



苏芳,刘钰,汪三贵,等. 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 Fang, LIU Yu, WANG Sangui, et al. 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.]

气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响

苏芳¹, 刘钰², 汪三贵³, 尚海洋⁴

(1. 西北大学经济管理学院, 陕西 西安 710127; 2. 陕西科技大学经济与管理学院, 陕西 西安 710021;

3. 中国人民大学农业与农村发展学院, 北京 100872; 4. 西北政法大学商学院, 陕西 西安 710122)

摘要 随着全球气候变暖趋势的逐渐加剧, 气候变化对粮食安全的影响引发社会各界广泛关注。文章基于1990—2020年31个省份的面板数据, 在剖析气候变化与粮食安全关系的基础上, 分析气候变化与粮食安全发展趋势, 从粮食可用性、可获得性、可利用性、稳定性4个维度构建粮食安全指标体系, 利用极差标准化法、变异系数赋权法、雷达图面积模型计算法测算粮食安全指数, 实证验证气候变化对粮食安全的影响机制。研究发现: ①积温和降水两大气候因子皆对粮食安全具有抑制作用。积温在1%的显著性水平上对粮食安全具有负向影响, 降水在5%的显著性水平上对粮食安全产生不利影响。②农业技术的调节作用主要体现在其削弱了积温对粮食安全的抑制作用, 但对降水影响粮食安全的调节效果并不明显。③分区域看, 气候变化对粮食产销平衡区粮食安全的负向影响最大, 对粮食主产区和主销区粮食安全的抑制作用不明显; 农业技术在粮食主产区发挥的调节作用最强, 在粮食主销区和产销平衡区发挥的调节作用不明显。为保障粮食安全, 应强化应对气候变化的能力, 逐步完善粮食储备管理机制, 践行“藏粮于技”的战略方针, 因地制宜调整粮食耕作制度和种植结构, 培育优良作物品种, 推进现代农业技术的转化和推广。同时, 不同粮食生产功能区应充分发挥各自区域优势: 主产区应推动粮食生产、经营优化, 提升粮食生产综合能力; 主销区应充分发挥经济、科技优势, 发展集约化、现代化农业以提高粮食自给率; 产销平衡区需着力提高种植户抵御风险能力和粮食生产积极性, 维持区域产销平衡。

关键词 粮食安全; 气候变化; 农业技术; 区域差异

中图分类号 F326.11; P467 文献标志码 A 文章编号 1002-2104(2022)08-0140-13 DOI: 10.12062/cpre.20220515

粮食安全是国家安全的基础, 是经济发展、社会稳定的基石^[1-2]。粮食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, 气候变化特别是极端气候日益影响粮食产量、质量、价格以及供应链^[3], 粮食安全正陷入危机中。据《2021年世界粮食安全和营养状况》报告估计, 受气候变化、自然灾害以及虫害影响, 2020年全球大约8.11亿人(约占总人口的1/10)面临食物不足的困境, 严重缺乏粮食和营养保障的人口也将迅速增加^[4-6]。现阶段, 虽然中国的粮食产量保持了稳定增长的态势, 国内粮食供需基本平衡^[7], 但由于城镇化的快速发展、土地资源和自然资源的约束、气候变化所导致的自然灾害频发^[8]等因素增加了粮食安全的不确定性。中国巨大的人口规模对粮食安全具有更高的要求, 新常态下中国的粮食安全问题依然严峻^[9]。

1 文献回顾与研究假设

1.1 文献回顾

现有研究探讨了城镇化水平、农业政策、科技水平、国际贸易、环境变化^[10-14]等影响粮食安全的宏观因素, 也有学者从微观视角分析了粮食价格、粮食种植结构^[15-16]等因素对粮食安全的影响。目前, 有关气候变化的研究主要集中在两个方面。一方面, 揭示了不同区域气候变化的趋势^[17-19]。研究发现, 近50年华北地区极端高温事件的指数均呈上升趋势^[20], 东北地区高、低温阈值与最长热浪天数均呈现波动上升趋势^[21], 青藏地区在过去近60年平均增暖速率是全球平均水平的2倍以上^[22]。另一方面, 探究了气候变化对生物活动、植被动态、土地生态系统、水循环、农业生产、社会经济等产生的影响^[23-24]。

收稿日期: 2022-01-14 修回日期: 2022-05-28

作者简介: 苏芳, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为生态经济与区域可持续发展。E-mail: sufang@sust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“脱贫山区生计效率的多尺度评估与干预机制研究”(批准号: 42171281); 国家自然科学基金重点项目“脱贫地区持续发展的内生动力及政策研究”(批准号: 72034007); 国家社会科学基金项目“脱贫山区农村社会组织稳定脱贫的作用机制与提升路径研究”(批准号: 21BJY138); 陕西省创新人才推进计划-科技创新团队“乡村绿色发展技术与决策支持创新团队”(批准号: 2021TD-35)。



研究表明,气候变化促使中国植被覆盖率和西北诸河流域水汽收支呈现整体上升趋势^[25-26],然而在农业方面,高温、低温及全年降水总量等气候因子不利于农业全要素生产率的提升^[23]。对于气候变化与粮食安全二者关系,研究发现气候变化加剧了粮食价格上涨的趋势,是造成饥饿人口急剧增加的主要原因^[14]。学者们集中研究了气候变化对粮食作物(水稻、玉米、小麦等)生产的影响^[27-29],发现气温、降水和日照等气候变量对中国水稻和小麦单产的影响都存在“先增后减”的非线性关系^[30]。在农牧交错带,粮食作物的气候生产潜力呈现由南向北递减的趋势^[31],气候变化对省域粮食生产的负向影响更为显著^[32]。此外,部分学者在立足全球气候变暖的背景下,研究了粮食生产系统与气候变化的相互作用关系,发现在气候变化增加粮食系统不确定性的同时,粮食系统生产要素的重新配置也加剧了气候变化^[33-34],为气候变化与粮食安全的研究指明了新方向。

以上研究为探讨粮食安全与气候变化之间的关系提供了丰富的理论基础,但也存在不足之处:一方面现有研究多集中探究了气候变化对粮食生产的影响,对粮食安全的衡量指标较为单一,鲜有研究从不同维度综合考量粮食安全水平;另一方面,较少关注气候变化对不同粮食生产功能区粮食安全的差异性影响。因此,该研究基于省际面板数据,探究气候变化对粮食安全的作用机制和实际影响效果,并分析气候变化作用于不同粮食生产功能区粮食安全的区域差异,补充粮食安全影响因素的现有证据,以期为应对气候变化冲击、保障粮食安全提供有益的政策启示。

该研究力求在以下方面有所创新:一是验证气候变化对粮食安全作用机制,为研究粮食安全影响因素提供新的实证证据;二是引入农业技术这一调节变量,拓展研究视域;三是探讨气候变化对不同粮食生产功能区粮食安全的差异性影响以及农业技术在三大粮食生产功能区调节作用的强弱,为未来粮食安全保障工作提供科学依据和政策建议。

1.2 研究假设

全球气候变化趋势日渐加剧,对人民生命财产安全造成了重大危害,对粮食安全、能源安全、经济安全等安全要素产生了重大影响,对国家安全提出了重大挑战^[35-36]。一方面,以气温上升、降水频率不确定性增加、极端天气频发为主要表征的气候变化通过影响粮食生产、获得与利用,引发粮价波动,阻碍粮食供应链畅通等方式,对粮食可用性、可获得性、可利用性、稳定性造成严重威胁,粮食安全面临巨大隐患,形势不容乐观^[3];另一方面,农业机械、灌溉技术、育种技术等农业技术应运而

