证。气温上升会导致土壤水分迅速蒸发和作物的蒸腾作用加强,从而使水分的消耗加剧。气温过高时,土壤中的水分无法满足作物的需求,导致作物生长受限,产量下降<sup>[46]</sup>。积温上升可能对作物的生理代谢过程产生负面影响。高温会加速作物的生长速度,缩短粮食作物正常的生长周期,减少光合作用效率和养分吸收能力,导致作物产量下降。高温有助于病虫害的滋生和传播,较高的气温可以促进昆虫的繁殖和生长,有利于病原体的繁殖和扩散,增加了作物受到病虫害侵袭的风险,从而损害粮食生产韧性;降雨亏损意味着土壤中的含水量减少,作物的水分供应不足。缺乏足够的水分会导致作物生长受限,影响其发育、养分吸收和产量。特别是在关键生育阶段(如开花、结实等),水分不足可能导致作物减产甚至死亡。降雨过多则容易造成洪涝、地质等灾害,降雨过多可能引发土壤侵蚀,暴雨和强降雨会冲刷土壤表层,并带走其中的养分和有机质减少土壤的肥力,影响了

作物的产量和质量。降水不规律性增加灾害发生的可能性,从而威胁粮食生产韧性。

控制变量中,涉农支出对于粮食生产有显著的正向影响,说明涉农投资可能用于农业技术的引进和推广、农业基础设施改善等,从而促进粮食生产韧性的提高。农用机械总动力对粮食生产韧性有显著负向影响,说明可能存在技术效率问题以及农业结构调整,随着农业现代化的推进,农业结构发生变化,可能出现农村劳动力外流和农田撂荒等情况,导致农用机械的使用过剩。有效灌溉面积、化肥施用量、农业从业人口数对粮食生产韧性的影响不显著,可能有以下原因。近年来我国万亩以上的灌溉区数有明显的增长,但我国灌溉设施多建于改革开放之前,灌溉设施老旧使得灌溉系统的使用效率低下,因此,灌溉面积的增加并未带来显著的粮食生产韧性增长。如果土壤质量较差或存在土壤侵蚀等问题,增加化肥的施用量可能无法改善土壤结构和肥力,且随着环境意识的提高,许多地区已经采取了减少化肥使用的措施,从而限制了其对粮食生产韧性的影响。劳动力的技术水平较为低下以及技术进步可能削弱了农业从业人口数量对于粮食生产韧性的影响。

表 2 基准回归结果

Table 2 Benchmark regression results

模型 Model	模型 1 Model1		模型 2 Model2	
	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
AD	-0.0149 **	0.0063	-0.0165 ***	0.0063
RD	-0.0136 ***	0.0035	-0.0128 ***	0.0035
Irrigation			0.0169	0.0227
Fertilizer			0.0032	0.0202
Labour			-0.0029	0.0160
Tractors			-0.0366 ***	0.0127
Investment			0.0287 ***	0.0105
常数项 Constant term	1.1607 ***	0.0832	1.2716 ***	0.1640
控制变量 Control variable	不引入		引入	
时间固定效应 Time fixed effect			控制	
地区固定效应 Area fixed effect			控制	
观测值数 Number of observations	651		651	
R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> value	0.2090		0.2337	

\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平;各回归中时间固定效应和地区固定效应均已控制

### 3.3 稳健性检验

#### 3.3.1 遗漏变量偏误

借鉴王伟同等<sup>[47]</sup>的做法,利用可观测变量度量未观测变量带来偏误的可能性,对遗漏变量导致的内生性问题做进一步分析。首先,构建模型 3 与模型 5 两个受约束模型。模型 3 只引入解释变量,即积温和降雨压力指数的绝对值两大气候因子。考虑到有效灌溉面积(Irrigation)、农业机械总动力(Tractors)这两个变量直接作用于提高粮食生产韧性的有效性,模型 5 引入有效灌溉面积变量和农业机械总动力变量,从而得到两个受约束模型下气候因子的估计系数 $\beta_m$ 。其次,构造两个完整模型,即在模型 3 和模型 5 的基础上引入其他控制变量得到模型 4 和模型 6,两个完整模型下气候因子的估计系数为 $\beta_n$ 。最后,计算变动系数 $\varepsilon = |\beta_n / (\beta_m - \beta_n)|$ 。 $\varepsilon$  越大,越可以间接表明遗漏变量影响核心解释变量参数估计值的可能性越小。检验结果见表 3。积温和降雨的变动系数远大于 1,表明由未观测变量造成估计偏误的可能性很小,可以基本排除估计结果因遗漏变量而出现估计偏误的可能。

