

不同生长阶段降水对夏玉米产出的影响

陈文婷,周曙东

(南京农业大学 经济管理学院,江苏 南京 210095)

摘要: 基于1993—2020年河南夏玉米主产区的平衡面板数据,运用FGLS估计法分析气候变化背景下夏玉米不同生长阶段降水对其产出的因果估计。研究表明:以生育期整期为尺度的平均意义上的估计结果与分生长阶段的估计结果存在显著差异,降水对夏玉米单产“先增后减”的非线性关系主要体现在抽穗期,存在最优拐点;苗期、抽穗期、灌浆期干旱会显著降低夏玉米单产;灌溉缓解了降水不足与不均对夏玉米单产带来的不利影响;夏玉米抽穗期适当升温有助于单产的增加,但拔节期、抽穗期、灌浆期高温会显著降低单产。

关键词: 气候变化;降水;夏玉米;粮食生产

中图分类号: F326.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-0202(2022)04-0091-13

一、引言

保障国家粮食安全是一个永恒课题^[1],气候变化给粮食生产的可持续性带来了严峻的挑战^[2-3]。然而,全球和国家尺度上粮食作物产量对气候变化的响应仍然存在不确定性^[4]。《中国气候变化蓝皮书(2021)》指出,“中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区”,“1951—2020年,中国地表年均气温呈显著上升趋势,升温速率为0.26℃/10年”,“平均年降水量呈增加趋势,平均每10年增加5.1毫米,但降水变化区域间差异明显,其中东北南部、华北东南部、黄淮大部、西南地区东部和南部、西北地区东南部呈减少趋势”^[5]。夏玉米是中国主要的粮食作物,属于喜温且需水较多的作物,主要分布在黄淮海地区,多为旱作地区,降水是夏玉米稳产增产的主要限制因素^[6]。气候变化背景下高温、降水减少以及降水不均等现象加剧了夏玉米产出的不确定性。因此亟需厘清气候变化下降水等气候因素对夏玉米产出的影响,以期对未来采取缓解和适应气候变化的措施提供实证依据。

学者们在分析气候变化对农作物产出的影响及其作用机制方面有丰富的研究成果。当前,农作物生长模拟模型和计量经济模型是分析气候变化对农作物产出的主要研究方法。前者多被自然科学领域所采用,通过控制性生产实验,根据农作物生长要素的实验参数,探析气候因素变化对农作物产量的影响^[7]。这种方法对于模拟估计特定地理区位的农作物对气候变化的响应相较于后者更为精确,但需要大量的实验参数,模拟的估计结果易受参数设定偏差的影响,空间代表性有限^[8];后者多被社会科学尤其是经济学科所采用,克服了前者未能充分考虑现实中农户适应气候变化的社会经济因素。该方法基于历史统计数据将社会经济因素纳入到气候因素对农作物产量或利润影响的计量经济模型中,在模型设定正确的情况下具有较高的解释力和有效性^[9-10]。此

收稿日期:2022-02-17

DOI:10.7671/j.issn.1672-0202.2022.04.009

基金项目:国家社会科学基金重大项目(13&ZD160)

作者简介:陈文婷(1988—),女,河南濮阳人,南京农业大学经济管理学院博士研究生,主要研究方向为农村发展与农业经济。E-mail:janechen1226@163.com

外,单产模型相较于利润函数模型而言能较大程度的避免由价格等带来的潜在内生性问题^[11-12]。

气候变化对中国农业产出的影响在农作物种类和地区上存在巨大差异^[13],这是实证研究结果尚未达成一致的原因之一。此外,研究模型的设定、气候变量的测度等因素也会导致研究结果出现差异。就气候变化对玉米单产的影响而言,国家和省份尺度上玉米单产对气候变化下年均气温与降水的响应仍存在较大不确定性,具有代表性的文献显示:升温对玉米单产被实证存在负向影响^[14],但也有研究认为由于气候变化适应性措施的实施以及玉米喜温耐热的特性,升温对玉米单产有正向影响^[15]或影响不显著^[16];关于气候变化下的降水影响,部分研究认为降水减少对玉米单产会产生显著不利影响^[10],相反,有的研究认为由于灌溉的存在,降水对玉米单产的影响很小^[14]。造成上述研究结果的差异,除了归因于样本所处省份的差异外,省份内部的作物种类差异被忽视^[13],如山西省南部多为夏玉米,而北部多为春玉米,生育期存在差异。为此,学者们进一步收集县域面板数据,由年均气温和降水转变为作物生育期内的气温和降水均值,考察气温和降水变化对玉米单产的影响,以控制玉米不同类别造成的估计偏差。Chen等^[17]发现气温和降水对玉米单产呈倒U型的非线性效应,预计到本世纪末,升温与降水的增加将导致玉米减产。此外,部分学者注意到农作物生育期内不同时期在评估气候变化效应的异质性,他们应用省级面板数据,分析了不同季节^[18]和不同月份^[19]的气温和降水变化对农作物产出的影响,但他们的分析只反映了两者之间的线性拟合关系,且与农作物生长阶段的对应关系尚不够清晰。

现有文献已取得相当成果,这些研究为本文提供了相关的理论与实证支撑,已有借助计量经济模型评估的气候变化产出效应多为平均意义上的结果,但对于结合农作物生长习性,区分其不同生长阶段气候变化产出效应的异质性鲜有研究,仍存在进一步拓展的空间。有鉴于此,本文在前人的研究基础上,以河南夏玉米为例,结合夏玉米生长习性,基于1993—2020年河南夏玉米主产县域的平衡面板数据,采用可行广义最小二乘法(FGLS)双向固定效应模型,探索识别气候变化背景下不同生长阶段的降水等气候因素对夏玉米产出的影响。本文从农作物生长习性为切入点的研究视角可以为经济学实证分析气候变化对农作物产出的估计及其作用机制提供新的研究视角,同时,其研究结果为旱作地区政府和玉米种植户应对气候变化的策略提供了实证基础。

二、理论框架与实证模型

(一) 分析框架

经济再生产与自然再生产过程的有机交织是农业生产的最根本特征,因此,区别于其他部门生产要素的产出率基本上取决于技术及其应用,农业生产的要素产出率不仅取决于技术及其应用,还取决于气候等自然条件。由于气候的影响,农业生产在不同年度之间表现出一种不确定性。

夏玉米喜暖湿气候,是生育期需水较多的作物。对于夏玉米而言,降水不足,降水分布与夏玉米需水规律的不吻合,是制约夏玉米生产的首要自然因素,暖干的气候变化趋势会加剧这一问题^[20]。由于夏玉米不同生长阶段的生育特点,其不同生长阶段的需水规律存在阶段性差异,因此夏玉米不同生长阶段的降水变化会对其产出增长带来不确定性。