生,成为人为干预气候变化对农业生产影响的有效手段^[37],在气候变化作用粮食安全的过程中起到了至关重要的作用。

1.2.1 气候变化与粮食安全

(1)气候变化对粮食可用性的影响。粮食可用性是指粮食生产和产量的保障力^[38]。首先,气候变化改变了粮食生产的温度条件,大气中不断增加的二氧化碳所引起的气温升高缩短了粮食作物的正常生长周期,对粮食单产造成不可估量的损害^[39],威胁粮食供给与利用。其次,气候变化引起降水异常,粮食生产的水分条件无法得到保障,造成粮食减产^[40]。气候变化通过影响降雨、蒸发、径流等改变全球水文循环的现状,引起水资源在时间和空间上的重新分配。降雨、土壤湿度等是粮食生产的必要条件,会因气候变化导致的水资源不足而受到影响^[41]。再次,气候变暖加剧农业病虫害的爆发,导致粮食减产^[42]。气温上升使得农业害虫的分布范围突破低温的限制,害虫虫卵的越冬北界北移,害虫成活率提高,害虫数量激增且危害期延长^[43]。最后,气候变化引发的极端气候事件增多,对粮食供给稳定带来了严峻挑战。21世纪以来,高温、洪涝、干旱、台风、寒害等极端气候事件发生的频率大幅增加^[44],尤其是干旱和洪涝灾害发生概率较大,其导致的灾害损失约占气象灾害的70%~85%,严重影响了粮食生产环境^[45],造成粮食大幅减产。

(2)气候变化对粮食可获得性的影响。粮食可获得性是指粮食价格平稳、具备可获得粮食的能力^[46]。气候变化导致粮食种植成本上升,引发粮食价格波动^[26]。气候变化使得粮食作物所必需的温度、水分、土壤等生产要素发生变化。为避免粮食产量减少,保持农业生产环境稳定,会加大对农业生产的投资,粮食种植成本由此上升。例如,为应对气温上升,抗旱粮食品种的研发与应用增加了技术资本与人力资本^[47];降水异常引发的灾害会增加水利设施资本的投入,强降雨冲刷使土地肥力下降,农业化肥投入增加^[48];气候变暖导致病虫害频发,农药投入增加及人工驱虫等促使粮食生产成本上升^[49]。以上因素皆导致了粮食生产成本的增加,不利于粮食价格与居民购买力的稳定,对粮食的可获得性提出了挑战。

(3)气候变化对粮食可利用性的影响。粮食可利用性是指保障粮食品质、汲取粮食营养的能力^[50]。一方面,二氧化碳排放量持续增加、气温升高及水资源不足,会引起小麦、玉米等粮食作物中的蛋白质含量减少,使得粮食作物中的营养成分发生改变,破坏了其固有的营养成分结构^[51]。另一方面,光照变化也会导致低品质作物出现可能性增加。若光照时间过长、光照过于强烈,温度相应升高,会使得作物成熟周期变短,生长过程中缺乏必要的

营养元素;若光照时间不足,特别是在通风透光不良的作物生产环境下,也会导致低品质作物发生频率加大^[52]。此外,气温上升引起的病虫害频率增多也会使农药使用量增加,导致药物残留,引发粮食质量安全问题^[53]。

(4)气候变化对粮食稳定性的影响。粮食稳定性主要保障粮食供产销环节,即粮食供应链的畅通^[54]。一方面,气候变化通过冲击粮食供应链的供给端威胁粮食安全。气候变化对粮食稳定性的影响最直观体现在粮食供应变化上。不同区域和种类的粮食作物产量对气候变化的响应各不相同^[55],面临不同程度的减产问题,对粮食供应稳定性以及粮食消费选择造成影响。另一方面,气候变化通过冲击粮食供应链的运输端影响粮食稳定性。极端气候会使局部区域道路受损,导致粮食运输受阻甚至运输链中断,加大了粮食运输的风险性,严重损害粮食贸易链运转^[2],不利于粮食安全的稳定性。

综上,提出以下假设。

H1:气候变化对粮食安全具有负向影响。

1.2.2 气候变化、农业技术与粮食安全

农业技术的调节作用主要体现在两个方面。第一,农业技术通过改变粮食生产环境削弱气候变化对粮食安全的不利影响^[38]。随着农业技术水平的提高,温室大棚技术、节水灌溉、农业抗旱、工程保水等农业技术得到应用和推广,改善了粮食生长所需的自然条件,实现了蔬菜的反季节上市^[56],促使季节性干旱和局部干旱得到有效缓解,尤其对西部干旱区粮食产量的提高发挥了极大作用^[57]。第二,农业技术通过提升农业生产率减小了气候变化对粮食安全的负向影响。引种及育种技术水平不断提高,优良作物品种得到优化,增强了作物对高温、干旱等恶劣环境的适应性,提高了粮食单产和品质^[58]。利用农业监测技术适时调整农业布局 and 结构,可以有效降低气候变暖对农业生产的负面影响^[59]。可见,运用农业技术来降低气候变化对粮食生产种植的影响是现代农业发展的重要手段。基于此,提出以下假设。

H2:农业技术水平的提升可以削弱气候变化对粮食安全的不利影响。

2 研究设计

2.1 模型构建

2.1.1 基本模型

为验证假设1,该研究设定的基本模型如式(1)所示。其中: $Food-Security_{i,t}$ 代表第*i*个省第*t*年的粮食安全水平, $Q_{i,t}$ 代表第*i*个省份第*t*年的平均积温, $J_{i,t}$ 代表第*i*个省份第*t*年的降水量, $X_{i,t}$ 代表控制变量, μ_i 和 γ_t 分别代表个体固定效应和时间固定效应, $\varepsilon_{i,t}$ 表示随机扰动项。

$$Food-Security_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 Q_{i,t} + \beta_2 J_{i,t} + \beta X_{i,t} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

2.1.2 调节效应模型

为更深入探讨农业技术在气候变化影响粮食安全过程中的调节作用,引入交互项 $M_{i,t} \times Q_{i,t}$ 、 $M_{i,t} \times J_{i,t}$ 变量以验证调节作用,具体模型设定如式(2)所示。其中 $M_{i,t}$ 表示第*i*个省份第*t*年的农业技术水平。

$$Food-Security_{i,t} = \lambda_0 + \lambda_1 M_{i,t} \times Q_{i,t} + \lambda_2 M_{i,t} \times J_{i,t} + \lambda X_{i,t} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

2.2 变量定义与说明

2.2.1 被解释变量

被解释变量为粮食安全。联合国粮农组织(FAO)对粮食安全的定义做出3次转变,由早期仅限于粮食供给层面转变为1983年后侧重于家庭和个人食物获取层面,再到1996年后,将食物的卫生、健康标准及营养平衡纳入粮食安全内涵,外延上引入了人权和社会文化等因素。有关粮食安全如何测度的问题,国内部分学者认为粮食安全应着重强调数量安全^[60];也有学者坚持宏观安全与微观安全相统一,在保证数量安全的同时突出质量和生态安全^[61-63];还有学者将粮食供给、粮食获取、粮食利用以及粮食稳定性等方面考虑进粮食安全体系^[64]。基于以上分析,结合联合国粮农组织(FAO)对粮食安全的定义,形成以粮食可用性、可获得性、可利用性、稳定性4个变量为二级指标,以平均膳食能量供应充足率等13个变量为三级指标的粮食安全指标体系(表1)。

在粮食安全体系中,粮食可用性是粮食安全的必要条件,主要强调的是产量、能量以及营养物质的供给,主要由人均粮食占有量、粮食生产平均值、平均蛋白质供应量、平均膳食能量供应充足率来衡量^[65]。即使有足够可用的粮食供应,粮食的获取程度以及人们获取粮食的能力仍然存在极大差异,这主要取决于社会经济发展水平、人们的购买力、粮食的稀缺程度以及粮食运输通达度等因素。粮食可获得性由铁路密度、人均国内生产总值、食物不足发生率^[66]来衡量。粮食安全还包括粮食利用方面。受健康卫生条件、饮食习惯等因素影响^[67],粮食利用存在显著的不均衡问题,肥胖与瘦弱并存等问题在儿童群体中尤其突出。粮食利用主要由基本饮用水服务普及度、基本卫生服务普及度、5岁以下儿童发育不良占比来衡量^[68]。粮食稳定性是决定国家能否实现长期粮食安全的重要因素,是粮食可用性、可获得性、可利用性的重要保障,主要由谷物进口依存度、人均粮食产量波动性、人均粮食供给波动性来衡量。