#### 3.3.2 更换被解释变量衡量方法

将被解释变量粮食生产韧性(Resilience)根据最小阈值 1 归类为具有韧性或不具有韧性,进一步转化为二分变量。具体而言,如果 t 时期省份 i 的粮食生产韧性大于或等于 1,则归类为具有韧性,取值为 1;粮食生产韧性小于 1,则归类为不具有韧性,取值为 0。进一步用 Probit 模型进行回归分析,以验证结论的稳健性。

回归结果如表 4 所示。模型 7 表示更换了粮食生产韧性衡量方法后的回归结果。在控制地区固定效应和时间固定效应以及加入其他控制变量的基础上,核心解释变量积温的系数在 5%的水平上显著为负,表明积温上升不利于粮食生产韧性的增长;降雨压力指数的绝对值在 1%的水平上显著为负,表明降雨亏损或降雨过多不利于粮食生产韧性的增长。综上可得研究结论具有稳健性,气候变化对粮食生产韧性具有显著的负向影响。

表 3 遗漏变量偏误

Table3 Omitted variable bias

模型 Model	模型 3 Model3		模型 4 Model4		模型 5 Model5		模型 6 Model6	
	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
AD	-0.0149 **	0.0063	-0.0167 ***	0.0063	-0.0157 **	0.0063	-0.0165 ***	0.0063
RD	-0.0136 ***	0.0035	-0.0135 ***	0.0035	-0.0130 ***	0.0035	-0.0128 ***	0.0035
Irrigation Tractors	不引入		不引入		引入		引入	
其他控制变量 Other control variables	不引入		引入		不引入		引入	
变动系数 Variation coefficient								
AD			9.28				20.63	
RD			135				64	

\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 1%、5%、10%的显著性水平;各回归中时间固定效应和地区固定效应均已控制

表 4 更换被解释变量衡量方法

Table4 Replacement of dependent variable's measurement method

模型 Model	模型 7 Model 7		模型 Model	模型 7 Model 7	
	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error		回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
AD	-0.3943 **	0.1731	Investment	0.3457	0.2941
RD	-0.3060 ***	0.0989	常数项 Constant term	5.1958	3.9696
Irrigation	0.6887	0.6278	地区固定效应 Area fixed effect	控制	
Fertilizer	0.4407	0.5509	时间固定效应 Time fixed effect	控制	
Labour	-0.5157	0.4358	观测值数 Number of observations	651	
Tractors	-0.5902 *	0.3482	Pseudo R <sup>2</sup> 值 Pseudo R <sup>2</sup> value	0.1383	

\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 1%、5%、10%的显著性水平;各回归中时间固定效应和地区固定效应均已控制

### 3.3.3 替换核心解释变量

气候变化将导致极端气候的发生,选取极端气候相关变量作为气候变化的衡量因子重新进行回归,以验证回归结论的稳健性。极端气候包括极端降雨和极端高温。选取一系列关键阈值相关的指标衡量极端降雨和极端高温。极端降雨变量用干旱天数(DSD)、潮湿天数(WSD)衡量,极端高温用高温天数(HSD)衡量。对于给定年份,干旱天数为日降雨量小于历年每日降雨量分布的第 5 百分位数的天数总和,潮湿天数为日降雨量大于历年每日降雨量分布的第 95 百分位数的天数总和,高温天数为日温度值大于历年每日温度分布的第 95 百分位数的天数总和。回归结果如表 5 所示。模型 8 表示替换核心解释变量的回归结果。干旱天数在 5%的水平上显著为负,说明降雨亏损不利于粮食生产韧性的增长。高温天数在 1%的水平上显著为负,表明高温不利于粮食生产韧性的增长。潮湿天数即降雨过多对于粮食生产韧性的影响并不明显。综上仍然可得气候变化对粮食生产韧性具有显著的负向影响,但降雨亏损和降雨过多对粮食生产韧性的影响存在差异性,本文将在后续讨论中进一步进行降雨差异分析。

表 5 替换核心解释变量

Table 5 Replacement of core explanatory variables

模型 Model	模型 8 Model 8		模型 Model	模型 8 Model 8	
	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error		回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
DSD	-0.0007 **	0.0003	Investment	0.0269 ***	0.0039
WSD	0.0014	0.0009	常数项 Constant term	1.0883 ***	0.1366
HSD	-0.0009 ***	0.0002	地区固定效应 Area fixed effect		控制
Irrigation	-0.0048	0.0212	时间固定效应 Time fixed effect		控制
Fertilizer	0.0359 *	0.0191	观测值数 Number of observations		651
Labour	-0.0098	0.0159	R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> value		0.1685
Tractors	-0.0330 ***	0.0126			