水是玉米植株进行光合作用与生化反应的介质,气候变化通过影响土壤水分和养分的变化,进而影响玉米的生态变化,最终影响其产量。参照玉米作物栽培的研究^{[21]2-6},本文将夏玉米的生育期划分为苗期(播种至拔节)、拔节期(拔节至开花)、抽穗期(抽雄穗至灌浆)、灌浆期(灌浆至成熟)四个生长阶段。根据夏玉米不同生长阶段的生长发育特点,夏玉米中期吸收水分最多,前期和后期对水分的需求量较低^[21-22]。具体来看,夏玉米苗期是以营养器官生长为主,首先要保证种子发芽出苗,土壤湿度适宜,不仅关系到湿度因子的作用,而且影响到土壤通气条件,过干或过湿均

不利于种子发芽、出苗。一般河南夏玉米在收获冬小麦后播种,耕层土壤含水率很低,若没有降水,必须灌底墒水才能确保玉米播种与出苗、壮苗。只要灌好播前水,之后可适当控水蹲苗,促进根系向纵深发展;而拔节期是夏玉米农田水利管理的关键阶段,该时期夏玉米由单纯的营养生长进入营养生长与生殖生长并行的时期,玉米生殖器官发育对水分反应比营养器官更敏感,旺盛的营养体生长需要有充足的水分供给,是夏玉米的需水敏感期。土壤水分亏损或湿度过大均会导致营养体的削弱,进而影响雌、雄穗的发育,穗抽出时间推迟等问题;之后,夏玉米开始完全的生殖生长时期,抽穗期虽然天数最短,但因该期干物质积累最快,生物产量最高,因而对水分最敏感,需水强度最高,是夏玉米需水临界期。抽穗期水分充足不仅对开花授粉有益,增多穗粒数,有益粒重的提高,而水分不足,会使抽穗开花持续时间短,影响抽雄、雌穗分化,也影响植株上部叶片的抽出与展开,对后期籽粒灌浆有严重影响;进入灌浆期以后夏玉米生长活动逐渐缓慢,对水分的需求不断减少,该时期正值雨季,一般情况下不需要灌水即可满足需水要求,但该时期缺水会造成上部的籽粒发育不良、穗粒数减少等问题。适宜的水分供给不仅有利于营养物质的运输、积累,而且有保持叶片功能期长,避免过早衰老枯黄等功效。通过基于上述夏玉米不同生长阶段的土壤水分情况对其产出影响的作用机制,本文提出一个待验证的假说:在考虑气候变化适应措施以及其他条件不变的情形下,降水对夏玉米呈现先增后降的非线性关系,且不同生长阶段降水状况对夏玉米单产的影响存在差异。

(二) 实证模型与估计方法

基于以上分析框架并借鉴吸纳相关文献的变量设定,本文在C-D生产函数中纳入气候因素,构建如下实证模型:

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 P_{it} + \beta_2 T_{it} + \beta_3 H_{it} + \beta_4 D_{it} + \beta_5 A_{it} + \beta_6 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

(1)式中,下标*i*和*t*分别表示样本地区和年; Y_{it} 向量表示夏玉米单产; P_{it} 向量表示夏玉米生育期的降水及其二次项; T_{it} 向量表示夏玉米生育期的温度及其二次项; H_{it} 向量表示夏玉米生育期内超过35℃的累计天数; D_{it} 向量表示干旱的发生情况; A_{it} 向量表示农田水利状况; X_{it} 向量表示传统的生产要素投入,包括单位面积的劳动力投入、农业机械的施用和化肥的投入,且以对数形式纳入模型;模型采用纳入地区和年份控制的双向固定效应,其中,地区固定效应 μ_i 控制了土壤、地理特征等不随时间变化的因素;时间固定效应 λ_t 控制了样本地区在*t*年的农业政策冲击以及技术进步等不随地区改变的因素; ε_{it} 是随机误差项。 β_0 为常数项, $\beta_1 \sim \beta_6$ 为变量的估计系数。

进一步地,本文通过农田水利与干旱的交互项来考察灌溉措施在应对干旱发生时的调节作用,具体表现为(2)式中的待估系数 β_7 , (2)式中变量含义与式(1)一致。

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 P_{it} + \beta_2 T_{it} + \beta_3 H_{it} + \beta_4 D_{it} + \beta_5 A_{it} + \beta_6 X_{it} + \beta_7 A_{it} D_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

考虑到样本地区夏玉米不同生长阶段对降水的敏感性差异,在上述理论分析的基础上,本文按照夏玉米四个关键生长阶段进行划分,以分析不同夏玉米生长阶段的降水以及干旱对其单产的影响程度差异。考虑不同夏玉米生长阶段的方程为:

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \sum_{r=1}^4 \beta_1^r P_{it}^r + \sum_{r=1}^4 \beta_2^r T_{it}^r + \sum_{r=1}^4 \beta_3^r H_{it}^r + \sum_{r=1}^4 \beta_4^r D_{it}^r + \beta_5 A_{it} + \beta_6 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \sum_{r=1}^4 \beta_1^r P_{it}^r + \sum_{r=1}^4 \beta_2^r T_{it}^r + \sum_{r=1}^4 \beta_3^r H_{it}^r + \sum_{r=1}^4 \beta_4^r D_{it}^r + \beta_5 A_{it} + \beta_6 X_{it} + \sum_{r=1}^4 \beta_7^r A_{it} D_{it}^r + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

(3)和(4)式中,下标*i*和*t*分别表示样本地区和年,上标*r*表示夏玉米所处的生长阶段,取值1~4分别代表夏玉米的苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期; P_{it}^r 、 T_{it}^r 、 H_{it}^r 、 D_{it}^r 分别表示*i*地区*t*年夏玉米在*r*

生长阶段的降水及其二次项、气温及其二次项、气温超过 35 ℃ 的累计天数以及干旱发生情况,其他变量含义与式(1)一致。(4)式在(3)式基础上纳入了不同生长阶段的干旱发生情况与以农田水利为代理的应对措施的交互项,待估系数为 β_7 。

考虑到上述长面板数据模型可能存在异方差的问题,需使用 Greene Wald 检验、Wooldrige Wald 检验以及 Breusch-Pagan LM 检验^[23-24]分别对组间异方差、组内自相关和组间同期相关等问题进行检验,然后采用相应的可行广义最小二乘法(FGLS)等方法进行估计。

三、数据来源与变量构建

(一)数据来源

本文的数据来源于 1993—2020 年间河南省郑州、洛阳、平顶山、安阳、新乡、许昌、南阳、商丘、周口、驻马店共 10 个夏玉米主产区的气象数据和农业生产方面的平衡面板数据。其中,气象数据来源于中国气象数据共享服务网提供的中国地面气候资料日值数据,包括日均温度、日最高温度和日最低温度,以及日降水量。农业生产方面的数据来源于 2006 年至 2021 年的《河南统计年鉴》以及 1994 年至 2005 年的《河南农村统计年鉴》。具体来看,1998 年及之前的农业从业人数来源于《河南统计年鉴》和《河南农村统计年鉴》,1998 年之后的农林牧渔从业人员、农业总产值以及农林牧渔总产值数据来源于《河南农村统计年鉴》;玉米单位面积产量、玉米播种面积以及农作物总播种面积、耕地面积以及耕地有效灌溉面积、农业机械总动力、化肥折吨施用量数据来源于《河南统计年鉴》和《河南农村统计年鉴》。