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、年降水



量作为气候变化的衡量因子^[30-32]。数据处理中,首先对各省主要城市气象站点逐日数据进行逐月处理,分别计算出月均积温、月降水量。若出现极端异常值,采用中位数进行数据处理。其次,根据月均积温、月降水量计算出年均积温和年降水量。

2.2.3 调节变量

农业技术为调节变量。农业技术目前主要有农业全要素生产率^[69]、农业专利质量^[70]和农业专利数量^[71]三类衡量标准,采用各省农业专利数量来衡量农业技术,主要考虑到中国各省份对于专利申请、审查、授权的制度法规基本是一致的,不同省份之间的专利数量具有可比性。

2.2.4 控制变量

在参考已有研究^[72-73]的基础上,引入了第一产业劳动力、第一产业增加值、农药使用量、化肥施用量、灌溉面积、能源消耗、农业政策为控制变量。变量的测度方法见表2。

2.3 粮食安全指数测算方法

2.3.1 极差标准化法

粮食安全指标处理中,首先采用极差标准化法对正向指标与负向指标做标准化处理。 X_{ij} 为第*i*个省第*j*项指标的原始数据; X'_{ij} 为对应的标准化变量值, $\max X_{ij}$ 、 $\min X_{ij}$ 分别表示第*j*项指标的最大值和最小值。

表1 粮食安全指标构成

一级指标	二级指标	三级指标	测算方法	指标方向
粮食安全指数 (Food-Security)	可用性 (y1)	j1:人均粮食占有量/(kg/人)	粮食总产量/总人口	+
		j2:粮食生产平均值/(美元/人)	粮食生产值/总人口	+
		j3:平均蛋白质供应量/(g/人·d)	食物蛋白供应量/(总人口×当年天数)	+
		j4:平均膳食能量供应充足率/%	每日膳食能量供应大于9.71×10 ⁶ J的人数/总人口	+
	可获得性 (y2)	j5:铁路密度/(km/km ²)	区域内铁路总长度/区域总面积	+
		j6:人均国内生产总值/美元	国内生产总值/总人口	+
		j7:食物不足发生率/%	每日膳食能量供应低于9.71×10 ⁶ J的人数/总人口	-
	可利用性 (y3)	j8:基本饮用水服务普及度/%	全年不缺水的户数比重	+
		j9:基本卫生服务普及度/%	所在乡镇有卫生院的行政村比重	+
		j10:5岁以下儿童发育不良占比/%	5岁以下发育不良的儿童数量/5岁以下儿童总数	-
	稳定性 (y4)	j11:谷物进口依存度/%	(谷物进口-谷物出口)/(谷物产量+谷物进口-谷物出口)×100%	-
		j12:人均粮食产量波动性	人均粮食产量的标准差	-
		j13:人均粮食供给波动性	人均粮食供给的标准差	-

注:指标向性中“+”表示指标取值越大,粮食安全水平越高;“-”表示指标取值越大,粮食安全水平越低。粮食生产值采用FAO统一规定的美元标准来计算。9.71×10⁶J是指按成人等价单位换算的每日膳食能量最低标准。将铁路密度作为粮食可获得性的衡量指标之一,主要考虑到粮食是大宗商品,中国内陆粮食长途运输的主要方式为铁路运输。

表2 变量说明及统计描述

变量分类	变量名称	变量含义	最小值	最大值	均值
被解释变量	粮食安全	粮食安全指数	0.13	1.54	0.91
解释变量	气候变化	年均积温/℃	0.63	1.53	1.12
		年降水量/mm	0.24	4.36	2.47
调节变量	农业技术	各省农业专利数量/件	0.63	6.31	3.09
控制变量	第一产业劳动力	乡村从业人员/万人	2.13	5.01	3.10
	第一产业增加值	第一产业增加值/亿元	0.88	4.85	2.72
	农药使用	农药总使用量/t	0.04	19.88	4.58
	化肥使用	化肥总使用量/t	0.41	2.85	1.98
	灌溉面积	耕地有效灌溉面积/hm ²	2.04	5.58	3.18
	能源消耗	第一产业能源消费总量/tce	1.62	11.36	5.05
	农业政策	粮食保护价收购政策	0.00	1.00	0.74
		粮食直接补贴政策	0.00	1.00	0.55

注:除农业政策、农药使用外,所有变量数据皆取对数。农业政策包括粮食保护价收购政策和粮食直接补贴政策。由于粮食保护价收购政策于1998年开始实施,粮食直接补贴政策于2004年正式出台,因此,将1998年前粮食保护价收购政策计为0,1998年之后计为1;2004年前的粮食直接补贴政策计为0,2004年之后计为1。

$$\text{正向指标: } X'_{ij} = (X_{ij} - \min X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}) \quad (3)$$

$$\text{负向指标: } X'_{ij} = (\max X_{ij} - X_{ij}) / (\max X_{ij} - \min X_{ij}) \quad (4)$$

2.3.2 变异系数赋权法

该研究采用变异系数赋权法^[74]为三级指标指标赋权。变异系数赋权法是一种客观赋权方法,直接利用各项指标所包含的信息进行赋权。具体计算方法见式(5)、式(6)。其中, CV_j 表示三级指标 j 的变异系数, S_j 表示指标 j 的标准差, \bar{X}_j 表示指标的 j 的平均值, w_j 表示指标 j 的权重。

$$CV_j = S_j / \bar{X}_j \quad (5)$$

$$w_j = CV_j / \sum CV_j \quad (6)$$

各三级指标权重计算结果见表3。

以三级指标权重为基础,对1990—2020各省份的粮食可用性(y_1)、可获得性(y_2)、可利用性(y_3)和稳定性(y_4)进行评价,分别得到二级指标的评价结果。

$$\begin{aligned} y_1 &= 13.90\%j_1 + 35.83\%j_2 + 40.52\%j_3 + 9.75\%j_4 \\ y_2 &= 43.36\%j_5 + 49.13\%j_6 + 7.51\%j_7 \\ y_3 &= 16.50\%j_8 + 11.08\%j_9 + 72.42\%j_{10} \\ y_4 &= 1.58\%j_{11} + 65.77\%j_{12} + 32.65\%j_{13} \end{aligned} \quad (7)$$

2.3.3 雷达图面积模型算法

粮食安全指数采用雷达图面积模型来计算^[68]。当系统安全性取决于各子系统的状态及其交互作用时,可使用雷达图面积模型来集成子系统的状态信息。就粮食安全而言,充足可用的粮食显然是粮食安全的第一前提,在此基础上粮食安全尚需要通过粮食获取和粮食利用来实现,而如何稳定、可靠地供给、获取和利用粮食则需要粮食稳定性作为保障。可见,可用性(y_1)、可获得性(y_2)、可利用性(y_3)、稳定性(y_4)构成了对粮食安全的闭合传递关系,使用雷达图面积模型能够更好地反映这种关系。

$$\text{Food-Security} = (y_1 \times y_2 + y_2 \times y_3 + y_3 \times y_4 + y_4 \times y_1) / 2 \quad (8)$$

2.4 数据来源

选取1990—2020年31个省份的面板数据来验证气候变化对粮食安全的影响。限于数据可得性等原因,研究未涉及香港、澳门和台湾地区。数据来自国家统计局、各省份统计局、中华粮网、国家气象科学数据中心、国家知识产权局专利数据库、FAO数据库等。为便于比较分析和检验模型结论的稳健性,该研究对各粮食生产功能区进行细分考察,根据《国家粮食安全中长期规划纲要

(2008—2020)》的标准划分为粮食主产区、主销区和产销平衡区。其中,粮食主产区包括辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古、河北、山东、安徽、江苏、江西、河南、湖南、四川和湖北13个省份;主销区包括北京、上海、天津、浙江、海南、广东和福建7个省份;产销平衡区包括山西、广西、重庆、云南、贵州、陕西、甘肃、青海、西藏、宁夏和新疆11个省份。