DSD: 干旱天数 Drought days; WSD: 潮湿天数 Wet days; HSD: 高温天数 High temperature days; \*\*\*, \*\*, \* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平; 各回归中时间固定效应和地区固定效应均已控制

### 3.4 作物多样性的调节效应

通过数据分析得到作物多样性的调节效应结果(表 6)。模型 9 表示在基准回归中加入了作物多样性变量以及气候变化变量与作物多样性变量交乘项的回归结果。表 6 显示,年平均积温和降雨压力指数的绝对值对粮食生产韧性的主效应系数皆显著为负,作物多样性与积温的交互项系数在 5% 的水平下显著为正,说明作物多样性作为调节变量,显著削弱了积温上升对粮食生产韧性的负向影响,假说 H2a 成立。但作物多样性与降雨压力指数绝对值的交互项系数不显著,假说 H2b 未得到验证。假说 H2 总体上得到验证。作物多样性能够减轻气候灾害对粮食生产的冲击,确保粮食生产安全。作物多样性与降雨交互项系数不显著,可能有以下原因:一方面,近年来全国降雨现状呈现不规律的变动趋势。有研究显示,当降雨量减少 20% 时,任何提升粮食作物产量的技术都会失效<sup>[48]</sup>。可见,作物多样性对缓解降雨造成的负面影响是相对的。另一方面,灌溉设施的早期建设和工程设施的损坏,以及地下水保护计划的实施,导致了严重的机井报废问题。这些因素削弱了灌溉技术在调节不稳定降水方面的作用。

表 6 作物多样性调节效应结果

Table 6 Regulatory effects of crop diversity

模型 Model	模型 9 Model 9		模型 Model	模型 9 Model 9	
	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error		回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
AD	-0.0151 **	0.0062	Tractors	-0.0387 ***	0.0125
RD	-0.0131 ***	0.0035	Investment	0.0192 *	0.0105
SID	0.1142 ***	0.0280	常数项 Constant term	1.2728 ***	0.1617
SID×AD	0.0121 **	0.0053	时间固定效应 Time fixed effect		控制
SID× RD	-0.0259	0.0199	地区固定效应 Area fixed effect		控制
Irrigation	0.0095	0.0226	观测值数 Number of observations		651
Fertilizer	0.0017	0.0199	R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> value		0.2651
Labour	-0.0033	0.0158			

\*\*\*, \*\*, \* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平; 各回归中时间固定效应和地区固定效应均已控制

### 3.5 主要粮食作物差异分析

不同粮食作物对气候变化的适应能力不同,气候变化对粮食作物的影响是多样化的。为了进一步探究气候变化对于粮食生产韧性的影响效应,我们将粮食作物细分为谷物、豆类、薯类三大主要粮食作物,分别进行数据分析得到相应回归结果(表 7)。表 7 显示,在控制地区固定效应和时间固定效应以及加入其他控制变量的基础上,核心解释变量积温在 10% 的显著性水平上对谷物生产韧性具有抑制作用,对豆类和薯类作物生产

韧性抑制作用不明显。降雨压力指数的绝对值在 1% 的显著性水平上对谷物生产韧性具有抑制作用,在 10% 的显著性水平上对豆类生产韧性具有抑制作用,对薯类作物生产韧性抑制作用不明显。积温上升对谷物作物影响较大,主要原因是谷物作物,如小麦、稻谷等作物,多生长在较低纬度地区,需要充足的光照时间来完成生长和发育,而积温上升会导致其光合作用受限。豆类和薯类对积温上升的适应能力较强,主要原因为豆类作物如大豆、豇豆等对积温上升具有生长适应性,在较高温度下仍然能够正常进行光合作用和其他生理代谢活动,且豆类作物的根系分布一般较为发达,能够更好地吸收土壤中的水分和养分,从而在干旱条件下保持相对稳定的生长,薯类作物如马铃薯等具有地下块茎或块根,这些地下器官在积温上升时能够提供一定程度的保护。降雨亏损或过多对谷物作物以及豆类作物均具有负向影响,且降雨对谷类作物的影响小于豆类作物,可能有以下原因:相较于谷类作物,豆类植物通常需要更多的水分来维持其生长和代谢,且豆类植物的根系较为浅表,容易受到降雨亏损或过多的影响,而谷类植物的根系则更深入土壤,更能够利用土壤中的水分和养分。而薯类作物的块茎和根系结构具有较大的储水能力,可以储存充足的水分供植株生长和发育,在干旱条件下能够有效吸收土壤中的水分和养分,具有更强的耐旱能力,因此降雨对薯类作物生产韧性影响较为不明显。