(二)变量设置及其描述性统计

1. 夏玉米的单产。本文直接使用统计年鉴中各样本地区夏玉米的单位面积产量作为因变量,单位为千克/公顷,以其对数的形式纳入实证模型。

2. 气候因素。在降水方面,本文使用夏玉米生育期内的日均降水及其二次项纳入夏玉米生育期单产模型。进一步地,为了探析不同生长阶段内的降水变化对夏玉米单产的影响,本文使用夏玉米不同生长阶段内的降水均值及其二次项纳入其单产模型。

在温度方面,本文同样地考虑了夏玉米不分生长阶段和分生长阶段两种情形,对夏玉米生育期内的温度均值以及不同生长阶段的温度均值予以控制。此外,本文还构建了高温变量以控制高温热害对夏玉米单产的影响。考虑到夏玉米属于高温耐旱作物,且其生长在高温季节,根据夏玉米的生理特性,参考董宛麟等^[25]的研究,本文把夏玉米生育期内日最高温度超过 35 ℃ 的累计天数作为高温的代理变量。

在干旱方面,本文按照中华人民共和国国家标准《气象干旱等级(GB/T 20481-2017)》,利用夏玉米生育期以及各个生长阶段的降水数据,利用降水量距平百分率年尺度划分的干旱等级来判断样本地区的干旱发生情况,具体计算方法可参见上述国家标准,表 1 给出了降水量距平百分率干旱等级。据此,本文构建样本地区夏玉米整个生育期与各个生长阶段的干旱发生虚拟变量,如果降水量距平百分率大于 -15%,则为干旱未发生,赋值为 0;否则,赋值为 1。

表 1 年尺度下降水距平百分率干旱等级划分

等级	类型	降水量距平百分率/(年尺度)
1	无旱	-15 < PA
2	轻旱	-30 < PA ≤ -15
3	中旱	-40 < PA ≤ -30
4	重旱	-45 < PA ≤ -40
5	特旱	PA ≤ -45

资料来源:中华人民共和国国家标准《气象干旱等级(GB/T 20481-2017)》,参见官网:<http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&heno=D2281945A96E-8185F67EDC9E7A698049>。

3. 农田水利。部分学者采用有效灌溉面积除以农作物的播种面积来代理基础灌溉条件,但这

样会低估实际的灌溉比例,因为按照统计年鉴中的指标解释,有效灌溉面积不是当年的实际灌溉面积,而是具备灌溉条件,能正常灌溉的耕地面积。此外,根据现有的统计年鉴数据,目前无法得到某一类作物实际的灌溉面积。因此,借鉴 Deschênes 和 Greenstone^[26] 以及陈帅等^[27] 的研究,本文利用耕地有效灌溉面积占比作为农田水利的代理变量,即历年统计年鉴中的有效灌溉面积除以耕地面积,该变量能够客观地表示样本地区水利条件的状况,一定程度上能够刻画人们应对气候条件的行为措施。

4. 要素投入。根据本文讨论的主题,本文将样本地区玉米生产过程中单位面积的劳动力投入、机械采用、化肥施用作为影响夏玉米单产的控制变量。在统计年鉴中,没有上述样本地区玉米各个要素投入的原有数据,需要根据现有的统计年鉴数据进行构建。本文参照周曙东和朱红根^[28] 的方式对上述生产要素投入进行处理,具体来看,关于劳动力投入,把样本地区玉米生产过程中的劳动力投入由当年农业从业人员数乘以玉米播种面积占农作物总播种面积比例,其中,由于1998年以前以及2017年至2020年没有农业从业人员这项统计指标,因此,对于上述年份玉米生产过程中的劳动投入设置为当年农林牧渔从业人员乘以农业总产值占农林牧渔总产值的比例和玉米播种面积占比;关于机械采用,通过农业机械化总动力乘以玉米播种面积占比来构建;关于化肥投入,则通过化肥投入总量乘以玉米播种面积占比来构建。为了得到单位面积的劳动力、农业机械和化肥三要素的投入,需分别对上述当年玉米要素总投入除以玉米播种面积。在实证分析中,这三类传统生产要素以对数的形式纳入模型。

表2给出了1993年至2020年河南夏玉米生产排名前十位的主要县市的农业生产和气候条件变量的描述性统计。一公顷单位耕地面积上,平均而言,样本地区投入1.957劳动力,5.922千瓦农业机械动力和0.408吨化肥可生产5249.613千克夏玉米。在气候条件方面,平均而言,样本地区夏玉米生育周期内的日均温度为26.12°C,日均降水量为0.429厘米,整个生育期内平均有13天暴露在日最高温超过35°C的环境下,气象干旱发生率为0.371。

表2 变量描述性统计分析

变量名称	单位/说明	均值	标准差	最小值	最大值	变量名称	单位/说明	均值	标准差	最小值	最大值
夏玉米单产	千克/公顷	5249.613	1000.600	1598.000	7206.740	拔节期日最低温	10°C	2.375	0.115	2.065	2.704
劳动力投入	人/公顷	1.957	0.672	0.304	3.887	抽穗期日最高温	10°C	3.167	0.155	2.776	3.654
农机动力	千瓦/公顷	5.922	2.285	1.015	12.389	抽穗期日最低温	10°C	2.376	0.119	2.071	2.733
化肥施用	吨/公顷	0.408	0.124	0.033	0.717	灌浆期日最高温	10°C	2.852	0.147	2.365	3.253
生育期内降水量	厘米	0.429	0.161	0.144	1.021	灌浆期日最低温	10°C	1.959	0.100	1.729	2.236
苗期降水量	厘米	0.402	0.255	0.042	1.501	生育期最高温35°C以上累计天数	天	13.000	7.083	0.000	36.000
拔节期降水量	厘米	0.557	0.428	0.003	2.227	苗期最高温35°C以上累计天数	天	6.893	4.207	0.000	22.000
抽穗期降水量	厘米	0.427	0.370	0.001	2.418	拔节期最高温35°C以上累计天数	天	3.639	3.298	0.000	16.000
灌浆期降水量	厘米	0.350	0.230	0.009	1.265	抽穗期最高温35°C以上累计天数	天	1.539	2.176	0.000	11.000
生育期内日均温度	10°C	2.612	0.079	2.397	2.873	灌浆期最高温35°C以上累计天数	天	0.929	1.787	0.000	13.000
苗期日均温度	10°C	2.662	0.089	2.444	2.897	生育期内干旱的发生	0=否;1=是	0.371	0.484	0.000	1.000
拔节期日均温度	10°C	2.743	0.128	2.362	3.070	苗期干旱	0=否;1=是	0.507	0.501	0.000	1.000
抽穗期日均温度	10°C	2.722	0.129	2.437	3.138	拔节期干旱	0=否;1=是	0.525	0.500	0.000	1.000
灌浆期日均温度	10°C	2.348	0.112	2.019	2.693	抽穗期干旱	0=否;1=是	0.550	0.498	0.000	1.000
苗期日最高温	10°C	3.205	0.113	2.910	3.513	灌浆期干旱	0=否;1=是	0.500	0.501	0.000	1.000
苗期日最低温	10°C	2.183	0.092	1.969	2.433	农田水利	耕地灌溉面积占比	0.628	0.153	0.303	0.938
拔节期日最高温	10°C	3.196	0.155	2.710	3.593						