3 实证分析

3.1 现状分析

3.1.1 粮食安全发展趋势

通过对粮食安全指数数据处理,得到1990—2020年全国粮食安全变化趋势(图1)。由图1可知,1990—2020年全国以及三大粮食生产功能区的粮食安全指数均在0.65~1.20之间浮动。总体上看,粮食安全水平呈上升趋势,在1995年和2003年出现两个低峰,这大概率是由于1995年通货膨胀引起的粮价大涨,造成居民粮食消费心理恐慌,导致粮食安全水平有所降低。2003年中国粮食产量同比1998年下降0.81亿t,这主要是由于工业化、城镇化的发展占用了部分耕地,农业劳动力供给不足,粮食补贴政策还未实行,农民生产积极性不高导致。自2004年实行粮食直接补贴政策以来,中国粮食产量“十二连增”,粮食安全水平持续上升。近几年,中国面临着复杂的国内外形势,第一产业劳动力不断缩减,粮食进口大幅攀升,气候变化导致的自然灾害频发等因素降低了粮食安全水平。三大粮食生产功能区总体趋势大致相同,主产区的粮食安全水平整体高于其他两大区域,产销平衡区粮食安全水平低于全国平均水平。

通过对粮食安全二级指标数据整理,得到1990—2020年全国与三大粮食生产功能区粮食可用性、可获得性、稳定性、可利用性变化趋势(图2)。由图2所示:①全国粮食可用性曲线变动相对平缓,整体呈现上升趋势。三大粮食生产功能区中,主产区的粮食可用性水平上升幅度最明显,整体高于其他两大区域;主销区和产销平衡区粮食可用性水平低于全国平均水平。其中,主销区的可用性水平最低。②全国粮食可获得性指数总体为上升趋势,这表示居民购买力不断提升。分区域看,主销区粮食获取能力最强,这主要归因于主销区多位于东部发达地区,人均GDP较高,购买力较强;产销平衡区多地处中

表3 三级指标权重

指标	可用性				可获得性			可利用性				稳定性	
	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9	j_{10}	j_{11}	j_{12}	j_{13}
权重/%	13.90	35.83	40.52	9.75	43.36	49.13	7.51	16.50	11.08	72.42	1.58	65.77	32.65

注:三级指标代码的含义见表1。

西部区域,受自然条件限制,经济欠发达,粮食获取能力弱于主销区和主产区。③粮食稳定性在1993年和2003年出现两次较大波动,2004—2017年趋于平稳,2017年后稳定性水平下降。在三大区域中,主产区粮食稳定性波动最为明显,主销区次之,产销平衡区波动相对较小。这主要因为产销平衡区粮食产量基本能保持省域内的自给自足,且产销平衡区基本分布欠发达地区,规模效应低,经济发展水平相较于主产区和主销区更加落后,物价水平较低且更趋于平稳。④粮食可利用性指数整体呈现上升趋势。随着“健康中国”战略的实施,基本公共卫生服务和饮用水的普及度越来越高,营养不足发生率逐渐下降,公众的健康意识越来越强。三大区域中,主销区粮食可利用性水平高于其他两大区域和全国平均水平。

3.1.2 气候变化发展趋势

通过对两大气候因子数据整理,得到1990—2020年全国气候变化趋势(图3)。由图3所示,全国年降水量波动较为明显,整体呈上升趋势浮动,在1993、1998、2010、2016年出现四个高峰值,2016年降水量明显高于其他年份,在2007、2011年出现两个降水低峰值。全国年均积温在13~15℃区间内浮动,总体呈上升趋势变化,在1998、2007、2017、2019年出现四个较为明显的年均积温高峰,在1993、1996、2012出现三个低峰。1990—2020年全国气候变化的主要特征是积温呈上升趋势变化,降水变化极不稳定。气候变化最直接的特征是气候变暖,这为农作物熟制北移、冬季冻害减轻带来有利影响^[34],但同时也

会加剧干旱、引发病虫害、影响农作物品质、导致极端天气增加,对农业生产造成威胁。

3.2 基准回归结果分析

通过数据处理得到基准回归结果(表4)。表4显示,积温对粮食安全在1%的显著性水平上具有负向影响,降水在5%的显著性水平上对粮食安全具有抑制作用。总体来说气候变化两大因子对粮食安全具有显著的负向影响,假设H1得到验证。即气温上升缩短农作物生长周期,导致农业病虫害增多,造成粮食减产;降水不规律性增加了洪涝、地质等灾害发生的可能性,对粮食生产、运输等环节造成破坏,威胁粮食供给与利用。控制变量中,粮食保护价收购政策和粮食直接补贴政策对粮食安全皆具有显著的正向影响,这说明推行积极有效的农业政策可以帮助种粮户度过受灾年份,获得基本的粮食种植保障性收入,也可以在一定程度上减少农业从业人员的流失。

控制变量中第一产业劳动力、农药、灌溉面积、能源消耗对粮食安全的影响不显著,可能有以下原因。据中国统计年鉴相关数据显示,1990—2020年我国第一产业从业人数、农药使用量总体呈下降趋势,第一产业能源消耗量呈先增后减趋势。随着绿色环保理念的推广与“碳中和”政策的实施,农业生产愈发减少对农药与能耗资源的依赖,但我国粮食产量与粮食安全保障水平却连年稳步提升,表明以上控制变量对粮食安全保障并不明显。1990—2020年我国万亩以上灌溉区数得到明显增长,但灌溉设施多建于改革开放之前,工程设施损坏报废严重,