表 7 主要粮食作物分类回归结果

Table 7 Classification regressions for major food crops

作物类型 Type of crop	谷物 Cereals		豆类 Beans		薯类 Potatoes	
	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
AD	-0.0114 *	0.0062	-0.0158	0.0155	-0.0191	0.0405
RD	-0.0099 ***	0.0035	-0.0147 *	0.0087	-0.0082	0.0227
Irrigation	0.0174	0.0225	0.1036 *	0.0559	-0.1788	0.1458
Fertilizer	-0.0067	0.0200	-0.0544	0.0498	0.2769 **	0.1299
Labour	-0.0191	0.0159	0.0409	0.0395	-0.1744 *	0.1030
Tractors	-0.0065	0.0126	-0.0186	0.0314	-0.0832	0.0817
Investment	0.0091	0.0104	0.0055	0.0260	-0.0141	0.0677
常数项 Constant term	1.2185 ***	0.1625	0.5630	0.4043	3.0252 ***	1.0543
时间固定效应 Time fixed effect				控制		
地区固定效应 Area fixed effect				控制		
观测值数 Number of observations		651		651		651
R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> value		0.1420		0.1202		0.0572

\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平;各回归中时间固定效应和地区固定效应均已控制

### 3.6 降雨差异分析

进一步区分降雨对粮食生产韧性的影响,对降雨亏损以及降雨过量的情况进行分类回归(表 8)。表 8 显示,在降雨亏损的条件下,气候变化变量系数皆显著为负,而在降雨过量的条件下,气候变化变量对粮食生产韧性的影响较为不明显。降雨亏损对粮食生产的影响相对较大。降雨过少可能导致干旱,对农作物的生长和发育会造成严重影响<sup>[49]</sup>。首先,干旱影响作物营养吸收和养分转运等关键生理过程。其次,干旱还会导致土地退化和土壤侵蚀,进一步降低土地的肥力。此外,干旱也会对灌溉系统和水稻等需要大量水分的作物种植造成挑战。相比之下,降雨过多对粮食生产的影响相对较小。虽然强降雨可能引发洪涝灾害,造成农作物受损和田地被淹,但这类事件在特定地区和季节发生,并不普遍。此外,适度的降雨有助于提供农作物所需的水分和满足生长需要。总体而言,降雨过少对我国的粮食生产韧性影响更大,因此需要采取有效的水资源管理、灌溉技术改进和研发抗旱农作物等措施来应对干旱问题,确保粮食生产安全。

在我国降雨过多的地区,高温对粮食生产影响较小,主要原因为降雨过多可以提供充足的水源供应,高温天气会导致土壤水分的蒸发加快,地区降雨过多使得土壤中的水分含量较高,在高温条件下作物仍能从土壤中获得足够的水分来维持生长和发育。高温天气会引起土壤表面的水分迅速蒸发,但在降雨过多的地区,大

部分多余的降雨会通过地下水补给、河流或湖泊的排泄等方式排出,从而保持土壤中水分的供应,有利于作物抵御高温环境下的胁迫。

作物多样性的调节作用具有差异性。表 8 显示,作物多样化仅能缓解降雨亏损的地区高温对于粮食生产韧性的不利影响。因此,作物多样化在应对气候变化并非是万能的,还需考虑区域的土壤条件、气候特点等因素,针对性地采取综合治理措施。