注:夏玉米单产、劳动力、农机动力以及化肥投入均是以其对数形式纳入后续实证模型。

图1显示了在1993年至2020年期间,各个样本地区的夏玉米单产随着时间呈逐渐上升趋势,但各个地区的增长率存在差异,其中,商丘、周口、驻马店增长较快。

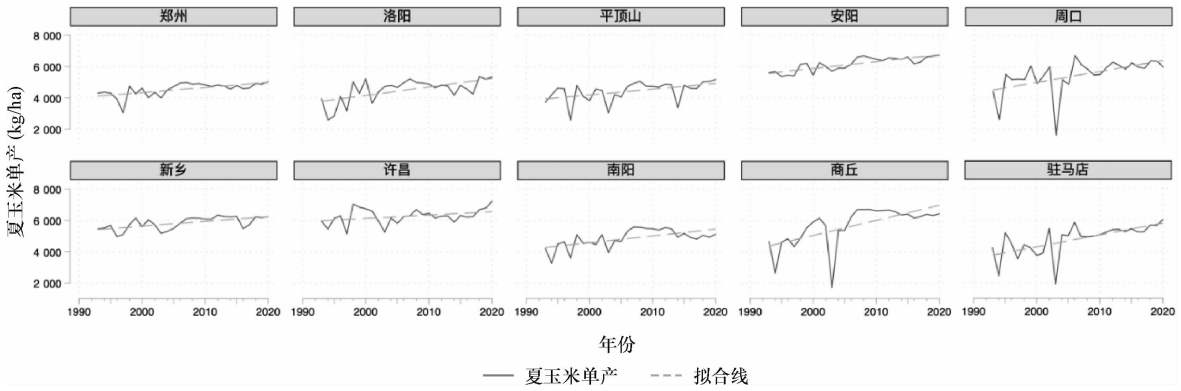


图1 样本地区夏玉米单产的变动趋势

图2展示了1993年至2020年样本地区夏玉米生育周期内温度的变动趋势,发现除了安阳、许昌、商丘、驻马店四地外,其余样本地区夏玉米生育期内温度均值均呈上升趋势,但温度上升的速率存在地区差异。

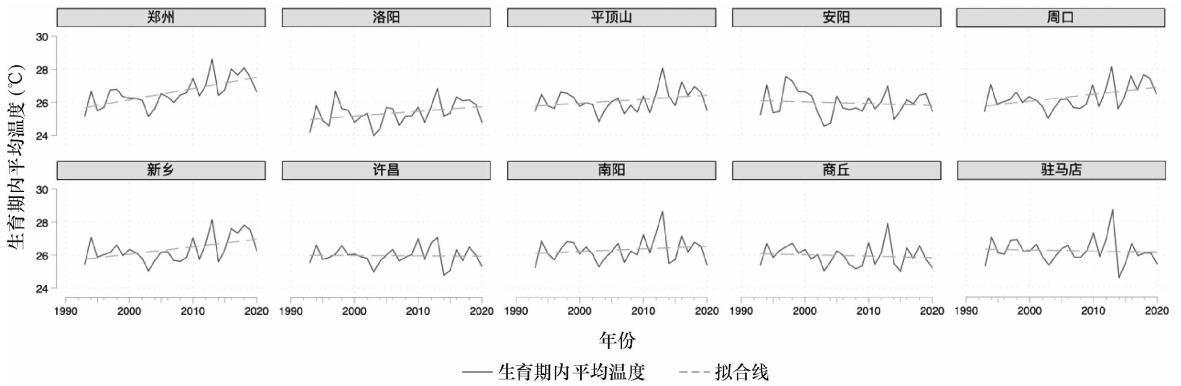


图2 样本地区夏玉米生育期内温度的变动趋势

根据图3显示,总体上除了商丘之外,各个样本地区夏玉米生育期内的降水均呈现下降趋势,但通过该图同时发现,降水在各个地区以及不同年份之间存在明显的差异,相较于样本地区夏玉米生育期内温度的波动,降水的波动幅度更大。因此,上述特征为本文研究降水变化及干旱对夏玉米产量的影响提供了较好的样本。

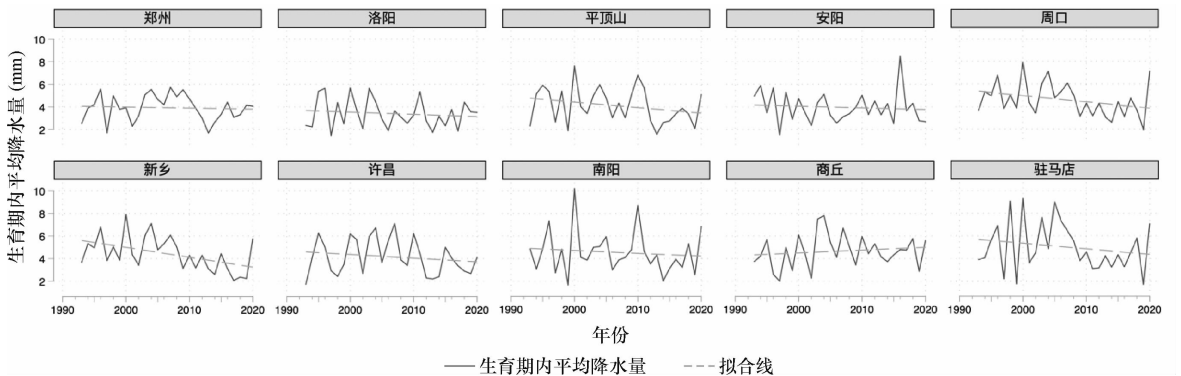


图3 样本地区夏玉米生育期内降水的变动趋势

表3给出了样本地区夏玉米生育期内不同生长阶段干旱的发生率,依据样本地区夏玉米生长阶段的干旱分布来看,抽穗期相较于其他各期气象干旱发生较频繁。样本地区夏玉米生育期内各生长阶段干旱的发生概率在10%~16%。