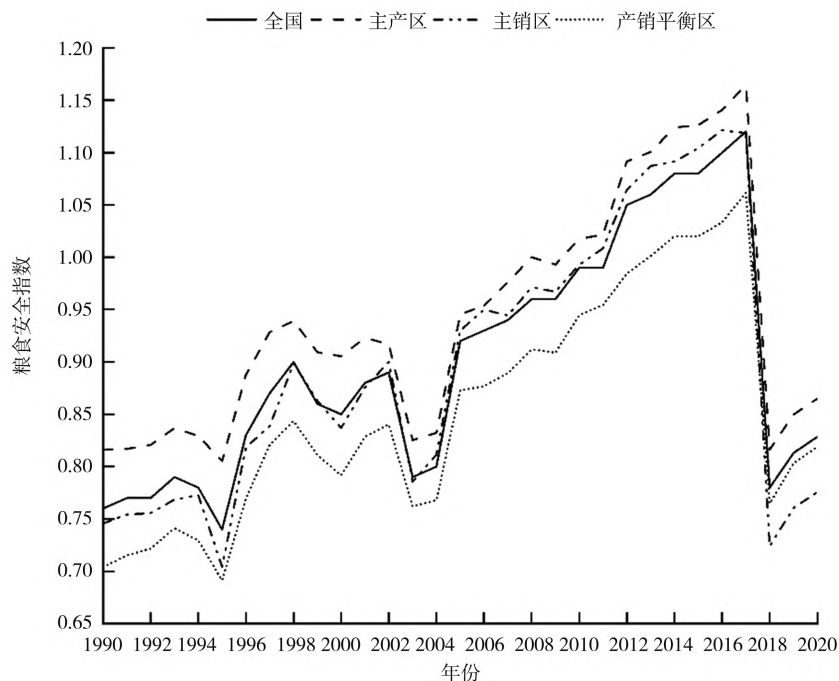


图1 1990—2020年粮食安全指数变化趋势

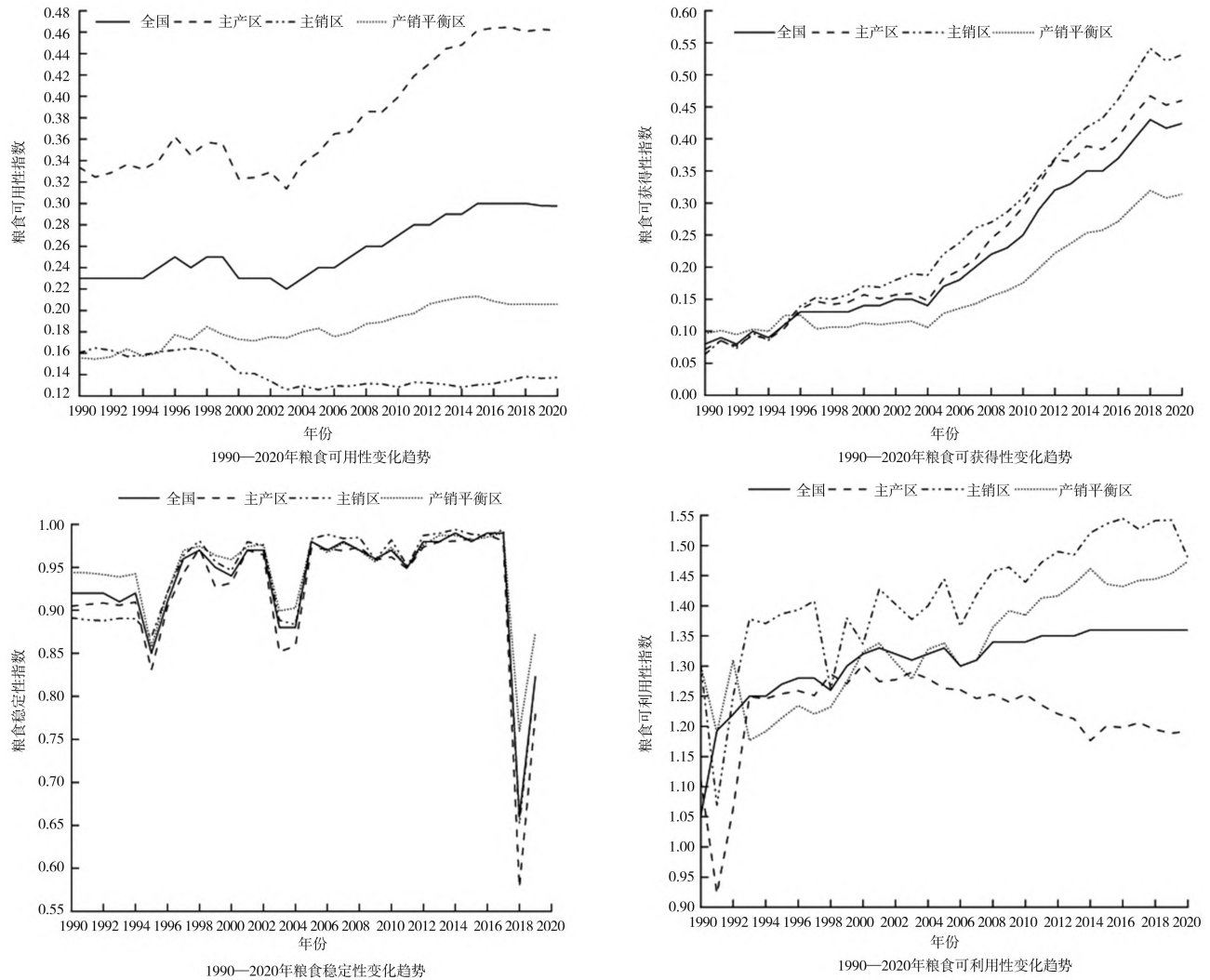


图2 1990—2020年粮食安全二级指标变化现状

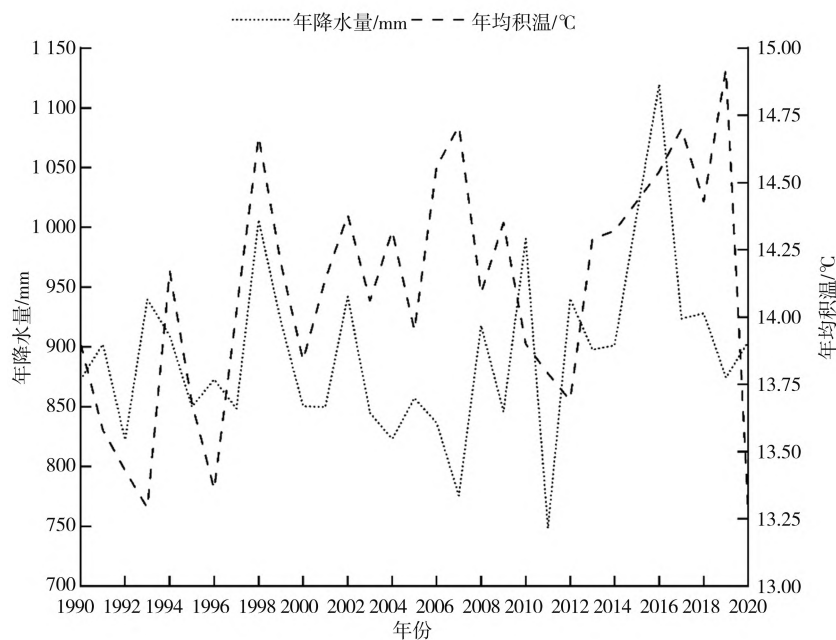


图3 1990—2020年全国气候变化趋势



对有效灌溉面积造成影响;且2000年以后,我国启动了地下水保护计划,使得粮食主产区机井报废问题较大,降低了灌溉面积对粮食安全的保障作用。

3.3 稳健性检验

借鉴王伟同等^[75]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1与模型3两个受约束模型。模型1只引入解释变量,即积温和降水两大气候因子。考虑到农业政策直接作用于粮食安全保障的有效性,模型3引入两大农业政策,即粮食保护价收购政策和粮食直接补贴政策,从而得到两个受约束模型下气候因子的估计系数 β^m 。其次,构造两个完整模型,即在模型1和模型3的基础上引入其他控制变量得到模型2和模型4,两个完整模型下气候因子的估计系数为 β^n 。最后,计算变动系数 $\varepsilon = |\beta^n / (\beta^m - \beta^n)|$ 。 ε 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5。积温和降水的变动系数远大于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。

3.4 农业技术的调节效应分析

通过数据处理得到农业技术的调节效应检验结果(表6)。表6显示,积温和降水对粮食安全影响的主效应系数皆为负,农业技术与积温的交互项系数在1%的水平下显著为正,说明农业技术作为调节变量,显著削弱了积温上升对粮食安全的负向影响,但农业技术与降水的交互项系数不显著,假设H2总体上得到验证。随着科技水平的提升,诸如育种技术、温室大棚技术等农业技术的广泛应用,在很大程度上

度上弥补了气候变化导致的水、热等资源的不足,缓解了气候灾害对粮食生产的冲击,有效保障了粮食生产安全。农业技术与降水交互项系数不显著,可能有两方面的原因:一方面,从1990—2020年全国降水现状可以看出,降水呈现极不规律的变动趋势。有研究表明,在降雨量减少20%的情况下,任何提升粮食作物产量的技术都会失效^[76]。可见,农业技术对缓解降水造成的负面影响是相对的。另一方面,由于灌溉设施兴建较早,工程设施损坏较重,加之地下水保护计划启动造成较严重的机井报废问题,削弱了灌溉技术对降水不稳定的调节作用。

3.5 气候变化对粮食安全影响的区域差异

上述研究已表明,气候变化两大因子会显著降低粮食

表5 稳健性检验结果

模型	积温	降水	其他控制变量	ε 值	
				积温	降水
模型1	-0.447** (0.172)	-0.014** (0.006)	不引入	27.294	15.000
模型2	-0.464*** (0.154)	-0.015** (0.006)	引入		
模型3	-0.446** (0.173)	-0.014** (0.007)	不引入	27.235	15.000
模型4	-0.463*** (0.154)	-0.015** (0.007)	引入		

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$;括号内数字为稳健标准误。

表6 农业技术调节效应结果

变量	系数	稳健标准误差	t统计量
积温	-1.104***	0.275	-4.010
降水	-0.069	0.041	-1.680
农业技术	0.266***	0.058	4.530
积温×农业技术	0.231***	0.074	3.110
降水×农业技术	0.018	0.013	1.440
第一产业劳动力	0.064	0.159	0.410
第一产业增加值	0.017	0.010	1.620
农药	-0.007	0.005	-1.380
化肥	-0.060**	0.029	-2.070
灌溉面积	0.014	0.020	0.720
能源消耗	0.003	0.006	0.510
粮食保护价收购政策	0.094***	0.024	3.840
粮食直接补贴政策	0.453***	0.035	12.810
常数项	1.876***	0.518	3.620
时间固定效应		控制	
个体固定效应		控制	
R^2		0.780	
观测值		961	