表 8 降雨差异分析

Table 8 Analysis of precipitation variability

降雨类型 Type of precipitation	降雨亏损 Precipitation deficit				降雨过多 Excessive precipitation			
	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
AD	-0.0322 ***	0.0107	-0.0273 **	0.0106	0.0085	0.0085	0.0076	0.0084
RD	-0.0326 ***	0.0059	-0.0311 ***	0.0059	0.0004	0.0045	-0.0004	0.0045
SID			0.1107 ***	0.0381			0.0660	0.0594
SID×AD			0.0146 *	0.0082			0.0115	0.0085
SID× RD			-0.0449	0.0317			0.0330	0.0253
Irrigation	-0.0094	0.0352	-0.0120	0.0356	0.0351	0.0349	0.0311	0.0346
Fertilizer	-0.0030	0.0340	-0.0050	0.0334	-0.0028	0.0261	0.0029	0.0260
Labour	0.0093	0.0245	0.0081	0.0240	-0.0389 *	0.0230	-0.0478 **	0.0235
Tractors	-0.0182	0.0229	-0.0220	0.0226	-0.0331 **	0.0165	-0.0360 **	0.0165
Investment	0.0227	0.0160	0.0127	0.0160	0.0021	0.0174	-0.0083	0.0177
常数项 Constant term	1.4896 ***	0.2739	1.4371 ***	0.2723	1.1438 ***	0.2233	1.2102 ***	0.2269
时间固定效应 Time fixed effect					控制			
地区固定效应 Area fixed effect					控制			
观测值数 Number of observations		339		339		312		312
R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> value		0.2855		0.3178		0.3409		0.3632

\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平;各回归中时间固定效应和地区固定效应均已控制

### 3.7 地区差异分析

上述研究已表明气候变化两大因子会显著降低粮食生产韧性,作物多样性会削弱这种抑制作用。在此基础上,将研究区域细分为粮食主产区与非粮食主产区,进一步探讨气候变化对不同区域粮食生产韧性影响以及作物多样性调节作用的差异。其中,粮食主产区为黑龙江、河南、山东、四川、江苏、河北、吉林、安徽、湖南、湖北、内蒙古、江西、辽宁等十三个省份。

表 9 显示,降雨压力指数的绝对值对粮食主产区的粮食生产韧性在 1% 的显著性水平上具有负向影响,年平均积温对粮食主产区粮食生产韧性的系数为负数,但不显著;主要原因为我国核心粮食主产区如黑龙江省、辽宁省、河北省、山东省、河南省,内蒙古自治区主要集中于气温较低的北方地区,高温对其粮食生产韧性的影响并不明显。降雨压力指数的绝对值对非粮食主产区的粮食生产韧性在 5% 的显著性水平上具有负向影响,年平均积温对非粮食主产区的粮食生产韧性在 1% 的显著性水平上具有负向影响。

作物多样性的调节作用在不同区域体现出了差异性。表 9 显示,作物多样性的调节作用主要体现在削弱了积温对粮食生产韧性的负向影响,在降雨的影响调节方面不明显。非粮食主产区积温对粮食生产韧性影响的主效应系数显著为负,积温与作物多样性的交互项系数在 1% 的水平上显著为正,表明作物多样性显著削弱了非粮食主产区积温对粮食生产韧性的抑制作用。粮食主产区的调节作用并不显著。可能的原因如下:一方面,粮食主产区通常有特定的气候和土壤条件,适合某些特定作物的种植。在特定地域内,可能只有几种作

物适应当地的环境,其他作物的生长受限。因此,即使进行作物多样化种植,也无法充分利用不同地域的潜力来缓冲气候变化。另一方面,不同的作物有不同的适应性和生长特点。在作物分区位种植时,通常会依据作物的生态要求和市场需求来选择种植适宜作物的地区。这种区域分工使得不同地区专注于种植特定的作物,但也带来了对单一作物的过度依赖。当气候变化发生时,如果主产区的作物受到影响,其他地区种植的作物无法弥补供应缺口。综上所述,地域限制和作物分区位种植是导致主产区作物多样化无法有效缓冲气候变化的主要原因。为了增强粮食生产韧性,需要探索更加适应气候变化的作物品种以及培育适应各地气候条件的新作物。

表 9 地区差异分析

Table 9 Analysis of regional differences

粮食产区类型 Type of grain-producing region	粮食主产区 Major grain-producing region				非粮食主产区 Non-major grain-producing region			
	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
AD	-0.0146	0.0091	-0.0067	0.0090	-0.0227 ***	0.0085	-0.0217 ***	0.0083
RD	-0.0132 ***	0.0044	-0.0120 ***	0.0043	-0.0116 **	0.0052	-0.0115 **	0.0052
SID			0.1697 **	0.0684			0.0261	0.0475
SID×AD			-0.0140	0.0128			0.0232 ***	0.0078
SID× RD			-0.0114	0.0240			-0.0374	0.0302
Irrigation	0.0422	0.0292	0.0112	0.0291	0.0023	0.0340	0.0022	0.0334
Fertilizer	-0.0053	0.0302	0.0116	0.0297	0.0082	0.0257	0.0116	0.0255
Labour	0.0096	0.0207	0.0146	0.0201	0.0013	0.0231	-0.0077	0.0229
Tractors	0.0026	0.0194	0.0141	0.0191	-0.0531 ***	0.0171	-0.0503 ***	0.0170
Investment	0.0088	0.0204	-0.0278	0.0212	0.0190	0.0136	0.0050	0.0140
常数项 Constant term	0.7137 ***	0.2660	0.6572 **	0.2577	1.5440 ***	0.2058	1.5578 ***	0.2035
时间固定效应 Time fixed effect					控制			
地区固定效应 Area fixed effect					控制			
观测值数 Number of observations		273		273		378		378
R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> value		0.4636		0.5116		0.2438		0.2796