表3 分生长阶段河南夏玉米主产区干旱发生率

地区	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	地区	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期
郑州	0.13	0.13	0.14	0.10	许昌	0.13	0.13	0.12	0.12
洛阳	0.11	0.13	0.16	0.12	南阳	0.13	0.13	0.14	0.13
平顶山	0.10	0.14	0.15	0.13	商丘	0.13	0.14	0.13	0.13
安阳	0.14	0.13	0.11	0.14	周口	0.13	0.13	0.13	0.13
新乡	0.13	0.13	0.14	0.14	驻马店	0.14	0.12	0.15	0.12

数据来源:通过本文数据整理获得。

四、估计结果与分析

(一)降水变化及干旱对夏玉米产量的影响

1. 基准回归结果及分析

由于本文的实证分析是基于1993年至2020年的各市样本地区平衡面板数据,需要对长面板数据模型的随机扰动项可能存在的异方差问题进行检验,否则会导致参数估计不再有效。通过Greene Wald检验、Wooldrige Wald检验以及Breusch-Pagan LM检验分别对组间异方差、组内自相关、组间同期相关进行检验,表4中所有模型存在组间异方差和组间同期相关造成的异方差问题,检验结果均在1%统计水平上拒绝原假设,但无法拒绝不存在组内相关的原假设。因此,本节使用同时解决组间异方差和同期相关问题的可行广义最小二乘法(FGLS)对模型进行估计。

表4给出了降水变化及干旱对样本地区夏玉米单产影响的估计结果。表4中,模型1只包含了降水以及温度及它们的二次项,模型2进一步纳入了高温和干旱的极端气象条件,模型3是纳入了所有气候变量、要素投入以及农田水利的估计结果。结果显示,不论是否控制其他气候条件以及适应措施,降水的一次项及其二次项均在1%统计水平上显著,降水与夏玉米单产之间存在先增后减的非线性关系,呈倒U型,该结果与Chen等^[17]、何为等^[16]分别基于全国县级面板数据与省级面板数据的结果一致。

表4 降水变化及干旱对河南夏玉米产量的影响

	因变量:夏玉米单位产量的对数			
	模型1	模型2	模型3	模型4
降水均值	0.5189*** (0.0902)	0.5039*** (0.1263)	0.5131*** (0.1324)	0.4303*** (0.1355)
降水均值二次项	-0.5577*** (0.0874)	-0.5559*** (0.1102)	-0.5577*** (0.1152)	-0.4995*** (0.1167)
温度均值	-0.2039 (2.2023)	-4.0013 (2.5225)	-3.4579 (2.5085)	-2.459 (2.4798)
温度均值二次项	0.0361 (0.4173)	0.8108* (0.4794)	0.709 (0.4770)	0.5187 (0.4711)
最高温35℃以上累计天数		-0.0048*** (0.0010)	-0.0047*** (0.0010)	-0.0048*** (0.0010)
干旱		0.0031 (0.0123)	0.0045 (0.0127)	-0.1665*** (0.0408)
农田水利			0.1515 (0.1038)	0.0375 (0.1110)
农田水利 x 干旱				0.2542*** (0.0586)
劳动力投入			-0.0439* (0.0249)	-0.0295 (0.0264)
农机动力			0.0229 (0.0256)	0.0453* (0.0235)
化肥施用			-0.0052 (0.0179)	0.0055 (0.0184)
常数项	8.4021*** (2.9061)	13.1053*** (3.3207)	18.2776*** (3.3039)	11.0487*** (3.2694)
地区效应	Yes	Yes	Yes	Yes
时间效应	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	280	280	280	280

注:*表示 $P < 0.10$, **表示 $P < 0.05$, ***表示 $P < 0.01$;括号内数值为标准误。

在温度方面,模型2和模型3中的估计结果显示,日最高温度超过35℃以上的累计天数均在1%统计水平上显著,而温度二次项仅在模型2中通过了10%统计水平的检验。由表2关于样本地区夏玉米生育期内日均温度的描述性统计可知,样本地区夏玉米生育期内的日均温度在23.97℃~28.73℃,夏玉米属于喜温耐旱作物,对温度敏感度不高,适当的升温可以提高夏玉米的单产,但极端高温会对夏玉米的生产产生显著的负向影响。

对于夏玉米而言,其生育期内降水不足引起的干旱是影响夏玉米产量的重要气象因素。由模型2和模型3对干旱以及农田水利的估计结果可知,在考察降水不足引起的干旱对夏玉米实际产生的影响时,需要考虑适应性措施行为所起的调节作用。模型3中干旱与农田水利的估计系数均为正数,但没有通过统计性检验,这说明适应措施一定程度上缓解了干旱对夏玉米单产的负面影响,需要对两者进行交互以进一步考察干旱发生对夏玉米单产的实际影响。

2. 农田水利对气象干旱的作用效果

为了进一步考察农田水利的作用效果以及干旱对夏玉米实际产量造成的影响,表4中模型4的估计结果给出了农田水利在缓解干旱对产量造成的不利影响中发挥的作用。具体来看,降水、温度及高温等气象条件的估计系数与没有考虑交互情形的模型3的自变量的显著性及估计系数相近,互为稳健性检验。结合模型3的估计结果,模型4的估计结果表明,干旱对样本地区夏玉米的单产造成显著的负向影响,在1%的统计水平上显著,而农田水利作为适应降水严重不足的措施显著缓解了降水不足及干旱对夏玉米单产的负面影响,且在1%的统计水平上显著。具体来说,干旱发生时,耕地有效灌溉比例增加一单位,将使得夏玉米单产增加3.4%。相较于未发生干旱情形,随着灌溉比例的增加,干旱对单产的边际效应逐渐增大;当耕地有效灌溉比例大于等于0.662时,干旱情形下的夏玉米单产预测边际值比非干旱情形下的高。图4显示了不同耕地有效灌溉比例下干旱发生对样本地区夏玉米单产的边际效应。

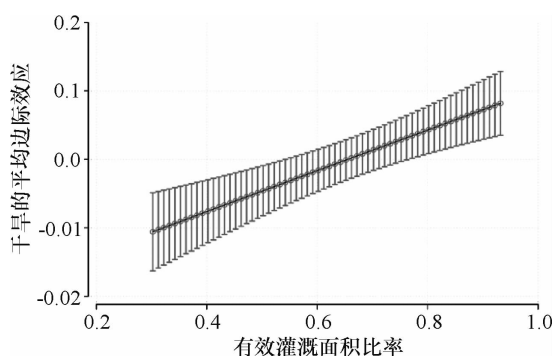


图4 样本地区气象干旱对夏玉米单产的边际效应

注:图中的圆点为气象干旱的平均边际效应,竖线为其95%的置信区间。

(二) 不同生长阶段降水变化及干旱对夏玉米产量的影响差异性

上述估计结果是夏玉米整个生育期内的气象条件及其适应行为对其单产影响的平均意义上的结果。进一步地,本节基于生命周期视角,区分夏玉米生长中的关键生长阶段,分析不同生长阶段内的降水变化及干旱情况对夏玉米单产的异质性效应,并探究农田水利设施在各个时期对于降水不足造成的干旱的减灾作用。