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$ 。

表4 基准回归结果

变量	系数	稳健标准误差	t统计量
积温	-0.463***	0.154	-3.000
降水	-0.015**	0.007	-2.230
第一产业劳动力	0.019	0.180	0.110
第一产业增加值	0.114*	0.011	1.250
农药	-0.005	0.005	-0.950
化肥	-0.061**	0.027	-2.230
灌溉面积	0.015	0.020	0.780
能源消耗	0.002	0.006	0.460
粮食保护价收购政策	0.098***	0.023	4.120
粮食直接补贴政策	0.087**	0.049	1.750
常数项	1.281**	0.596	2.150
时间固定效应		控制	
个体固定效应		控制	
R^2		0.758	
观测值		961	

注:* $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$ 。

安全水平,农业技术的广泛应用会削弱这种抑制作用。在此基础上,将研究区域细分,进一步探讨气候变化对不同粮食生产功能区粮食安全影响的差异。气候变化对三大粮食生产功能区粮食安全的直接作用结果见表7。积温和降水对产销平衡区粮食安全皆在5%的显著性水平上具有负向影响,对其他两大粮食生产功能区粮食安全的影响不显著。总体上看,产销平衡区气候变化对粮食安全的负向影响最大。产销平衡区多位于中西部地区,自然环境相对脆弱,粮食生产与销售相对于主产区来说仅能达到平衡状态。当气候变化引发的干旱、洪涝、病虫害及极端天气冲击时,其粮食生产与销售的平衡关系被打破,引发粮价波动等问题,不利于保障粮食的有效供应。此外,产销平衡区相较于东部省区而言经济欠发达,自然灾害预防监测系统及农业基础设施欠完善,一旦受到气候灾害冲击,自身农业系统恢复力较差,对粮食安全的负向影响更大。

农业技术的调节作用在三大粮食生产功能区体现出了差异性(表8)。表8显示,农业技术的调节作用主要体现

表7 气候变化对粮食安全影响的区域差异

变量	主产区	主销区	产销平衡区
积温	-0.210 (0.146)	-0.030 (0.733)	-0.656** (0.273)
降水	-0.017 (0.010)	-0.018 (0.019)	-0.019** (0.008)
第一产业劳动力	0.837 (0.529)	1.053 (2.179)	-0.263* (0.129)
第一产业增加值	0.005* (0.021)	0.030* (0.013)	0.014 (0.016)
农药	-0.005 (0.006)	0.023 (0.016)	-0.023* (0.011)
化肥	-0.023 (0.023)	-0.056 (0.043)	-0.082* (0.039)
灌溉面积	-0.018 (0.022)	0.032 (0.041)	0.030** (0.013)
能源消耗	-0.005 (0.003)	-0.006 (0.009)	0.017* (0.008)
粮食保护价收购政策	0.008* (0.042)	0.123* (0.051)	0.171*** (0.038)
粮食直接补贴政策	0.092 (0.065)	0.075 (0.059)	0.237*** (0.037)
常数项	-0.964 (1.251)	-2.633 (6.263)	2.348*** (0.673)
时间固定效应		控制	
个体固定效应		控制	
R^2	0.732	0.828	0.822
观测值	403	217	341

注: * $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数字为稳健标准误。

在削弱了积温对粮食安全的负向影响,在降水的影响调节方面不明显。主产区积温对粮食安全影响的主效应系数显著为负,积温与农业技术的交互项系数在5%的水平上显著为正,表明农业技术显著削弱了主产区积温对粮食安全的抑制作用。其他两大区域的调节作用并不显著。综合来看,农业技术在粮食主产区发挥的调节作用最强,粮食主产区承担着70%以上的粮食产量和80%左右的商品粮供给,粮食供给体量大,关系着全国的粮食安全。相较于其他两大区域,主产区粮食安全的战略地位决定着国家将先进的农业生产保障技术向其倾斜力度更大。此外,主产区自身粮食生产规模化能力较强,农业现代化水平较高,对农业技术的适用性和推广性相比于主销区和产销平

表8 农业技术调节效应的区域差异

变量	主产区	主销区	产销平衡区
积温	-1.343*** (0.405)	-0.399 (0.151)	-0.023 (0.768)
降水	-0.026 (0.119)	-0.134 (0.075)	-0.105 (0.065)
农业技术	0.305*** (0.065)	0.371 (0.436)	0.211 (0.316)
积温×农业技术	0.316** (0.107)	0.253 (0.353)	-0.215 (0.306)
降水×农业技术	0.004 (0.034)	0.053 (0.029)	0.033 (0.026)
第一产业劳动力	0.635 (0.498)	0.853 (1.998)	-0.493 (0.325)
第一产业增加值	0.005 (0.023)	0.023 (0.012)	0.014 (0.015)
农药	-0.004 (0.005)	0.016* (0.016)	-0.021** (0.009)
化肥	-0.015 (0.027)	-0.025 (0.046)	-0.089* (0.043)
灌溉面积	-0.018 (0.020)	-0.007 (0.040)	0.036** (0.014)
能源消耗	-0.003 (0.003)	-0.007 (0.009)	0.015* (0.007)
粮食保护价收购政策	-0.001 (0.045)	1.000* (0.067)	0.140*** (0.031)
粮食直接补贴政策	0.480*** (0.053)	-0.179 (0.096)	0.450*** (0.062)
常数项	0.635 (1.223)	-1.348 (5.343)	2.549** (0.828)
时间固定效应		控制	
个体固定效应		控制	
R^2	0.767	0.844	0.834
观测值	403	217	341

注: * $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数字为稳健标准误。



衡区更强,因此,农业技术在主产区发挥的积极影响最大。

4 结论与启示

4.1 主要结论

该研究分析了气候变化影响粮食安全的作用机制,构建了调节效应模型,分析了农业技术在气候变化对粮食安全影响过程中的调节作用,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:①气候变化的两大因子——积温和降水皆对粮食安全具有抑制作用。积温在1%的显著性水平上对粮食安全具有负向影响,降水在5%的显著性水平上负向影响了粮食安全。②农业技术在气候变化对粮食安全的抑制过程中起到了调节作用,主要削弱了积温对粮食安全的负向影响,但对降水作用粮食安全的调节效果并不明显。③分区域看,气候变化对粮食产销平衡区的负向影响最大,对粮食主产区和主销区的抑制作用不明显。农业技术在三大粮食生产功能区的调节作用依旧体现在积温影响粮食安全的过程中,在粮食主产区发挥调节作用的最强,在主销区和产销平衡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。

(1)针对气候变化两大因子对粮食安全的抑制作用,一方面,应强化应对气候变化的能力,完善自然灾害防控体系建设,提升气象灾害的预报能力;另一方面,需要完善粮食储备管理机制。国家应通过宏观调控稳定粮食生产周期的持续性,提升粮食储备管理力度,优化粮食储备结构,以期应对短期内的粮食危机。

(2)针对农业技术在气候变化作用于粮食安全过程中的调节作用,一方面,应坚决贯彻落实“藏粮于技”的战略方针,因地制宜调整粮食耕作制度和种植结构,培育优化优良作物品种,采取综合配套技术提高抵御自然灾害的能力,提升作物对环境变化的适应性;另一方面,农业技术虽然在积温影响粮食安全的过程中起到了调节作用,但对降水影响的调节作用并不明显,表明我国应对气候变化的农业技术推广机制和整体转化率还有待提高。因此,要制定气候变化科技发展中长期战略规划,优化配置科学技术研制资源,稳步推进符合我国农业发展现状的气候友好科技研发、转化、推广机制,为农业生产创造更有利的外部条件。

(3)不同粮食生产功能区应结合本区域粮食安全战略定位从不同侧重方向保障区域粮食安全。粮食主产区因技术、资源条件更具有优势,受气候冲击作用较小,其战略地位关乎国家整体粮食安全。要加强对粮食主产区