\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平;各回归中时间固定效应和地区固定效应均已控制

## 4 结论与启示

### 4.1 主要结论

研究分析了气候变化影响粮食生产韧性的作用机制,构建了调节效应模型,分析了作物多样性在气候变化对粮食生产韧性影响中的调节作用,并基于 31 个省份的面板数据对其进行了实证检验。主要结论如下:首先,气候因子的变化,包括积温的上升以及降雨的亏缺或过量,对粮食生产韧性具有抑制作用,即积温在 1% 的显著性水平上对粮食安全具有负向影响,降雨在 1% 的显著性水平上负向影响了粮食安全。其次,提高作物多样性程度在气候变化对粮食生产韧性的抑制过程中起到了调节作用,主要削弱了积温对粮食生产韧性的负向影响,但对降雨作用粮食生产韧性的调节效果并不明显。第三,对主要粮食作物分类回归结果表明,积温上升对谷物作物的负面影响最大,对豆类、薯类作物影响较不明显,降雨对谷物、豆类作物的负面影响较大,对薯类作物影响较不明显;降雨差异分析表明,降雨亏损对于粮食生产韧性的负向影响较大,而降雨过量可以缓解高温的不利影响;进一步划分区域来看,积温上升对非粮食主产区粮食生产韧性产生的负向影响最大,对粮食主产区粮食生产韧性的抑制作用不明显。降雨亏损或过量对于粮食主产区和非粮食主产区均有负向影响。作物多样性在调节作用依旧体现在积温影响粮食生产的过程中,在非粮食主产区发挥调节作用的最强,在非

粮食主产区发挥的调节作用并不显著。

## 4.2 政策启示

以上结论对于应对气候变化,保障粮食安全具有重要的政策启示。

第一,针对气候变化对粮食生产韧性的抑制作用,可以采取以下措施:强化应对气候变化的能力,加强气候监测和预警系统,提升气象灾害的预报和预警能力,及时发现和应对可能的自然灾害。同时,推动科技创新和农业技术进步,在作物品种改良、耐旱耐涝技术、水资源管理等方面开展研究,提高农业生产的适应性和抗灾能力。完善自然灾害防控体系建设、加强基础设施建设,包括水利设施、排涝系统、防风防沙林网等,提高农田的抗灾能力。强化应对气候变化的能力是应对气候变化对粮食生产的抑制作用的重要举措。为了应对气候变化所带来的粮食生产安全挑战,我们需要推动可持续农业发展,以实现粮食安全和可持续发展的目标。

第二,针对作物多样性在气候变化作用于粮食生产过程中的调节作用,一方面,应调整粮食耕作制度和种植结构,根据不同地区的气候条件和土壤特点,因地制宜地选择作物品种进行种植。培育优化优良作物品种,加大对抗旱、抗病虫害、耐盐碱等特性的研究和培育,推广优良作物品种,提高作物对环境变化的适应性和抗灾能力,以提高作物的产量和质量稳定性。另一方面,作物多样性虽然在积温影响粮食生产韧性的过程中起到了调节作用,但对降雨影响的调节作用并不明显,表明我国应对气候变化的作物多样性推广机制和整体转化率还有待提高。

第三,不同粮食生产区域应根据本区域的粮食安全战略定位,采取不同的保障措施。粮食主产区由于具备更好的技术和资源条件,受气候变化的影响较小,对于国家整体粮食安全至关重要。因此,加强对粮食主产区的政策倾斜和资金投入具有必要性。为推动粮食主产区的优化生产和经营,可以考虑以下方面:增加对粮食主产区的投资,包括农业基础设施建设、灌溉设施改善、农业生产装备更新等方面,提高粮食生产的综合能力。加强科研机构对粮食主产区的支持,提供先进的种植技术、育种技术和管理技术,帮助农民提高生产效益和抗灾能力。通过加强政策倾斜、资金投入和技术支持,以及促进粮食产业链发展和市场保障,可以帮助粮食主产区优化生产、提升综合能力,从而为粮食安全提供可靠的保障。同时,也需要注重平衡各个地区的粮食安全,确保整体国家粮食供应的稳定。