表5中,模型5和模型6的区别在于后者考虑了农田水利为代理的适应性行为对各个生长阶段干旱发生的调节作用。经过组间异方差、组内自相关、组间同期相关的检验,发现模型5和模型6仅存在组间异方差和组间同期相关引起的异方差问题,且检验结果均在1%统计水平上拒绝原假设。因此,模型5和模型6均使用同时解决组间异方差和同期相关问题的FGLS估计法对模型进行估计。模型5和模型6中,降水、温度以及高温的显著性及估计系数相近,互为稳健性检验。结合表4的估计结果,表5揭示了如下关键结果:

表5 不同生长阶段的降水变化及干旱对河南夏玉米主产区产量的影响

	因变量:夏玉米单位产量的对数(FGLS估计法)	
	模型5	模型6
苗期降水	0.1088(0.0932)	0.0512(0.0900)
苗期降水二次方	-0.1106*(0.0635)	-0.0831(0.0597)
拔节期降水	0.0877(0.0544)	0.0563(0.0540)
拔节期降水二次方	-0.0531**(0.0242)	-0.0374(0.0240)
抽穗期降水	0.1080**(0.0496)	0.1140**(0.0500)
抽穗期降水二次方	-0.0572**(0.0226)	-0.0585**(0.0232)
灌浆期降水	-0.0225(0.1122)	-0.0501(0.1117)
灌浆期降水二次方	-0.0617(0.0890)	-0.0470(0.0883)
苗期温度	-1.5728(2.8575)	-0.7064(2.8684)
苗期温度二次方	0.3523(0.5345)	0.1714(0.5378)
拔节期温度	-1.6541(1.8089)	-1.6751(1.7757)
拔节期温度二次方	0.3202(0.3341)	0.3288(0.3288)
抽穗期温度	-4.8579*** (1.7205)	-4.1377** (1.7186)
抽穗期温度二次方	0.8418*** (0.3150)	0.7157** (0.3148)
灌浆期温度	3.2413* (1.8129)	2.8738(1.7973)
灌浆期温度二次方	-0.6025(0.3838)	-0.5263(0.3812)
苗期最高温 35℃以上累计天数	-0.0023(0.0022)	-0.0005(0.0022)
拔节期最高温 35℃以上累计天数	-0.0143*** (0.0031)	-0.0147*** (0.0032)
抽穗期最高温 35℃以上累计天数	-0.0062(0.0052)	-0.0066(0.0051)
灌浆期最高温 35℃以上累计天数	-0.0136*** (0.0045)	-0.0117*** (0.0045)
苗期干旱	-0.0020(0.0165)	-0.1445*** (0.0483)
拔节期干旱	0.0250(0.0167)	-0.0351(0.0477)
抽穗期干旱	0.0069(0.0167)	-0.0923** (0.0445)
灌浆期干旱	-0.0127(0.0170)	-0.0871** (0.0442)
农田水利	0.1216(0.1254)	-0.2021(0.1489)
农田水利 x 苗期干旱		0.2108*** (0.0693)
农田水利 x 拔节期干旱		0.0867(0.0696)
农田水利 x 抽穗期干旱		0.1566** (0.0616)
农田水利 x 灌浆期干旱		0.1153* (0.0645)
劳动力投入	-0.0301(0.0381)	-0.0356(0.0387)
农机动力	0.0900*** (0.0317)	0.0932*** (0.0284)
化肥施用	0.0178(0.0209)	0.0107(0.0206)
常数项	14.5723*** (4.2776)	13.1649*** (4.2982)
地区效应	Yes	Yes
时间效应	Yes	Yes
样本量	280	280

注: *表示 $P < 0.10$, **表示 $P < 0.05$, ***表示 $P < 0.01$; 括号内数值为标准误。

首先,降水对夏玉米单产存在先增后减的非线性关系,但各个生长阶段的效应存在差异。模型5和模型6的估计结果均显示,夏玉米在抽穗期的降水与其单产存在“倒U型”非线性关系,且在5%统计水平上显著;而苗期、拔节期降水增加有利于夏玉米单产,灌浆期降水增加则对夏玉米的单产有负向影响,但没有通过统计性检验。其中,样本地区夏玉米抽穗期生长所需的最优日均降水量为0.94 cm~0.97 cm,超过该范围的降水则会对夏玉米的生产产生不利影响。因为夏玉米是生育期内需水较多但又忌水过多的旱作作物,在夏玉米的整个生长期中,中期抽穗期吸收水分最多,前期播种至出苗阶段以及后期灌浆至成熟收获阶段对水分的需求量较低,进入灌浆期以后玉米生长活动变弱,对水分的需求也不断减少,由于灌浆期正值雨季,一般情况下,不需要灌水就可以满足土壤水分要求。

其次,极端高温会显著地导致夏玉米减产。模型5和模型6的估计结果均显示高温会对夏玉

米的单产产生负面影响,其中,拔节期和灌浆期日最高温度超过 35℃ 累计天数越久,对夏玉米单产的减产效应就越大,均在 1% 统计水平上显著。此外,除了抽穗期,其它生长阶段的日均温度及其二次项对夏玉米单产的影响并不显著,结果显示当降水与灌溉条件能与之匹配的情况下,抽穗期适当的温度升高有助于夏玉米单产的增加。

最后,应对降水变化的适应性措施减缓了干旱对夏玉米单产的影响。通过对比模型 5 和模型 6 中各个生长阶段干旱与农田水利及其交互项的估计结果可知,农田水利设施缓解了干旱发生时对夏玉米单产的不利影响,其中,苗期、抽穗期、灌浆期发生干旱时,农田水利起到了显著的缓解作用,且分别在 1%、5% 与 10% 统计水平上显著。在采取应对降水不足的措施下,苗期、拔节期和灌浆期干旱的发生对夏玉米单产造成了显著的负向影响。具体来看,由于河南夏玉米是在收获冬小麦后播种的,农田土壤水分经过一个麦季已消耗殆尽,苗期干旱的发生会影响夏玉米的出苗、壮苗,进而影响其产出,而在无降水的情况下及时灌溉可以保证土壤有较好的底墒,有利于苗全、苗壮;抽穗期则是夏玉米需水最敏感的时期,该期干旱会影响抽雄、雌穗分化等进程,造成后期籽粒灌浆受到严重影响,模型的结果也印证了农谚“春旱不算旱,秋旱减一半”的说法;灌浆期伏旱发生会导致籽粒发育不良、穗粒数减少等问题,进而影响夏玉米的产出。