的政策倾斜和资金投入,推动主产区优化生产、经营,加快提升粮食生产综合能力,为商品粮生产提供全产业链的配套设施。粮食主销区多位于经济发达区域,城镇化水平较高,粮食种植规模较小,粮食生产所受气候变化影响的规模反应不强。粮食主销区可以充分发挥经济、科技优势,发展集约化、现代化农业以提高粮食自给率,加强在国内粮食商品产业链中的地位,在加工贸易、运输、销售等下游产业链环节上做出积极贡献。粮食产销平衡区受制于自然地理因素,受气候变化冲击较大,且受农业技术的调节作用较弱。政府应加大政策扶持力度,通过金融机构为产销平衡区的粮食种植户提供粮食生产资金保障,提高种植户抵御风险能力和粮食生产积极性,维持区域产销平衡,减轻气候灾害的影响。

4.3 局限性和研究展望

该研究引入农业技术调节变量,分析了气候变化对粮食安全的影响机制,通过实证检验得出了具有一定实践价值的研究结论,但还存在一些不足:第一,仅基于省域尺度进行分析,未来可立足于市域、县域尺度,通过不同区域、不同尺度的综合研究,深入剖析气候变化对粮食安全的影响程度。第二,仅考虑了气候变化对粮食安全的单向影响,未深入探讨粮食系统对气候变化的反作用机理和传导路径。未来研究可将粮食系统及农业体系的碳排放作为切入点,探究其对气候变化影响的贡献度。第三,该研究仅着眼于国内视角,未来应加强对国际及多区域粮食安全的战略研究,把中国粮食安全放在全球粮食安全评价体系中进行综合分析,针对不同地区、不同国家制定差异性粮食安全保障战略。

参考文献

- [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[J]. 中国农村经济,2019(9):15-29.
- [2] 叶明华,庾国柱. 要素投入、气候变化与粮食生产:基于双函数模型[J]. 农业技术经济,2015(11):4-13.
- [3] 陈睿山,郭晓娜,熊波,等. 气候变化、土地退化和粮食安全问题:关联机制与解决途径[J]. 生态学报,2021,41(7):2918-2929.
- [4] DEATON B J, DEATON B J. Food security and Canada's agricultural system challenged by COVID-19[J]. Canadian journal of agricultural economics/revue Canadienne d'agronomie, 2020, 68(2):143-149.
- [5] KOGO B K, KUMAR L, KOECH R. Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security[J]. Environment, development and sustainability, 2021, 23(1):23-43.
- [6] AINEHVAND S, RAEISSI P, RAVAGHI H, et al. Natural disasters and challenges toward achieving food security response in Iran[J]. Journal of education and health promotion, 2019, 8:51.

- [7] 任正晓. 解决好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[J]. 求是, 2015(19): 20-22.
- [8] 高延雷, 张正岩, 魏素豪, 等. 城镇化对中国粮食安全的影响: 基于省区面板数据的实证分析[J]. 资源科学, 2019, 41(8): 1462-1474.
- [9] 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[J]. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1381-1397.
- [10] HERTEL B T W, BALDOS U L C, FUGLIE K O. Trade in technology: a potential solution to the food security challenges of the 21st century[J]. *European economic review*, 2020, 127: 103479.
- [11] TAHIR I S A, MUSTAFA H M, IDRIS A A M, et al. Enhancing wheat production and food security in Sudan through scaling up improved technologies using innovation platforms[J]. *International journal of agricultural sustainability*, 2020, 18(4): 376-388.
- [12] 龚波. 中美贸易摩擦对中国粮食安全的影响[J]. 求索, 2019(4): 107-112.
- [13] CHANDRA A J, DIEHL J A. Urban agriculture, food security, and development policies in Jakarta: a case study of farming communities at Kalideres-Cengkareng district, West Jakarta[J]. *Land use policy*, 2019, 89: 104211.
- [14] BRIZMOHUN R. Impact of climate change on food security of small islands: the case of Mauritius[J]. *Natural resources forum*, 2019, 43(3): 154-163.
- [15] RUDOLF R. The impact of maize price shocks on household food security: panel evidence from Tanzania[J]. *Food policy*, 2019, 85: 40-54.
- [16] 毛学峰, 刘靖, 朱信凯. 中国粮食结构与粮食安全: 基于粮食流通贸易的视角[J]. 管理世界, 2015(3): 76-85.
- [17] 刘彩红, 王朋岭, 温婷婷, 等. 1960—2019 年黄河源区气候变化时空规律研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 293-302.
- [18] 管琪卉, 丁明军, 张华敏. 青藏地区高寒草地春季物候时空变化及其对气候变化的响应[J]. 山地学报, 2019, 37(5): 639-648.
- [19] 张音, 古丽贤·吐尔逊拜, 苏里坦, 等. 近 60a 来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 822-829.
- [20] 柏会子, 肖登攀, 刘剑锋, 等. 1965—2014 年华北地区极端气候事件与农业气象灾害时空格局研究[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(5): 99-105.
- [21] 李洋, 王玉辉, 吕晓敏, 等. 1961—2013 年东北三省极端气候事件时空格局及变化[J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2501-2513.
- [22] 靳铮, 游庆龙, 吴芳莹, 等. 青藏高原三江源地区近 60 a 气候与极端气候变化特征分析[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1042-1055.
- [23] 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[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2021, 21(4): 155-167.
- [24] GOUREVITCH J D, KOLIBA C, RIZZO D M, et al. Quantifying the social benefits and costs of reducing phosphorus pollution under climate change[J]. *Journal of environmental management*, 2021, 293: 112838.
- [25] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [26] 苏布达, 孙赫敏, 李修仓, 等. 气候变化背景下中国陆地水循环时空演变[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1096-1105.
- [27] 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.
- [28] 许吟隆, 赵运成, 翟盘茂. IPCC 特别报告 SRCCL 关于气候变化与粮食安全的新认知与启示[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 37-49.
- [29] 黄德林, 李喜明, 李新兴. 气候变化对我国粮食安全的均衡分析[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(3): 24-30.
- [30] 温静, 张超, 张丽君, 等. 气候变化下中国粮食生产时空演变及影响因素[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 652-665.
- [31] 方梓行, 何春阳, 刘志锋, 等. 中国北方农牧交错带气候变化特点及未来趋势: 基于观测和模拟资料的综合分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 358-370.
- [32] 陈帅, 徐晋涛, 张海鹏. 气候变化对中国粮食生产的影响: 基于县级面板数据的实证分析[J]. 中国农村经济, 2016(5): 2-15.
- [33] 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞, 等. 全球气候变化下的中国粮食安全问题分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(6): 927-939.
- [34] 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[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(1): 1-8.
- [35] 郑石明, 何裕捷, 邹克. 气候政策协同: 机制与效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(8): 1-12.
- [36] 吴绍洪, 赵东升. 中国气候变化影响、风险与适应研究新进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6): 1-9.
- [37] 谢琳, 胡新艳, 罗必良. 技术进步、信任格局与农业生产环节外包[J]. 农业技术经济, 2020(11): 4-16.
- [38] 欧阳竹, 邓祥征, 孙志刚, 等. 面向国民经济主战场的区域农业研究[J]. 地理学报, 2020, 75(12): 2636-2654.
- [39] KUSAINOVA A A, MEZENTSEVA O V, TUSUPBEKOV Z A. Influence of precipitation variability and temperature conditions on the yield of grain crops in northern Kazakhstan[J]. *IOP conference series: earth and environmental science*, 2020, 548(4): 042026.
- [40] WALLER D M, MEYER A G, RAFF Z, et al. Shifts in precipitation and agricultural intensity increase phosphorus concentrations and loads in an agricultural watershed[J]. *Journal of environmental management*, 2021, 284: 112019.
- [41] HOLTERMANN L. Precipitation anomalies, economic production, and the role of 'first-nature' and 'second-nature' geographies: a disaggregated analysis in high-income countries[J]. *Global environmental change*, 2020, 65: 102167.
- [42] 余福海, 韦恩斯. 后疫情时代的欧盟粮食安全战略: 改革趋向、体系架构与政策启示[J]. 世界农业, 2020(12): 30-38, 128.
- [43] 黄维, 吴炫柯, 刘永裕, 等. 气候变化对广西双季稻种植布局的影响[J]. 中国农业气象, 2020, 41(9): 539-551.
- [44] MADGETT O. Climate change: can grapegrowers become the he-