## 4.3 局限性和研究展望

本文引入作物多样性调节变量,分析了气候变化对于粮食生产韧性的影响机制,通过实证检验得出了具有一定实践价值的研究结论,但仍然存在一些局限性:第一,仅基于省级地区进行分析,未来应考虑市级地区、县域地区进行综合研究,深入了解气候变化对粮食生产系统的影响。第二,仅考虑了气候变化对粮食生产系统的单向影响,未深入探讨粮食生产系统对气候变化的反作用机理和传导路径。未来的研究可以从粮食系统的碳排放角度入手,探究其对气候变化的影响。第三,该研究仅关注国内视角,未来需要加强对国际以及多区域粮食生产安全的战略研究。

## 参考文献(References):

- [1] 王钢,钱龙. 新中国成立70年来的粮食安全战略:演变路径和内在逻辑. 中国农村经济, 2019(9): 15-29.
- [2] 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.
- [3] Kogo B K, Kumar L, Koech R. Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(1): 23-43.
- [4] 任正晓. 解决吃饭问题始终是治国理政的头等大事——深入学习贯彻习近平总书记关于粮食安全的重要论述. 求是, 2015(19): 20-22.
- [5] 罗秀丽,杨忍,徐茜. 全球人口与粮食的空间错位演变及影响因素分析. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1381-1397.
- [6] 蒋辉,陈瑶,刘兆阳. 中国粮食生产韧性的时空格局及其影响因素. 经济地理, 2023, 43(6): 126-134.
- [7] Macours K, Premand P, Vakis R. Transfers, diversification and household risk strategies: experimental evidence with lessons for climate change adaptation. Washington DC, US: The World Bank, 2012.
- [8] 张启楠,张凡凡,麦强,伍国勇. 中国粮食生产效率空间溢出网络及提升路径. 地理学报, 2022, 77(4): 996-1008.
- [9] 汪发元. 主要农业生产要素对粮食产量的影响——基于湖北省19年统计数据. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 636-640.
- [10] 崔宁波,董晋. 主产区粮食生产安全:地位、挑战与保障路径. 农业经济问题, 2021, 42(7): 130-144.
- [11] BIRTHAL P S, HAZRANA J. Crop diversification and resilience of agriculture to climatic shocks: evidence from India. Agricultural Systems, 2019, 173:

- 345-354.
- [12] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [13] Tendall D M, Joerin J, Kopainsky B, Edwards P, Shreck A, Le Q B, Kruetli P, Grant M, Six J. Food system resilience: defining the concept. *Global Food Security*, 2015, 6: 17-23.
- [14] FAO. The state of food and agriculture: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Rome, 2021.
- [15] Meuwissen M, Feindt P H, Spiegel A, Termeer C J A M, Mathijs E, Mey Y D, Finger R, Balman A, Wauters E, Urquhart J. A framework to assess the resilience of farming systems. *EconStor Open Access Articles and Book Chapters*, 2019, 176: 1-10.
- [16] Gomez M, Mejia A, Ruddell B L, Rushforth R R. Supply chain diversity buffers cities against food shocks. *Nature*, 2021, 595: 250-254.
- [17] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 任贾文, 王绍武, 伍荣生, 杨修群, 王苏民, 刘时银, 董光荣, 卢琦, 黄镇国, 杜碧兰, 罗勇. 中国气候与环境演变评估(1): 中国气候与环境变化及未来趋势. *气候变化研究进展*, 2005, 1(1): 4-9.
- [18] 何云玲, 张一平, 杨小波. 中国内陆热带地区近 40 年气候变化特征. *地理科学*, 2007, 27(4): 499-505.
- [19] Carter M, Janvry A, Sadoulet E, Sarris A. Index-based weather insurance for developing countries: a review of evidence and a set of propositions for up-scaling. *Revue d'économie du développement*, 2014, 23(1): 5-57.
- [20] Zampieri M, Ceglar A, Dentener F, Dosio A, Naumann G, van den Berg M, Toreti A. When will current climate extremes affecting maize production become the norm? *Earth's Future*, 2019, 7(2): 113-122.
- [21] Welbergen J A, Klose S M, Markus N, Eby P. Climate change and the effects of temperature extremes on Australian flying-foxes. *Proceedings Biological Sciences*, 2008, 275(1633): 419-425.
- [22] 李鸣钰, 高西宁, 潘婕, 熊伟, 郭李萍, 林而达, 李阔. 未来升温 1.5°C 与 2.0°C 背景下中国水稻产量可能变化趋势. *自然资源学报*, 2021, 36(3): 567-581.
- [23] Lin B B. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 2011, 61(3): 183-193.
- [24] 高鸣, 王颖. 农业补贴政策对粮食安全的影响与改革方向. *华南农业大学学报: 社会科学版*, 2021, 20(5): 14-26.
- [25] Lipper L, Thornton P, Campbell B, Baedeker T, Braimoh A, Bwalya M, Caron P, Cattaneo A, Garrity D, Henry K, Hottle R, Jackson L, Jarvis A, Kossam F, Mann W, McCarthy N, Meybeck A, Neufeldt H, Remington T, Sen P, Sessa R, Shula R, Tibu A, Torquebiau E. Climate Smart Agriculture for Food Security. *Climate-smart agriculture for food security Nature Climate Change*, 2015, 5: 386.
- [26] Chemeris A, Liu Y, Ker A P. Insurance subsidies, climate change, and innovation: implications for crop yield resiliency. *Food Policy*, 2022, 108: 102232.
- [27] 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.
- [28] 陈宏伟, 穆月英. 节水灌溉设施的粮食生产增效机制. *华南农业大学学报: 社会科学版*, 2021, 20(4): 76-89.
- [29] Murrell E G. Can agricultural practices that mitigate or improve crop resilience to climate change also manage crop pests? *Current Opinion in Insect Science*, 2017, 23: 81-88.
- [30] Bardgett R D, Freeman C, Ostle N J. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2008, 2(8): 805-814.
- [31] McDaniel M D, Tiemann L K, Grandy A S. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecological Applications*, 2014, 24(3): 560-570.
- [32] Waller D M, Meyer A G, Raff Z, Apfelbaum S I. Shifts in precipitation and agricultural intensity increase phosphorus concentrations and loads in an agricultural watershed. *Journal of Environmental Management*, 2021, 284: 112019.
- [33] Cregger M, McDowell N, Pangle R, Pockman W, Classen A. The impact of precipitation change on nitrogen cycling in a semi-arid ecosystem. *Functional Ecology*, 2014, 28: 1534-1544.
- [34] 刘海军, 唐晓培, 杨丽. 极端降水引起的大面积夏玉米减产方法研究——以 2021 年河南“7·20”强降水事件为例. *灌溉排水学报*, 2023, 42(3): 1-6.
- [35] 杜倩, 丁佳艳, 郭东华, 王茂君, 李立, 姜文国. 作物抗涝增产技术措施. *吉林农业*, 2011(3): 150.
- [36] Braulke M. A note on the Nerlove model of agricultural supply response. *International Economic Review*, 1982, 23(1): 241.
- [37] Chen S, Chen X G, Xu J T. The economic impact of weather variability on China's rice sector. *Discussion Papers*, 2014, 14-13.
- [38] Welch J R, Vincent J R, Auffhammer M, Moya P F, Dobermann A, Dawe D. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(33): 14562-14567.
- [39] Schlenker W, Roberts M J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(37): 15594-15598.
- [40] 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.
- [41] Zampieri M, Toreti A, Ceglar A, De Palma P, Chatzopoulos T, Michetti M. Analysing the resilience of agricultural production systems with ResiPy, the Python production resilience estimation package. *SoftwareX*, 2021, 15: 100738.
- [42] 刘晓星, 张旭, 李守伟. 中国宏观经济韧性测度——基于系统性风险的视角. *中国社会科学*, 2021(1): 12-32, 204.
- [43] 崔静, 王秀清, 辛贤, 吴文斌. 生长期气候变化对中国主要粮食作物单产的影响. *中国农村经济*, 2011(9): 13-22.
- [44] 崔明明, 聂常虹. 基于指标评价体系的我国粮食安全演变研究. *中国科学院院刊*, 2019, 34(8): 910-919.
- [45] 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.
- [46] 张强, 邓振镛, 赵映东, 乔娟. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [47] 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, 135.
- [48] 张宁. 气候变化或致全球粮食危机. *生态经济*, 2021, 37(8): 5-8.
- [49] 袁沫, 邢秀丽, 居为民. 中国遥感干旱指数时空特征及其对气候和地表覆盖变化的响应. *生态学报*, 2023, 43(16): 6691-6705.