此外,根据表 4 和 5 中各模型所控制的传统生产要素的结果发现,农业机械对于夏玉米单产的提升具有显著的正向作用,且估计结果十分稳健。

(三) 内生性讨论与稳健性检验

1. 内生性的讨论

现有关于气候变化以及极端气象情形对农业生产影响的经济学研究中,学术界对于农作物单产决定模型中是否应该包含经济信号和气候适应性行为变量仍存在争议^[27]。部分学者认为,适应性行为及经济信号反映了农户对农业生产未来收益的预期,并且与气候要素高度相关,符合遗漏变量定义^[17,29],但持相反意见的学者认为,适应性行为以及经济信号本身都是经济主体对气候要素的反应,它们本身也源于气候变量的影响,额外控制它们只是分走了气候变量的部分影响^[30]。此外,考虑到应对降水不足的措施可能与夏玉米单产之间存在双向因果关系,即农田水利的施用能够促进夏玉米单产的提升,而夏玉米单产的提升会促使所在地区加强农田水利的建设。为此,本文参照 Chen 等^[17]、Roberts 和 Schlenker^[31] 以及陈宏伟和穆月英^[32] 关于经济因素以及灌溉的工具变量设置,采用滞后一期的降水、温度以及灌溉作为适应性措施的工具变量,认为过去的气候因素以及适应性措施与当期的适应性措施相关,但不直接影响当期的夏玉米单产。

通过对工具变量有效性的检验,本文发现,无论考虑农田水利与干旱交互与否,滞后一期的降水、温度以及耕地有效灌溉面积占比作为当期适应性措施的工具变量均是有效的。具体来看,不可识别检验的原假设以及弱工具变量的原假设均在 1% 统计水平上显著拒绝原假设,表明工具变量与内生变量相关;而无法拒绝过度识别检验的原假设“所有工具变量都是外生的”,证实了本文所采用工具变量的合理性。使用面板工具变量法的前提是存在内生解释变量,在工具变量为有效的情况下,考虑随机扰动项异方差的情形,采用自助法修正的豪斯曼检验分别对表 4 中的模型 3 和模型 4 以及表 5 中的模型 5 和模型 6 进行内生性检验,均发现无法拒绝“所有解释变量均为外生变量”的原假设,因此,本文上述模型的估计结果是一致的。

2. 稳健性检验

为了检验上述估计结果的稳健性,下面主要从核心自变量的替换以及更换估计方法两方面进行检验。

(1) 稳健性检验一:替换关键解释变量。考虑到夏玉米实际蒸发蒸腾需要的降水情况,本文借鉴农业学者的研究,使用有效降水来替代上述模型的降水变量,相应地,构建农业干旱虚拟变量替代上述模型中的气象干旱。这里,判断是否发生干旱的依据是由夏玉米生育期以及各个生长阶段

实际的有效降水累计量与其所处的对应时期作物需水量之间差决定,如果所处生育期的实际降水量大于夏玉米所处生育期内的最低作物需水量,则认为没有干旱发生,赋值为0,否则认为干旱发生,赋值为1。参见刘战东等^[33]、王春堂^[34]⁶²以及杨森等^[35]的研究,本文使用有效利用系数法计算夏玉米生育期有效降水量,具体公式如下:

$$P_e = a \times P \quad (5)$$

(5)式中, P_e 为有效降水(cm); P 为降水量,也称次降水量(cm), a 是降水有效利用系数(采用经验系数的取值范围如下:若 $P < 0.5$ cm,则 $a = 1$;若 $0.5 \text{ cm} \leq P < 5$ cm,则 $a = 0.8$;若 $5 \text{ cm} \leq P < 15$ cm,则 $a = 0.75$;若 $15 \text{ cm} \leq P$,则 $a = 0.7$)。

本文使用的样本地区夏玉米生育期及其各个阶段的需水量数据来源于肖俊夫等^[21]从河南各县市灌溉所以及河南省水利科学研究院收集的夏玉米需水量。自然科学领域的研究表明,夏玉米的需水量品种之间差异不大,主要是与栽培方法和管理方式有关。通过与表5中自变量的显著性与估计系数对比发现,关于降水等方面的估计结果是稳健的,具体来看,在降水方面,研究证实了抽穗期的降水情况与夏玉米单产之间呈现“倒U型”的非线性关系,进一步验证了抽穗期的降水状况对夏玉米单产至关重要,表明基准回归的估计结果是稳健的。在温度方面,与基准回归的估计结果一样,极端高温,尤其在拔节期与灌浆期的高温会导致夏玉米单产的显著减少,但抽穗期内适当的温度提升有助于夏玉米单产的增加。此外,在控制了适应性措施的基础上,苗期和抽穗期内降水不足导致的干旱对夏玉米单产造成了显著的负面影响,而灌溉等农田水利设施则显著地缓解了苗期、抽穗期和灌浆期干旱发生造成的不利影响,这与从省级层面以及国家层面观察到的统计结果一致,受灾虽然在上升,但成灾率在下降。

(2)稳健性检验二:更换估计方法。由于表5中模型5和模型6仅存在组间异方差和组间同期相关引起的异方差问题,相较于采用FGLS估计法,面板校正标准误差(PCSE)估计法更为稳健,而FGLS估计法比PCSE估计法更为有效。采用PCSE估计法作为上述估计结果稳健性的检验,估计结果表明,各个生长阶段的降水对夏玉米单产的影响与基准回归一致,表明抽穗期降水与夏玉米单产“倒U型”的非线性估计结果是稳健。夏玉米喜温耐旱,对温度敏感度不高,抽穗期温度的适当升高有助于夏玉米单产的增加,但极端高温,尤其是发生在拔节期和抽穗期的高温情况会显著地减少夏玉米单产,这与基准回归估计的结论也是一致的。现有农田水利状况显著地缓解了干旱对夏玉米不利的影 响,尤其是在夏玉米容易发生“卡脖旱”的生长阶段,缓解了干旱对夏玉米单产的负向影响。

五、研究结论与启示

本文结合夏玉米生长习性分析了气候变化下降水对其产量的影响,以夏玉米主产省河南的10个主产区为样本,通过细分夏玉米生长阶段,建立起不同生长阶段的降水等气候因素与夏玉米单产之间的关系。得出结论如下:

第一,降水与夏玉米单产之间呈现先增后减的“倒U型”非线性关系,这种非线性关系主要体现在夏玉米抽穗期这一夏玉米产量形成的关键时期。第二,由于降水不足造成的干旱会对夏玉米单产造成不利影响,但由于农田水利的实施,干旱对夏玉米单产实际造成的成灾概率较小,农田水利设施水平的提升显著地缓解了夏玉米苗期、抽穗期和灌浆期干旱灾害造成的不利影响。第三,夏玉米对近年来温度的升高并不敏感,在降水及灌溉保证的情况下,适当的温度提升有助于夏玉米单产,但极端高温会造成夏玉米单产显著地减少。此外,在传统要素的投入方面,农业机械化的投入显著地提升了夏玉米单产,这一结果在各个模型的估计中是一致并稳健的。