- roes of climate change? [J]. Australian and New Zealand grape-grower and winemaker, 2019(664):31-32.
- [45] MATTHEW T. Climate change challenges for Queensland's emergency management sector[J]. The Australian journal of emergency management, 2019, 34(1): 13-13.
- [46] 庞艳梅,陈超,徐富贤,等. 气候变化对四川盆地主要粮食作物生产潜力的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(11):1661-1672.
- [47] 孙巨青. 全球气候谈判及对农业的影响[J]. 世界农业,2016(5):145-148,219.
- [48] 覃志豪,唐华俊,李文娟,等. 气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J]. 中国农业资源与区划,2013,34(5):1-7.
- [49] 张洋. 关于气候变化与粮食安全生产研究:基于农业生产中性别平等的分析[J]. 生态经济,2016,32(1):144-147.
- [50] 张强,姚玉璧,王莺,等. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策[J]. 生态学报,2017,37(21):7206-7218.
- [51] HE F, THIELE B, SANTHIRARAJA-ABRESCH S, et al. Effects of root temperature on the plant growth and food quality of Chinese broccoli (brassica oleracea var. alboglabra bailey) [J]. Agronomy, 2020, 10(5):702.
- [52] 解伟,魏玮,崔琦. 气候变化对中国主要粮食作物单产影响的文献计量 Meta 分析[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(1):79-85.
- [53] 徐雨晴,於琰,周波涛,等. 气候变化背景下未来中国气候生产潜力时空动态格局[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(9):72-80.
- [54] 樊胜根,张玉梅,陈志钢. 逆全球化和全球粮食安全思考[J]. 农业经济问题,2019,40(3):4-10.
- [55] 黄萌田,周佰铨,翟盘茂. 极端天气气候事件变化对荒漠化、土地退化和粮食安全的影响[J]. 气候变化研究进展,2020,16(1):17-27.
- [56] 程琨,潘根兴. “千分之四全球土壤增碳计划”对中国的挑战与应对策略[J]. 气候变化研究进展,2016,12(5):457-464.
- [57] 彭俊杰. 气候变化对全球粮食产量的影响综述[J]. 世界农业,2017(5):19-24,64.
- [58] GENET Y, FEYSO T. Evaluation of the adoption of improved agricultural practices and factors that affect adoption of tef (*Eragrostis tef* (zucc) trotter) in Ethiopia [J]. International journal of agricultural economics, 2020, 5(6):293.
- [59] HOQUE M A A, PRADHAN B, AHMED N, et al. Agricultural drought risk assessment of northern New South Wales, Australia using geospatial techniques [J]. The science of the total environment, 2021, 756:143600.
- [60] 王丹. 气候变化对中国粮食安全的影响与对策研究[M]. 武汉:湖北人民出版社,2011.
- [61] 公茂刚,王学真. 我国粮食安全现状的多维度衡量[J]. 新疆社会科学,2017(6):29-37,179.
- [62] 李腾飞,亢霞. “十三五”时期我国粮食安全的重新审视与体系建构[J]. 农业现代化研究,2016,37(4):657-662.
- [63] 胡岳岷,刘元胜. 中国粮食安全:价值维度与战略选择[J]. 经济学家,2013(5):50-56.
- [64] 姚成胜,滕毅,黄琳. 中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析[J]. 农业工程学报,2015,31(4):1-10.
- [65] OMOLAYO Y, FEINGOLD B J, NEFF R A, et al. Life cycle assessment of food loss and waste in the food supply chain [J]. Resources, conservation and recycling, 2021, 164:105119.
- [66] O' HARA S, TOUSSAINT E C. Food access in crisis: food security and COVID-19 [J]. Ecological economics, 2021, 180:106859.
- [67] POUDEL D, GOPINATH M. Exploring the disparity in global food security indicators [J]. Global food security, 2021, 29:100549.
- [68] 马恩朴,蔡建明,林静,等. 2000—2014年全球粮食安全格局的时空演化及影响因素[J]. 地理学报,2020,75(2):332-347.
- [69] 黄大湖,丁士军. 农业技术进步、空间效应与城乡收入差距:基于省级面板数据的分析[J]. 中国农业资源与区划,2022(5):1-11.
- [70] 丰延东,余茂艳,陈劲. 基于乡村振兴背景下的我国农业专利产出、转化及作用研究[J]. 软科学,2020,34(4):1-6.
- [71] 赖晓敏,张俊飏,李兆亮,等. 地方激励政策与农业专利增长:基于技术距离矩阵的空间计量分析[J]. 地域研究与开发,2021,40(2):103-107.
- [72] SMITH G R, ARCHER R. Climate, population, security food: adapting and evolving in times of global change [J]. International journal of sustainable development & world ecology, 2020, 27(5):419-423.
- [73] 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[J]. 中国科学院院刊,2019,34(8):910-919.
- [74] PÉLABON C, HILDE C H, EINUM S, et al. On the use of the coefficient of variation to quantify and compare trait variation [J]. Evolution letters, 2020, 4(3):180-188.
- [75] 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[J]. 管理世界,2019,35(7):89-103,135.
- [76] 张宁. 气候变化或致全球粮食危机[J]. 生态经济,2021,37(8):5-8.

Impact of climate change on food security in different grain producing areas in China

SU Fang¹, LIU Yu², WANG Sangui³, SHANG Haiyang⁴

(1. School of Economics and Management, Northwest University, Xi'an Shaanxi 710127, China;

2. School of Economics and Management, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710021, China;

3. School of Agricultural Economics and Rural Development, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

4. School of Business, Northwest University of Political Science and Law, Xi'an Shaanxi 710122, China)

Abstract With the gradual intensification of global warming, the impact of climate change on food security has attracted widespread concerns. Based on the panel data of 31 provinces from 1990 to 2020, the article analyzed the development trends of climate change and food security based on the analysis of the relationship between climate change and food security. This article constructed a food security index system from four dimensions of food availability, accessibility, utilization, and stability, using methods of range standardization, weighing of variation coefficients, and the radar-area model analysis to calculate the food security index, and empirically verified the impact mechanism of climate change on food security. The study found that: ① Two major climatic factors, namely accumulated temperature and precipitation, had inhibitory effects on food security. Accumulated temperature had a negative impact on food security at the 1% significance level, and precipitation had an adverse effect on food security at the 5% significance level. ② The regulating effect of agricultural technology was mainly reflected in that it weakened the inhibitory effect of accumulated temperature on food security, but the moderating effect in the process during which precipitation affected food security was not obvious. ③ In terms of sub-regions, climate change had the greatest negative impact on food security in areas with balanced grain production and marketing, while the inhibitory effect on food security in main grain producing areas and main grain marketing areas was not obvious; agricultural technology played the strongest regulatory role in main grain producing areas, and the moderating effect in main grain marketing areas and areas with balanced grain production and marketing was not obvious. To ensure food security, it is necessary to strengthen the ability to deal with climate change, gradually improve the management mechanism of grain reserves, implement the policy of 'food crop production strategy based on technological application,' adjust the grain farming system and planting structure according to local conditions, cultivate excellent crop varieties, and promote the transformation and popularization of modern agricultural technology. In the meanwhile, different functional areas of grain production should give full play to their regional advantages: main grain producing areas should promote the optimization of grain production and operations and improve the comprehensive capacity of grain production; main grain marketing areas should give full play to their economic and technological advantages and develop intensive and modern agriculture to increase the self-sufficiency rate of grain; areas with balanced grain production and marketing need to focus on improving the farmers' ability to resist risks and motivate them to engage in grain production so as to maintain the balance between regional production and marketing.

Key words food security; climate change; agricultural technology; regional difference

(责任编辑:刘照胜)