根据上述结论,可以得到两点启示:一是研究视角层面,未来运用计量经济模型分析和评估气候变化对农作物生产的影响时,应该结合农作物生长习性,细分到农作物不同生长阶段的气候影

响,以此更准确地反映气候变化下不同气候应对模式对农作物的影响。该研究视角还可应用于其他农作物,从而提升对种植业气候变化影响的认识。二是政策制定层面,要结合农作物生长规律,因地制宜制定气候变化响应战略。以夏玉米为例,华北平原玉米产地多为旱作地区,是中国玉米三大产区之一,在未来升温 and 降水减少的趋势下,应考虑地区禀赋条件和作物品种与种植特性,注重农田水利的建设,以及高温、极端干旱等情形的预警机制建设,以此保证生产决策的支撑体系足够完善,保障国家的粮食安全。

参考文献:

- [1]冯维江. 保障国家粮食安全是一个永恒课题[J]. 人民论坛,2019(32):20-21.
- [2]IPCC. Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability[R]. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2022.
- [3]周广胜,何奇瑾,周梦子. 中国农业生产气候危险性评估报告[M]. 北京:社会科学文献出版社,2021.
- [4]WANG X, ZHAO C, MÜLLER C, et al. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments[J]. Nature Sustainability, 2020(11):908-916.
- [5]中国气象局气候变化中心,中国气候变化蓝皮书(2021)[M]. 北京:科学出版社,2021.
- [6]CAO X, SHU R, CHEN D, et al. Temporal-spatial distributions of water use and productivity of maize in China[J]. The Journal of Agricultural Science, 2018(4):528-536.
- [7]MÜLLER C, ELLIOTT J, CHRYSANTHACOPOULOS J, et al. Global gridded crop model evaluation: Benchmarking, skills, deficiencies and implications[J]. Geoscientific Model Development, 2017(4):1403-1422.
- [8]LOBELL D B, BURKE M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010(11):1443-1452.
- [9]CHEN S, GONG B. Response and adaptation of agriculture to climate change: Evidence from China[J]. Journal of Development Economics. 2021(148):102557.
- [10]WU J, ZHANG J, ZHANG G, et al. Impact of climate change on maize yield in China from 1979 to 2016[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021(1):289-299.
- [11]SCHLENKER W, LOBELL D B. Robust negative impacts of climate change on African agriculture[J]. Environmental Research Letters, 2010(1):014010.
- [12]汪阳洁,仇焕广,陈晓红. 气候变化对农业影响的经济学方法研究进展[J]. 中国农村经济,2015(9):4-16.
- [13]WANG J, HUANG J, YANG J. Overview of impacts of climate change and adaptation in China's agriculture[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014(1):1-17.
- [14]WEI T, CHERRY T L, GLOMROD S, et al. Climate change impacts on crop yield: Evidence from China[J]. Science of the Total Environment, 2014(9):133-140.
- [15]ZHOU L, TURVEY C G. Climate change, adaptation and China's grain production[J]. China Economic Review, 2014(28):72-89.
- [16]何为,刘昌义,刘杰,陈梦玫. 气候变化和适应对中国粮食产量的影响——基于省级面板模型的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境,2015(S2):248-253.
- [17]CHEN S, CHEN X, XU J. Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China[J]. Journal of Environmental Economics and Management. 2016(3):105-124.
- [18]WANG J, MENDELSON R, DINR A, et al. The impact of climate change on China's agriculture[J]. Agricultural Economics, 2009(3):323-337.
- [19]朱永彬,白冰,刘昌新,等. 气候变化对我国农作物产量影响及气候损失估算[J]. 统计与决策,2019(24):85-89.
- [20]PENG H A, YL B, WLA C, et al. Quantifying maize grain yield losses caused by climate change based on extensive field data across China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021(5):105811.
- [21]肖俊夫,宋毅夫,刘祖贵,等. 玉米节水灌溉技术[M]. 郑州:中原农民出版社,2015:2-6.

- [22]高超,李学文,孙艳伟,等. 淮河流域夏玉米生育阶段需水量及农业干旱时空特征[J]. 作物学报,2019(2): 297-309.
- [23]WOOLDRIDGE J M. Econometric analysis of cross section and panel data, 2nd ed[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2010.
- [24]GREENE W H. Econometric analysis, 7th ed[M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2017.
- [25]董宛麟,程路,孙志刚,等. 夏玉米产量时空变化及气候年型分析[J]. 玉米科学,2020(5):110-118.
- [26]DESCHÊNES O, GREENSTONE M. The economic impacts of climate change: Evidence from agricultural output and random fluctuations in weather[J]. American Economic Review, 2007(1):354-385.
- [27]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.
- [28]周曙东,朱红根. 气候变化对中国南方水稻产量的经济影响及其适应策略[J]. 中国人口·资源与环境,2010(10):152-157.
- [29]WELCH J, VINCENT J, AUFFHAMMER M, et al. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures, Proceedings of the National Academy of Sciences[J]. 2010(33):14562-14567.
- [30]SCHLENKER W, ROBERTS M. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under Climate Change, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009(37):15594-15598.
- [31]ROBERTS M, SCHLENKER W. Identifying supply and demand elasticities of agricultural commodities: Implications for the US ethanol mandate[J]. The American Economic Review, 2013(6):2265-2295.
- [32]陈宏伟,穆月英. 节水灌溉设施的粮食生产增效机制[J]. 华南农业大学学报(社会科学版),2021(4):76-89.
- [33]刘战东,段爱旺,肖俊夫,等. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报,2007(3):27-30+34.
- [34]王春堂. 农田水利学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014:62.
- [35]杨森,李会云,寇艳玲,等. 1982—2012年河南省夏玉米生育期降水量时空变化格局分析[J]. 河南农业大学学报,2019(1):28-33.

Impact of Precipitation at Different Growth Stages on Summer Maize Yield

CHEN Wen-ting, ZHOU Shu-dong

(College of Economics and Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Based on the balanced panel data of main summer maize producing areas in Henan province from 1993 to 2020, this study uses FGLS model to analyze the impact of precipitation at different growth stages on summer maize yield under climate change. The results show that the estimations measured by the whole summer maize's growth period are significantly different from those measured by different growth stages. There are significant nonlinear and inverted U-shaped relationships between summer maize yield and precipitation at heading stage with optimal points. Drought reduces the summer maize yield at seeding, heading, and filling stage, but irrigation alleviates the adverse effects of insufficient and uneven precipitation on the summer maize yield. Besides, proper increase in temperature at heading stage benefits the increase of summer maize yield, but high temperature significantly reduces the summer maize yield at elongation, heading and filling stages.

Key Words: climate change; precipitation; summer maize; grain production